高 等 学 校 教 材

环境经济学与循环经济

曹瑞钰 编

化学工业出版社
教 材 出 版 中 心
·北 京·

图书在版编目（CIP）数据

环境经济学与循环经济/曹瑞钰编. —北京：化学工业出版社，2006.4
高等学校教材
ISBN 7-5025-8027-1

Ⅰ.环… Ⅱ.曹… Ⅲ.①环境经济学-高等学校-教材②自然资源-资源经济学-高等学校-教材
Ⅳ.①X196②F062.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）**第** 032419 **号**

高等学校教材
环境经济学与循环经济
曹瑞钰 编
责任编辑：满悦芝
文字编辑：刘莉珺
责任校对：顾淑云 徐贞珍
封面设计：胡艳玮
*
化学工业出版社
教材出版中心 出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印装
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12½ 字数 301 千字
2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-8027-1
定 价：24.00 元

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

前　言

人类只有一个地球。

众所周知，西方发达国家在经济发展道路上经历了痛苦曲折的历程，形成了多种不可持续的生产方式和经营活动。欧洲和美洲在历史上曾经拥有的许多绚丽多彩的自然风光、宜人的环境，大部分已经消失。经济发展和环境问题这对“双胞胎”伴随着中国工业化和城市化的快速推进，也已经在我国诞生了。环境问题已经唤醒人类对生存的危机感，同时也唤醒人类行动起来以保护环境、保护地球、保护自己的家园！

20 世纪 80 年代，“环境经济学”正是在这种历史背景下产生的，它是环境科学、环境工程学与经济科学相互结合、相互渗透的结晶，是多学科相互交叉的边缘学科。

“环境经济学”主要是研究“污染物污染环境之后对人类、对社会所造成的经济损失、治理这些污染所花费的经济成本及所产生的环境、经济和社会效益，以及治理环境相关的经济理论和经济的计算方法”。

循环经济学讲述循环经济学的产生理论和意义；讲述“3R”原则及循环经济与科学发展观及绿色 GDP 的辩证关系和意义。

本书可以作为高等院校环境工程、环境科学专业本科生和研究生教材，也可作为环保行业管理人员和专业技术人员的阅读和培训教材。

本书在编写过程中得到同济大学原常务副校长顾国维教授，同济大学经济管理学院系主任黄渝祥教授、邢爱芳教授，复旦大学经济管理学院司春林教授等的指导和帮助；并得到邹琍、刘涛、黄玉兰、赵旭、王茹静等的支持和帮助，在此表示衷心感谢！

本书由邹琍打字、刘涛绘图。

本书编写过程中，因时间仓促，疏漏在所难免，恳请广大读者指正。

曹瑞钰

2006 年 5 月于同济

目　　录

第一篇　环境经济学

第一章　环境经济学概论 …… 1
第一节　环境经济学的产生 …… 1
一、环境问题的产生 …… 1
二、环境问题的发展和研究 …… 2
三、环境问题的特点 …… 3
第二节　环境经济学的发展 …… 4
第三节　环境经济学的研究对象和性质 …… 6
一、环境经济学的研究对象 …… 6
二、环境经济学的性质 …… 6
第四节　环境经济学的研究任务和内容 …… 7
一、环境经济学的研究任务 …… 7
二、环境经济学的研究内容和方法 …… 7
第二章　环境经济学基本原理 …… 9
第一节　环境经济学的理论基础 …… 9
一、环境经济学的发展基础 …… 9
二、环境是资源 …… 9
三、环境资源的特征 …… 10
第二节　环境资源的价值和商品性 …… 11
一、环境资源的价值 …… 11
二、环境资源的商品性 …… 11
三、经济效益、环境效益和社会效益 …… 12
第三节　环境发展与环境保护 …… 14
一、经济与环境的辩证关系 …… 14
二、国际各环境学派及其主要观点 …… 15
三、经济发展和环境保护协调 …… 16
第三章　环境经济学基础 …… 18
第一节　货币的时间价值和等值计算 …… 18
一、货币时间价值概述 …… 18
二、现金流量的基本要素 …… 19
三、利息种类及其计算 …… 23
第二节　环保项目的经济效果评价 …… 30
一、现值法评价环保项目 …… 30

二、年值法评价环保项目 …… 32
三、投资收益率法评价环保项目 …… 33
四、投资回收期法评价环保项目 …… 38
五、差额分析法评价环保项目 …… 39
第四章　环保项目投资方案的不确定性分析 …… 42
第一节　环保项目的盈亏平衡分析 …… 42
一、销售收入、生产成本与产量的关系 …… 42
二、盈亏平衡分析 …… 43
三、成本结构对企业业务风险的影响 …… 45
第二节　环保项目的敏感性分析 …… 45
一、敏感性分析的步骤与内容 …… 45
二、单因素敏感性分析举例 …… 46
三、多因素敏感性分析 …… 48
第三节　环保项目的概率分析 …… 49
一、净现金流量的期望值及其方差 …… 49
二、方案净现值的期望值及其方差 …… 50
三、概率分析举例 …… 52
第四节　环保项目评选中期望值与方差的权衡 …… 53
第五章　环保设备更新的经济分析 …… 57
第一节　环保设备的磨损与补偿 …… 57
一、环保设备磨损的形式 …… 57
二、环保设备的劣化过程 …… 58
三、环保设备磨损的补偿方式 …… 59
第二节　环保设备的经济寿命 …… 59
一、环保设备经济寿命的概念 …… 59
二、新环保设备经济寿命的计算 …… 60
第三节　环保设备更新的决策方法 …… 62
一、年费用比较法 …… 63
二、总费用比较法 …… 65
三、环保设备更新收益率法 …… 69
第六章　环境经济“费用-效益”分析 …… 75
第一节　环境经济“费用-效益”分析理论基础 …… 75
一、“费用-效益”分析方法的发展 …… 75
二、“帕累托（Pareto）”准则和“卡尔多-西科斯（Kaldor-Hicks）”检验 …… 75
三、在完成竞争市场均衡条件下，费用-效益度量 …… 76
四、支付者意愿和消费者剩余 …… 77
五、社会福利函数与社会效益的叠加 …… 79
六、生产者剩余、外部效果和公用物品 …… 80
七、社会效益的时间价值——社会折现率 …… 83

第二节　影子价格 …… 85
一、完全竞争状态下的市场价格 …… 85
二、价格失真——边际效益、边际成本 …… 86
三、市场价格修正 …… 86
四、影子工资率和影子利率 …… 87
第三节　“费用-效益”分析方法应用 …… 90
一、由“费用-效益”分析方法确定污染物的最优去除水平 …… 90
二、环境经济“费用-效益”分析实例 …… 90
第七章　环境经济费用模型优化 …… 98
第一节　环境经济费用模型的特点和要求 …… 98
第二节　环境经济费用模型建立的步骤和方法 …… 98
第三节　环境经济费用模型 …… 99
一、给水工程的费用函数模型 …… 99
二、排水工程的费用函数模型 …… 103
三、地下水资源开采的最大效益函数模型 …… 107
第四节　环境经济费用模型的应用 …… 108
一、应用“拉格朗日乘子法则”进行环境经济费用优化 …… 108
二、污水系统最优化均匀处理费用函数模型 …… 113
第八章　环境经济“投入-产出”分析 …… 120
第一节　静态物品投入-产出模型 …… 120
一、实物型投入-产出模型 …… 120
二、价值型投入-产出模型 …… 123
第二节　部门、企业和地区间的投入-产出模型 …… 126
一、部门投入-产出模型 …… 126
二、企业投入-产出模型 …… 128
三、地区间投入-产出模型 …… 129
第三节　环境经济投入-产出模型 …… 133
一、环境经济投入-产出模型［一］ …… 133
二、环境经济投入-产出模型［二］ …… 140
三、环境水资源投入-产出模型 …… 142

第二篇　循环经济

第九章　循环经济的产生及其发展 …… 155
第一节　循环经济的产生 …… 155
第二节　循环经济的发展 …… 157
第三节　循环经济的内涵及意义 …… 159
第十章　循环经济的发展基础 …… 163
第一节　循环经济的发展观 …… 163
第二节　循环经济发展的价值观 …… 164

第三节　循环经济发展的道德、文明观 …… 165
第十一章　循环经济的发展理论 …… 167
第一节　循环经济发展的指导原则 …… 167
第二节　循环经济发展的物质循环理论 …… 168
一、循环经济发展的目的 …… 168
二、循环经济中的物质循环 …… 168
第三节　循环经济中的生态学理论 …… 171
第四节　循环经济发展的实践 …… 174
一、循环经济发展的实践 …… 174
二、循环经济的技术支撑 …… 175
第十二章　循环经济与“绿色国民经济核算体系——绿色 GDP” …… 177
第一节　经济总量指标 …… 177
一、国内生产总值 …… 177
二、国民生产总值与国民总收入 …… 178
三、国民经济总量统计的其他指标 …… 179
第二节　绿色 GDP——绿色国内生产总值 …… 179
一、国内生产总值的局限性 …… 179
二、绿色 GDP 的提出 …… 180
第三节　绿色国民经济核算体系 …… 183
一、国民经济核算体系（SNA） …… 183
二、中国国民经济核算体系的发展概况 …… 184
三、国内大核算体系的构建设想 …… 185

参考文献 …… 187

第一篇　环境经济学

第一章　环境经济学概论

第一节　环境经济学的产生

一、环境问题的产生

环境问题是关系到人类前途与命运的大事，说到底环境问题是一个经济问题。正如恩格斯曾指出，科学的产生和发展一开始就是由生产决定的。随着环境问题研究的深入，经济学、生态学和环境学相互渗透、相互结合而形成了“环境经济学”这一学科。

环境问题不是一个新问题，而是自古即有。公元前23世纪的尧舜时期，中国即有了有关环境问题法制的记载，至今已有4000多年的历史。中国是自然环境保护法制起源最早的国家之一。《尚书·尧典》记载：“汤汤洪水方割，荡荡怀山襄陵，浩浩滔天，下民其咨……会白于鲧哉……帝日往，九载绩用弗成。”《史记·五帝记·夏本纪》记载：“舜命禹，女平水土，维是勉之。”“禹柳洪水十三年，过家不入门……九川即疏，九泽即漉，诸夏艾安，功绝于三代。”《逸周书·大聚》记载：“春三月，山林不登斧，以成草木之长，夏三月，川泽不入网罟，以成鱼鳖之长”。公元前3世纪，荀子在《王制》中说：“草木荣华滋硕之时，则斧斤不入山林，不夭其生，不绝其长也。鼋、鼍、鱼、鳖、鳅、孕之时，罔罟毒药不入泽，不夭其生，不绝其长也。”还指出：“夫不足，非天下之公患也，……天下之公患，乱伤之也。”宋朝，宋律里明确规定：“诸穿垣出秽污者，杖六十，主司不禁与罪同”。

随着社会生产力的发展，人类生活水平的提高，人类对环境资源的索求和影响愈来愈大，因此便造成环境资源的枯竭和环境的破坏，世界上许多国家纷纷制定法律保护环境。公元前5世纪至4世纪，古希腊医师希波克拉底斯（Hippcraoes）在《关于空气、水和土地》一书中论述了环境因素与疾病的关系。13世纪，英国国会发布文告，禁止伦敦工匠和制造商在国会开会期间燃烧烟煤。1829年，法国制定《鱼类保护法》，这是国外最早的水质控制法。

在古代，我国黄河中上游，古埃及的尼罗河流域及古巴比伦幼发拉底河谷，被称为世界古代文明的发源地。但由于过量垦荒种地、砍伐森林，造成严重的水土流失和风沙灾害，有些地方甚至成为荒无人烟的沙漠。

近几十年来，社会生产力发展迅速，人类改造自然的规模空前宏大，向大自然索取的自然资源愈来愈多，水、气、渣废物的排放与日俱增，产生严重的污染，破坏了环境。至20世纪五六十年代已发展成为全球环境问题，引起全世界人民的关注，这类问题主要可归结如下。

（1）废物超量排放，破坏了环境的正常循环规律。科学家估计，20世纪60年代，全世界每年排入环境的各种污水为500km^3；各种工业废渣30亿吨；各种气溶胶10亿吨。大气中的二氧化碳含量已由产业革命前的270mg/L，上升到1984年的345mg/L，有的学者估计

至2030年将增加到540mg/L；那时将会引起全球性的“温室效应”，地表温度将增高1.5～5℃，而南极会增高12℃，海平面将上升0.2～1.5m，至时，沿海很多地区将受淹。由于工业生产和交通运输排放的氮化合物、氟氯化合物进入距地表面10～50km的臭氧层中，发生臭氧化合反应，使臭氧迅速减少，南极上空已出现面积越来越大的“空洞”。按现在的速度50～70年以后，大气中的臭氧将仅剩不到3%，人类的免疫力将受到很大的破坏。此外，酸雨已在我国中南、华南、华东及西南地区出现，同时也已遍及欧洲、北美和亚洲的其他地区，污染了环境水源和土地，造成农田大面积减产，森林成片枯萎。

（2）人类的“取源大于生源”造成了资源的枯竭和环境的退化。自从地球上出现人类以后，人类同环境就开始了永不休止的相互作用和影响。有人说人口问题是引起环境经济问题的根本原因。当今有人把人口、环境、资源列为人类面临的三大问题。

这些问题，目前已发展成为全球性问题，威胁着全世界人类生存的安全，正如有的人所指出，如果地球环境继续退化，“地球是否还会安全地为人类服务，人类社会是否还会安全地存在下去，都成了问题”。

二、环境问题的发展和研究

环境问题研究的实质是合理利用环境的资源，改善和保护环境，更好地为人类服务。早在一百多年以前，恩格斯在《英国工人阶级状况》一书中讲述了英国工业城市曼彻斯特的严重污染以后，尖锐指出环境问题产生的两个根源：一是对自然规律认识不足，未能正确预见到生产行为对环境自然界的干涉所引起的比较长远的环境自然影响，遭到了自然的“报复”；二是现有的生产方式都只在于取得劳动的最近的、最直接的经济效果，而忽视了比较远的自然的和社会的影响效果。曲格平先生说：“尊重自然、善待自然的伦理态度将是人类文明持续的基础。自然环境不是人类欲望的函数，而是赖以生存的母体。拜自然为师、循自然之道的理性态度将是人类文明发展的不竭动力。保护自然，拯救自然的实践态度将是人类文明长胜不衰的根本保证。”

环境问题作为一门学科始于20世纪50年代，经过科学家对生物、地理、化学的环境问题的多年研究，指出了环境污染的严重后果。经济学家从经济理论上对环境污染产生的经济根源做了深入探讨，认识到传统的经济理论不能很好地解决环境污染和自然资源枯竭问题，因为传统的经济理论不考虑“外部不经济性”，在产品的内在成本中未计入废物的处理费用，而是以牺牲环境质量为代价获取高额利润，将隐蔽而沉重的费用转嫁给了社会，增加了公共费用负担，破坏了舒适的环境条件；二是国民生产总值（GNP）不能反映环境情况，不能反映经济福利。正如于光远所说，“国民生产总产值和工农业生产总值等统计指标都根本不能反映环境的状况，这是一个很大的缺点。”正因为如此，经济学开展了经济发展与环境改善的研究。关于协调经济发展与环境质量的关系方面，美国科学家巴克莱和塞克勒提出以下方程式：

$$NSW=NNP+(B-GC)-AL$$

式中　NSW——净社会福利；

NNP——净国民生产增值；

B——未被认识经济发展的非市场性有利条件，如增加的业余时间知识的积累、改善的保健等；

GC——经济发展费用（包括情报、管理等），减少污染所花费的劳动力和金钱；

AL——环境恩惠损失，包括噪声的增加、烟雾的增多、风景区的商业化演变。

根据以上方程的分析研究，巴克莱和塞克勒得出结论：在经济发展过程中，效益的追加部分增加时，为它支付的费用也必须增加；当追加费用等于追加效益时，就必须停止发展，否则会引起环境恶化。

有人计算了1925～1965年的经济净福利，结果表明，经济净福利的增长慢于国民生产总值的增长，尤其是20世纪50年代以后，更加缓慢，说明环境污染的代价越来越大。日本筱原之代平等人计算了日本的国民净福利，按1970年价格计算，由环境污染所造成的经济损失1955年估计为550亿日元，占国民净福利的0.2%，1970年高达64700亿日元，占国民净福利的13.8%，污染的损失相当严重。1970年以后，日本全国上下重视环境保护，下大力气治理污染，环境状况有了很大改善。

美国著名经济学家瓦西里·列昂节夫（W. W. Leontief）是世界上最早从宏观上定量分析研究环境保护与经济发展关系的经济学家。他用投入-产出分析法研究世界经济结构，把处理工业污染物单独列为一个物质生产部门，在产品成本中，除了原材料消耗和劳动力消耗外，还包括处理污染物的费用，从而分析研究了环境政策对经济发展可能产生的影响以及促进经济发展与改善保护政策之间的影响。

A. 马歇尔是20世纪以来第一个对环境问题做出重要论述的经济学家，他指出："污染问题是正常经济活动中所出现的一种失调现象，因为在正常经济活动中任何稀缺资源的消耗取决于供求力量的对比。"

W. 贝克曼和E. 米尔斯则认为："城市环境各种标准中，任何不够理想的现象，都是由各种经济市场内部的失调而产生的，只要正确地调整价格体制，就容易把情况纠正。"贝克曼还认为："运用经济机制来降低污染就是把外在因素变为内在因素，或者说给予影子价格来反映所造成的社会支出。"

从20世纪60年代末以来，以"罗马俱乐部"为主要代表利用数学模型和系统分析的方法，研究了世界人口、工业、农业生产、自然资源环境污染五个因素的内在联系；发表了《增长的极限》和《全球2000年》等著作。这种以五个变量作为有机的统一体进行定量分析，研究它们相互之间的关系作为提供制定政策的依据，是环境经济学的新尝试，它推动了环境问题的整体性研究。

三、环境问题的特点

环境问题的特点概括起来有以下几点。

第一是环境状态改变的不可逆转性。众所周知环境生态系统有自身调节的能力，但是一旦超过了一定限度，将会导致环境生态系统平衡的失调，人类将会受到环境的惩罚。世界三大文明发源地，如中国黄河流域的中上游、古埃及的尼罗河中下游、古巴比伦的幼发拉底河流域，都是由于不合理开发利用环境资源而遭到破坏，难以恢复到原来的环境面貌。当今世界，人类特别关心区域性和全球性的环境问题。例如"温室效应"，森林的迅速减少所引起的气候反常，臭氧层中臭氧的减少等，它一旦引起环境的改变必然影响到人类的安全与生存，而且环境的破坏是不可能逆转的，因此，要保护环境，努力防止不可逆转的环境问题的发生。

第二是环境危害的长期性。我国贵州某山区，在一百多年以前山清水秀，开采朱砂矿以后，很快把浅层的矿挖完，矿工们改烧木炭，把附近的山林砍光。矿洞里流出含有污染物的水，随水土流失，蔓延到农田并影响水源。后来，当地很多人的头发都掉光了，群众说是"鬼剃头"。直至20世纪70年代，科学工作者经过调查和生物实验，才揭开了这个谜。因为

土壤、水中铊的含量特别高，由于人类的活动把隐藏在矿物中的铊通过生态系统的食物链蓄积在人体中，导致了该病的发生。

环境的改变，有时不是马上能看得出的，要延续 10～20 年甚至更长时间后才能看出。如震惊世界的日本水俣事件，是经过 10～20 年后才显露出来的。因此，发展经济必须要具有生态观念，不能破坏生态规律，不能只顾局部的暂时利益，而忽视长远影响，否则就会遭到自然界的惩罚。

第三是环境资源的有限性。自然环境不仅是人类生存的空间，而且为人类活动提供了再生产的物质源泉。随着世界人口的急剧增长和生产的飞速发展，环境资源的稀缺愈来愈明显。矿产物不断减少，有些生物和动物濒于灭绝。有些资源，如水源，过去一直被认为是取之不尽、用之不竭的，但是目前全世界很多国家和地区水源不足，甚至严重缺水。我国 300 多个城市中，有 188 个缺水，有 40 多个严重缺水，大大影响我国国民经济的发展。特别对于可更新资源，必须遵循采伐量等于生产量的法则，多索求就要促使其多转化。因此保护环境应当合理利用环境资源，使其长期服务，促进经济的健康发展。

第四是环境要素的整体性。习惯是多种因素、多种层次、多种结构的综合体。环境要素的变化，是多种因素综合作用的结果。大气环境、水环境、土地环境、生物环境等都是各种自然因素和多种社会经济因素共同作用的产物。在冰雪覆盖的南极大陆上的企鹅体内，已监测出滴滴涕农药；在北极附近的格陵兰岛的冰盖层中，铅和汞的含量不断上升，都表明环境各要素通过物质循环而相互关联、相互影响、相互转移。一些地区和城市所出现的大气污染，不仅同人类排放的污染物的种类、数量有关，而且还同城市的地理位置、工业布局、城市人口的密集程度有关。

由于环境要素的整体性，对污染的治理要求不能就污染治理污染，必须把自然环境系统和社会经济系统作为一个整体，统筹安排，综合治理，或者进行区域性或流域性的大范围的规划治理。这就要自然科学、社会科学和经济科学交叉渗透，对自然、科学和经济进行综合评价。

第五是环境问题的不确定性。水环境、大气环境的污染和破坏往往不是一时一事所造成，其形成原因是多种的，因素是复杂的。由于污染所造成的危害和损失，大多数是间接的潜在的，有时是近期内一时难以完全掌握和清楚的，这就形成了环境问题的“不确定性”。例如各种污染物对环境危害的因果关系，化学物质的致畸、致癌、致突变的可能性，都需要长时间的观察和研究，才能得出比较科学的结论。但是，我们为了保护环境，在没有取得十分确切的数据以前，必须采取措施，防患于未然。

正是由于这种不确定性，容易使人忽视它的重要性。因此我们必须大力开展环境科学研究工作，组织跨学科的交叉研究，掌握环境问题的自然规律和经济规律以及环境评价和经济计算方法，为环境决策提供可靠的科学依据。

第二节　环境经济学的发展

环境经济学，最早有人称之为污染经济学或公害经济学，后来有人称之为生态经济学或生物经济学。20 世纪 60 年代中期以前，一些工业发达的资本主义国家的环境污染由局部逐步发展到整个区域，公害事件不断出现。这些国家被动地对废水、废气、废渣的污染进行单项治理，但污染仍在继续扩展，公害事件不断出现。60 年代中期以后，他们逐渐认识到环境是一个多元、多介质、复杂的综合系统，各种环境因素相互制约、相互联系，因此他们重视了综合性治理，使环境有所改善。以日本为例，第二次世界大战后，日本经济畸形发展，

70%的工厂集中在东京、横滨、大阪、神户、名古屋等沿海大城市，常年烟雾弥漫、粉尘飞扬，上空有毒气体的平均含量高达32t/km^2，近海和主要河流受到严重污染，濑户内海变成污水坑，臭气冲天，水产资源遭到极大破坏。日本政府迫于社会舆论的强大压力，从标准、法规、投资等方面采取措施，加强对公害的控制，使环境状况有所改善。尽管有些发达国家进行了大量投资，仍没有根本解决环境问题。事实证明：重要原因是没有很好地研究、解决环境经济问题。

1972年联合国规划署在斯德哥尔摩召开了人类环境会议，提出了发展与环境问题；1974年墨西哥会议认为，必须从协调经济发展与环境的关系下手；1975年联合国欧洲经济委员会在鹿特丹召开经济规划的生态对策讨论会，与会代表提出环境经济规划问题，在制订经济发展规划中考虑生态因素（环境影响）；1977年联合国环境规划署专家认为，经济发展要合乎环境要求。1980年联合国环境规划署在斯德哥尔摩召开关于“人口、资源、环境和发展”的讨论会。会议指出这四者之间是紧密联系、相互制约、相互促进的，新的发展战略要正确处理这四者之间的关系。联合国规划署通过对人类环境各种变化的观察分析，总结了人类管理地球的经验，1981年联合国环境规划署决定将“环境经济”列为《环境状况报告》中的第一主题。由此表明，作为环境科学的重要分支——环境经济学已成为一门举世瞩目的独立学科。最近几年，环境经济学不断发展，不断完善，达到一个新的阶段。

我国对环境问题也有个认识深化和环境保护战略思想的转变过程。1970年初，我国对环境污染与破坏的认识不够充分，随着国际上环境保护工作的发展以及我国环境污染的现状，至1978年党的十一届三中全会后，认识到环境污染与破坏的严重性，认识到解决环境问题的长期性和艰巨性以及环境经济问题的复杂性，在此基础上，于1983年底在国务院召开第二次全国环境保护会议，并宣布：“保护环境是我国的一项基本国策”。这标志着我国经济发展战略思想的转变，这一转变大大推动了对环境问题以及环境经济学的研究。

在这里需要明确的是“环境经济学”不等于“生态经济学”。众所周知：生态学是关于生物有机体和无机环境之间相互关系的科学，生物指的是动物、植物和微生物；环境指的是自然界的空气、水、热、光以及各种有机和无机元素所组成的空间。显然，生态学是以生物为中心，生物周围的无生命的条件则为环境。环境科学所说的环境则不然，它是以人类为中心，人以外的，充满着各种有生命和无生命的物质的空间则为环境。有位外国科学家曾十分生动地表述了环境的涵义：“除我以外的一切称为环境，除我以外的一切加上我就是整个宇宙。”因此说，环境大于生态。

由以上分析可以知道，以人为中心的环境经济学所研究的必然是以人口为中心和人口以外的一切条件，特别是其所具有的一切自然资源为环境。

我国经济学的发展，是吸收了西方环境经济学的一些有益的部分发展起来的。而西方环境经济学，大都是建立在福利经济学的理论基础上。归纳其主要论点是：①环境是一种稀缺资源，污染实际上是对这种资源的消耗和浪费；②环境是个特殊商品，或是说公共商品，它的价格应由边际效益和边际费用的平衡点来确定；③经济发展和环境保护之间有相互促进、相互制约的关系。

我国环境经济学的研究和发展较西方国家晚，1978年我国制定了环境经济学和环境保护技术经济八年发展规划（1978～1985年）；1980年，中国环境管理、经济与法学学会成立，由此推动了我国环境经济学的研究。

第三节 环境经济学的研究对象和性质

一、环境经济学的研究对象

环境经济学主要是研究环境保护和经济发展的关系；研究环境污染与破坏；环境资源浪费、生态破坏产生的原因，控制解决的方法；环境治理的经济评价。环境经济学所要解决的主要课题是经济活动的环境效应，并使这种效应转化为经济信息，反馈到国民经济平衡与核算中去，为正确制定经济发展战略和各项经济政策提供依据，为解决环境问题的方案提供可靠的经济依据。环境经济学的根本任务，就是正确地控制、调节“经济-环境”系统，在经济发展和环境保护之间寻求相对的平衡，以保证既为当前的生产发展服务，又为长远的经济发展、保护环境提供自然物质基础，维持经济持续、稳定的增长，为子孙后代造福。

众所周知，地球环境的形成大约有几十亿年，而人类文明只有几千年，人类历史的长河只是天体演化的瞬间，然而人类活动，特别是20世纪50年代以来，人类在创造物质文明的同时，从根本上改变着地球环境的各个系统，这不仅影响人类的生存，也将影响人类经济再生产的顺利进行。

经济再生产过程和自然再生产过程之间存在着有机的联系：经济再生产过程以自然再生产过程为前提条件，经济再生产过程要从环境中获得资源，而环境中资源数量的多寡，在一定程度上决定了经济再生产的规模。同时，前者向环境排放废物，而环境承受废物的容量是有限的，所以也会影响经济再生产的规模，因此经济再生产既要遵循经济规模，也要遵循自然规律。

自然再生产的变化取决于经济再生产的方式、结构与规模。自然环境在没有人类经济活动的干扰前，一直在按自动的客观规律进行着自然物质循环，不断地进行着新陈代谢的再生产过程。自然界，由于人类的干扰，物质循环发生了不利于人类生存的变化，这就要调整现有的经济发展方式、结构和规模，使人类的经济再生产适应于自然再生产。

经济再生产与自然再生产协调发展，才能使社会再生产持续稳定地发展。经济再生产的方式，有外延扩大再生产和内涵扩大再生产之分。外延扩大再生产，要求从环境中获取更多的资源，且要向环境排放更多的废物。当代的环境问题正是在经济再生产的开端和终端两个环节上，在开端上，从环境中获取的资源超过了自然生长量，造成了资源的退化和枯竭；在终端上，废物排入环境的数量超过了环境容量，造成了污染。要从根本上解决这两类环境问题，就要改变经济再生产方式，由外延扩大再生产为主转向以内涵扩大再生产为主，尽量提高资源利用程度，减少向环境索求的资源量；要尽可能地将废物利用使之资源化，减少向环境排放，使经济再生产与自然再生产协调起来，才能保障社会再生产的顺利发展。

二、环境经济学的性质

环境经济学是环境科学和经济科学交叉渗透而形成的应用性科学。它既是环境科学的分支学科，又是经济科学的分支学科。

环境经济学是一门边缘学科。环境经济学的研究涉及自然、经济、技术等各个方面的因素。它不仅与经济科学、环境科学有直接关系，而且与地学、化学、生物学、技术科学、管理科学以及法学等许多学科在内容和研究领域上有很大的交叉渗透。正是由于这种边缘性，所以在研究环境经济问题时，既要重视经济规律的支配，又要承受自然规律的制约，例如污染在环境中的迁移转化等生态规律。这就要求环境经济学的专家既要掌握经济学知识，又要掌握环境科学知识，更好地研究环境经济学的问题。

环境经济学是应用性学科。所谓应用性，是指运用基础科学的理论和方法来解决实际问

题。环境经济学主要是运用经济科学和环境科学的理论和方法，研究经济发展和环境保护的关系，解决经济活动中的环境效应。

环境经济学是一门部门经济学。实践证明，环境问题应该从各个经济部门进行研究，并把这些研究结合在一起，构成环境经济学这个部门经济学。环境经济学正是把经济学中和环境直接关联的部分归到自己的学科中来，形成一门新兴的部门经济学。

第四节　环境经济学的研究任务和内容

一、环境经济学的研究任务

马克思说："社会化的人，联合起来的生产者，将合理地调节他们与自然之间的物质交换，把它置于他们的共同控制之下，而不让它作为盲目的力量来统治自己，靠消耗最小的力量，在最无愧于和最适合于他们人类本性的条件下进行这种物质变换。"

环境经济学的任务是要正确地控制与调节经济发展与环境保护的关系，主要可分为以下三方面内容。

（1）研究经济发展如何符合自然规律的要求，并考虑人类活动对自然和社会的近、远期影响。环境问题的改善在很大程度上取决于对客观规律的认识和运用，所以环境经济学研究的一个重要任务就是遵循自然规律来发展经济，而经济发展要顺应自然。环境问题的自然规律主要是生态规律、物质循环规律。人类在改造或利用某一环境要素时，要考虑对其他环境要素的不利影响，物质和能量的转换要保持相对平衡。这个平衡主要是指：一是排入环境的废物不能超过环境的净化能力，避免造成环境污染和破坏。二是人类从自然环境中所获取的可更新资源不能超过它的再生增值能力，以保障资源的永续利用；从环境中索取不可更新资源，要合理开发和利用。所以经济社会发展规划必须列入环境保护内容，经济社会的决策必须考虑生态学的要求，使经济发展和环境保护协调进行。

（2）环境保护，投入要尽量小，而环境效益和经济效益要尽量地大。如前所述，经济发展带来环境的污染与破坏，而保护环境需要消耗一定的物质财富，而且环境质量的改善程度同经济发展水平有关系，因此环境经济学把环境经济学效果作为重要研究内容。在开发利用自然资源中，研究环境系统变化所带来的经济损失，进行费用-效益分析比较，以选择优化的开发方案；在生产建设中，研究防治污染、保护环境措施的经济效果，为制订最佳的防治污染方案提供依据。在环境管理中，研究各类环境标准的水平变化和环保投资增减的比例关系，为制订适合我国经济水平的环境标准提供经济依据。

（3）发展经济要保护和改善环境，使环境更适合人类生活提高的要求。当今世界经济迅速发展，人口急剧增长，因此对地球环境的压力已经达到相当紧张的程度。世界环境与经济发展委员会在一份报告中说："它们超负荷、超速度地过量开采环境资源，使其不能不被耗竭而持续到遥远的将来。虽然我们这一代是受益的，但我们的子孙则会承受损失，后代人可能会责怪我们挥霍浪费，但他们都无法向我们讨债。"因此，环境经济学研究的一个重要任务，就是要正确调控经济与环境之间的关系，既要保证当代人的健康，又要为子孙后代造福，既为当前生产发展服务，又为长远的经济发展考虑。环境经济学要研究生物圈提供环境资源的能力，保障人类生存条件，为当代人和后代人造福！

二、环境经济学的研究内容和方法

1. 环境经济学研究的内容

（1）环境经济学的基本理论　环境经济学基本理论的研究包括社会制度、经济发展、科

学技术、人口等环境保护的关系以及环境计量的理论和方法等。

经济发展和科学技术进步，既带来了环境问题，又不断地增强保护和改善环境的能力。要协调它们之间的关系，首先是改变传统的发展方式，要把保护和改善环境作为社会经济发展和科学技术发展的一个重要内容和目标。环境问题的产生同科学技术有关；环境问题的解决在很大程度上又取决于科学技术的进步，积极发展有利于环境保护无污染和少污染的科学技术，发展节约资源和节约能源的科学技术，使经济发展由资源消耗型的粗放经营转向资源节约型的节约经营。

人类社会中，人是社会的主体，人口的数量和人口的质量是构成社会生产的主体，人作为消费者构成社会消费者的主体，必然与环境相互作用，并且形成相互联系、相互制约的对立统一关系。因此，阐明人与环境发展的规律性，为国家解决人口政策和消费方式等战略决策提供科学依据。

当人类活动排放的废物超过环境容量时，为保证环境质量必须投入大量的物化劳动和活化劳动，这部分劳动已愈来愈成为社会生产中的必要劳动。同时，为保护环境的永续利用，也必须改变对环境资源无偿使用的状况，对环境资源进行计量，实行有偿使用、使外部费用内在化，使经济活动的环境效应以经济信息的形式反馈到国民经济计划和核算的体系中，以保证经济决策既考虑直接的近期效果，又考虑间接的长远影响。

（2）社会生产力的合理组织　合理开发和利用自然资源，合理规划和组织社会生产力，是保护环境最根本有效的措施。为此，必须改革单纯以国民生产总值衡量经济发展优劣的传统方法，把环境质量的改善作为经济发展目标的重要内容，使生产和消费的决策同生态学的要求协调一致。要研究环境保护纳入国民经济计划的方法，确定环境保护目标，把生态平衡纳入国民经济综合平衡体系，按照经济观点和生态观点相统一的原则，拟定各种资源开发利用的方案，确定一国或一地区的产业结构以及社会生产力的合理布局，保证基本生产部门和消除污染部门按比例地协调发展。

（3）研究环境保护的经济效果　经济效果是环境经济学研究的重要内容之一。环境保护经济效果包括环境污染和环境破坏经济损失估价的理论和方法，环境保护经济效益计算的理论和方法；生产生活废物处理和利用的最优方法的经济选择，区域环境污染综合防治优化方案的经济选择；各种有害物质排放标准制定的经济准则，各类环境经济数学模型的建立等。

（4）研究如何运用经济手段进行环境管理　在环境管理中运用经济手段，与行政的、法律的、教育的方法相互配合。它通过税收、排污收费、罚款等经济杠杆，调节污染者与受污者之间的关系，促使企业和个人的生产和消费活动符合国家保护环境和维护生态平衡的要求。经常采用的经济手段有：征收资源税、排污费、事故性排放罚款；实行废物综合利用的奖励，提供废物处理设施建造的财政补贴和优惠贷款等。

2. 环境经济学的研究方法

环境经济学研究，要运用马克思列宁主义、政治经济学的基本理论和方法，研究环境污染中的经济问题。运用经济学的基本理论，如货币的时间价值计算方法，进行环境工程经济优化的评价和判据研究；运用“费用-效益”分析方法，进行环境污染的损益分析及环境治理工程的效益分析研究计算；运用“投入-产出”分析方法，对环境污染损失和环境治理中的各种消耗进行计算研究；运用“数学回归分析”方法，对环境污染和环境治理工程费用进行近期的预测分析；运用“数学规划”方法，对环境系统的规划和治理进行多目标的优化决策。

第二章　环境经济学基本原理

第一节　环境经济学的理论基础

一、环境经济学的发展基础

众所周知，西方环境经济学是以福利经济学为其理论基础而发展起来的。福利经济学的核心是强调市场物品的交换使全社会的效益最大，而不仅仅是物品的生产者和消费者双方利益最大。他们给社会福利最大化的定义是：社会从自然环境中所获得的资源，由资源所产生的产品以及产品服务人类的总价值为最大。当然做到这一点不是很容易，原因之一是物品的生产中存在着外部效应，即外在效益。经济学家把人类共同享用的东西称为“公共物品”（public goods）。纯粹的“公共物品”具有非拒绝性（non-excludable）和无排斥性（non-exclusive），也就是说，无论何人即使他不愿意为某物品付费，也不可能把它排斥于该物品的消费之外。例如国际开支就是一个例子，因为事实上，人们不可能把某个特定的人排斥于国际效益之外。当然对这种原因的说明还可以从公共物品的“外在性”（extenality）和市场失灵来说明，即一物品或活动施加于社会的某些成本和效益，不能在决定该物品或活动的市场价格的过程中充分得到反映，也就是说，这不是施加给那些参与交易的有关方面（物品的生产者、购买者和销售者），而是施加给有关方面以外的一种成本和效益。

实际上有两种主要的外在性，即“生产外在性”和“消费外在性”。一工厂烟囱排出的黑烟造成空气污染，给第三者形成外在成本，使周围大气环境质量下降，甚至对居民造成危害；这些负效益在产品的交易市场上，并没有得到反映。而汽车（主要是指轿车）排出的有害气体对周围造成的污染，就是“消费外在性”的例子。

西方环境经济学另一个理论基础是：“环境质量是一个经济问题”。他们认为环境的舒适性是一种稀少并有价值的“资财”，可以以不同的方式被利用。一种资源的利用如果存在着几种可能的竞争，那么，这种资源就是“稀少的”。

因此，在环境的利用问题上往往存在着几种可供选择的用途，而且几种用途又互相竞争。因此说，环境也是一种稀少资源。这种竞争的一个鲜明的例子是：新鲜的空气是人类生存的必要条件和最基本的资源；但是工厂却把含有大量有害物质的气体排入空气，污染了大气环境，造成了竞争。

二、环境是资源

环境是人类生存的空间场所，也是人类生存和发展的物质源泉。恩格斯说过：“自然界为劳动提供材料，劳动把材料变成财富”。自然环境中的太阳能、风能、水能、热能、潮汐能以及各种动物、植物、矿物等自然财富为社会再生产提供了原材料，构成生产的要素，同时也是人类自身再生产的条件。

自然环境提供人类生产活动的各种原材料，包括可再生和不可再生的资源。例如土地、水资源、森林、矿藏和各种动物、植物都是经济发展的物质基础。

环境是人类和各种生物生活的场所，即人类和生物赖以生活和繁衍的栖息地。

环境为人类活动排放的污染物提供了扩散、贮留、同化作用，也就是说，水环境、大气

环境、土地环境对各种污染物都有一定的净化能力。

环境为人类提供了各种景观服务，奇异的山峰、清澈的流水、广阔的田野、茂密的森林等；大自然为人类提供了休息和游览的胜地，为人类的精神生活和社会福利提供了丰富的物质资源。

保护环境，不仅是保护人类生活环境的质量，更重要的是保护环境资源，保障环境资源的永续利用。

三、环境资源的特征

环境资源，从经济学的角度来看，具有以下特征。

1. 环境资源具有稀缺性

原始社会，人口稀少，生产力水平低下，资源的有限性和稀缺性不很明显。随着生产力的发展，人口的增加，人类对环境资源的索求愈来愈多，特别是当今世界，人口急剧增加，生产力迅速增长，人类对环境资源的索求大大增加，资源的有限性和稀缺性表现得日益突出，例如耕地的短缺、粮食的不足、森林的消失、水资源的贫乏、大气质量的下降等。资源的有限性还表现在资源的负荷能力上。一定的资源数量，在一定的生产力水平下，只能养活一定的人口。更深一步讲，资源的有限性还表现在结构的组成上。任何一项生产，都是多种生产要素的组合，要求有一个合理的资源结构，即使多种资源比较丰富，但如果某种资源短缺，也会形成一定的限制因素。

我国人均资源数量不多，特别是我国人口众多，工业不够发达，所以资源的有限性和资源需求之间的矛盾愈来愈突出。如我国很多地区由于水资源的缺乏，已成为国民经济的主要制约因素。虽然环境资源稀缺、有限，但是随着科学技术的发展，人类会研究创造新的材料和代用资源，如能源的发展即是如此。但必须指出，有些资源，例如水资源、空气资源是任何其他物质也替代不了的，所以我们必须珍惜它、爱护它。

2. 环境资源的多用途性

世界上大部分环境资源都有多种用途，多种功能。例如一水系河流，沿河岸植满林带、筑坝形成水库，它可以用来发电，提供自流灌溉，提供水利运输，提供渔业水产，提供木材，提供优美的环境，供旅游者观赏游览。我们应充分利用资源的这一特性，综合开发，发挥其多方面的效益。

某种环境资源当被选择为一种用途后，而另一种用途就可能减少。如森林资源可以涵养水分，调节气候，遮挡风沙，防止土地沙化；也可以提供木材、用作建筑材料和造纸。如果砍伐过量，破坏了森林的生长循环规律，它的作用就将减少或丧失。因此我们要综合考虑，权衡利弊，注重资源的综合效益。

3. 环境资源的增值性

如前所述，环境资源有不可再生和可再生之分，而再生资源具有再增值能力。如果合理利用，不违反其生态循环规律，则可使其不断更新，不断增值。但对其利用如超过极限，违反了它的生态循环规律，就会造成资源的衰退和枯竭。如超载放牧，会引起草原破坏和退化；海洋和河流捕捞过度，会造成鱼类和水产的衰退和枯竭。南方水域的螃蟹和甲鱼愈来愈少，就是一个明显的证明。总之，在环境资源开发利用过程中，首先要分别对不同的对象确定其阈限值后，再确定开发和利用的程度和措施。

人口的增加和生产力的发展，对可更新资源的需要量日益增多。因此，人类必须按生态规律，投入一定的人力、物力，促使其多转化、多增值，扩大自然资源的生长量，为人类提

供更多的自然资源。

4. 环境资源的计量困难性

环境资源虽然具有使用价值，但是相当一部分环境资源没有市场价格。例如，大自然中的空气、天然的水源、美丽的风景等，都没有市场价格。为了全面评价经济活动对社会的正效益和负效益，必须对其造成的环境污染和环境破坏计算经济损失值，为保护环境、治理污染所付出的活劳动和物化劳动进行计量。但是，这种计量远比经济活动的计量复杂得多、困难得多，而且我国对许多环境资源实行的是无偿使用，有的甚至是无计划的开采，因此更增加了计算和计量的困难性；因此要开展环境资源评价和计量方法的研究，为环境规划的决策提供定量、可靠的科学依据。

第二节　环境资源的价值和商品性

一、环境资源的价值

按照传统的理论，说一个物品要具有价值，必须经过人们的劳动过滤，不经过劳动过滤的自然资源，例如，空气、河流、天然森林、矿藏等只具备使用价值，而不具备商品价值。这些资源是不是应该具有商品价值？我们认为应该具有商品价值。当今世界，生产力飞速发展，人口迅速增加，城镇工业急剧集中，人类广泛的生产活动所产生的废物，无不影响环境、威胁环境，甚至超过环境的容量。为了防止污染环境和破坏资源、使人类的生存少受影响和免受威胁，人类社会就应该投入大量的劳动，对环境资源和自然资源进行勘探、开采、保护和增值，这对人类的生存是完全必要的。以河流和地下水资源为例，江、河、湖水是降水所致而自然形成的，但是河流的水量、水质则需要花费劳动力去勘测、调查、化验；河流需要疏浚，堤岸需要整修，就要消耗劳动。因此说，它是有价值的。再如天然的空气，由于污染越来越严重，需要专门的机构和人工管理，需要进行检测分析，这就消耗劳动，它就有价值。

从某种意义上说，与人们的改造、影响无关的自然资源，在今日的世界里可以说已经不太多了。另外，长期以来，人们往往认为自然资源是自然的馈赠，因而无代价地索取使用，这样造成了自然资源地大量浪费和严重破坏，对人类和国民经济都是非常不利的。例如，遍及山西省 100 多个县的小煤窑有四千多个，1980 年这些小煤窑生产了二千多万吨煤，而按国家规定的开采率应该采煤一亿二千万吨，正是由于人们认为这种“自然资源的无偿性”，造成了无法挽回的巨大浪费和损失。再者，一个商品的价格是商品价值的货币表现，自然资源的价值用货币形式来表现的价格是由哪些要素体现的呢？它们主要是排污费、保护费、治理费、赔偿费、研究费和管理费。

我国环境学界、经济学界的许多工作者对自然资源的有偿使用提出新的方法，例如于光远曾提出按照“级差地租”的理论征收资源税的办法，即有级差的资源收取级差税；有人提出“影子价格”的办法，即把自然资源看作是固定资产，开发利用时，可以起控制降低成本、增加利润的作用。现在的领空、领海和领土都有专门机构和人员管理（包括国土和环境部门），它们消耗着大量的劳动。从这个意义上说，作为环境存在的一切对人类消费有用的自然资源都具有使用价值和商品价值。

二、环境资源的商品性

环境资源具有使用价值和价值，但其是否具有商品性，是不是商品，人们也曾有过不同的看法。

按照传统的观念，在社会主义制度下，土地、矿藏、水源、森林、荒地、滩涂等自然环境资源属于国家和集体所有，不得买卖，不得出租，因此不称其为商品，对环境资源实行无偿占用。实践证明，环境资源的无偿占用，不利于对它的开发和合理利用。为此，很多学者和专家提出了环境资源的商品性和商品化问题。

我们认为，在社会主义计划经济条件下，环境资源也具有商品性。其理由是：环境资源也像生产其他商品一样，要投入勘探、开采、保护、再生、增值等劳动，要消耗活劳动和物化劳动，是社会的劳动产品；环境资源的稀缺性，除了一部分取之不尽的环境资源外，土地、矿藏、生物等环境资源在其数量上都是有限的；环境资源的级差性，同一种环境资源的使用价值也不尽相同，在水源丰富与缺乏地区，水污染的危害程度是不一样的，对水环境质量的要求也并不相同，这就产生了级差效益；环境资源的两权分离性，自然界中的空气、水源、矿藏等环境资源是公共财产，经营权和占用权可以分离、进行转让，这种分离和转让，使经营者获得收益，应该把一部分返回给资源所有者，形成按生产要素分享所得，这是另一种“等价交换”。

承认环境资源的商品性，对保护环境与自然资源具有重要意义。

首先它有利于环境资源的优化利用。资源的无偿占用，往往导致资源开发利用的浪费。实行有偿使用，可增强使用者的成本观念、效益观念，节约使用资源，有效使用资源，并开展资源副产品的回收和废物的综合利用。其次，它有利于环境资源的保护与再生增值。无偿使用资源，使用者不关心环境资源的保护，所有者也由于得不到利益以及经费的限制，影响保护与再生增值的积极性。实行有偿使用，使用者会主动提高责任感，所有者由于分享利益，重视了环境资源的再生增值。再次，它开辟了环境保护的资金渠道。实行环境资源的有偿使用，可以使环境资源以生产要素的资格参与国民所得的分配。

三、经济效益、环境效益和社会效益

1. 经济效益

经济效益是指人们在生产活动中所获得的经济利益。具体地讲，是指人们在从事经济活动过程中，用尽可能少的劳动消耗或劳动占用，取得尽可能多的劳动成果。也可以概括为劳动成果同劳动消耗的比较，产出与投入的比较，所得和费用的比较。

劳动成果是指物质生产过程中新创造的使用价值，即有用之物。在环境保护中，一是指由于采取一定措施后，提高了劳动生产率，或者回收了副产品等，增加了社会产品；二是指由于采取人工措施后，改善了环境质量或减少了排污量，可以避免或减少对社会财富和人体健康的损害。

所谓劳动消耗或劳动占用，是指物质生产过程中为取得一定量的劳动成果所消耗的劳动。这种劳动消耗包括活动劳动消耗和物化劳动消耗两方面。就环境保护而言，活动劳动消耗是指在环境保护过程中有一定生产经验、劳动技能和科学技术知识的人所消耗的劳动量；物化劳动消耗是指投入环境保护过程中去的原材料、燃料、机器设备、房屋建筑、交通运输设施和输水、输电设施等生产资料的消耗量。

经济效益用以下公式描述：

$$B=\frac{W}{C}$$

式中　B——经济效益；

　　W——劳动成果；

C——劳动消耗量。

环境保护经济效益，是指为实现某一环境目标所付出的劳动消耗或劳动占用和因环境改善所获得的综合的社会经济效益之间的对比关系。它可以根据采取环保措施后的环境改善状况同未采取环保措施可能出现的环境状况相比较，具体可以从以下三个方面的差值来计算：一是物质生产领域里表现在净产值或利润增长方面；二是非物质生产领域在完成工作或提供服务所节约的费用方面；三是在个人消费领域里表现为居民个人防止污染开支方面。

环境保护经济效益有直接经济效益和间接经济效益之分。所谓直接经济效益，是指通过环境保护活动直接取得的经济效益。例如一个工厂采取污染治理措施后，工厂直接获得的收益。所谓间接经济效益，是指通过环境保护活动后减少了对社会的损害或带来的利益。

2. 环境效益

所谓环境效益，是指经济活动包括生产活动排放的废物和开发利用自然资源活动引起对环境的变化。这些变化可能是好的影响，也可能是不好的影响。例如电厂排放的沸热水，可能对鱼类生长有利，但在大多数情况下，往往带来的是不利的后果。大气中二氧化硫和氮氧化合物含量的增高，引起酸沉降的污染，排入水体，使水质恶化。这种环境变化有的会发生直接的或间接的经济影响。例如，水质恶化会影响水生生物的繁殖，使农作物产量减少，品质降低，净化处理费用增加等。这种经济影响一般是可以计算的，但有的就比较麻烦了。例如，对环境变化的长期效应，二氧化碳引起全球气温的升高等，由于科学技术上的不确定性，更难正确估量。

具体说，环境保护取得的环境状况不利影响的减少和环境质量的改善，主要表现为空气、水体和土壤中污染物数量和有害物质浓度的减少，可用的土地面积的增加，生态平衡的保持，自然保护区的维护，噪声和振动及其他影响水平的降低，其货币计量值可按环保措施实行前后，环境不利影响指标和环境状况指标的差值来计算。

3. 社会效益

所谓社会效益，是指某项经济社会活动所产生的社会效果。它不仅仅是从企业，而且还从社会角度评价经济活动的成果，它既包括直接的产生效果，也包括间接的社会效果；既有正效益，又有负效益。例如核电站的建设，除了电站的净效益外，从社会来讲，由于发电量的增长，可以促进缺电地区工农业生产潜力的发挥，同时核技术的应用，可以带动整个国民经济科学技术的进步等。一般来说，对促进工农业生产的效益是可以计算的，但科学技术进步的效益很难计量。另一方面，核电站的废物如不认真地、科学地处理，就有可能对周围环境产生污染，造成潜在的危害，这就是负效益。从环境保护来说，社会效益表现为居民体质的增强、发病率降低，寿命的延长，就业增加，劳动和休息条件的改善，人文景观及美学财富的维护，有利于个人创造潜力的发挥，文化条件的改善，人的道德觉悟提高等，其货币计量值也是按环保措施实行前后环境不利影响指标或环境状况指标的差值来计算的。

经济效益、环境效益和社会效益三者之间的关系是辩证统一的。环境效益是经济效益和社会效益的基础，经济效益、社会效益是环境效益的影响结果，三者互为条件，相互影响。在环境保护措施的最佳（最优）方案（或模式）中，经济效益、社会效益和生态环境效益的方向基本上是一致的，有良好的环境和社会效益，必然有利于提高经济效益。但是，三者之间也是有矛盾的。有的方案从近期看有着良好的经济效益和社会效益，但从长远看，则会产生污染，损害环境生态的平衡。

问题是如何把环境效益、社会效益和经济效益这三者用同一尺度衡量，进行直接比较和评价。实践证明，这个尺度只能是货币。我们可以用货币进行环境效益、社会效益和经济效益的综合比较评价。虽然社会效益、环境效益不能全部用金钱反映出来，但它常常会伴随产生经济效果，这可以用货币来度量。例如，对人体健康的影响，人的生命价值是无法用钱来计算的，但是污染引起的人体健康的损害、体质下降，会降低劳动效率，增加医疗费用的开支，增加社会福利基金的支出等。这些都可以通过数学模拟用金钱计算出来。又例如，环境退化所引起的自然资源的损害，可以采用恢复自然资源的费用以及影子工程法等来计算。

第三节　环境发展与环境保护

一、经济与环境的辩证关系

1. 环境是经济发展的物质基础

首先，人类的经济活动，包括生产、分配、流通、消费，它通过一系列的劳动加工，从自然界中获取自然资源，转化为生产和生活资料，经过分配、流通以满足人类社会生存和发展的消费需要。

生产模式分为简单再生产和扩大再生产两种。扩大再生产较之简单再生产要求较多地把自然资源转化为生产和生活资料。所谓较多地转化，无非有两种办法：一种是增加被转化的资源总值，从环境中获取更多的资源；另一种是不增加资源的消耗量，提高单位资源的转化率，减少废物的排放。前者属于外延扩大再生产，后者属于内涵扩大再生产。不论是哪种扩大再生产或是简单再生产，都是把环境资源作为再生产的物质基础。没有环境资源这个基础，无论是哪一种再生产都将无法进行。保护好环境资源可以为经济发展提供物质条件；遭受污染与破坏的环境资源必定会影响经济的持续发展。

其次，经济活动过程中的生产和生活消费活动，总有一定数量的废物排入环境，而环境具有扩散、贮存、同化废物的机能，利用环境这种机能可以减少人工处理设施的投资与费用。如果保持环境的这种机能，就能为人类经济活动免费提供净化废物的资源；如果破坏了环境的这种机能，就要危害人类健康，要付出昂贵的处理废物和恢复环境机能的费用，影响经济的发展。

因此，不论生产活动从自然环境获取资源，进行经济再生产，还是生产和生活消费活动向环境排放废物，都说明经济发展以环境资料为条件，环境是经济发展的物质基础。

2. 经济发展对环境的主导作用

在原始社会，人类以“牧童式”的方式生活，以采集和狩猎为主，自然界有丰富的资源，人类可以享用，因此，他们对周围的资源索取要求不高，对周围环境的破坏不大。

当人类逐渐学会经营畜牧业及种植业后，生产方式由游牧生活过渡到耕种土地，实行定居生活时，人类通过各种劳动增加生活资源。这种农业生产活动实际上是在自然生态循环的基础上加入人为的因素，使之在一定时期内转化出较多的产品。如果农业的再生产遵循环境的生态规律，不但可以向自然界索取大量的物质财富，而且能够使自然再生产实现永续的良性循环，保证农业生产的不断发展。但是人们常常违反环境生态规律，遭到了自然界的报复。恩格斯在《自然辩证法》中，曾列举了许多滥伐森林、破坏土地资源的惩罚。我国黄河流域是古代文明的发源地，由于人为的长期活动，使自然环境遭到严重破坏，水土流失严重，使当今的农业生产处于恶性循环之中。这些都是沉痛的历史教训。

工业生产的发展，标志着社会生产力的进步。采掘工业直接面对自然资源；原料工业是

分解和富集自然资源；加工工业是按社会需要改变自然资源的用途，这些都离不开自然资源。所以，工业生产也是以自然环境提供的资源为基础。但是，随着工业生产规模不断扩大，向自然环境索取的资源愈来愈多，使某些资源，如石化燃料、金属与非金属矿物的开采储量愈来愈少，出现枯竭趋势，或者索取的资源，如生物、水源、土壤等超过了再生增值能力，使资源遭到破坏，出现了目前的第一类环境问题，也即开发活动引起的环境破坏问题。同时，工业生产规模的扩大，向自然环境排放的废物愈来愈多，超过了环境容量，出现了目前的第二类环境问题，即生产和生活消费活动引起的环境污染问题。要解决这两类环境问题，一是合理开发资源，提高利用率，最大限度地将其转化为产品；二是废物再生资源化，既可以增加资源，又可以减少向环境排放废物。

由此可见，不论是农业生产活动还是工业生产活动，经济发展对环境变化都起着主导作用。

3. 环境和经济相互促进、相互制约

环境对经济的促进作用，主要表现在环境系统的良性循环：可以使资源的再生增值能力大于经济增长对资源的需要，如为农、林、牧、副业生产发展提供良好的生态环境；可以促进企事业单位采用无污染、少污染的技术，减少污染物的排放；可以广泛开展废物的综合利用，提高资源的利用率，发展资源再循环利用技术，避免造成对环境的破坏。

环境对经济的制约作用，主要表现在环境受污染和破坏后，不仅使社会受到巨大的经济损失，而且环境资源枯竭导致经济的发展受到限制。例如，我国许多地区由于过度开采地下水资源以及水资源被污染，水资源日趋减少，不得不限制工业生产用水量，使生产发展受到影响。所以，环境对经济的制约不是限制经济的发展，而是限制其在经济发展中不合理利用环境资源的活动，使之符合自然生态规律。

经济对环境的促进作用，还表现为人们通过对自然环境的开发利用，将自然环境改变为人工环境，以便按照人类发展的要求建设成最优化的生活环境和产业环境。经济发展了，还可以拿出更多的资金用于保护和改善环境，为解决环境问题提供必要的技术装备。经济发展也可以促进人们提高对环境质量的要求，它是环境保护事业发展的一个内在动力。

经济对环境的制约作用，主要表现在环境的保护和改善要花费一定的投资。环境的改善程度总是同经济发展水平相统一，并受经济的制约。例如在城市建设中，采用集中供热、煤气化和建设城市污水处理厂可以大大改善城市大气环境和水域环境，但这需要花费大量的投资和运转费用。因此，只能根据经济条件尽量加以解决。

二、国际各环境学派及其主要观点

20 世纪 70 年代以来，国际上各环境学派对世界前景纷纷做出预测，众说纷纭，莫衷一是。他们基本上可以分成三个学派。

1. 悲观派

这一派以“罗马俱乐部”为主要代表。从 20 世纪 60 年代以来，悲观派环境经济学家对人类发展的过去、现在和未来进行了大量的系统研究，将全球的未来描绘成一幅可悲的前景。其代表性著作有《增长的极限》、《全球 2000 年》和《世界保护战略》等。

悲观派的基本结论是：如果人类社会按当时的趋势继续发展，则 2000 年的世界比我们现在的世界更不安定，更拥挤，污染更严重，生态更不平衡；全世界如不立即采取措施制止或减缓人口和经济增长的速度，则在 100 年内的某一天，人类社会的增长会达到极限，此后便是人类社会不可控制的瓦解，人口和产量都将大幅度地下降。

悲观派的主要论点有，人类社会发展由五种趋势构成，这五种趋势是：加速发展的工业化；人口急剧增长；粮食短缺和营养不良；不可再生资源枯竭；生态环境日益恶化。

科学技术虽然能够解决某些当前的问题，但不能从根本上解决发展的无限性与地球有限性的矛盾。科学技术只能推迟“危机点”的出现，延长增长的时期，但无法消除“危机点”。因此，人口和经济增长是有限度的，一旦达到它的极限，增长就会被迫停止。由此可见，人类社会经济的无限增长是不现实的，而等待自然极限来迫使增长停止又是人类社会难以接受的。出路只有一条，这就是人类要自我限制增长。

限制增长的含义是：保持人口的动态平衡，让出生率等于死亡率，保持世界总人口不变；保持资本拥有量的动态平衡，让每年的增产额等于折旧额，使总资本保持不变；大力发展科学技术，尽可能提高土地生产力，尽量减少单位产品所耗用的资源数量和排出的污染物量。

2. 乐观派

这一派以美国未来研究所所长卡恩博士为代表，代表作有《世界经济发展——令人兴奋的 1978～2000 年》。他们以设想方式而不是用数学推导的方式看待未来。

乐观派的结论是：从历史发展趋势来看人类正处在从过去的贫困过渡到富裕而有潜力的未来社会的“伟大转变”的中期，增长不会停滞，因为转变有其内在的动力。

乐观派的主要观点有：1800～2200 年这段时间可以称为“伟大转变”时期，这个转变只有在经济不断发展的情况下才能实现。

乐观派认为悲观论的荒谬在于其理论以指数函数增长为基础，而这种增长率只能在短时期内维持下来，实现伟大转变是按综合逻辑的形式或 S 形曲线发展的。

3. 现实派

现实派代表人物有柯尼什（世界未来学会主席）、德·儒弗内尔和艾伦·科特奈尔等，其代表作为《环境经济学》以及阿·托夫勒的《未来的震荡》和《第三次浪潮》。

现实派的结论是：今后的岁月可能布满风险，但人类各个领域的活动仍有希望取得许多巨大的成就。因此，对未来的正确态度，既不是悲观主义也不是乐观主义，而是满怀信心的现实主义。

现实派的主要观点有：人口剧增，资源枯竭问题严重，但市场机制有刺激人们解决资源短缺的力量，因此增长可以继续下去；地球的自然资源与人类消费量相比还是极其丰富的，之所以出现资源短缺，是由于技术上和经济上的限制造成的；认真解决有关的社会和政治问题，包括节制生育、富国不能挥霍无度、世界各国应就环境问题进行全球性合作、放弃某些自私的打算等。总之，人类既应清醒地估计到今后的问题和风险，又应认识到正在出现的解决问题的方法和机会。

三、经济发展和环境保护协调

社会主义生产的目的是为了最大限度地满足社会成员日益增长的物质、文化生活的需要，这包括消除污染、治理和改善环境。环境保护与经济发展既是统一的又是矛盾的。经济上产生的问题是局部利益与全局利益、近期利益与长远利益处理不当所致。恩格斯曾经指出：资本主义以前的生产方式“都只在于取得劳动的最近的、最直接的有益效果，那些只是在以后才显现出来的，由于逐渐的重复和积累才发生的作用的进一步的结果，是完全被忽视的”。在我国造成这种矛盾的原因主要是企业在评价经济效果时，只计产量、利润等指标，不计环境资源的经济损失。企业和部门由于所处的地位不同，也常常只顾局部的、近期的利

益，忽视社会全局的、长远的利益，忽视了污染的治理和环境保护。此外，环境保护还与经济发展水平有关，特别是发展中国家，许多环境问题是由于经济落后造成的。例如我国城市大气污染问题，主要是千家万户的炊事、取暖直接燃煤排放的污染物，在冬季采暖期的清晨与傍晚出现两个显著的污染高峰，使空气浑浊。而许多先进国家采用集中取暖、供热、煤气化和电气化，则可以大大改善环境质量。当然要做到这一点必须花费大量的投资。又如城市中进行污水处理，建造二级污水处理厂，不仅要花费大量的基建投资，也需昂贵的运转费用，这对于经济实力不雄厚的国家来说困难是不小的。

环境保护与经济发展协调的标志是，既要取得最佳的综合社会经济效益，实现环境效益、经济效益和社会效益的统一，又要不断地改善广大人民的生活和劳动环境质量。

怎样才能使环境保护与经济发展相协调呢？首先经济发展既要满足人类物质财富的增长，又不能超过环境可能提供的资源和承纳污染物容量的限度，决不能以牺牲环境为代价去实现经济发展的目标。其次是环境保护的目标和要求，既要考虑到人体健康和其他生物生存的基本要求，又要考虑到经济技术发展的水平，环境保护的水平和目标只有在经济发展的基础上不断提高。再次，环境保护与经济发展协调的关系，主要是通过全面规划、综合平衡，把全局利益、局部利益、长期利益和近期利益正确地结合起来。

环境保护和经济发展协调的方法是：

（1）“结合”论　即把环境保护同经济发展有机地结合起来，具体讲是要求环境保护计划与经济计划相结合，环境规划与城市规划、农业规划相结合，工业污染防治与技术改造相结合；

（2）“同步”论　即环境保护事业与经济发展同步规划、同步实施、同步发展；

（3）“服务”论　即环境保护既要为提高人民生活环境和维护环境资源的永续利用服务，又要为经济发展服务。

在实践中，这三种协调方法要相互结合运用，有机地联系。

第三章　环境经济学基础

第一节　货币的时间价值和等值计算

一、货币时间价值概述

众所周知，钱的“时值”概念（time value of money）就是钱存入银行，可以得到利息，钱投资于项目，可以取得利润，这已被广泛应用于投资决策和企业经营管理中。

在资本主义社会中，一定量的资本，用于投资项目，会带来收益，这种收益量与资本量的比率就是资本或投资项目的净生产率。当年的累积又用来充当下年度的资本而再度带来收益。随着时间的不断推移，一定量资本的净产率又是一种按几何数增长的复利率。而资本初始总表现为货币，所以，资本的净生产率也可以视为投资于社会生产的货币的净生产率。由此可见，货币的时间价值实际上就是资本化的货币的时间价值。

在社会主义生产关系中，资金也总要表现为一定量的货币，资金具有增值性，即带来利润的属性仍然保留着。社会主义经济建设的目的是发展生产，满足人民的需要。为了达到投资的目的，需要讲究经济效益，使投入的资金经过生产劳动，创造新的财富，所以社会主义建设资金同样具有随时间增值的能力，也就是说，货币同样具有时间价值。

应当提出，货币的时间价值的含义并不是指有了货币就会无条件的随时间推移带来价值增值。一定数量的货币如果常年贮藏起来，就没有增值可言，仍为同名量的货币，其价值不变。因此，价值的增值必须基于人们对货币资金的利用，必须投入生产流通领域。

货币的时间价值理论是一种具有广泛实用价值的理论。根据这一原理，计算不同时间货币的现值来对投资进行费用-效益分析的方法早已被广泛使用。近年来，其在东欧一些国家（匈牙利、保加利亚等国）已不同程度地应用。在我国，随着经济体制的改革，对外关系的发展，中外合资企业的出现，货币时间价值理论的采纳和应用也愈来愈重要。

首先，应用这一理论可以使货币资金得到有效利用。人们只有充分认识了货币时间价值的重要意义，才会自觉节约使用货币资金，重视对于货币资金的利用，要求货币资金带来一定的增值，并进而根据增值的程度来检验考核利用货币资金的效果，促使货币资金得到更有效的利用。

其次，有利于投资决策，选择净收益较高的项目进行投资。我国建国初期，市政投资是由财政拨款供给的，是未考虑用于投资项目的货币时间价值的。假定，某建设项目需投资总额为 1000 万元，建设期为三年。现有两个方案，甲方案各年需要的投资额为，第一年 500 万元，第二年 300 万元，第三年 200 万元；乙方案各年需要的投资额为，第一年 200 万元，第二年 300 万元，第三年 500 万元。如不考虑货币的时间因素，就会认为两方案大同小异，总投资额没有差别。但是，如果考虑到资金的占用时间与投资效果成反比关系，建设成果相同，资金占用的时间愈长，则投资效果愈差。从计算结果看，乙方案优于甲方案。

如投资为银行贷款，贷款利率为 8%，则采用甲方案需付利息 76.29 万元，而乙方案只付利息 62.29 万元（发生贷款的当年均假定发生年中，按半年利息计算）。因此，利用货币的时间价值原理，可以帮助鉴别投资方案的经济效果，从而为科学合理地进行投资决策提供

依据。

再次，有利于做好利用贷款的工作。随着我国利用外资项目的增多，如何处理好借用外资的费用与投资效益之间的关系问题已显得愈来愈重要。在可行性研究中就必须考虑到资金的时间因素，它包括三重含义：一是费用和效益的计算，应该属于同一时间区段；二是费用和效益计算所依据的价格是随时间变化的，因此，必须在现有价格的基础上，进行市场预测；三是应用复利计算的折现方法，使在不同点发生的费用和效益之间建立可比性。货币的时间价值原理的应用可以增加人们的时间观念和责任感，扩大考察项目经济效益的视野，提高项目经济效益分析水平，有利于提高项目的经济效益。

二、现金流量的基本要素

建设一个环境工程项目或实施一项环境技术方案的典型过程，包括投资建设和生产经营两个阶段。根据不同阶段现金流出和流入的特点，可将现金流分成不同的经济量。技术经济分析中经常使用的基本经济量有投资、成本、销售收入、利润与税金等。

1. 投资

（1）投资的概念　投资是劳动消耗中反映劳动占用的一个指标。它是花费在工程项目或企业建设上的全部物化劳动和活劳动的总和，或是为实现一项技术方案而花费的一次性支出的资金。投资包括固定资金和流动资金，固定资金是建设和装备一个投资项目所需的一次性支出，而流动资金则相当于经营该项目所需的一次性支出。固定资金与流动资金都必须在投资初期预先垫付。

固定资金是固定资产价值的货币表现。固定资产指的是土地、建筑物、机器、设备、车辆等价值较高、使用期限较长（一般在一年以上）的生产资料。它们在生产过程中始终保持原有的物质形态，其价值则按它使用过程中磨损或折旧的程度逐渐转移到产品中去。随着产品的出售，转移的价值又以货币的形式回到投资者手中。

流动资金是在生产过程和流通过程中供周转使用的物资和货币的总和，是企业进行生产和经营活动的必要条件。流动资金在供、产、销三个阶段以货币、原材料的形式在制品和产成品几种形态同时存在并周而复始地循环。

投资除可按用途和使用方式分为固定资产投资和流动资产投资外，还可按计算范围的不同，分为直接投资、辅助投资和相关投资。直接投资是指花费在产品生产的主要环节上的投资；辅助投资是指花费在为主要生产车间、工段服务的公用设施上的投资；相关投资是指花费在与新建项目相关联的企业或部门的投资，即配合该项目的生产而追加的投资。

（2）总投资及其估算　总投资包括固定资产投资和流动资金投资。固定资产投资包括建筑工程费，设备购置费，安装工程费，设备工器具及家具、用具购置和其他费用；流动资金包括储备资金、生产资金、成品资金和结算及货币资金。

固定资产投资估算分概略估算和详细估算。概略估算一般在资料不充分的情况下采用，如项目可行性研究中的机会研究阶段。常用的概略估算方法有以下几种。

① 单位生产能力投资估算法　用项目生产能力与同类型项目单位生产能力投资额指标的乘积作为估计值。单位生产能力投资额指标是根据对历史数据的调查统计得出的。

② 分项类比估算法　先估算出机器设备部分的投资额（包括购买及运输安装费用），然后按一定比例估出建筑物、构筑物部分的投资及其他投资。

③ 生产规模指数法　用一个表示生产能力及投资之间关系的经验公式来估算：

$$\frac{K_2}{K_1}=\left(\frac{X_2}{X_1}\right)^n \tag{3-1}$$

式中　K_1——已建项目的投资额；

K_2——新建项目的投资额；

X_1——已建项目的生产能力；

X_2——新建项目的生产能力。

由于 n 取 0.6，所以该方法也叫 0.6 指数法。如果知道同类型已建项目的生产能力和投资额，就可根据新项目的生产能力，用式（3-1）估算投资额。

（3）折旧与摊销　固定资产在使用过程中，每年按一定的比例转移到产品中的那部分价值称为折旧。根据固定资产的折旧额，从销售收入中按月提存，用于固定资产再生产的那部分金额称为折旧费（或折旧基金）。固定资产虽然在生产过程中始终保持原有的物质形态，其价值却由于不断磨损而处于不断变化之中。投产时核定的固定资产价值称为原值，固定资产原值扣除折旧以后的价值称为净值。通过提取折旧费对固定资产进行价值形态的补偿，通过更新对固定资产进行实物形态的补偿。

对房屋和建筑物，在用的机器设备、仪器仪表、运输车辆等固定资产，计算折旧的依据为固定资产原值。计算、提取折旧的方法为直线法（亦称平均限法）：

$$\text{年折旧额}=\frac{\text{固定资产原值}-\text{固定资产净残值}}{\text{折旧年限}}$$

固定资产净残值为残值减去清理费后的余额。各类固定资产的净残值为原值的 3%～5%。

折旧率是一定时期内（年、月）固定资产折旧额对固定资产原值的比率，通常以年为计算单位，用百分数表示：

$$\text{年折旧率}=\frac{\text{年折旧额}}{\text{固定资产原值}}\times 100\%$$

可以按折旧与固定资产的关系来理解摊销费与无形资产的关系。例如项目引进技术的技术转让费（包括许可证费、专利费、设计费），在项目投产前一次性支付的部分已作为固定资金的一部分列入总投资。这部分金额应在项目投产后分次摊入成本，称为摊销费。摊销费代表无形资产转移给产品的那部分价值，也在销售收入中加以回收。

因摊销费与折旧费有类似的性质和地位，所以在计算现金流量时，可以把它并入折旧栏目中一并计算。

（4）固定资产残值与流动资金回收　在经济分析所考虑的期限终了，固定资产还可以出卖，换回的价值称为固定资产残值。由于机器设备的出卖还需要一笔拆迁费，所以通常所说的固定资产残值是扣除拆迁费以后的净残值。净残值可为正数，也可为负数。

在项目寿命期终了，流动资金将退出生产领域或流通领域，全部还原成货币资金（流动资金回收）。

2. 成本

（1）一般的成本概念　成本是企业生产经营活动重要的综合性指标。它可以综合地反映技术水平、工艺完善程度、固定资产及流动资金利用状况、生产组织完善程度、劳动生产率水平、产品销售条件和物质技术供应条件及生产组织管理水平等。

成本直接反映劳动消耗，它由企业在生产过程和销售过程的费用组成。商品在生产过程中发生的生产费用是商品的工厂成本。生产费用加上销售费用构成商品的销售成本，亦称产

品成本。

在计算企业总成本时时常使用生产费用要素，生产费用要素包括：原料及主要材料费用，辅助材料费用，替换设备、工业和备件费用，外购燃料费用，外购动力费用，工资，固定资产折旧费，其他费用。

（2）经济决策中的几种成本

① 经营成本　当经济决策考察的范围是技术方案或工程项目实施的全寿命期时，由于已将投资作为现金流出，所以在生产经营阶段的真正成本支出是不包括折旧和摊销的经营成本：

$$\text{经营成本}=\text{产品成本}-\text{折旧}-\text{摊销}$$

② 总成本、平均成本和边际成本

a. 总成本是生产一定数量的产品（或劳务）所支付的费用的总和。它是产量的函数：

$$\mathrm{TC}=f(Q) \tag{3-2}$$

式中　TC——总成本；

Q——产量。

b. 平均成本是总成本除以产量的商，即生产一件产品所支付的平均费用：

$$\mathrm{AC}=\frac{\mathrm{TC}}{Q}=\frac{f(Q)}{Q} \tag{3-3}$$

式中　AC——平均成本。

c. 边际成本（MC）是每增加（或减少）一个单位产量所引起的总成本的变动值，也可以说成是在任一产量水平上，再多生产一件产品所要增加的费用：

$$\mathrm{MC}=\mathrm{TC}_n-\mathrm{TC}_{n-1}=f_n(Q)-f_{n-1}(Q) \tag{3-4}$$

用微分方程表示：

$$\mathrm{MC}=\frac{\mathrm{dTC}}{\mathrm{d}Q}=f'(Q) \tag{3-5}$$

图 3-1 是总成本、平均成本与边际成本随产量变化的函数曲线。

③ 固定成本和变动成本　生产经营过程中之所以发生成本费用是由于投入资本（或称生产要素）引起的，所以生产要素投入的规律和特点也反映在成本上。这种生产要素投入的特点使得在一定产量范围内，有些成本不随产量的变化而变化，有些成本随产量的变化而变化。

在一定产量范围内，不随产量变化而变化的成本称为固定成本，用 FC 表示，如厂房、机器以及保险费、长雇人员工资等。而那些随产量变化而变化的成本称为变动成本，用 VC 表示，如原材料、燃料动力、运输费等。产量为零时变动成本为零。

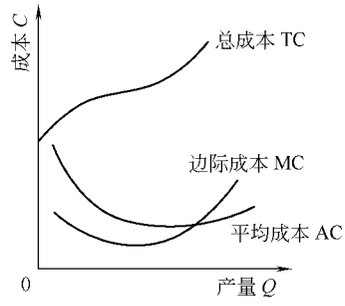


图 3-1　总成本、平均成本与边际成本随产量变化的函数曲线

把总成本、平均成本和边际成本的概念与固定成本和变动成本组合起来，可以得到总成本 TC、总固定成本 TFC、总变动成本 TVC、平均成本 AC、平均固定成本 AFC、平均变动成本 AVC 和边际成本 MC 等 7 个成本概念。它们都是产量的函数。图 3-2 表示这个成本随产量变化的规律，并揭示了它们之间的相互关系。

④ 机会成本　使用某种资源（泛指各种原料、机器设备、土地、资金及劳动力等生产

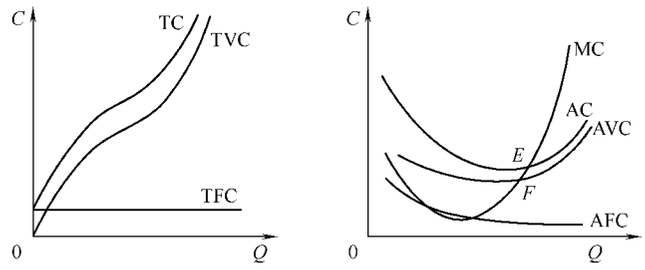


图 3-2　成本随产量变化的规律

投入）的机会成本是按市场价格实际支付的费用，而机会成本不出现在财务账上。

当有限的资源具有多种可选择的用途时，将其投入甲方案就必然放弃乙方案，从而失掉从乙方案获取收益的机会。这个损失应看作是选择和实施甲方案所付出的代价。例如把一笔资金投入一个钢铁厂的建设，就是放弃了把它投入其他项目或把钱投入银行的机会。

因此说，机会成本对生产者来说，是指由于使用某种资源而必须放弃的该种资源其他用途的最高代价。对资源所有者来说，机会成本等于该种资源在一切可能的机会中的最高报酬。例如过去某炼油厂使用国产原油，原油的调拨价格为每吨 110 元，协议价格为每吨 200 元。若这些原油出口，可卖 120 美元 1t。假如出口是原油一切可能用途中带来的收益最高的一种，那么 120 美元就是它的机会成本。

⑤ 沉没成本　沉没成本是指过去已经发生的，与当前决策无关的费用。例如某企业前年用 1 万元购入一台仪器设备。现在车间考虑要用另一台仪器来更新，对于是否更新的决策，前年的 1 万元支出是沉没成本，与决策无关。

3. 销售收入、利润与税金

（1）销售收入与企业纯收入　销售收入是企业向社会出售产品及劳务的货币所得，等于销售量与销售价格的乘积。企业的销售收入与它同期的总产值是不同的。总产值是指已加工制造完毕的成品、半成品和正在加工制造的在制品，按相应的不变价格计算的总价值，是生产阶段效益的反映。销售收入是产品经过流通领域之后给企业带来的真正经济效益。

企业纯收入是销售收入减去销售成本以后的盈余，代表了劳动者新创造的那部分价值。

$$\text{纯收入} = \text{销售收入} - \text{销售成本}$$

（2）利润与税金　利润与税金是对企业纯收入进行分配的不同形式。

税收是国家凭借政治权利参与国民收入分配与再分配的一种方式，带有强制性和法律的严肃性。

税金是国家按法律规定，向有纳税义务的企业单位和个人征收的资金，是国家的财政收入。

利润是因资产所有关系而分配到的纯收入中的一部分。利润率把利润表现为总资本的产物，而剩余价值率转化为利润率，才使剩余价值转化为利润。

4. 现金流

在经济学的研究中，实际的经济方案都包含着一些不同时刻发生的货币资金的输入和输出，所以现金流一般是一个在不同时刻具有不同值的多重资金流通的情况。为了便于研究，可以用一种简单的图解法把一个不同时刻的多重货币流以简洁而清晰的方式表示出来，这就是所谓现金流。

现金流是把资金作为时间的函数，用图形表示出来，横轴代表时间，自左向右表示时间的推移，每一格代表一个时间单位（年、月、日）。应该注意，第 n 格的终点和第 $n+1$ 格的起点是相重合的。从横轴上引出一些带箭头的垂直线段，代表货币资金值。在时间零点的资金就是资金的现时值，垂直线段向上表示资金输入，而垂直线段向下，则表示资金输出。现金流量图（cash flow diagram）与立脚点有关。图 3-3（a）表示借款人的立脚点；图 3-3（b）表示贷款人的立脚点。

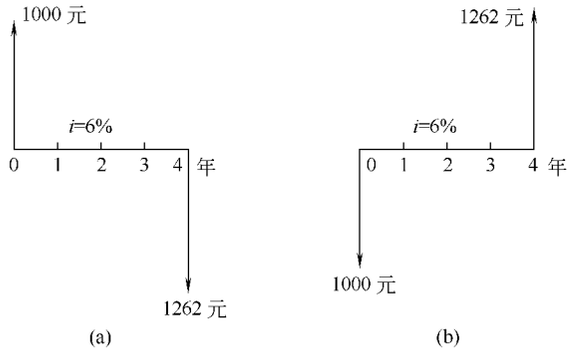


图 3-3　两种立脚点的现金流量图

（a）借款人的现金流量图；（b）贷款人的现金流量图

现金流是一种很有用的分析工具。事实上，工程经济学对投资过程的研究就是分析各种投资过程的现金流，因为对它的分析可以揭示某一投资过程的一些重要经济特性。

三、利息种类及其计算

利息可分为单利和复利两种。利息可以按年也可以按不等于一年的周期计算。用以表示计算利息的时间单位称为计息周期，以下暂时假定计息周期为一年。

1. 单利

每期均按原始本金计息，这种计息方式称为单利。在以单利计息的情况下，利息与时间是线性关系，不论计息期数为多大，只有本金计算利息，而利息不计利息。

如以 K 表示本金，i 表示利率，n 表示计息期数，I 代表所付或所收的总利息，则

$$I=Kin \tag{3-6}$$

本利和 F 则为

$$F=K(1+in) \tag{3-7}$$

假如以单利方式借入一笔资金 1000 元，规定年利率为 6%，则在第 1 年末时利息应为

$$I=1000\times0.06\times1=60 \text{ 元}$$

年末应付的本利和为

$$F=1000\times(1+0.06\times1)=1060 \text{ 元}$$

如果借入资金 1000 元，借期为 4 年，则第 4 年末应偿还的本利和为

$$F=1000\times(1+0.06\times4)=1240 \text{ 元}$$

2. 复利

将上期的利息转为下期的本金，下期将本利和总额计息，这种计息方式称为复利。在以复利计息的情况下，除本金计息外，利息再计利息，复利的计算公式如下：

$$I=K[(1+i)^n-1] \tag{3-8}$$

$$F=K(1+i)^n \tag{3-9}$$

上例如果按复利计息，则第 4 年末应偿还的本利和为

$$F=1000\times(1+0.06)^4=1262.48 \text{ 元}$$

从以上可以看出，同一笔借款，在 i、n 相同的情况下，用复利计算出的利息金额数比用单利计算出的利息金额数大，当所借本金愈大、利率愈高、年数愈多时，两者差距就愈大。

本书利息公式采用的符号意义如下：

i——利率；

n——计息期数；

P——现在值，是指未来某一特定金额的现在价值，即相对于将来值的任何较早时间的价值；

F——将来值，即相对于现在值的任何以后时间的价值，它们之间的关系是现在值＋复利利息＝将来值，将来值－复利利息＝现在值；

A——n 次等额支付系列中的一次支付，在各个计息期末实现。

根据现金的不同支付方式介绍主要的复利计算公式如下。

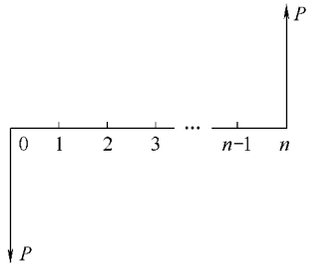


图 3-4　一次支付复利现金流量图

（1）**一次支付复利公式**　如果有一项资金 P 按年利率 i 进行投资，几年以后本息和应为多少？这项财务的安排可用现金流量图 3-4 所示，n 年末的将来值 F 为

$$F=P(1+i)^n \tag{3-10}$$

为了计算方便，我们可以按照不同的利率和计息期数 n 计算出 $(1+i)^n$ 值，列成一个系数表。这个系数叫做一次支付复利系数，通常采用三种符号表示，即 Spcaf、Fci、$(F/Pi,\ n)$ 表示，第三种采用较多，所以上式（3-10）可以写成：

$$F=P(F/Pi,n) \tag{3-11}$$

例如，如果在第 1 年年初以年利率 6％投资 1000 元，则到第 4 年年末，

$$F=P(1+i)^n=P(F/Pi,n)=1000\begin{pmatrix}F/P6,4\\1.262\end{pmatrix}=1262\text{ 元}$$

（2）**一次支付现值公式**　如果已知未来款额 F，以复利率 i，求 n 值前的现值 P，则公式如下：

$$P=F\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right] \tag{3-12}$$

式中 $\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right]$——一次支付现值系数或“折现系数”。

$$\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right]=(P/Fi,n)$$

并用 $(P/Fi,\ n)$ 代表，上式（3-12）可写成：

$$P=F(P/Fi,n) \tag{3-13}$$

支付现值系数可用 ppwf、Fpw 及 $(P/Fi,\ n)$ 三种符号表示，而第三种形式采用较多。

例如，为了在 4 年后得到资金 1262 元，按年利率 6％计算，问现在必须投资多少？

$$P=F\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right]=1262\begin{pmatrix}P/F6,4\\0.7921\end{pmatrix}=1000\text{ 元}$$

（3）**等额支付系列复利公式**　在环境经济研究中常常需要求出在若干期的期末支付等额的资金最后所积累起来的资金，这种情况可用图 3-5 表示。

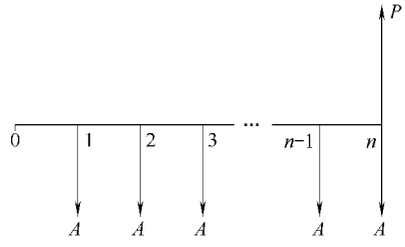


图 3-5　等额支付现金流量图

在利率为 i 的情况下，几年来积累的资金

$$F=A(1)+A(1+i)+\cdots+A(1+i)^{n-2}+A(1+i)^{n-1} \tag{3-14}$$

以（$1+i$）乘上式，可得

$$F(1+i)=A(1+i)+A(1+i)^2+\cdots+A(1+i)^{n-1}+A(1+i)^n \tag{3-15}$$

由式（3-15）减去式（3-14），得

$$F(1+i)-F=-A+A(1+i)^n$$

则

$$F=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right] \tag{3-16}$$

$\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]$的值叫作等额支付系列复利系数，又称年金终值系数，还可表示为$\begin{cases}\text{uscat}\\ \text{Frs}\end{cases}$，通常用（$F/Ai$，$n$）表示，则公式（4-16）可表示为

$$F=A(F/Ai,n) \tag{3-17}$$

例如，连续 5 年每年年末存入 100 元，按年利率 6%计算，第 5 年年末可得到的本利和为

$$F=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]=100\begin{pmatrix}F/A6,5\\ 5.637\end{pmatrix}=563.70\text{ 元}$$

又例如，在 6 年内每年年末投入等额资金 500 万元，试求第 6 年年末能得到金额是多少？

$$F=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]=500\begin{pmatrix}F/A6,6\\ 6.975\end{pmatrix}=500\times6.975=3487.50\text{ 万元}$$

（4）等额支付系列积累基金公式　由式（3-16）得

$$A=F\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right] \tag{3-18}$$

$\left[\frac{1}{(1+i)^n-1}\right]$叫作等额支付系列积累基金系数，也可以叫作资金存储系数，可以用以下三种符号表示：

$$\begin{cases}\text{sfdf}\\ \text{Fsr}\\ (A/Fi,n)\end{cases}$$

通常采用$\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=$（$A/Fi,n$）表示，所以式（3-18）又可表示为

$$A=F(A/Fi,n) \tag{3-19}$$

应用该式计算为在若干年后得到一项将来资金 F，从现在起每年年末必须存储若干等额资金 A。

例如，如果要在 5 年之后得到资金 563.70 元，按年利率 6%计算，从现在起连续 5 年每年年末必须存储的资金为

$$A=F\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=F(A/Fi,n)=563.70\begin{pmatrix}A/F6,5\\ 0.1774\end{pmatrix}=100\text{ 元}$$

例如，通过每年投入等额资金的办法，在第 5 年年末得到资金 1900 万元，投资收益率 $i=6\%$，试求每年投入等额资金 A 是多少？

$$A=F\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=F(A/Fi,n)=1900\begin{pmatrix}A/F6,5\\ 0.1774\end{pmatrix}=337.06\text{ 万元}$$

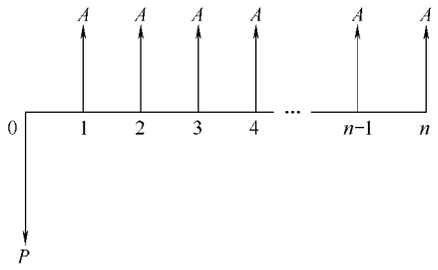


图 3-6　等额支付系列资金恢复流量图

(5) 等额支付系列资金恢复公式　如果某单位以年利率 i，现在即存入银行一项资金 P，希望在今后几年内把本利和在每年年末以等额资金 A 的方式取出，这项财务活动我们可以用图 3-6 表示。

由前述已知

$$A=F\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]$$

将 $F=P(1+i)^n$ 代入上式，即得等额支付系列资金恢复公式：

$$A=P(1+i)^n\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right] \tag{3-20}$$

式中 $\left[\frac{i\ (1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right]$——等额支付系列资金恢复系数，用符号 $\begin{cases}\mathrm{Crf}\\ \mathrm{Fpr}\\ (A/Pi,\ n)\end{cases}$ 表示，通常用 $(A/Pi,\ n)$ 表示。

例如现在以年利率 15%投资 10000 万元，这笔投资可在 7 年内全部回收，试求每年的定额收益是多少？

$$A=P\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right]=10000(A/P15,7)=10000\begin{pmatrix}A/P15,7\\ 0.24036\end{pmatrix}=2403.6\ \text{万元}$$

(6) 等额支付系列现值公式　假如在几年内投资收益率为 i，每年末可得定额收益 A，试求当初投资 P 是多少？

由下式可得 P 与 A 之间的关系 $\left(\text{因 } F=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]\right)$：

$$P=F\left[\frac{1}{(1+i)^n}\right]=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right] \tag{3-21}$$

式中 $\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right]$——等额支付系列现值系数，常用符号 $\begin{cases}\mathrm{uspwf}\\ \mathrm{Frp}\\ (P/Ai,\ n)\end{cases}$ 表示，采用较多的为 $(P/Ai,\ n)$。

例如，今后 8 年每年年末可以支付 154.72 元，按年利率 5%计算，其现值为

$$P=A\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right]=154.72(P/A5,8)=154.72\begin{pmatrix}P/A5,8\\ 0.4632\end{pmatrix}=1000\ \text{元}$$

(7) 均匀梯度系列公式　假如一个现金流量如图 3-7 所示，第 1 年年末的支付是 A_1，第 2 年年末的支付是 A_1+G，第 3 年年末的支付是 A_1+2G，…，第 n 年年末的支付是 $A_1+(n-1)G$。

如果能把图 3-7 所示的现金流量转换成等额支付系列的形式，那么根据等额支付系列复利公式和等额支付系列现值公式很容易求得 n 年年末的将来值 F 和零年的现值 P。

比较简便的方法是把一个均匀增加（减少）的支付系列看作是由下列两系列组成：一个是等

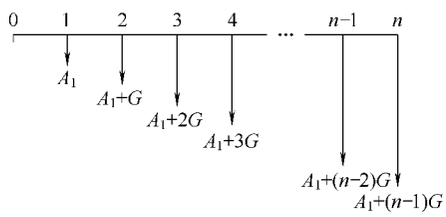
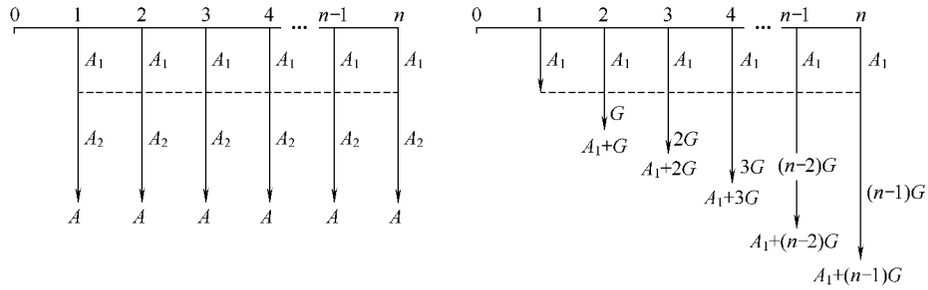


图 3-7　均匀梯度增加支付系列



(a) 均匀增加支付系列　　(b) 均匀增加的支付系列的转换

图 3-8　均匀梯度系列

额支付系列，其等额的年末支付是 A_1；另一个是由 0、G、$2G$、…、$(n-1)G$ 组成的梯度系列。如果能把 0、G、$2G$、…、$(n-1)G$ 组成的梯度系列转换成 A_2，那么所要求的等额支付的年末支付 $A=A_1+A_2$，见图 3-8。

在这里 A_1 是已知的，A_2 可以通过下列方法求得：先把梯度系列 0、G、$2G$、…、$(n-1)G$ 分解成 $n-1$ 格年末支付为 G 的等额支付，并通过等额支付复利公式可求得将来值 F_2，再通过等额支付系列积累基金公式求得 A_2，见图 3-9。

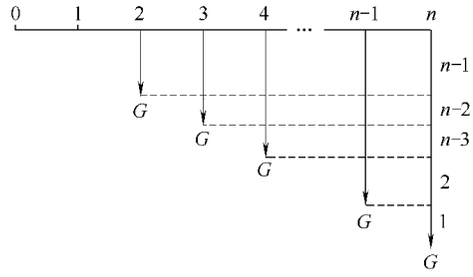


图 3-9　梯度系列的分解

梯度系列的将来值

$$\begin{aligned}F_2&=G(F/Ai,n-1)+G(F/Ai,n-2)+\cdots+G(F/Ai,2)+G(F/Ai,1)\\&=G\left[\frac{(1+i)^{n-1}-1}{i}\right]+G\left[\frac{(1+i)^{n-2}-1}{i}\right]+\cdots+G\left[\frac{(1+i)^{2}-1}{i}\right]+G\left[\frac{(1+i)-1}{i}\right]\\&=\frac{G}{i}[(1+i)^{n-1}+(1+i)^{n-2}+\cdots+(1+i)^{2}+(1+i)-(n-1)\times 1]\\&=\frac{G}{i}[(1+i)^{n-1}+(1+i)^{n-2}+\cdots+(1+i)^{2}+(1+i)+1]-\frac{nG}{i}\end{aligned}$$

上式方括号中的各项之和等于 n 年的等额支付系列复利系数，所以

$$F_2=\frac{G}{i}\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]-\frac{nG}{i} \tag{3-22}$$

而

$$A_2=F_2\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=\frac{G}{i}\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right]\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]-\frac{nG}{i}\times\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]$$

$$A_2=\frac{G}{i}-\frac{nG}{i}\times\left[\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=\frac{G}{i}-\frac{nG}{i}(A/Fi,n)=G\left[\frac{1}{i}-\frac{n}{i}(A/Fi,n)\right] \tag{3-23}$$

这种把梯度支付转化为等额支付形式的运算系数 $\left[\frac{1}{i}-\frac{n}{i}\times\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]$ 称为梯度系数。

$$\left[\frac{1}{i}-\frac{n}{i}\times\frac{i}{(1+i)^n-1}\right]=\left[\frac{1}{i}-\frac{n}{i}(A/Fi,n)\right]$$

通常采用的符号为 $(A/Gi,\ n)$。

$$A_2=G(A/Gi,n)$$

把 A_1 和 A_2 相加就得到 A

$$A=A_1+G(A/Gi,n) \tag{3-24}$$

例如假定某人第 1 年把 1000 元存入银行，以后 9 年每年递增存款 200 元，如利率 8%，则这笔存款折算成 10 年的等额支付系列，相当于每年存入多少？

$$A=A_1+G(A/Gi,n)=1000+200\begin{pmatrix}A/G8,10\\3.8713\end{pmatrix}=1774\text{ 元/年}$$

梯度系数也可用来计算均匀减少的系列。

例如某人第 1 年存入银行 5000 元，以后 5 年每年递减 600 元，如利率为 9%，则相当于这个系列的等额年末支付为

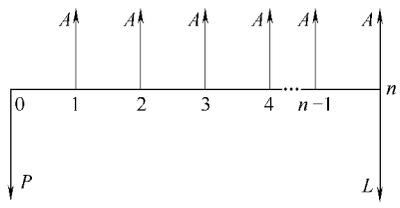


图 3-10　有残值时的资金恢复公式图解

$$A=5000-600\begin{pmatrix}A/G9,6\\2.2493\end{pmatrix}=3650\text{ 元/年}$$

（8）在有残值的情况下等额资金恢复公式　在有残值的情况下资金恢复公式图解见图 3-10。

很明显，这里需要每年等额偿付的并非全部投资 P，因为其中一部分（L）将在期末收回。由于残值是在 n 年末期收回，根据利率 i 可将其折算成 n 期内每年等额存储基金，并从等额支付值中扣除，即可得出有残值时的资金恢复公式。

$$A=P\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}-L\frac{i}{(1+i)^n-1}$$

因

$$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}-i=\frac{i}{(1+i)^n-1}$$

故可证明如下：

$$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}-i=\frac{i(1+i)^n-i(1+i)^n+i}{(1+i)^n-1}=\frac{i}{(1+i)^n-1}$$

得

$$A=P\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}-L\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}-i\right]$$

$$A=(P-L)\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}+L\cdot i$$

$$A=(P-L)(A/Pi,n)+L\cdot i \tag{3-25}$$

例如某项投资现值 P 为 20000 元，10 年末残值为 5000 元，要求按投资收益率 i 为 10% 来等额偿还投资，试求每年等额偿付多少？

$$A=(P-L)(A/Pi,n)+L\cdot i=(20000-5000)(A/P10,10)+5000\times10\%$$

$$=15000\begin{pmatrix}A/P10,10\\0.16275\end{pmatrix}+500=2941.25\text{ 元}$$

即每年等额偿付 2941.25 元。

（9）名义利率（nominal interest rate）和有效利率（effective interest rate）　以上所述是把计息期作为 1 年。但是实际上计息期可以规定为半年、3 个月或 1 个月。当利率的时间单位与计息期不一致时，就出现了名义利率和有效利率的概念。例如每半年计息一次，每半年计息期的利率为 3%，3%就是实际计息用的利率，也是资金在计息期所发生的实际利率，称为有效利率。有效利率都是指的计息期的利率，当计息期为 1 年时，此时的有效利率称为年有效利率；当计息期短于 1 年时，为以计息期的有效利率乘上一年中的计息期数所得到的年利率，如上例 3%×2=6%，6%就称为年名义利率，但实际计息中不采用这个利率，它

只是习惯上的表示形式。例如每月计息一次，月利率为1%，习惯上称为“年利率为12%，每月计息一次”。

通常所说的“年利率”都是指“名义利率”，如果后面不对计息期加以说明，则表示一年计息一次，此时的年利率也就是“年有效利率”。

有效利率与名义利率的关系式为

$$i=\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}-1$$

① **离散式复利**（discrete interest rate）　按期（年、季、月和日）计息的方法称为离散式复利。一年中计算复利的次数愈频繁，则年有效利率比名义利率愈高。例如年利率6%，每半年计息一次，即资金1元按利率3%，每半年计息一次，到第1年年末为

$$F=1\times(1.03\times1.03)=1\times(1.03)^{2}=1.0609\text{ 元}$$

这1元的实际利息是1.0609－1.0000＝0.0609元，即有效利率是6.09%，大于名义利率6%。

例如上例中，每半年计息一次现改为每月计息一次，则月有效利率为0.5%，1元资金到第1年年末的本利和为

$$F=1\times(1.005)^{12}=1.0617\text{ 元}$$

这1元的实际利息是0.0617元＞0.0609元，因为一年中的计息次数频繁了。

如果名义利率表示为r，一年中的计息次数为n次，根据一次支付复利系数公式，年末本利和为

$$F=P\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n} \tag{3-26}$$

而利息，即为本利和与本金之差为

$$P\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}-P$$

根据定义，利息与本金之比为利率，则年有效利率为

$$i(\text{年有效利率})=\frac{P\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}-P}{P}=\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}-1 \tag{3-27}$$

假如某人拿1000元进行投资，时间为10年，年利率6%，每季度计息一次，试问10年末的将来值为多少？

每年计息4次，10年的计息期为4×10＝40次，每一计息期的有效利率为6%/4＝1.5%，根据$F=P(F/Pi,\ n)$

$$P=1000\begin{pmatrix}F/P1.5,40\\1.814\end{pmatrix}=1.814\text{ 元}$$

其名义利率为6%，每年的计息期为$n=4$，年有效利率为

$$i=\left(1+\frac{0.06}{4}\right)^{4}=6.1364\%$$

② **连续利息**（continuous interest rate）　连续计息法则是把资金运动的周期看作是无限小，计息次数趋于无限大（∞），也就是等于没有时间间隔，资金在每一瞬间都增值。

年有效利率为

$$i=\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}-1$$

但是由于　$$\left(1+\frac{r}{n}\right)^{n}=\left[\left(1+\frac{r}{n}\right)^{\frac{n}{r}}\right]^{r}$$

而　$$\lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{r}{n}\right)^{\frac{n}{r}}=e$$

因而　$$i=\lim_{n\to\infty}\left[\left(1+\frac{r}{n}\right)^{\frac{n}{r}}\right]^{r}-1=e^{r}-1$$

就是说，如果复利是连续地计算，则

$$i(\text{年有效利率})=e^{r}-1 \tag{3-28}$$

式中　e——自然对数的底，其值为 2.71828，其余符号意义同前。

连续复利 6%的有效利率为

$$i=e^{r}-1=(2.71828)^{0.06}-1=6.1837\%$$

有效利率对于描述一年之内利上滚利的复利计算效果是有用的。

表 3-1 表示了名义利率为 6%分别按年、按半年、按季、按月、按日、连续地计算复利，其相应的有效利率。

表 3-1　名义利率为 6%的有效利率

计算复利的方式	一年中的计息期数	各期的有效利率	年有效利率
按年	1	6.0000%	6.0000%
按半年	2	3.0000%	6.0900%
按季	4	1.5000%	6.1364%
按月	12	0.0500%	6.1678%
按日	365	0.0164%	6.1799%
连续地	∞	0.0000%	6.1837%

在投资方案比较时，如果各方案均采用相同的计算期和名义利率，由于它们计算利息次数不同，彼此也不可比，应先将年名义利率化成年有效利率后再进行计算和比较。

第二节　环保项目的经济效果评价

环保项目的投资方案经济效果评价，往往可以采取多种不同的技术方案。在特定的经济技术条件下，不同的技术方案所需要的各种资源的投入和所带来的有效成果可能是不同的。多数情况下，这些资源投入和有效成果可以用货币单位来计量，所以，从经济角度来看，技术方案可以归结为投资方案，即以一定的资金投入获取相应的经济收益。投资方案的经济效果指所需要投资与可获收益之间的比较。评价各种投资方案的经济效果是经济分析与决策的一个重要内容。

环保项目投资方案经济效果评价主要解决两个问题：第一，看投资方案的经济效果是否可以满足某一绝对检验标准的要求，即解决方案的“筛选”问题；第二，对于多种备选方案，看哪个方案的经济效果更好，即解决方案的“排队”和“择优”问题。经过长期的研究与实践，人们提出了多种投资方案经济效果评价的方法，这些方法适用于各种不同的方案评价问题。下面介绍几种主要的评价方法。

一、现值法评价环保项目

现值法是把环保项目的投资方案在计算期内的现金流出与流入通过资金的等值计算全部折算成现值，根据累计的收益与费用现值的大小评价方案的经济效果。现值法常用的评价指

标有净现值、净现值率和费用现值。

1. 净现值（net present value，简称 NPV）

净现值指整个方案计算期内累计的净现金流现值，换句话说，就是环保项目总收入现值与总支出现值之差。计算公式为

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} NCF_t(P/Fi,t) = \sum_{t=0}^{n} (B_t - C_t - K_t)(P/Fi,t) \tag{3-29}$$

式中　NCF_t——第 t 年的净现金流量，即第 t 年的现金流入减去现金流出；

B_t——第 t 年的项目收入；

C_t——第 t 年的项目经营成本；

K_t——第 t 年的投资支出；

n——方案计算年限；

i——能反映资金时间价值的标准折现率。

如果方案的净现值大于零，则说明该方案投资能够取得满意的经济效果，在若干备选方案中，净现值最大的方案经济效果最佳。

【例 3-1】　某环境企业拟新上一条生产线，投资 500 万元，当年建成投产。第 1 年产品销售收入 240 万元，经营成本 150 万元，以后每年产品销售收入可达 480 万元，年经营成本 300 万元，销售税金为销售收入的 10%，使用寿命为 10 年，期末设备残值为 50 万元，如果取标准折现率 $i=12\%$，计算该方案的净现值，并判断该方案经济上是否可行。

【解】　现金流出包括投资、经营成本及税金，现金流入包括销售收入与设备残值回收。

第 1 年的净现金流为

$$240-240\times0.1-150=66 \text{ 万元}$$

第 2 年至第 9 年的净现金流为

$$480-480\times0.1-300=132 \text{ 万元}$$

第 10 年的净现金流为

$$480-480\times0.1-300+50=182 \text{ 万元}$$

图 3-11 为该方案的现金流量图。

$$\begin{aligned} NPV &= \sum_{t=0}^{10} NCF_t(P/F12,t) \\ &= -500+66(P/F12,1)+132(P/A12,8)\times \\ &\quad (P/F12,1)+182(P/F12,10) \\ &= 202.97 \text{ 万元} \end{aligned}$$

NPV＞0，所以该项目经济上是可行的。

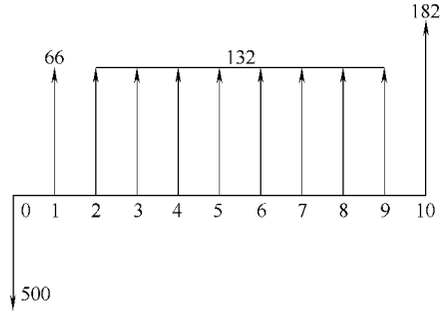


图 3-11　例 3-1 的现金流量图

通常，计算净现值的基准时，点选在初始投资年份的情况下，如果改变基准点时，净现值的大小会发生变化，但正负号不变，因此评价结论不会改变。

净现值指标用于多方案选择时，一般要求各方案计算期一致。

2. 净现值率（NPVR）

净现值指标用于多方案比选时，若各方案计算期一致，则净现值最大的方案为最优方案。不考虑投资额的大小。这里面隐含着一个假定，即按照与标准折现率相对应的资金成

本，可以得到足够的资金。如果相对于可能的投资机会，可得到的资金是有限的，在评价中就必须考虑单位资金的利用效率。通常用净现值率作为净现值的辅助指标，以反映单位资金的利用效率。净现值率是项目净现值与总投资现值之比，表示单位投资现有值所能到来的净现值，计算公式为

$$\mathrm{NPVR}=\frac{\mathrm{NPV}}{\sum_{t=0}^{n}K_t(P/Fi,t)} \tag{3-30}$$

显然，在资金有限的条件下，NPVR 大的方案比较好。在例 3-1 中，

$$\mathrm{NPVR}=\frac{202.97}{500}=0.406$$

3. 费用现值（PVC）

用净现值指标评价技术方案的经济效果，要求用货币单位计算项目的收益，如销售收入、成本节约额等。但是有些环保项目的收益难以用货币单位直接计算，如安全保障、工人劳动条件的改善等。对于这类项目，若各备选方案能够满足相同的需要，则只需比较它们的投资与经营费用。对于可以用货币单位计算收益的项目，如果各备选方案逐年收益相等，也可以略去对收益的计算，按总费用最小的原则进行方案比选。费用现值指标主要用于这两类项目的方案比选。费用现值的计算公式为

$$\mathrm{PVC}=\sum_{t=0}^{n}(K_t+C_t)(P/Fi,t) \tag{3-31}$$

【例 3-2】 某厂现有 4 种环境治理方案，且这 4 种方案的标准利率 $i=8\%$，寿命期为 5 年，各方案的投资与年经营费用如表 3-2 所示。试按费用现值指标选出最优方案。

表 3-2　例 3-2 的原始数据

方　案	1	2	3	4
投资/万元	1800	2545	3340	4360
年经营费用/万元	900	590	450	360

【解】 $\mathrm{PVC}_1=1800+900(P/A8,15)=9503$ 万元

$\mathrm{PVC}_2=2545+590(P/A8,15)=7595$ 万元

$\mathrm{PVC}_3=3340+450(P/A8,15)=7192$ 万元

$\mathrm{PVC}_4=4360+360(P/A8,15)=7441$ 万元

方案 3 费用现值最小，为最优方案。

二、年值法评价环保项目

用现值法进行方案比选时，如果所有的备选方案寿命期相同，可直接比较。对于满足同一用途的备选方案，若各方案寿命期不等，则需要确定一个共同的计算期。通常假定备选方案中的一个或若干个方案以同样规模重复若干次，取各备选方案寿命期的最小公倍数作为共同的计算期，这样做是比较麻烦的。

年值法是将各方案在其寿命期内的现金流按某一给定的标准折现率折算成等额年值进行比较。因为一个方案无论重复多少次，其年值是不变的，所以年值法可以认为是方案的无限重复。对于寿命不等的备选方案，使用年值法比选，可以使方案之间具有可比性。年值法常用的评价指标有净年值和费用年值。

1. 净年值（NAV）

将净现值折算成等额年金就是净年值，净年值的计算公式为

$$NAV = NPV(A/Pi,n) = \left[\sum_{t=0}^{n}(B_t - C_t - K_t)(P/Fi,t)\right](A/Pi,n) \tag{3-32}$$

对于特定项目而言，净年值与净现值的评价结果是等价的。适用净现值的一切分析，对净年值都适用；$NAV>0$，即认为方案具有满意的经济效果，可以通过绝对标准的检验，进行多方案比选时，NAV 大者为优。

【例 3-3】 设标准折现率为 10%，比较下列两个投资方案，原始数据如表 3-3 所示。

表 3-3　例 3-3 的原始数据

方　案	初始投资/元	年经营费用/元	年收入/元	寿命/年	期末残值/元
1	10000	2200	5000	5	2000
2	15000	4300	7000	10	0

【解】 方案 1　$NAV_1 = 5000 - 2200 - 10000(A/P10,5) + 2000(A/F10,5) = 489.6$ 元

方案 2　$NAV_2 = 7000 - 4300 - 15000(A/P10,10) = 258.75$ 元

两个方案的净年值均大于零，都能通过绝对标准的检验，但 $NAV_1 > NAV_2$，说明方案 1 优于方案 2。

2. 费用年值（AC）

将费用现值折算成等额年金就是费用年值，费用年值的计算公式为

$$AC = PVC(A/Pi,n) = \left[\sum_{t=0}^{n}(K_t + C_t)(P/Fi,t)\right](A/Pi,n) \tag{3-33}$$

费用年值主要用于对可以满足相同需要，但寿命期不等的备选方案进行比选，费用年值最低的方案为最优方案。

【例 3-4】 为满足工厂对压缩空气的需要，有两种型号的空气压缩机可供选择，如果标准折现率为 15%，确定应选用哪种型号的压缩机如表 3-4 所示。

表 3-4　例 3-4 的原始数据

压缩机型号	投资/元	年运行费用/元	期末残值/元	寿命/年
Ⅰ	3000	2000	500	6
Ⅱ	4000	1600	0	9

【解】　$AC_Ⅰ = 3000(A/P15,6) - 500(A/F15,6) + 2000 = 2735.6$ 元

$AC_Ⅱ = 4000(A/P15,9) + 1600 = 2438.3$ 元

$AC_Ⅱ < AC_Ⅰ$，所以应选用Ⅱ型空气压缩机。

三、投资收益率法评价环保项目

使用现值法和年值法评价环保项目投资方案的经济效果，需要事先给定一个标准折现率，这个标准折现率反映了投资者所希望达到的单位投资年均收益水平。净现值与净年值大于零，表明单位投资的平均收益水平高于标准折现率。但现值法与年值法没有直接给出单位投资的实际年均收益水平。如果希望了解投资方案单位投资的实际年均收益水平，则需要使用投资收益率法进行方案的经济效果评价。投资收益率法分为动态投资收益率法和静态投资

收益率法，前者考虑了资金的时间价值，后者则不考虑。动态投资收益率法的评价指标有内部收益率和外部收益率。静态投资收益率法常用的评价指标有投资利润率、投资利税率和投资净收益率。

1. 内部收益率（internal rate of return，IRR）

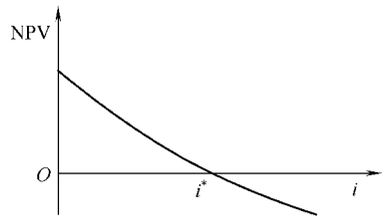


图 3-12　NPV 函数曲线

（1）**内部收益率的概念与计算方法**　从净现值的计算公式 $NPV=\sum_{t=0}^{n}NCF_t(P/Fi,t)$ 看来，对于特定的投资方案而言，标准折现率 i 取值不同，直接影响到 NPV 的大小。如果将折现率看作一个变量，NPV 与折现率 i 的关系用函数可表示为

$$NPV=f(i)$$

称为 NPV 函数。对于一般的投资方案，NPV 函数是一个单调减函数（图 3-12）。

NPV 函数曲线与横坐标轴交于 i^*，即当 NPV＝0 时，$i=i^*$。i^* 就是投资方案的内部收益率 IRR。

IRR 可以通过求解下列方程得到：

$$\sum_{t=0}^{n}NCF_t(P/FIRR,t)=0 \tag{3-34}$$

或

$$\sum_{t=0}^{n}(B_t-C_t-K_t)(1+IRR)^{-t}=0 \tag{3-35}$$

内部收益率反映了投资方案在整个项目寿命期内的平均资金盈利能力。对内部收益率的经济涵义还可以这样解释：在利率为 IRR 的条件下，在整个项目寿命期内，始终存在着未被收回的投资，而在项目寿命期终了时，投资恰恰被完全收回。式（3-35）是个分式方程，不易直接求解，通常用“试算内插法”求解，做法如下：

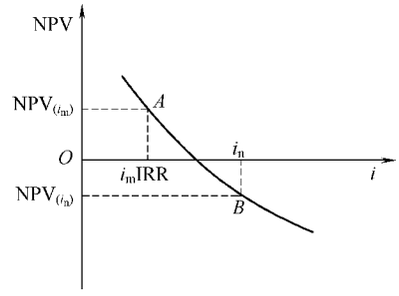


图 3-13　试算内插法求 IRR

先给定一个折现率 i_1，求出相应的 NPV(i_1)，若 NPV(i_1) 为正，说明 IRR＞i_1，若 NPV(i_1) 为负，说明 IRR＜i_1，根据这个信息，将折现率修正为 i_2，求出 NPV(i_2)，NPV(i_2) 应较 NPV(i_1) 更接近零，反复试算，逐步逼近，最后可得到比较接近的两个折现率 i_m、i_n，NPV(i_m)＞0，NPV(i_n)＜0，再用直线插值法确定 IRR 的近似值（图 3-13）。

把 NPV 函数曲线的 AB 段近似看成直线，根据形似三角形原理

$$\frac{NPV(i_m)}{NPV(i_m)-NPV(i_n)}=\frac{IRR-i_m}{i_n-i_m}$$

$$IRR=i_m+\frac{NPV(i_m)(i_n-i_m)}{NPV(i_m)-NPV(i_n)} \tag{3-36}$$

计算出的内部收益率应与给定的标准收益率（即年值法和现值法中的标准折现率）相比较，若内部收益率大于标准收益率，说明该方案在经济上是可行的。若进行多方案比较，以内部收益率大的方案为优。

【例 3-5】　根据例 3-1 给出的数据，计算方案的内部收益率。

【解】 NPV＝－500＋66(P/Fi,1)＋132(P/Ai,8)(P/Fi,1)＋182(P/Fi,10)

先取 i_1＝15%进行试算，

NPV(i_1)＝－500＋66(P/F15,1)＋132(P/A15,8)(P/F15,1)＋182(P/F15,10)＝117.50

NPV(i_1)＞0，说明 IRR＞15%。

再取 i_2＝20%试算，

NPV(i_2)＝－500＋66(P/F20,1)＋132(P/A20,8)(P/F20,1)＋182(P/F20,10)＝6.49

NPV(i_2)＞0，说明 IRR＞20%。

再取 i_3＝22%试算，

NPV(i_3)＝－500＋66(P/F22,1)＋132(P/A22,8)(P/F22,1)＋182(P/F22,10)＝－29.39

NPV(i_3)＜0，说明 IRR＜22%。

用插值法求 IRR

$$\mathrm{IRR}=0.20+\frac{6.49\times(0.22-0.20)}{6.49+29.39}=20.36\%$$

该方案的内部收益率为 20.36%。

用内插法求 IRR，误差大小与 i_m-i_n 的大小关系很大，i_m-i_n 过大，就难以用直线段近似代替 NPV 函数曲线的相应弧线，为控制误差，i_m-i_n 一般不应超过 5%。

(2) 关于内部收益率指标的讨论　对于任何一个环保投资项目，如果各年的净现金流量为 NCF_t(t＝1，2，…，n)，根据式 (3-34)，求 IRR 的方程应为

$$\mathrm{NCF}_0+\frac{\mathrm{NCF}_1}{(1+\mathrm{IRR})}+\frac{\mathrm{NCF}_2}{(1+\mathrm{IRR})^2}+\cdots+\frac{\mathrm{NCF}_{n-1}}{(1+\mathrm{IRR})^{n-1}}+\frac{\mathrm{NCF}_n}{(1+\mathrm{IRR})^n}=0$$

令 $x=\dfrac{1}{1+\mathrm{IRR}}$，方程可化为

$$\mathrm{NCF}_n x^n+\mathrm{NCF}_{n-1}x^{n-1}+\cdots+\mathrm{NCF}_2 x^2+\mathrm{NCF}_1 x+\mathrm{NCF}_0=0$$

这是一个实系数 n 次代数方程，从理论上讲，这个方程应该有 n 个根，但对于我们所讨论的问题，只有正实根才有意义。根据笛卡儿符号法则，若系数序列 (NCF_0，NCF_1，…，NCF_n) 的正负号变化次数为 P，则方程的正根个数 (一个 K 重根按 K 个根计算) 等于 P 或者比 P 少一个正偶数，特别是当 P＝0 时，方程无正根；当 P＝1 时，则有且仅有一个单正根。

在实际经济生活中遇到的大多数环保投资项目，投资集中在初期，在初期净现金流为负，投资期以后，项目进入获利型生产阶段，净现金流为正，净现金流的符号只变化一次，所以，上述方程只有唯一的正根，也就是说，只存在唯一的 IRR，这种环保投资项目称为典型的环保投资项目。

但是对于净现金符号变化不止一次的非典型环保投资项目，可能出现多重的 IRR 解。

【例 3-6】 某环保公司为一项大型环境工程提供一套大型设备，合同签订后，买方先支付 1900 万元，1 年后再支付 2000 万元，设备于第 4 年末以前提货，买方在第 4 年末和第 5 年末再分别支付 2000 万元和 6000 万元。据估算，制造这套设备的费用第 1 年为 1000 万元，第 2 年和第 3 年每年 5000 万元。计算这一方案的内部收益率。

【解】 各年的净现金流量为

年　份	0	1	2	3	4	5
NCF/万元	1900	1000	－5000	－5000	2000	6000

在计算期内，净现金流的符号有两次变化。

用不同的折现率试算方案的净现值。

折 现 率	0%	10%	20%	30%	40%	50%
NPV/万元	900	12	−256.2	−249.3	−122.7	48.4

该方案的净现值函数曲线见图 3-14。

净现值函数曲线与横轴的交点有两个，也就是说该方案有两个内部收益率值

$$IRR_1=10.4\%,\quad IRR_2=47.2\%$$

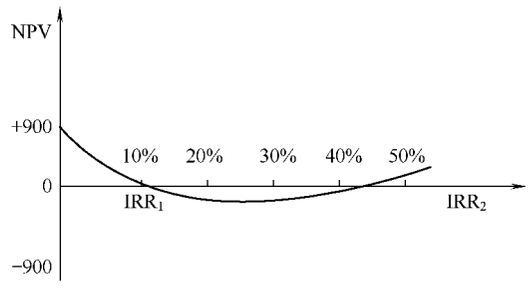


图 3-14　例 3-6 的净现值函数曲线

在这种情况下，IRR 指标用于评价方案的经济效果就失败了。对于净现金流符号变化不止一次的方案，一般避免使用 IRR 指标评价其经济效果。也可以采用如下的处理办法：根据在项目外进行再投资的机会情况确定一个标准折现率，用标准折现率对某些年份的净现金流进行等值换算，使计算期内净现金流符号变化的次数减少到一次，以得到一个类似典型投资项目的净现金流序列，从而求 IRR 的唯一解。在例 3-6 中，可将第 0 年、第 1 年的净现金流用一个标准折现率折算到第 2 年，设标准折现率 $i=8\%$，处理后的净现金流序列为

年份	0	1	2	3	4	5
NCF/万元	0	0	−1830	−5000	2000	6000

由此可求得 IRR=8.15%，不过，这样处理后 IRR 的经济含义已与原来有所不同。

2. 外部收益率（external rate of return，ERR）

对投资方案内部收益率 IRR 的计算，隐含着一个基本假定，即项目寿命期内所获得的净收益全部用于再投资，而且再投资的收益水平等于内部收益率。这种隐含假定是由于资金等值计算中采用复利计算方法带来的。下面的推导有助于我们看清这个问题。

在求解 IRR 的方程式（3-35）两端同乘以 $(1+\mathrm{IRR})^n$，也就是说，通过等值计算将式左右端的净现值折算成 n 年末的将来值，得

$$\sum_{t=0}^{n}(B_t-C_t-K_t)(1+\mathrm{IRR})^{-t}(1+\mathrm{IRR})^n=0$$

即

$$\sum_{t=0}^{n}(B_t-C_t-K_t)(1+\mathrm{IRR})^{n-t}=0$$

将投资额与年经营费用及年收入项分开，有

$$\sum_{t=0}^{n}[-K_t(1+\mathrm{IRR})^{n-t}+(B_t-C_t)(1+\mathrm{IRR})^{n-t}]=0$$

$$\sum_{t=0}^{n}K_t(1+\mathrm{IRR})^{n-t}=\sum_{t=0}^{n}(B_t-C_t)(1+\mathrm{IRR})^{n-t}$$

式中 B_t-C_t 是第 t 年的净收益，这个等式意味着每年的净收益全部用于再投资，而且投资收益率均达到 IRR 的水平。到 n 年末，历年净收益的将来值之和与历年投资按 IRR 折

算到 n 年末的将来值之和相等。

由于受投资机会的限制，这种假定往往难以与实际情况相符。

外部收益率 ERR 的计算方法与 IRR 相类似，所不同的是假定项目寿命期内每年所获的净收益用于再投资的收益水平相当于标准折现率。外部收益率的计算公式为

$$\sum_{t=0}^{n} -K_t(1+\mathrm{ERR})^{n-t} + \sum_{t=0}^{n}(B_t - C_t)(1+i_0)^{n-t} = 0 \tag{3-37}$$

式中　ERR——外部收益率；

i_0——标准折现率。

ERR 的求解可以用类似求解 IRR 的试算内插法，往往也可以用代数方法直接求解。一般来说 ERR 没有多解问题。ERR 指标用于评价投资方案的经济效果，需要与标准折现率 i_0 相比较，若 ERR$>i_0$，则表明方案可以取得满意的经济效果，进行多方案比选时，以 ERR 大者为优。

【例 3-7】　某环境工程初始投资 $K_0=10$ 万元，第 5 年追加投资 $K_5=2$ 万元，工程寿命期 10 年，第 1～10 年每年收入 $B=3.3$ 万元，支出 $C=1.5$ 万元，标准折现率 $i=10\%$，求外部收益率 ERR。

【解】　根据式（3-37），可列出如下方程

$$-10(F/P\mathrm{ERR},10)-2(F/P\mathrm{ERR},5)+(3.5-1.5)(F/A10,10)=0$$

查表可知 $(F/A10,10)=15.937$，以上方程可写成

$$-10(1+\mathrm{ERR})^{10}-2(1+\mathrm{ERR})^{5}+31.874=0$$

令 $X=(1+\mathrm{ERR})^5$，则方程变成

$$-10X^2-2X-31.874=0$$

解得 $X_1=1.688$；$X_2=-1.888$

舍去负根，$X=1.688$

由 $(1+\mathrm{ERR})^5=1.688$，可解得 ERR$=11.04\%$

外部收益率 ERR 为 11.04%。

3. 静态投资收益率

静态投资收益率指标的计算不考虑资金的时间价值，计算比较简单，一般用于对投资方案进行粗略评价。

静态投资收益率的一般表达式为

$$E=\frac{R}{K} \tag{3-38}$$

式中　E——静态投资收益率；

K——总投资。

在不同层次上规定 R 的具体内容，可以得出不同层次的静态投资收益率指标。如果 R 被规定为利润，E 即为“投资利润率”；如果 R 被规定为利润与税收之和，E 即为“投资利税率”；如果 R 被规定为净收益（即销售收入与经营成本之差），则 E 为“投资净收益率”。

在计算静态投资收益率时，R 取项目建成后正常年份的值或项目寿命期内的平均值。求得的静态投资收益率应与给定的标准值相比较，如果大于标准值，则认为项目的经济效果是好的。

【例 3-8】　某环境治理项目总投资 100 万元，建成投产后年销售收入 30 万元，年总成本

15 万元，其中经营费用 10 万元，产品税率 10%，求投资利润率、投资利税率与投资净收益率。

【解】 年利润＝年销售收入－年总成本－销售税金＝30－15－30×10%＝12 万元

$$\text{投资利润率}=\frac{\text{年利润}}{\text{总投资}}=\frac{12}{100}=12\%$$

$$\text{投资利税率}=\frac{\text{年利润}+\text{税金}}{\text{总投资}}=\frac{12+3}{100}=15\%$$

年净收益＝年销售收入－经营成本＝30－10＝20 万元

$$\text{投资净收益率}=\frac{\text{年净收益}}{\text{总投资}}=\frac{20}{100}=20\%$$

四、投资回收期法评价环保项目

投资回收期也叫还本期，指用投资带来的净收益偿还全部初始投资所需要的时间，一般以年为单位。按是否考虑资金的时间价值，可分为静态投资回收期和动态投资回收期。

1. 静态投资回收期

静态投资回收期不考虑资金的时间价值，计算通式为

$$\sum_{t=0}^{T} R_t = K \tag{3-39}$$

其中

$$R_t = B_t - C_t$$

$$K = \sum_{t=0}^{k} K_t$$

式中 T——静态投资回收期；

R_t——第 t 年净收益；

K——总投资额；

K_t——第 t 年投资额；

k——投资结束年份。

如果每年的净收益都相等，静态投资回收期也可用下式计算：

$$T=\frac{K}{R}=\frac{K}{B-C} \tag{3-40}$$

式中 R——年净收益。

静态投资回收期反映了初始投资得到补偿所需时间的长短，它提供了一种投资安全性的信息。在资金缺乏或未来技术变化和市场条件变化较快的情况下，计算静态投资回收期是十分必要的。静态投资回收期的计算比较简单，但是它忽略了投资方案在回收期以外的经济效果，并且没有考虑资金的时间价值，所以，静态投资回收期只能作为评价投资方案的一种辅助指标，多用于对投资建议进行粗略评价。

由于静态投资回收期指标侧重于对投资安全性的评价，一般来说应该从投资年起计算，如果从投产年起计，则应加以说明，求得的静态投资回收期 T 必须与给定的标准投资回收期 T_0 比较，只有 $T \leqslant T_0$，投资方案才是可以接受的。

2. 动态投资回收期

动态投资回收期考虑了资金的时间价值，计算公式如下：

$$\sum_{t=0}^{T^*} R_t(1+i_0)^{-t} = \sum_{t=0}^{k} K_t(1+i_0)^{-t} \tag{3-41}$$

或者写成

$$\sum_{t=0}^{T^*}(B_t-C_t-K_t)(1+i_0)^{-t}=0 \tag{3-42}$$

式中　T^*——动态投资回收期；

i_0——考虑资金的时间价值所给出的标准折现率。

动态投资回收期实际上就是从投资年开始到方案净现值等于零的年限。

【例 3-9】　根据例 3-1 给出的数据计算静态投资回收期与动态投资回收期。

【解】　计算各年的累计净现金流和累计净现金流现值如表 3-5 所示。

累计净现金流第 4 年为－38 万元，第 5 年为 94 万元，由此可知静态投资回收期在第 4 年与第 5 年之间。累计净现金流现值第 6 年为－16.23 万元，第 7 年为 43.48 万元，由此可知动态投资回收期在第 6 年与第 7 年之间，用插值法可求得

静态投资回收期　$T=4.3$ 年

动态投资回收期　$T^*=6.3$ 年

表 3-5　例 3-9 计算表

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
－500	66	132	132	132	132	132	132	132	132	182
1	0.8929	0.7972	0.7118	0.6358	0.5674	0.5066	0.4523	0.4039	0.3606	0.3220
－500	58.93	105.23	93.96	83.89	74.90	66.87	59.70	53.31	47.60	58.60
－500	－434	－302	－170	－38	94	226	358	490	633	804
－500	－441.07	－335.84	－214.88	－157.99	－83.10	－16.23	43.48	96.79	144.39	202.99

五、差额分析法评价环保项目

进行多方案比选，通常采用的方法有两种。一种方法是，按所选定的评价指标分别计算各方案的经济效果，根据计算结果进行选优、排序。用以上介绍的评价指标进行方案比选均属此类，用这种方法可以解决大多数的方案比选问题，但是，后面的分析将告诉我们，在有些情况下用这种方法进行方案比选可能会导致错误的结论。进行方案比选的另一种方法是，计算方案之间差额投资的经济效果，如果差额投资的经济效果达到绝对检验标准，则认为投资额大的方案优于投资额小的方案，这就是差额分析法。差额分析法常用的评价指标有追加投资回收期和差额内部收益率，净现值与净年值也可以用于差额投资经济效果分析。

1. 追加投资回收期

设方案 1 与方案 2 是投资额不等的两个方案，方案 1 的投资额 K_1 大于方案 2 的投资额 K_2，称 $\Delta K=K_1-K_2$ 为差额投资，也可以看作是在方案 2 基础上的追加投资。如果方案 2 的年净收益 R_2 大于或等于方案 1 的年净收益 R_1，显然，方案 2 优于方案 1，没有必要做进一步的分析。但是，通常遇到的情况是，投资额大的方案 1 的年净收益大于投资额小的方案 2 的年净收益，这就需要通过进一步计算进行方案比选。追加投资回收期就是用于这类方案比选的一个指标。

追加投资回收期指用差额投资所带来的净收益增量回收差额投资所需的年限，通常只计算静态的追加投资回收期。若每年的净收益增量 $\Delta R=R_1-R_2$ 都相等，追加投资回收期的计算公式为

$$T=\frac{\Delta K}{\Delta R}=\frac{K_1-K_2}{R_1-R_2} \tag{3-43}$$

若各年的净收益增量不等，则追加投资回收期的计算公式为

$$\sum_{t=0}^{T}\Delta R_t = \Delta K \tag{3-44}$$

式中　ΔR_t——第 t 年的净收益增量。

若参加比选的两个方案是为了满足同一需要或两个方案每年的收入均相等，则可将净收益增量理解为经营成本的年节约额，式（3-43）可写成

$$T=\frac{\Delta K}{\Delta C}=\frac{K_1-K_2}{C_1-C_2} \tag{3-45}$$

式中　C_1、C_2——分别为方案 1 与方案 2 的年经营成本。

用追加投资回收期指标进行方案比选，需要将求得的追加投资回收期 T 与标准投资回收期 T_p 相比较，若 $T\leqslant T_p$，则投资额大的方案优于投资额小的方案；若 $T>T_p$，则投资额小的方案优于投资额大的方案。追加投资回收期指标侧重于评价追加投资的安全性，由于它不考虑回收期以外的收益情况，所以不能全面反映追加投资的经济效果，通常只用于方案的初步比选。

【例 3-10】 现拟建一环保设备加工车间，有两个方案：第 1 方案采用普通机床，投资 2500 万元，年经营成本为 1500 万元；第 2 方案采用数控机床，投资高达 4500 万元，但年经营成本仅为 1000 万元。若标准投资回收期 $T_p=5$ 年，比较这两个方案的优劣。

【解】 第 2 方案与第 1 方案相比，追加投资回收期为

$$T=\frac{K_2-K_1}{C_1-C_2}=\frac{4500-2500}{1500-1000}=4 \text{ 年}$$

$$T<T_p$$

所以第 2 方案优于第 1 方案。

2. 差额内部收益率

差额内部收益率指投资额不等的两个方案之间现金流量之差的内部收益率，记作 ΔIRR。对于投资额不等的方案 1 与方案 2，差额内部收益率的计算公式为

$$\sum_{t=0}^{n}(\mathrm{NCF}_{1t}-\mathrm{NCF}_{2t})(1+\Delta\mathrm{IRR})^{-t}=0 \tag{3-46}$$

式中　NCF_{1t}——方案 1 第 t 年的净现金流量；

NCF_{2t}——方案 2 第 t 年的净现金流量；

ΔIRR——方案 1 与方案 2 的差额内部收益率。

进行方案比选时，如果 ΔIRR 大于或等于给定的标准折现率，表明差额投资能够取得满意的经济效果，投资额大的方案优于投资额小的方案；如果 ΔIRR 小于标准折现率，则认为投资额小的方案优于投资额大的方案。

式（3-46）还可写成

$$\sum_{t=0}^{n}\mathrm{NCF}_{1t}(1+\Delta\mathrm{IRR})^{-t}-\sum_{t=0}^{n}\mathrm{NCF}_{2t}(1+\Delta\mathrm{IRR})^{-t}=0$$

或

$$\sum_{t=0}^{n}\mathrm{NCF}_{1t}(1+\Delta\mathrm{IRR})^{-t}=\sum_{t=0}^{n}\mathrm{NCF}_{2t}(1+\Delta\mathrm{IRR})^{-t}$$

上式的两端分别是以 ΔIRR 为折现率时，方案 1 与方案 2 的净现值。也就是说，差额内部收益率是投资额不等的两个方案在净现值相等时的折现率。其几何意义可以从 NPV 函数

曲线图上看出（图 3-15）：两个方案的 NPV 函数曲线的交点所对应的折现率就是差额内部收益率。所以，差额内部收益率也称交叉收益率。

差额内部收益率反映的是差额投资的经济效果，只适用于比较投资额不等的方案之间的相对优劣。要了解各备选方案的经济效果能否达到绝对检验标准，仍需用内部收益率或净现值等指标进行衡量。

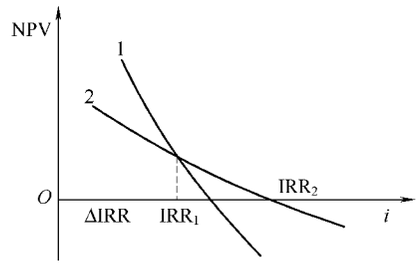


图 3-15　差额内部收益率的几何意义

用差额内部收益率进行方案比选的步骤如下。

① 按费用现值的大小将备选方案排序（对于投资集中于初期的典型投资项目一般可直接按投资额大小进行方案排序），得 A_1，A_2，A_3，A_4，…，A_1 为费用现值最小的方案。

② 用现值法、年值法或投资收益率法对方案 A_1 进行绝对标准检验，若 A_1 通过绝对标准检验，可进行下一步，若 A_1 不能通过绝对标准检验，则淘汰 A_1，以 A_2 代 A_1，依次类推。

③ 若 A_1 通过绝对标准检验，计算 A_2 与 A_1 的差额内部收益率，若小于标准折现率，说明 A_1 优于 A_2，淘汰 A_2；以 A_3 代 A_2 继续计算，若大于标准折现率，说明 A_3 优于 A_1，淘汰 A_1，计算 A_3 与 A_2 的差额内部收益率，依次类推，直至将所有备选方案比选完毕，选出最优方案。

【例 3-11】 4 个备选投资方案的初始投资额与年净收益见表 3-6，方案寿命均为 10 年，标准折现率为 10%，用差额内部收益率进行方案比选。

表 3-6　例 3-11 的原始数据/万元

方　案	A_1	A_2	A_3	A_4
初始投资	100	200	300	400
年净收益	30	50	65	85

【解】 方案 A_1 的净现值

$$NPV_1=-100+30(P/A10,10)=83.4\text{ 万元}$$

$NPV_1>0$，方案 A_1 可以通过绝对标准检验。

计算 A_2 与 A_1 的差额内部收益率 ΔIRR_{21}，由

$$-200+100+(50-30)(P/A\Delta IRR_{21},10)=0$$

解得

$$\Delta IRR_{21}=15.1\%$$

ΔIRR_{21} 大于标准折现率，淘汰 A_1。

计算 A_3 与 A_2 的差额内部收益率 ΔIRR_{32}，由

$$-300+200+(65-50)(P/A\Delta IRR_{32},10)=0$$

解得

$$\Delta IRR_{32}=8.1\%$$

ΔIRR_{32} 小于标准折现率，淘汰 A_3。

计算 A_4 与 A_2 的差额内部收益率 ΔIRR_{42}，由

$$-400+200+(85-50)(P/A\Delta IRR_{42},10)=0$$

解得

$$\Delta IRR_{42}=11.7\%$$

ΔIRR_{42} 大于标准折现率，A_4 优于 A_2，所以在资金可供量许可的条件下应选择方案 A_4。

第四章　环保项目投资方案的不确定性分析

环保项目投资方案经济效果评价中使用的投资、成本、产量、价格等基础数据大都要依靠预测和估算。由于经济环境、技术发展往往会有某些难以预见的变化，加上预测、估算方法和工作条件的局限性，预测与估算的结果不可避免地会有误差甚至失误，这使得环保方案的经济效果可能偏离其预期值，从而给投资者带来风险。例如，投资超支、工期拖长、生产能力达不到设计要求、原材料价格上涨、工资上涨、产品售价波动、市场需求量变化、贷款利率变动等都可能使投资方案达不到预期的经济效果，甚至发生亏损。为了了解在外部条件变化时环保项目投资方案经济效果的变动情况，需要对其做不确定性分析。

第一节　环保项目的盈亏平衡分析

环保项目的盈亏平衡分析是通过分析产品产量、成本与方案盈利能力的关系，找出工业投资方案盈利与亏损在产量、产品价格、生产能力利用率等方面的界限，从而确定在经营条件（如产品价格、销售量、原材料燃料动力价格、工资等）发生变化时方案的承受能力。

一、销售收入、生产成本与产量的关系

环保项目的销售收入与产品销售量（如果按销售量组织生产，产品销售量等于产品产量）的关系有两种情况，第一种情况，该环保项目的生产、销售活动不会明显地影响市场供求状况，假定市场条件不变，产品价格不会随该工业项目销售量的变化而变化，可以看作一个常数。销售收入与销售量呈线性关系，即

$$B=PQ \tag{4-1}$$

式中　B——销售收入；

P——单位产品价格；

Q——产品销售量。

第二种情况，该环保项目的生产销售活动将明显地影响市场供求状况，随着该环保项目产品销售量的增加，产品价格有所下降，这时，销售收入与销售量之间不再是线性关系。销售收入与销售量关系的这两种情况见图 4-1，曲线 a 表示第 1 种情况，曲线 b 表示第 2 种情况。

环保项目投产以后，其生产成本与产品产量的关系见图 4-2。

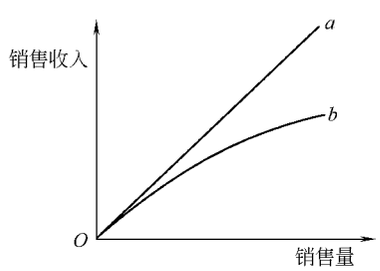


图 4-1　销售收入与销售量的关系

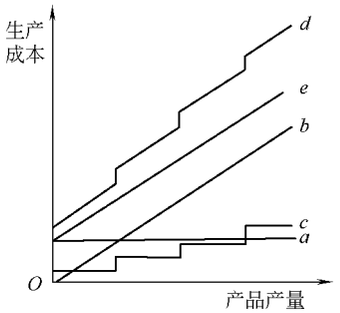


图 4-2　生产成本与产品产量的关系

生产成本可以分为固定成本与变动成本两部分，固定成本指在一定的生产规模限度内不随产量变动而变动的费用，见图 4-2 中 a 线，例如，固定资产折旧费中仅与使用时间有关的部分，管理人员的工资，管理机构的办公费，维持生产所必需的供水、供气、取暖、空调、照明等费用，还有保险费及一部分流动资金利息，在我国大部分国有企业中，生产工人的基本工资实际上也属于固定成本。变动成本指随产品产量变动的费用，例如，原材料消耗，直接用于生产的燃料动力消耗，产品包装费，生产工人奖金及固定资产折旧费中与设备磨损程度有关的部分，在市场经济条件下生产工人的工资也应属于变动成本。变动成本总额中大部分与产品产量成正比关系，如图 4-2 中的 b 曲线，即

$$V_C = C_V Q \tag{4-2}$$

式中　V_C——变动成本；

C_V——单位产品变动成本；

Q——产品产量。

也有一部分变动成本与产量不成正比例，如生产批量有关的某些消耗性材料、工装模具费用及运输费等，这部分变动成本随产量变动的规律一般呈阶梯形上升，通常称这部分变动成本为半变动成本，如图 4-2 中 c 曲线。总生产成本是固定成本与变动成本之和，它与产品产量的关系如图 4-2 中的 d 曲线所示。由于半变动成本通常在总成本中所占比例很小，一般可以近似地认为它也随产量成正比例变动，这样，总成本与产量的关系就可以简化为线性关系，如图 4-2 中的 e 曲线，即

$$T_C = F_C + C_V Q \tag{4-3}$$

式中　T_C——总生产成本；

F_C——固定成本。

如果产量与销售量相等，可将图 4-1 中的销售收入曲线与图 4-2 中的总成本曲线画到同一坐标图上，从而构成“量-利分析图”。如果销售收入 B 与总成本 T_C 同产量 Q 的关系都是线性的，就是线性量-本-利分析图（图 4-3）；如果销售收入 B 或总成本 T_C 同产量 Q 的关系是非线性的，就是非线性量-本-利分析图（图 4-4）。图 4-3 与图 4-4 中，横坐标表示产量（Q），纵坐标表示销售收入（B）或成本（C）。

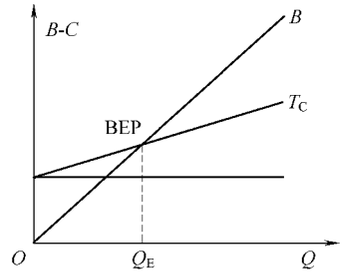


图 4-3　线性量-本-利分析图

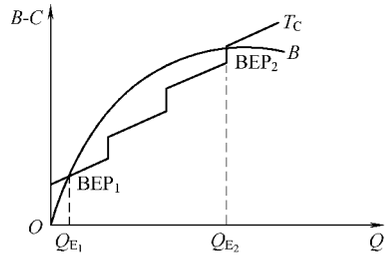


图 4-4　非线性量-本-利分析图

量-本-利分析图直观地表达了工业项目的销售收入、成本和产量之间的关系，是分析企业经济活动的重要工具。

二、盈亏平衡分析

利用量-本-利分析图，可以对工业投资方案进行盈亏平衡分析。

图 4-3 与图 4-4 中销售收入曲线与总成本曲线的支点称盈亏平衡点（break even point，

BEP)，也就是项目盈利与亏损的分界点。在线性量-本-利分析图上只有一个盈亏平衡点BEP。在BEP的左边，总成本大于销售收入，项目亏损；在BEP的右边，销售收入大于总成本，项目盈利；在BEP点上，项目“盈利平衡”，不盈不亏。在非线性量-本-利分析图上，可能有两个盈亏平衡点BEP_1和BEP_2，在BEP_1与BEP_2之间的区域项目盈利，在此区域之外项目亏损。

根据固定成本、单位产量变动成本、产品价格等资料，可以图解法求出盈亏平衡点。如果销售收入及总成本都与产量呈线性关系，还可以很容易地用解析方法求盈亏平衡点。

在盈亏平衡点，销售收入B等于总成本T_C，由式（4-1）和式（4-3）可得

$$PQ_E = F_C + C_V Q_E$$

盈亏平衡产量

$$Q_E = \frac{F_C}{P - C_V} \tag{4-4}$$

由式（4-4）可以看出，影响盈亏平衡产量的因素有固定成本、产品价格和单位产品变动成本。通常称产品价格与单位产品变动成本之差为“单位产品边际贡献”。固定成本愈高，盈亏平衡产量愈高；单位产品边际贡献愈高，盈亏平衡产量愈低。对于一个工业项目来说，未来市场条件的变化可能造成产品销售量偏离其预期值。相对于预期的产品销售量，盈亏平衡产量愈高，项目发生亏损的可能性愈大；盈亏平衡产量愈低，项目发生亏损的可能性愈小。

式（4-4）是以产量表示的盈亏平衡点，这是求盈亏平衡点的基本公式。根据这个基本公式，通过简单的变换还可以导出以销售额、生产能力利用率、销售价格、单位产品变动成本等表示的盈亏平衡点。

由式（4-1）和式（4-4）可知，盈亏平衡销售额为

$$B_E = PQ_E = \frac{PF_C}{P - C_V} \tag{4-5}$$

若设计生产能力为Q_0，则盈亏平衡生产能力利用率为

$$U_E = \frac{Q_E}{Q_0} \times 100\% = \frac{F_C}{(P - C_V)Q_0} \times 100\% \tag{4-6}$$

若设计生产能力生产的产品能够全部销售，则盈亏平衡销售价格为

$$P_E = \frac{B}{Q_0} = \frac{T_C}{Q_0} = \frac{C_V Q_0 + F_C}{Q_0} = C_V + \frac{F_C}{Q_0} \tag{4-7}$$

盈亏平衡单位产品变动成本为

$$C_{VE} = P - \frac{F_C}{Q_0} \tag{4-8}$$

【例4-1】 某环保项目年设计生产能力为生产某种产品3万件，单位产品销售价3000元，生产总成本为7800万元，其中固定成本3000万元，变动成本4800万元，求以产量、生产能力利用率、销售价格、单位产品变动成本表示的盈亏平衡点。

【解】 单位产品变动成本

$$C_V = \frac{4800 \times 10^4}{3 \times 10^4} = 1600 \text{ 元/件}$$

盈亏平衡产量

$$Q_E = \frac{3000 \times 10^4}{3000 - 1600} = 21400 \text{ 件}$$

盈亏平衡生产能力利用率

$$U_E = \frac{3000 \times 10^4}{(3000 - 1600) \times 3 \times 10^4} \times 100\% = 71.43\%$$

盈亏平衡销售价格　$P_E=\dfrac{(1600\times3+3000)\times10^4}{3\times10^4}=2600$ 元/件

盈亏平衡单位产品变动成本　$C_{VE}=3000-\dfrac{3000\times10^4}{3\times10^4}=2000$ 元/件

通过计算盈亏平衡点，结合市场预测，就可以对投资方案风险的大小有个了解。在例 4-1 中，如果未来的产品价格、生产成本与预期值相同，项目不发生亏损的条件是年销售量不低于 2.14 万件，生产能力利用率不低于 71.43%；如果按设计能力进行生产并能全部销售，生产成本与预期值相等，项目不发生亏损的条件是产品价格不低于 2600 元/件；如果销售产量、产品价格与预期值相同，项目不发生亏损的条件是单位产品变动成本不高于 2000 元/件。

三、成本结构对企业业务风险的影响

从企业经营角度来看，由于外部经营环境可能发生的变化引起的利润波动叫企业的业务风险（business risk）。销售量可能发生的变动是最常见的风险因素。下面分析成本结构对由销售量可能发生的变动引起的企业业务风险的影响。

不考虑纳税，企业利润应为

$$I=PQ-C_VQ-F_C=Q(P-C_V)-F_C \tag{4-9}$$

式中　I——企业税前利润。

如果产品销售量变动了 ΔQ，则企业利润的变动量为

$$\Delta I=\Delta Q(P-C_V) \tag{4-10}$$

利润变动的百分比为

$$\frac{\Delta I}{I}=\frac{\Delta Q(P-C_V)}{Q(P-C_V)-F_C} \tag{4-11}$$

由式（4-10）可知，对应于某一销售变动量 ΔQ，企业利润的变动量 ΔI 的大小取决于单位产品的边际贡献，如果产品价格已给定，单位产品的边际贡献取决于单位产品变动成本 C_V，C_V 愈小，单位产品的边际贡献愈大，由销售量变动引起企业利润变动量也就愈大。

由式（4-11）可知，由于固定成本 F_C 的存在，企业利润变动的百分比 $\Delta I/I$ 要大于销售量变动的百分比 $\Delta Q/Q$，F_C 愈大，利润变动百分比超过销售量变动百分比愈多。

显然，对应于某一预期的产量，固定成本在总成本中所占的比例愈大，企业面临的业务风险愈大，也就是说，固定成本有放大企业业务风险的作用。这种现象称为“经营杠杆效应”（operating leverage），认识这种现象对于正确判断投资方案的风险情况和合理选择工业项目的成本结构具有重要意义。

第二节　环保项目的敏感性分析

所谓敏感性分析，就是通过测定一个或多个不确定因素的变化所导致的决策评价指标的变化幅度，判断各个因素的变化对实现预期目标的影响程度。它是经济决策中最常用的一种不确定性分析方法。

一、敏感性分析的步骤与内容

（1）选定需要分析的不确定因素，设定这些因素的变动范围。对于一般的环保项目来说，影响方案经济效果的不确定因素通常包括：

① 投资额；

② 项目寿命期及期末固定资产残值；

③ 经营成本，特别是其中的变动成本；

④ 产品价格；

⑤ 产品产量及销售量；

⑥ 项目建设期、项目投产时的产出水平及达到设计水平所需时间；

⑦ 标准折现率。

事实上，没有必要对所有的不确定因素都进行敏感性分析。可以根据以下两条原则进行筛选：第一，预计在可能的变动范围内，某因素的变动会较强烈地影响方案的经济效果评价指标；第二，对在确定性经济评价中采用的某因素的数据的标准性把握不大。

在选定需要分析的不确定因素的同时，要根据实际情况，设定这些因素可能的变化范围。

（2）确定分析指标。评价方案经济效果的指标有许多种，如净现值、净年值、内部收益率、投资回收期等。敏感性分析可以围绕不同的评价指标进行。由于敏感性分析是在确定性经济效果评价的基础上进行的，所以敏感性分析的指标应与确定性经济效果评价所使用的指标相一致。当确定性经济评价指标不少于两个时，敏感性分析可以围绕其中一个或几个最重要的指标进行。

（3）计算各不确定因素不同幅度的变动所导致的经济效果评价指标的变动结果，建立起一一对应的数量关系。通常采用的敏感性分析方法是单因素分析，即在计算某因素的变动对经济效果评价指标的影响时，假定其他因素不变，这类似于数学上多元函数的偏微分，在对各个不确定因素进行逐个计算的基础上，将计算结果以表格或图形方式表示出来，以便于分析。如果需要了解多种因素同时变动对方案经济效果的综合影响，可以进行多因素敏感性分析。多因素敏感性分析的方法后面将加以介绍。

（4）确定敏感因素，对方案的风险情况做出判断。所谓敏感因素就是其数值变化能显著影响方案经济效果的不确定因素。判断敏感因素的方法有两种：第一种方法是假定要分析的各个因素均从其基本数值开始变动，比较在同一变动率下各因素的变动对经济效果评价指标影响的大小，据此判断方案经济效果对各因素的敏感程度，这是一种相对测定法；第二种方法是设各因素均向对方案不利的方向变动，并分别取其有可能出现的“最坏”值，据此计算方案的经济效果指标，看其是否可达到使方案无法被接受的程度，如果其因素的“最坏”值使方案变得不可接受，则表明该因素是方案的敏感因素。方案可否接受的判据是各经济效果指标能否达到临界值，例如，使用净现值指标要看净现值是否大于或等于零，使用内部收益率指标要看内部收益率是否能达到标准折现率等。第二种方法的一个变通方式是先设定有关经济效果指标的临界值，如令净现值等于零，令内部收益率等于标准折现率，然后求其特定因素的最大允许变动幅度并与其可能出现的变动幅度相比较，如果某因素可能出现的变动幅度大于最大允许变动幅度，则表明该因素是方案的敏感因素。第二种方法是敏感因素的绝对测定法。实践中也可以把这两种方法结合起来使用。

二、单因素敏感性分析举例

【例 4-2】 有一个生产城市用小型电动汽车的投资方案，用于确定性经济效果评价的现金流量表 4-1 中的数据是根据对未来最可能出现的情况的预测估算的，由于对未来影响经济环境的某些因素把握不大，投资额可能在±20％的范围内变动，产品价格和变动成本有可能在±15％的范围内变动，标准折现率为 10％，试对上述三个不确定因素分别做敏感性分析。

表 4-1　小型电动汽车投资方案的现金流量表/万元

年　末	0	1	2～10	11
投资	−15000			
销售收入			22000	22000
固定成本			−3200	−3200
变动成本			−12000	−12000
销售税金(销售收入的 10%)			−2200	−2200
固定资产残值				2000
净现金流量	−15000	0	4600	4600+2000

【解】 设初始投资为 K，期末固定资产残值为 K_L，固定成本为 C_f，变动成本总额为 C_V，产品价格为 P，销售量为 Q，销售收入为 B，销售税金为 T_A，

$$B=PQ$$

$$T_A=0.1B=0.1PQ$$

用净现值指标评价本方案的经济效果，计算公式为

$$NPV=-K+(B-C_f-C_V-T_A)(P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

按照表 4-1 的数据，

$$NPV=-15000+4600\times6.145\times0.9091+2000\times0.3505=11397\text{ 万元}$$

下面用净现值指标对投资额、产品价格和变动成本等三个不确定因素做敏感性分析。

设 x 为产品价格变动的百分比，y 为变动成本变动的百分比，z 为投资额变动的百分比，当考虑投资额的变动时，令 $x=0$，$y=0$，净现值的计算公式为

$$NPV=-K(1+z)+(B-C_f-C_V-T_A)(P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

当考虑变动成本的变动时，令 $x=0$，$z=0$，净现值的计算公式为

$$NPV=-K+[B-C_f-C_V(1+y)-T_A](P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

当考虑产品价格的变动时，令 $y=0$，$z=0$，不难看出，产品价格的变动将直接导致销售收入的变动，进而也使销售税金发生变动，销售收入和销售税金变动的百分比与产品价格变动的百分比相同。净现值的计算公式为

$$NPV=-K+[B(1+x)+C_f-C_y-T_A(1+x)](P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

$$=-K+[0.9B(1+x)-C_f-C_V](P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

按照上述三个公式，取不同的 x、y、z 值，可以计算出各不确定因素在不同变动幅度下方案的净现值，将计算结果列入表 4-2。

表 4-2　不确定因素的变动对净现值的影响/万元

不确定因素 \ 变动率	−20%	−15%	−10%	−5%	0	+5%	+10%	+15%	+20%
投资额	14397	13647	12897	12147	11397	10647	9897	9147	8397
产品价格		−5194	336	5967	11397	16927	22457	27987	
变动成本		21452	18100	14748	11397	8045	4693	1342	

根据表中数据可以给出敏感性分析图 4-5。

由表 4-2 和图 4-5 可以看出，在同样的变动率下，方案的净现值指标受产品价格变动的

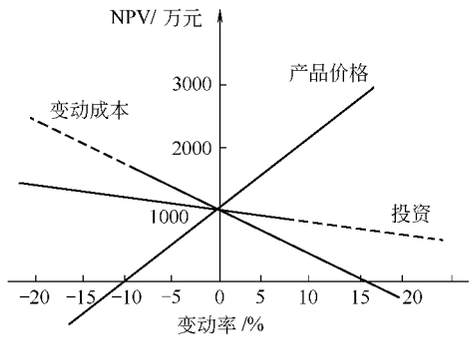


图 4-5　敏感性分析图

影响最大，受投资额变动的影响最小，按相对测定法，可以判断出，对于方案的经济效果来说产品价格是最敏感的因素。尤其值得重视的是，当产品价格下降 15％时净现值由正值变为负值，也就是说，如果产品价格低于预期值 15％，方案将变得不可接受。按绝对测定法判断，产品价格也是敏感因素。

上述敏感性分析的结果表明，对这一方案要慎重考虑，必须对未来产品价格的变动情况做进一步的分析研究，如果产品价格低于预期值 10％以上的可能性较大，则意味着这笔投资有较大的风险。另外，变动成本对方案的经济效果也有较大的影响，严格控制变动成本是提高项目经济效果的重要途径。至于投资额，对本方案来说不是敏感因素，即使增加 20％甚至更多一些也不会影响决策结论。

三、多因素敏感性分析

在进行单因素敏感性分析的过程中，每当计算某特定因素变动对经济效果的影响时，都假定其他因素不变。实际上，许多因素的变动具有相关性，一个因素的变动往往伴随着其他因素的变动，例如，对于例 4-2 中生产电动汽车这个方案，如果世界市场上石油价格上涨，电动汽车的市场需求量有可能增加，这将导致销量和产品价格的上升，然而，石油价格上涨还会引起其他生产资料价格上涨，这将导致生产成本的增加。所以，单因素敏感性分析有其局限性，改进的方法是进行多因素敏感性分析，即考虑多个因素同时变动对方案经济效果的影响，以判断方案的风险情况。

多因素敏感性分析要考虑各种因素不同变动幅度的可能的多种组合，计算起来要比单因素敏感性分析复杂得多。如果需要分析的不确定因素不超过 3 个，而且经济效果评价指标的计算比较简单，可以用解析法与作图法相结合的方法进行分析。

【例 4-3】　根据例 4-2 给出数据进行多因素敏感性分析。

【解】　沿用例 4-2 的符号，如果只考虑产品价格与变动成本的变动，净现值的计算公式为

$$NPV=-K+[0.9B(1+x)-C_f-C_V(1+y)](P/A10,10)(P/F10,1)+K_L(P/F10,11)$$

将表 4-2 的数据代入，经过整理得

$$NPV=110603.31x-67032.31y+11396.72$$

取 NPV 的临界值，即令 NPV＝0，则有

$$110603.31x-67032.31y+11396.72=0$$

$$y=1.65x+0.17$$

这是一个直线方程，在坐标图（图 4-6）上，它是 NPV＝0 的临界线；在此临界线右下方的区域，NPV＞0；在临界线左上方的区域，NPV＜0。也就是说，如果价格与变动成本同时变动，只要变动范围不超出直线 $y=1.65x+0.17$ 右下方的区域（包括直线上的点），方案都是可以接受的。

如果同时考虑投资额的变动，净现值和计算公式为

$$NPV=-K(1+z)+[0.9B(1+x)-C_f+C_V(1+y)](P/A10,1)+K_L(P/F10,11)$$

取不同的投资额变动幅度，可以求出一组 NPV＝0 的临界线方程

当 $z=+20\%$ 时，　$y=1.65x+0.1253$

当 $z=+10\%$ 时，　$y=1.65x+0.1477$

当 $z=-10\%$ 时，　$y=1.65x+0.1924$

当 $z=-20\%$ 时，　$y=1.65x+0.2148$

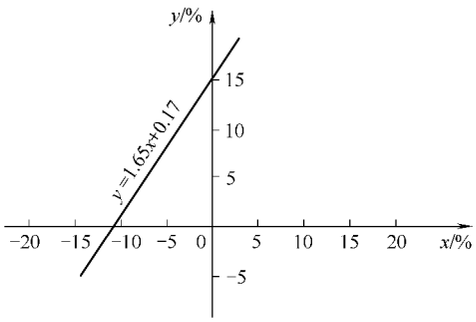


图 4-6　双因素敏感性分析图

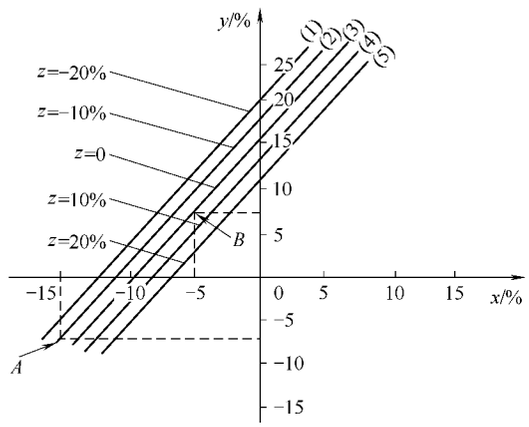


图 4-7　三因素敏感性分析图

在坐标图上，这是一组平行线（图 4-7）。由图 4-7 可以看出，投资额增加，临界线往左上方移动，投资额减少，临界线往右下方移动。根据三因素敏感性分析图，可以直观地了解投资额、产品价格和变动成本这三个不确定因素同时变动对方案经济效果的影响。在本例中，如果产品价格降低 15%，同时变动成本降低 7.5%，投资额减少 10%，产品价格与变动成本变动的状态点 A 位于临界线（2）的右下方，方案仍具有满意的经济效果。而如果产品价格降低 5%，同时变动成本上升 7.5%，投资额增加 10%，产品价格与变动成本变动的状态点 B 位于临界线（4）的左上方，方案就变得不可接受了。

第三节　环保项目的概率分析

敏感性分析的一个基本假设是各个不确定因素发生变动的概率相同，实际上，任何方案中各不确定因素在未来发生某一幅度变动的概率一般不尽相同。可能有这样的情况，通过敏感性分析找出的某一敏感因素未来发生不利变动的概率很小，因而实际上所带来的风险很小，以至于可以忽略不计，而另一不太敏感的因素未来发生不利变动的概率却很大，实际上所带来的风险比那个敏感因素更大。这种问题是敏感性分析所无法解决的，必须借助于概率分析。

概率分析是通过研究各个不确定因素发生不同幅度变动的概率分布及其对方案经济效果的影响，对方案的净现金流量及经济效果评价结果做出某种概率描述，从而判断方案的风险情况。

一、净现金流量的期望值及其方差

在进行概率分析时，把影响方案经济效果的各种不确定因素、方案的净现金流量，以及方案的经济效果指标都看成是随机变量。期望值与方差是随机变量重要的数字特征，在大量的重复事件中，期望值是随机变量取值的平均值，方差是随机变量取值与期望值之间离差平方的平均值，方差以及根据方差求得的标准差反映了随机变量取值的离散程度。

假定某方案的寿命期为 n 个周期（通常取 1 年为 1 个周期），净现金流量时间序列为

Y_0，Y_1，…，Y_n，周期数 n 和各周期的净现金流量 $Y_t(t=0, 1, \cdots, n)$ 都是随机变量，这些随机变量的数值取决于各已知的和未知的不确定因素的变动情况。为便于分析，设 n 为常数，从理论上讲，某一特定周期的净现金流量 Y_t 可能出现的数值有无限多个，把它们简化为若干个离散数值 $Y_t^{(1)}$，$Y_t^{(2)}$，…，$Y_t^{(n)}$，这些离散数值有的出现的概率要大一些，有的出现的概率要小一些。设与各离散数值对应的发生概率为 P_1，P_2，…，$P_m\left(\sum_{j=1}^{m} P_j = 1\right)$，则第 t 周期净现金流量 Y_t 的期望值为

$$E(Y_t) = \sum_{j=1}^{m} Y_t^{(j)} P_j \tag{4-12}$$

第 t 周期净现金流量 Y_t 的方差为

$$V(Y_t) = \sum_{j=1}^{m} [Y_t^{(j)} - E(Y_t)^2 P_j] \tag{4-13}$$

二、方案净现值的期望值及其方差

以下以净现值为例，讨论方案经济效果指标的概率描述。由于各个周期的净现金流量是随机变量，所以把各个周期的净现金流现值加和得到的方案净现值必然也是一个随机变量，称为随机净现值。随机净现值的计算公式为

$$\mathrm{NPV} = \sum_{t=0}^{n} Y_t (1+i)^{-t} \tag{4-14}$$

根据各周期净现金流量 $Y_t(t=0, 1, \cdots, n)$ 的期望值，可以求出方案净现值的期望值

$$E(\mathrm{NPV}) = \sum_{t=0}^{n} E(Y_t)(1+i)^{-t} \tag{4-15}$$

净现值方差的大小与方案净现金流量之间是否存在相关性有关，如果方案寿命期内任意两个净现金流量之间不存在相关关系或者不考虑净现金流量之间的相关关系，净现值方差的计算公式为

$$V(\mathrm{NPV}) = \sum_{t=0}^{n} V(Y_t)(1+i)^{-2t} \tag{4-16}$$

如果考虑净现金流量之间的相关关系，净现值的方差值往往要比不考虑相关关系时大，具体计算方法可参考有关概率统计方面的文献。

分别估算各个周期净现金流量 $Y_t(t=0, 1, \cdots, n)$ 的期望值与方差往往相当麻烦，如果能通过统计分析或主观判断给出方案寿命期内可能发生的各种状态所对应的净现金流量序列的概率，就可以用更简便的方法求出方案净现值的期望值与方差。假定某方案寿命期内可能发生 K 种状态，各种状态的净现金流量序列为

$$\{Y_t \mid t=0,1,\cdots,n\}^{(j)} (j=1,2,\cdots,K)$$

对应于各种状态的发生概率为

$$P_j (j = 1,2,\cdots,K, \sum_{j=1}^{k} P_j = 1)$$

则在第 j 种状态下，方案的净现值为

$$\mathrm{NPV}^{(j)} = \sum_{t=0}^{n} Y_{tj} (1+i)^{-t} \tag{4-17}$$

式中 Y_{tj}——在第 j 种状态下，第 t 周期的净现金流量。

方案净现值的期望值为

$$E(\mathrm{NPV}) = \sum_{j=1}^{k} \mathrm{NPV}^{(j)} P_j \tag{4-18}$$

在这种情况下净现值方差的计算公式为

$$V(\mathrm{NPV}) = \sum_{j=1}^{k} [\mathrm{NPV}^{(j)} - E(\mathrm{NPV})]^2 P_j \tag{4-19}$$

根据方案净现值的方差可求出方案净现值的标准差

$$\sigma = \sqrt{V(\mathrm{NPV})} \tag{4-20}$$

【例 4-4】 根据对未来经济技术环境的判断，例 4-2 中生产城市用电动小汽车的方案在其寿命期内可能出现 5 种状态的净现金流量序列及其发生概率见表 4-3，标准折现率为 10%，求方案净现值的期望值、方差与标准差。

【解】 对应于状态 θ_1

$\mathrm{NPV}^{(1)} = -15000 + 1630(P/A10,9)(P/F10,1) + 3630(P/F10,11) = -5194$ 万元

表 4-3　小型电动汽车投资方案在寿命期内 5 种状态的净现金流量及其发生概率/万元

概率 / 年末	$P_1=0.1$	$P_2=0.2$	$P_3=0.4$	$P_4=0.2$	$P_5=0.1$
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
0	−15000	−15000	−15000	−16500	−18000
1	0	0	0	0	0
2～10	1630	2620	4600	5060	5290
11	3630	4620	6600	7060	7290

对应于状态 θ_2

$\mathrm{NPV}^{(2)} = -15000 + 2620(P/A10,9)(P/F10,1) + 4620(P/F10,11) = 336$ 万元

对应于状态 θ_3

$\mathrm{NPV}^{(3)} = -15000 + 4600(P/A10,9)(P/F10,1) + 6600(P/F10,11) = 11397$ 万元

对应于状态 θ_4

$\mathrm{NPV}^{(4)} = -16500 + 5060(P/A10,9)(P/F10,1) + 7060(P/F10,11) = 12466$ 万元

对应于状态 θ_5

$\mathrm{NPV}^{(5)} = -18000 + 5290(P/A10,9)(P/F10,1) + 7290(P/F10,11) = 12251$ 万元

方案净现值的期望值

$$E(\mathrm{NPV}) = \mathrm{P}_1 \cdot \mathrm{NPV}^{(1)} + P_2 \cdot \mathrm{NPV}^{(2)} + P_3 \cdot \mathrm{NPV}^{(3)} + P_4 \cdot \mathrm{NPV}^{(4)} + P_5 \cdot \mathrm{NPV}^{(5)} = 7825 \text{ 万元}$$

方案净现值的方差

$$V(\mathrm{NPV}) = [\mathrm{NPV}^{(1)} - E(\mathrm{NPV})]^2 \cdot P_1 + [\mathrm{NPV}^{(2)} - E(\mathrm{NPV})]^2 \cdot P_2 + [\mathrm{NPV}^{(3)} - E(\mathrm{NPV})]^2 \cdot P_3 + [\mathrm{NPV}^{(4)} - \mathrm{E}(\mathrm{NPV})]^2 \cdot P_4 + [\mathrm{NPV}^{(5)} - E(\mathrm{NPV})]^2 \cdot P_5 = 39536857.7$$

方案净现值的标准差

$$\sigma = \sqrt{V(\mathrm{NPV})} = 6287.83 \text{ 万元}$$

求得期望值、方差和标准方差并不能完整地描述一个随机变量，要完整地描述一个随机

变量，需要确定其概率分布的类型。常见的概率分布有均匀分布、二项分布、泊松分布、指数分布和正态分布，在经济分析与决策中使用最普遍的是均匀分布与正态分布。关于这些概率分布类型的条件、特点及其参数的计算方法，读者可以参考有关概率统计方面的文献，这里不做介绍。值得指出的是，在实际工作中，不能仅参照教科书中的某些案例认定实际的概率分布服从于某种类型的概率分布，当做出某种假设以后必须将统计样本概率分布的形状与理论分布相比较，以检验所做假设是否合理。

如果知道方案的净现金流量以及经济效果指标的期望值、方差及概率分布类型，就可以对方案的风险情况有一个更清楚的了解。下面举例说明概率分析的方法及应用。

三、概率分析举例

【例 4-5】 已知某方案寿命期内各年净现金流量的期望值及其方差（表 4-4），假定各年净现金流量之间互不相关，并且都服从正态分布，标准折现率为 12%，求：

① 净现值大于或等于 0 的概率；

② 净现值小于 −150 万元的概率；

③ 净现值大于或等于 500 万元的概率。

表 4-4　某方案净现金流量的期望值与方差/万元

年　末	0	1	2	3	4	5
净现金流量期望值	−900	500	500	500	500	500
净现金流量方差	500^2	300^2	350^2	420^2	500^2	600^2

【解】 方案净现值是各年净现金流量的线性组合，所以方案净现值也具有正态分布。根据式（4-15）和式（4-16），方案净现值的期望值

$$E(\mathrm{NPV})=\sum_{t=0}^{n}E(Y_t)(1+i)^{-t}=-900+500(P/A12,5)=903\ \text{万元}$$

$$V(\mathrm{NPV})=\sum_{t=0}^{n}V(Y_t)(1+i)^{-2t}=500^2+300^2(P/F12,2)+350^2(P/F12,4)+420^2(P/F12,6)+500^2(P/F12,8)+600^2(P/F12,10)=763026$$

根据式（4-20），方案净现值的标准差

$$\sigma=\sqrt{V(\mathrm{NPV})}=\sqrt{763026}=874\ \text{万元}$$

由此可以计算各项待求概率。

① 净现值大于或等于 0 的概率　若连续型随机变量 x 服从参数为 μ、σ 的正态分布，x 具有分布函数

$$F(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{x}\mathrm{e}^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}t$$

令 $\mu=\dfrac{t-\mu}{\sigma}$，上式可化为标准正态分布函数

$$F(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}}\mathrm{e}^{-\frac{x^2}{2}}\mathrm{d}u=\Phi\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)$$

令 $Z=\dfrac{x-\mu}{\sigma}$，由标准正态分布表可直接查出 $x<x_0$ 的概率值 $P\left(Z<\dfrac{x_0-\mu}{\sigma}\right)$。

在本例中，把方案净现值看成是连续型随机变量

$$\mu = E(\mathrm{NPV}) = 903 \text{ 万元}$$

$$\sigma = 874 \text{ 万元}$$

令 $Z=\dfrac{\mathrm{NPV}-E(\mathrm{NPV})}{\sigma}$，净现值大于或等于 0 的概率为

$$P(\mathrm{NPV} \geqslant 0) = 1 - P(\mathrm{NPV} < 0) = 1 - P\left(Z < \frac{0-903}{874}\right)$$

$$= 1 - P(Z < -1.03) = 1 - 0.1515 = 0.8485$$

② 净现值小于 -150 万元的概率为

$$P(\mathrm{NPV} < -150) = P\left(Z < \frac{-150-903}{874}\right) = P(Z < -1.20) = 0.1151$$

③ 净现值大于或等于 500 万元的概率为

$$P(\mathrm{NPV} \geqslant 500) = 1 - P(\mathrm{NPV} < 500) = 1 - P\left(Z < \frac{500-903}{874}\right) = 1 - P(Z < -0.46) = 0.6772$$

由以上计算可以得知，在标准折现率为 12%的条件下，该方案净现值的期望值为 903 万元，标准差为 874 万元。在正态分布条件下，随机变量的实际取值在 $\mu \pm \sigma$（μ 为期望值，σ 为标准差）范围内的概率为 68.3%，在 $\mu \pm 2\sigma$ 范围内的概率为 95.4%，在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%。对于本例来说，这意味着方案的实际净现值在（903±874）万元范围内的可能性有 68.3%，在（903±1748）万元范围内的可能性有 95.4%，几乎不可能出现偏离期望值 2622 万元以上的情况。方案能够取得满意的经济效果（净现值大于或等于 0）的概率为 84.85%，不能取得满意经济效果（净现值小于 0）的概率为 15.15%，净现值小于 -150 万元的概率为 11.51%，净现值大于或等于 500 万元的概率为 67.72%。

概率分析的关键是确定随机变量取各种不同数值的概率，一般有两种方法：一是根据大量的历史数据进行统计分析；二是通过与同类事件的比较，由经济分析人员根据自己的知识与经验做出判断。无论采用何种方法，都要占有足够多的信息资料并对这些信息资料进行深入的分析研究。

第四节　环保项目评选中期望值与方差的权衡

有些环保项目，最终得出的不是一个确定的净现值（NPV）或内部收益率（IRR），而是它们某种概率的描述。最能反映这种概率分布特征的是它们的期望值和方差（或标准差）。前者反映平均最有可能达到的值的水平，后者反映平均的离散程度。这样在环保项目方案的评选中就出现期望值和方差之间的权衡问题。

图 4-8（a）中给出 A 和 B 两个方案的净现值概率密度分布图。它们的期望值相同，但 B 的不确定性要大些。由于人们通常都持避免风险（risk-avoiding）的态度，因此，只要期望值 $\overline{P}_0$ 大于零，认为方案 A 优于 B。图 4-8（b）中的情况较为复杂，方案 B 的期望值高，但风险也大。对于胆小、怕风险的决策者来说，他们宁可挑选方案 A。就费用-效益分析的范围来说，由于是以整个社会经济的总利益为出发点，对于大批中小型项目来说单用净现值（或内部收益率）的期望值来评选项目是有利的。否则，每个项目都选类似于 A、B 中的 A 方案，那么整个国民经济就会失掉可观的获得效益的机会。假定整个经济中有 n 个规模相似的项目，每一个项目的净现值的期望值和标准差都是 $\overline{P}_i$ 和 $\bar{\sigma}_i$，对每一个项目来说，它们的

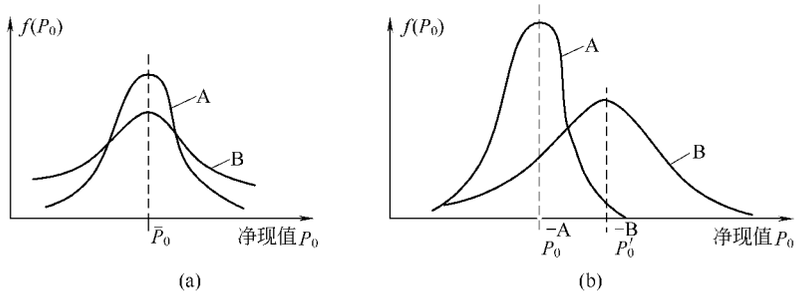


图 4-8　期望值与方差的权衡

离散系数是 $C_i=\frac{\bar{\sigma}_i}{\overline{P}_i}$。对整个经济来说，所有 n 个项目的净现值总和的期望值和标准差有

$$\overline{P}=n\,\overline{P}_i$$

$$\bar{\sigma}=\sqrt{n\bar{\sigma}^2}=\sqrt{n}\sigma_i$$

那么，度量离散程度的离散系数为 $C=\frac{1}{\sqrt{n}}C_i$。当 n（项目数）趋向很大时，总现值的离散度变得微不足道了，这种情况，在直觉上也很好理解。如果一个国民经济计划同时上 100 个中等规模的项目，由于不确定性，有些项目的效益会低于期望值，必然也会有一些项目的效益高于期望值。这种偏离相互抵消，最终实现的总效益会趋近于各项目效益期望值的总和。除非大部分期望效益都估计偏高，那才会使整个经济令人大失所望，但这不是随机因素的作用而是人为因素的作用，不属于不确定性所讨论的范围。

以上的这种讨论不适合于特别大型的项目或事关重大的决策。例如，大型的水利工程、大面积的作物品种的推广，除了期望效益外，决策者不能不考虑不确定性的程度。这时，决策者不仅要根据期望值效益，而且要根据期望效益的大小、风险的程度以及他本人对风险的态度来做出决策。人们的态度和数学期望不一致的情况，最早是由 D. Bernoulli 在研究博弈问题时发现的。所谓彼得堡矛盾问题（St. Petersburg paradox）就是一个典型的例子。一种赌博的规则是扔一个硬币，出现阴面时，可以继续掷，直至出现阳面，则结束。令 n 为第一次出现阳面时所掷的次数，规定掷者的赢钱数为 2^{n-1} 元，问人们愿出多少钱来参加这种赌赛？按古典概率，很容易算出参加这种赌赛赢钱的期望值是

$$E=\sum_{n=1}^{\infty}2^{n-1}\left(\frac{1}{2}\right)^n=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cdots=\infty$$

就是说赢钱的期望值是无穷大。如果人们按期望值来做出决策，那么他为了参加这种赢钱极大的赌赛，付出有限的钱，例如，10000 元是无所谓的事。但是，实际调查表明，大部分只愿付 2～3 元钱来参加这种博弈。这证明大部分人不是按最大的数学期望行事，而是按最大的期望效用（expected utility）来决策的。Bernoulli 当时就指出，人们的效用，不是和赢钱数 x 成线性关系，而是如式

$$U(x)=b\lg\frac{x}{a}$$

的对数关系。这类函数有如下特征

$$U'(x)=\frac{b}{x}\geqslant 0$$

$$U''(x)=-\frac{b}{x^2}\leqslant 0$$

即效用随 x 的增加而增加，但效用的增加率随 x 的增加而减少。实际上就是前面所提到的边际效用递减的规则（marginal diminishing of utility）。可以算出期望效用只是

$$E[U(x)]=b\lg\left(\frac{2}{a}\right) \tag{4-21}$$

当 a、b 是确定常数时，期望效用不是无穷大而是一个有限的数，而人们正是以自己的期望效用来做出决策的。伯努里（Bernoulli）的这个发现，直到 200 年后才被人们重视。著名数学家约翰·冯·纳曼（John von Neuman）和英国经济学家奥斯卡·毛杰斯坦（Oska Morgenstern）在 1944 年对效用理论做了系统的论证。在考虑某个项目的不确定性时，设 Y 为没有考虑项目时的整个经济总产出，X 为项目对于整个经济总产出的贡献。Y 和 X 都可以认为是随机变数。设 $U(Y)$ 为效用函数，由以上分析，它对于产出的一阶导数 $U'(Y)>0$，二阶导数 $U''(Y)<0$，期望效用可表示为

$$E[U(Y)] \tag{4-22}$$

当项目被接受时，期望效用为

$$E[U(Y+X)] \tag{4-23}$$

那么，项目被接受的条件是式（4-23）要大于式（4-22）。由于 X 的不确定性，引用一个等价于 X 的确定的数 x 来代替 X，

$$E[U(Y+X-x)]=E[U(Y)] \tag{4-24}$$

显然，项目被接受的条件是 $x>0$。把效用函数用 Taylor 级数展开，有

$$U(Y+X-x)=U(Y)+U'(Y)(X-x)+\frac{1}{2}U''(Y)(X-x)^2+\cdots$$

求期望值后，由式（4-24）的关系有

$$E[U'(Y)(X-x)]+\frac{1}{2}E[U''(Y)(X-x)^2]+\cdots=0 \tag{4-25}$$

假定 X 与 Y 是相互独立的，有

$$E[U'(Y)(X-x)]+\frac{1}{2}E[U''(Y)]E[(X-x)^2]+\cdots=0 \tag{4-26}$$

因为　$E[(X-x)^2]=E[(X-\overline{X}+\overline{X}-x)^2]=E[(X-\overline{X})^2]+(\overline{X}-x)^2=\mathrm{Var}(X)+(\overline{X}-x)^2$

式中　Var——代表方差。

式（4-26）可写为

$$(\overline{X}-x)=-\frac{1}{2}\frac{E[U''(Y)]}{E[U'(Y)]}\mathrm{Var}(X)-\frac{1}{2}\frac{E[U''(Y)]}{E[U'(Y)]}(\overline{X}-x)^2+\cdots \tag{4-27}$$

注意，$-\dfrac{U''(Y)}{U'(Y)}\cdot Y$，实际上就是边际效用对于收益的弹性，在这里通常称为相对风险避免指数（relative risk-aversion index）。因此，可以认为

$$\frac{E[U''(Y)]}{E[U'(Y)]}=-\frac{A}{\overline{Y}} \tag{4-28}$$

式中　A——常数，通常取 2～4。

把式（4-28）代入式（4-27）后可得

$$\frac{\overline{X}-x}{\overline{X}}=\frac{1}{2}A\,\frac{\mathrm{Var}(X)}{\overline{X}^2}\cdot\frac{\overline{X}}{\overline{Y}}+\frac{1}{2}A\left(\frac{\overline{X}-x}{\overline{X}}\right)^2\cdot\frac{\overline{X}}{\overline{Y}}+\cdots \tag{4-29}$$

上式的第二项以后可以认为是很小的，x 可近似地表示为

$$x=\overline{X}\left(1-\frac{1}{2}A\,\frac{\mathrm{Var}(X)}{\overline{X}^2}\cdot\frac{\overline{X}}{\overline{Y}}\right) \tag{4-30}$$

这个公式至少在定性上对项目不确定性的认识有所帮助。

（1）当项目的产出贡献占全部产出的比例 $\overline{X}/\overline{Y}$ 很小时，不确定情况的确定当量（即这个不确定项目的贡献相当于一个完全确定项目的贡献）x 就等于项目的期望贡献 $\overline{X}$。

（2）当$\dfrac{\overline{X}}{\overline{Y}}$较大时，项目的确定当量 x 随 X 的方差增加而减小。举例说，整个经济的平均产出 $\overline{Y}=100$ 亿，某项目的产出

$$X=\begin{cases}3\text{ 亿}, & P_{\mathrm{rob}}(x)=1/2;\\ 17\text{ 亿}, & P_{\mathrm{rob}}(x)=1/2\end{cases}$$

$$X=3\times\frac{1}{2}+17\times\frac{1}{2}=10\text{ 亿}$$

$$\mathrm{Var}(X)=(3-10)^2\times\frac{1}{2}+(17-10)^2\times\frac{1}{2}=49\text{ 亿}$$

代入式（4-30），并设 $A=4$，有

$$x=10\times\left(1-\frac{1}{2}\times4\times\frac{49}{100}\times0.1\right)=9\text{ 亿}$$

可以认为，这个项目虽然平均产出有 10 亿，却只相当于确定情况下的项目产出的 9 亿左右。

（3）公式（4-30）的一个重要参数 A 来源于边际效益的递减速度，A 的大小反映了决策者对于不确定因素的态度，通常取 2～4 之间。有意思的是，整个公式推导，说明人们对风险的规避态度与人们的边际效用的递减规律有关。

第五章　环保设备更新的经济分析

环保设备是环境行业生产力的重要组成要素，是环境保护的物质技术基础。各种环保设备的数量、质量和技术水平是衡量一个国家环境保护事业的重要标志，是影响环境企业和国民经济各项经济技术指标的重要因素。

环境行业生产中，环保设备作为固定资产其价值要在使用过程中逐步转移到产品中去。环保设备使用一定时期后就会发生价值损耗，损耗的实物形式是磨损及由此引起的陈旧落后和报废。要使再生产持续，就必须对设备进行补偿。补偿形式有修理、改装和改换旧设备，代之以更先进、更经济的新设备。这种补偿形式广义上都叫作“设备更新”（狭义的设备更新仅指用新设备更换旧设备）。环保设备对于提高环保企业的技术水平和经济效益具有重要意义，而环保设备更新的经济分析将为设备更新提供科学的依据。

第一节　环保设备的磨损与补偿

环保设备在使用和闲置过程中都会逐渐磨损。磨损是环保设备陈旧落后的主要原因。研究环保设备更新问题首先要研究环保设备磨损的规律。

一、环保设备磨损的形式

设备磨损可分为有形磨损和无形磨损两种形式。

1. 有形磨损

设备在使用过程中由于零部件的摩擦、振动、疲劳或介质腐蚀、材料老化等导致的设备实体的损坏称为有形磨损。设备在闲置不用时，由于自然力的作用也会发生有形磨损（如锈蚀等）。设备的有形磨损通常表现为设备零部件原始尺寸的改变、连接部位公差配合性质的改变、设备精度和工作效率的降低、零部件的损坏等。

有形磨损使机器的使用价值降低，磨损严重到一定程度将使环保设备完全丧失其使用价值。

2. 无形磨损

马克思指出：“机器除了有形磨损以外，还有无形磨损，只要同样结构的机器能够更便宜地再生产出来，或者出现更好的机器同原有的机器相竞争，原有机器的交换价值就会受到损失。在这两种情况下，即使原有的机器还富有生命力，它的价值也不再由实际物化在其中的劳动时间来决定，而由它本身的再生产或更好的机器的再生产的必要劳动时间来决定了，因此，它或多或少地贬值了。”

按照马克思的分析，设备的无形磨损有两种原因。第一种原因是由于制造工艺不断改进，成本不断降低，劳动生产率不断提高，生产同样设备所需要的社会必要劳动时间减少了，因而使原有设备贬值。由于这种原因引起的无形磨损称为第Ⅰ类无形磨损。电子表是一种计时设备，刚问世时价格是相当昂贵的，随着生产技术的改进，目前价格已相当低廉，这样，早期生产的电子表就必然因第Ⅰ类无形磨损而贬值。第Ⅰ类无形磨损虽然使现有设备贬值，但设备本身的技术特性与功能不受影响，其使用价值没有发生变化，因而不存在对现有设备提前更换的问题。

环保设备无形磨损的第二种原因是由于技术进步出现了结构更先进、性能更完善、生产

效率提高、能源和原材料消耗更少的新型设备，因而使原有设备贬值。由这种原因引起的无形磨损称为第Ⅱ类无形磨损。第Ⅱ类无形磨损不仅使原有设备以货币形式表现的交换价值降低，而且导致原有设备使用价值的局部丧失或完全丧失。

在现代经济条件下，设备无形磨损的形式已超出了马克思所分析过的范围。社会消费结构的变化导致人们对产品需求的变化，从而引起生产某些产品的机器设备丧失其使用价值；人们对生活质量要求的提高，使得某些对人类生活环境产生有害影响的机器设备（如引起噪声污染、空气污染、水污染的设备）的使用受到限制，这些也都造成设备的无形磨损。

二、环保设备的劣化过程

由于有形磨损和无形磨损的影响，环保设备在其服役期间一般有一个性能逐渐劣化的过程。环保设备的劣化有绝对劣化和相对劣化两种形式。有形磨损导致设备的绝对劣化，表现为设备的精度和效率愈来愈低，单位时间故障次数愈来愈多，这使得生产过程中设备的操作维修费用上升，原材料、能源消耗增加，废品损失增加，产量下降，从而导致单位时间设备运行成本增加、与设备使用有关的产品生产成本增加。无形磨损（主要是第Ⅱ类无形磨损）导致设备的相对劣化，即由于性能更好的新型环保设备的出现，使原有环保设备在精度、效率、可靠性等方面显得相对低劣。一般来说，使用新型设备能够降低设备运行成本，提高产品质量与产量。这意味着，如果继续使用旧的环保设备将放弃使用新设备可以带来的各种收益，实际上等于要蒙受一种相对损失。设备的绝对劣化与相对劣化是环保设备更新经济分析中要考虑的重要因素。

通常把因设备绝对劣化引起的单位时间（一般取 1 年）设备运行成本的增加额和因相对劣化引起的单位时间相对损失额叫作环保设备的劣化值。对于绝对劣化，劣化值的计算公式为

$$W_t = C_t - C_0 = \sum_{i=0}^{t} \lambda_i \tag{5-1}$$

式中　W_t——役龄为 t 个周期时环保设备的劣化值；

C_t——第 t 周期环保设备的运行成本；

C_0——原环保新设备使用第 1 个周期的运行成本；

λ_i——设备在第 i 周期的劣化值增量。

$$\lambda_i = \begin{cases} 0, & i=1 \\ C_i - C_{i-1}, & i>1 \end{cases} \tag{5-2}$$

式（5-1）没有考虑因设备绝对劣化引起的产量下降损失，如果考虑产量下降损失，劣化值的计算公式为

$$W_t = C_t - C_0 + B_{qt} = \sum_{i=1}^{t} \lambda_i^* \tag{5-3}$$

式中　B_{qt}——役龄为 t 个周期时，因环保设备绝对劣化导致产量下降所造成的损失额；

λ_i^*——考虑产量下降损失，设备在第 i 周期的劣化值增量。

如果同时考虑环保设备的绝对劣化与相对劣化，劣化值的计算公式为

$$W_t = C_t - C_N + B_{rt} \tag{5-4}$$

式中　C_t——原环保设备使用第 t 个周期的运行成本；

C_N——新型环保设备使用第 1 个周期的运行成本；

B_{rt}——新型环保设备使用第 1 个周期相对于原环保设备使用第 1 个周期因产品产量增加和质量提高而带来的收益增加额。

三、环保设备磨损的补偿方式

为了保证再生产过程的持续进行，对环保设备的磨损必须及时进行补偿。环保设备磨损的形式不同，补偿的方式也不同。补偿分为局部补偿和完全补偿。环保设备有形磨损的局部补偿是修理，通过修理更换或者修复被磨损的零部件从而恢复设备的性能。环保设备无形磨损（主要指第Ⅱ类无形磨损）的局部补偿是进行现代化改装，即根据生产需要，应用现代化技术给旧设备装上新部件、新装置、新附件，改善现有设备的技术性能，使之全部或局部达到新型先进设备的水平。环保设备有形磨损与无形磨损的完全补偿是用新环保设备更换旧设备，也就是狭义的设备更新（为避免混淆，如无特别说明，后文中均使用狭义的设备更新概念）。环保设备更新有两种形式：一种是原型更新，即用结构、性能完全相同的新环保设备更换已不能继续使用或不宜继续使用的旧环保设备，这种更新只能补偿设备的有形磨损；另一种更新形式是用结构更先进、技术更完善、效率更高、性能更好的新型环保设备更换旧环保设备，这种更新既可补偿环保设备的有形磨损，又可补偿环保设备的无形磨损。

第二节　环保设备的经济寿命

一、环保设备经济寿命的概念

环保设备的寿命从不同角度考虑，有物理寿命、技术寿命、折旧寿命和经济寿命之分。

物理寿命，又称自然寿命，是由有形磨损决定的，指设备从全新状态开始使用直到报废所延续的时间。它与设备维修保养的好坏有关，通过修理可以延长设备的物理寿命。

技术寿命，是由无形磨损决定的，指从设备开始使用到因技术落后而被淘汰所延续的时间。它与技术进步的速度有关，技术进步愈快，设备的技术寿命愈短。往往因为有更先进的设备出现或生产过程对设备的技术性能提出更高的要求，现有设备在其物理寿命尚未结束前就被淘汰。

折旧寿命，指按照财政部门的规定提取折旧，从环保设备开始使用到设备的账面价值接近于零时所延续的时间。就其实质而言，折旧是对应于设备价值损耗的补偿基金，环保设备的价值损耗是由有形磨损与无形磨损共同决定的。实践中各类设备的折旧寿命（也叫折旧年限）由国家统一规定，对于某一具体环保设备来说，其折旧寿命与物理寿命或技术寿命没有必然联系。

经济寿命，指从经济角度看环保设备最合理的使用期限，也就是从一台环保设备开始使用到根据经济分析应该被另一台设备所代替所延续的时间。

使用设备的总费用由两部分组成，一是购置、安装设备的投资，二是设备的运行成本。在设备使用过程中，一方面，随着使用时间的延长，单位时间分摊的设备投资愈来愈少；另一方面，由于设备逐渐劣化，其边际运行成本愈来愈高，从而使得期间单位时间的平均运行成本愈来愈高。综合考虑这两方面的影响，一般来说，随着使用时间的延长，使用设备的单位时间平均总费用的变化规律是先降后升，呈“U”形曲线。在某一特定的使用期限，会达到单位时间平均总费用的最小值（图 5-1）。这一使单位时间平均总费用最低的使用期限就是

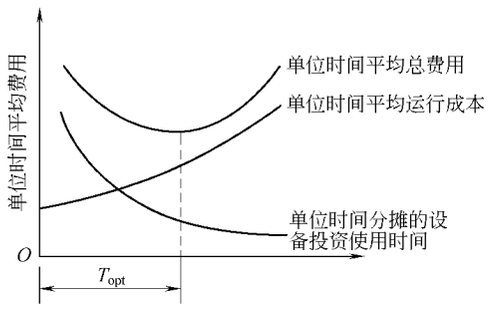


图 5-1　单位时间平均使用费用与环保设备使用时间的关系

设备的经济寿命。

二、新环保设备经济寿命的计算

假如已知一台新环保设备的原始价值（指购置安装设备的投资）和环保设备在未来的使用过程中各年的运行成本及年末残值（指可售价值），可以通过逐年计算不同使用年限的年均总费用求出设备的经济寿命。

如果不考虑资金的时间价值，使用设备的年均总费用为

$$AC_T = \frac{1}{T}(K_0 - K_T) + \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} C_t \tag{5-5}$$

式中　AC_T——使用年限为 T 时的年均总费用；

T——环保设备使用年限；

K_0——环保设备原始价值；

K_T——T 年末环保设备残值；

C_t——第 t 年环保设备运行成本。

各年的设备运行成本可以根据设备的初始运行成本（指设备投入使用第一年的运行成本）和各年的劣化值求得

$$C_t = C_0 + W_t = C_0 + \sum_{i=1}^{t} \lambda_i \tag{5-6}$$

式中　C_0——环保设备的初始运行成本；

W_t——役龄为 t 年时设备的劣化值；

λ_i——环保设备在第 i 年的劣化值增量。

对应于不同使用年限的年均总费用最小值 $\min\{AC_T \mid T=1, 2, \cdots, N\}$（$N$ 为设备技术寿命与物理寿命中的较短者）的使用年限即为设备的经济寿命。

如果考虑资金的时间价值，使用设备的年均总费用为

$$\begin{aligned} AC_T &= K_0(A/Pi,T) - K_T(A/Fi,T) + \left[\sum_{t=1}^{T} C_t(P/Fi,t)\right](A/Pi,T) \\ &= K_0(A/Pi,T) - K_T(A/Fi,T) + C_0 + \left[\sum_{t=1}^{T} W_t(P/Fi,t)\right](A/Pi,T) \end{aligned} \tag{5-7}$$

或

$$\begin{aligned} AC_T &= \left[K_0 - K_T(P/Fi,T) + \sum_{t=1}^{T} C_t(P/Fi,t)\right](A/Pi,T) \\ &= C_0 + \left[K_0 - K_T(P/Fi,T) + \sum_{t=1}^{T} W_t(P/Fi,t)\right](A/Pi,T) \\ &= C_0 + \left[K_0 - K_T(P/Fi,T) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{t} \lambda_i(P/Fi,t)\right](A/Pi,T) \end{aligned} \tag{5-8}$$

在具体计算新设备的经济寿命时，可以使用列表法。

【例 5-1】　某环保设备原始价值 10000 元，物理寿命为 10 年，初始运行成本为 1200 元，各年的劣化值和年末残值见表 5-1，求该环保设备的经济寿命。

【解】　表 5-1 中列出了在不考虑资金时间价值的情况下不同设备使用年限年均总费用的计算过程与结果。可以看出，使用年限为 7 年时年均总费用最低，其值为 3136 元，故可知不考虑资金时间价值时该设备的经济寿命为 7 年。

表 5-1　不考虑资金时间价值不同设备使用年限年均总费用的计算/元

年份 T	劣化值 W_T	年运行成本 $C_T=C_0+W_T$ ($C_0=1200$)	年均运行成本	年末残值 K_T	年均设备投资 ($K_0=10000$)	年均总费用
1	0	1200	1200	7000	3000	4200
2	150	1350	1275	5000	2500	3775
3	300	1500	1350	3500	2167	3517
4	500	1700	1438	2000	2000	3438
5	750	1950	1540	1000	1800	3340
6	1050	2250	1658	800	1533	3191
7	1400	2600	1793	600	1343	3136*
8	1800	3000	1964	400	1200	3144
9	2300	3500	2117	200	1089	3206
10	2800	4000	2305	100	990	3295

如果考虑资金的时间价值，假定折现率为 10%，不同设备使用年限年均总费用的计算过程和结果见表 5-2，使用年限为 8 年时年均总费用最低，其值为 3659.01，故若考虑资金的时间价值该设备的经济寿命为 8 年。

计算新环保设备经济寿命的难点在于准确地预测未来各年设备的运行成本和年末残值，如果预测数据不准确，复杂的计算就没有意义。实际上，可以通过做出某些合理的假设来简化计算过程。

假定随着环保设备使用年限的延长，环保设备的劣化过程是均匀的，即年运行成本呈线性增长。设每年设备劣化值的增量为 λ，则环保设备使用到第 T 年时的年运行成本为

$$C_T=C_0+W_T=C_0+(T-1)\lambda \tag{5-9}$$

表 5-2　考虑资金时间价值不同设备使用年限年均总费用的计算/元

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
年份	劣化值	劣化值现值	累计劣化值现值	劣化值年值	设备投资年值	年末残值	年末残值年值	年均总费用
T	W_T	$W_T(P/Fi,T)$	$(P/Fi,T)$	④×$(A/Pi,T)$	$K_0(A/Fi,T)$ ($K_0=10000$)	K_T	$K_T(A/Fi,T)$	⑥−⑧+⑤+C_0($C_0=1200$)
1	0	0	0	0	11000	7000	7000	5200
2	150	123.96	123.96	71.43	5762	5000	2380.6	4652.83
3	300	225.39	349.35	140.47	4021	3500	1057.4	4304.07
4	500	341.50	690.85	217.96	3155	2000	430.9	4142.06
5	750	465.68	1156.53	309.72	2678	1000	163.8	4023.92
6	1050	597.73	1749.25	401.63	2296	800	103.7	3793.93
7	1400	718.48	2467.73	500.01	2054	600	63.2	3697.67
8	1800	839.70	3307.43	619.81	1874	400	34.8	3659.01
9	2300	975.43	4282.86	743.5	1736	200	14.7	3664.80
10	2800	1079.40	5362.26	872.98	1628	100	6.27	3694.71

对于环保设备的年末残值，一般不宜假定线性递减，多数设备在其使用初期残值逐年锐减，而使用一定年限以后，由于不断地进行修理，残值不再有大的变化，所以我们可以假定设备使用一段时间后，其残值为一常数 K_L。在上述两个假定条件下，如果不考虑资金的时间价值，使用设备的年均总费用为

$$AC_T=\frac{1}{T}(K_0-K_L)+\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}C_t=\frac{1}{T}(K_0-K_L)+C_0+\frac{1}{2}(T-1)\lambda \tag{5-10}$$

AC_T 是使用年限 T 的函数，我们可以通过导数运算求得设备的经济寿命

$$\frac{d(AC_T)}{dT}=\frac{\lambda}{2}-\frac{1}{T^2}(K_0-K_L)$$

令

$$\frac{d(AC_T)}{dT}=0$$

则有

$$T_{opt}=\sqrt{\frac{2(K_0-K_L)}{\lambda}} \tag{5-11}$$

式（5-11）即为在设备年运行成本呈线性增长、环保设备残值为一常数的假定条件下，不考虑资金时间价值时环保设备经济寿命的计算公式。

如果考虑资金的时间价值，使用设备的年均费用为

$$AC_T=K_0(A/Pi,T)-K_L(A/Fi,T)+C_0+\lambda(A/Gi,T) \tag{5-12}$$

式中　$(A/Gi,T)$——等差数列年值系数。

$$(A/Gi,T)=\frac{(1+i)^T-iT-1}{i(1+i)^T-i}$$

对应于 $\min\{AC_T \mid T=1,2,\cdots,N\}$ 的使用年限即为设备的经济寿命，可以用列表法求得。

【例 5-2】 某工厂新购置一台环保设备，投资 10000 元，预计物理寿命为 12 年，第一年初始运行成本为 800 元，以后每年的劣化值增量为 320 元，设备一经安装，拆除后残值为零，求该设备的经济寿命。

【解】 已知 $K_0=10000$，$K_L=0$，$\lambda=320$，不考虑资金的时间价值，设备的经济寿命为

$$T_{opt}=\sqrt{\frac{2(K_0-K_L)}{\lambda}}=\sqrt{\frac{2\times10000}{320}}=7.9\text{ 年}$$

如果考虑资金的时间价值，假定折现率为 10%，不同设备使用年限年均总费用的计算过程与结果见表 5-3，设备的经济寿命为 9 年。

表 5-3　不同设备使用年限年均总费用的计算/元

①	②	③	④	①	②	③	④
年份 T	设备投资年值 $K_0(A/Pi,T)$ $(K_0=10000)$	劣化值年值 $\lambda(A/Gi,T)$	年均总费用 ②+③+C_0 $(C_0=800)$	年份 T	设备投资年值 $K_0(A/Pi,T)$ $(K_0=10000)$	劣化值年值 $\lambda(A/Gi,T)$	年均总费用 ②+③+C_0 $(C_0=800)$
1	11000	0	11800	7	2054	838.9	3692.9
2	5762	152.4	6714.4	8	1847	961.4	3635.4
3	4021	299.7	5120.7	9	1736	1079.2	3615.2
4	3155	442.0	4397.0	10	1627	1192.2	3619.2
5	2628	579.2	4017.2	11	1540	1300.5	3640.5
6	2296	711.6	3807.6	12	1468	1404.3	3672.3

第三节　环保设备更新的决策方法

随着经济的发展，环保设备在环保事业中的作用愈来愈大，设备成本的比例愈来愈高，适时地更新环保设备，对于实现企业技术进步，降低生产成本，提高经济效益具有更重要的意义。决定一台环保设备是否需要更新取决于两个条件：一是该设备在技术上是否还能满足使用要求；二是继续使用该设备经济上是否合理。本节是从经济角度讨论环保设备更新的决策方法，决策的目标是以最低的成本获取最大的收益。

环保设备更新决策实际上是对继续使用原设备和用新设备更换原设备这样两个方案进行比较选择。通常称原有设备为“防卫设备”，称新设备为“挑战设备”。一般来说，方案比选方法都可以用于设备更新决策，但是由于挑战设备与防卫设备的经济寿命往往不同，多数情况下使用年值法与投资收益率法比较方便。下面介绍的更新决策方法在原理上与上述方案比选方法相同，但根据设备更新问题的特点引入了一些合理的假定，计算方法做了简化。

一、年费用比较法

年费用比较法的基本思路是：分别计算挑战设备（备选新设备）与防卫设备（原有旧设备）在其经济寿命期内的年均总费用并加以比较，如果使用挑战设备的年均总费用低于使用防卫设备的年均总费用，则应立即进行设备更新，否则就应继续使用原有设备。

1. 新环保设备经济寿命期内年均总费用的计算

在环保设备年运行成本呈线性增长、环保设备残值为一常数的假定条件下，如果不考虑资金的时间价值，新设备在使用年限为 T 时年均总费用与新设备经济寿命的计算公式分别为式（5-10）与式（5-11），将式（5-11）代入式（5-10），新设备按其经济寿命计算的年均总费用为

$$\mathrm{AC}^{\mathrm{N}}=\sqrt{2\lambda(K_0-K_{\mathrm{L}})}+C_0-\frac{\lambda}{2} \tag{5-13}$$

如果考虑资金的时间价值，求新设备经济寿命期内的年均总费用一般需要采用列表计算法，这是比较麻烦的。实际上，设备年运行成本呈线性增长、设备残值为一常数这两个条件本身就是一种近似假定，实际工作中对有关参数（如 C_0、λ、K_{L} 等）的预测估算也不会完全准确，在这种情况下，采用复杂的资金等值计算方法意义并不大。为了简化计算，对于资金的时间价值可以只考虑因设备投资占用资金引起的利息损失。

设利息为 i，各年因资金占用引起的利息损失为 $I_t(t=1,2,\cdots,T)$，假定 T 年内每年设备价值的减少额为 $\frac{1}{T}(K_0-K_{\mathrm{L}})$，按每一年内资金占用的平均值计算各年的利息损失，则有

$$I_1=i\left[K_0-\frac{1}{2T}(K_0-K_{\mathrm{L}})\right]$$

$$I_2=i\left[K_0-\frac{3}{2T}(K_0-K_{\mathrm{L}})\right]$$

$$I_3=i\left[K_0-\frac{5}{2T}(K_0-K_{\mathrm{L}})\right]$$

$$\vdots$$

$$I_T=i\left[K_0-\frac{2T-1}{2T}(K_0-K_{\mathrm{L}})\right]$$

T 年内年均利息损失为

$$I_m=\frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T}I_t\right)=\frac{i}{2}(K_0+K_{\mathrm{L}}) \tag{5-14}$$

考虑因设备投资占用资金引起的利息损失，新设备使用 T 年时年均总费用为

$$\mathrm{AC}_T=\frac{1}{T}(K_0-K_{\mathrm{L}})+\frac{i}{2}(K_0+K_{\mathrm{L}})+C_0+\frac{T-1}{2}\lambda \tag{5-15}$$

在设备残值为常数的条件下，年均利息损失与使用年限无关，故不影响设备的经济寿命，设备的经济寿命仍可由式（5-11）求得，将式（5-11）代入式（5-15），考虑利息损失时

新设备经济寿命期内年均总费用 AC^N 的计算公式为

$$AC^N = \sqrt{2\lambda(K_0 - K_L)} + \frac{1}{2}[i(K_0 + K_L) - \lambda] + C_0 \tag{5-16}$$

如果设备残值逐年不等，则各年因资金占用引起的利息损失为

$$I_1 = \frac{i}{2}(K_0 + K_1)$$

$$I_2 = \frac{i}{2}(K_1 + K_2)$$

$$\vdots$$

$$I_T = \frac{i}{2}(K_{T-1} + K_T)$$

T 年内年均利息损失为

$$I_m = \frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T} I_t\right) = \frac{i}{2T}\sum_{t=0}^{T-1}(K_t + K_{t+1}) \tag{5-17}$$

在不做环保设备年运行成本呈线性增长、环保设备残值为一常数这两条假定的一般情况下，如果对资金时间价值只考虑占用引起的利息损失，新设备在使用年限为 T 时年均总费用的计算公式为

$$\begin{aligned} AC_T &= \frac{1}{T}(K_0 - K_T) + \frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T} C_t\right) + \frac{i}{2T}\sum_{t=0}^{T-1}(K_t + K_{t+1}) \\ &= \frac{1}{T}(K_0 - K_T) + C_0 + \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} W_t + \frac{i}{2T}\sum_{t=0}^{T-1}(K_t + K_{t+1}) \\ &= \frac{1}{T}(K_0 - K_T) + C_0 + \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{t}\lambda_i + \frac{i}{2T}\sum_{t=0}^{T-1}(K_t + K_{t+1}) \end{aligned} \tag{5-18}$$

新环保设备的经济寿命及按其经济寿命计算的年均总费用可用列表计算法求得。

$$AC^N = \min\{AC_T \mid T = 1, 2, \cdots, N\} \tag{5-19}$$

式中　AC^N——年均总费用；

$\{AC_T \mid T = 1, 2, 3, \cdots, N\}$——年均总费用集合；

AC_T——第 T 年的年均费用。

2. 原环保设备经济寿命期内年均总费用的计算

原环保设备的经济寿命指从决策时刻起计的使年均总费用最低的使用年限。原环保设备经济寿命期内年均总费用的一般计算式为

$$AC_T = \frac{1}{T}(K_0 - K_T) + C_0 + \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} W_t + \frac{i}{2T}\sum_{t=0}^{T-1}(K_t + K_{t+1}) \tag{5-20}$$

$$AC^O = \min\{AC_T \mid T = 1, 2, \cdots, N\} \tag{5-21}$$

式中　AC^O——原环保设备按其经济寿命计算的年均总费用；

$\{AC_T \mid T = 1, 2, \cdots, N\}$——年均总费用集合；

K_0——决策时刻原环保设备的原始价值；

K_T——再使用 t 年原环保设备的残值；

C_0——新环保设备的初始运行成本；

W_T——原环保设备再使用 t 年相对于新设备的劣化值。

大多数情况下，原环保设备的年均总费用是随着使用年限的延长逐年递增的，这是

由于旧环保设备相对低的贬值率和相对高的年劣化值增量所造成的。所以，原环保设备的经济寿命通常只有一年，其经济寿命期内的年均总费用也就是下一年的总费用，计算公式可简化为

$$AC^O = K_0 - K_1 + C_0 + W_1 + \frac{i}{2}(K_0 + K_1) \tag{5-22}$$

计算原环保设备经济寿命期内的年均总费用要特别注意两点。

第一，不应考虑沉没成本。原环保设备的原始价值不是指其最初购置安装时的投资，而是指决策时刻原设备在市场上的可售价值加上继续使用原设备所必需的追加投资。

第二，原环保设备的劣化值是指相对于新环保设备初始运行成本的劣化值。在新设备为原型设备的情况下，只考虑绝对劣化，劣化值的计算公式为式（5-1），在新设备为性能更好的新型设备的情况下，应同时考虑绝对劣化与相对劣化，劣化值的计算公式为式（5-4）。

使用年费用比较法进行环保设备更新决策时，决策的依据是新设备与原设备在其各自的经济寿命期内年均总费用的相对高低。为简化计算，可在分别计算新旧设备经济寿命期内年均总费用时都不计入新设备的初始运行成本 C_0。

【例 5-3】 某旧环保设备已使用若干年，若现在出售可卖 8000 元，若继续使用一年，预计运行成本为 8000 元，一年后出售可卖 7500 元，若一年后在继续使用，每年劣化值增量不低于 600 元，设备贬值不超过 500 元。如果用新设备更换该旧设备，需投资 20000 元，预计新环保设备第一年的运行成本为 4500 元，以后每年将增加 520 元，新环保设备使用 5 年后残值为 7000 元，以后几年将大致稳定在这一水平上。试做出应否进行设备更新的决策。设利率为 8%。

【解】 假定新环保设备在其经济寿命期结束时残值为 7000 元，新设备的经济寿命

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{2(K_0 - K_L)}{\lambda}} = \sqrt{\frac{2\times(20000-7000)}{520}} = 7 \text{ 年}$$

新环保设备在其经济寿命期内的年均总费用

$$\begin{aligned} AC^N &= \sqrt{2\lambda(K_0 - K_L)} + \frac{1}{2}[i(K_0 + K_L) - \lambda] \\ &= \sqrt{2\times520\times(20000-7000)} + \frac{1}{2}[0.08\times(20000+70000) - 520] \\ &= 4497 \text{ 元} \end{aligned}$$

上述没有计入新环保设备的初始运行成本。

根据已知条件分析，旧环保设备继续使用其年均总费用将随着使用年限的延长逐年递增，故旧环保设备的经济寿命只有一年，其经济寿命期内的年均总费用也就是下一年的总费用。故

$$\begin{aligned} AC^O &= K_0 - K_1 + W_1 + \frac{i}{2}(K_0 + K_1) \\ &= 8000 - 7500 + (8000 - 4500) + 0.08\times0.5\times(8000+7500) \\ &= 4620 \text{ 元} \end{aligned}$$

$AC^O > AC^N$，应该进行环保设备更新。

二、总费用比较法

在考虑环保设备更新时，可能面临若干种并存的可行方案。在某些情况下，通过比较特

定服务年限内各种方案的总费用来进行更新决策更为方便。

1. 特定服务年限内最佳更新时机的确定

以上对年费用比较法的讨论没有考虑企业需要设备服务的年限。如果所需要的设备服务年限大于在用旧环保设备的可服务年限而又小于合理的旧环保设备服务年限与新环保设备经济寿命之和，也就是说，在所需要的服务年限内必须更新一次，但是新环保设备的使用年限又可能达不到其经济寿命期，那么，就需要确定哪一年进行环保设备更新经济上最合理。在这种情况下，用总费用比较法进行决策比较方便，决策的原则是在特定服务年限内新旧环保设备总费用之和最小。

设需要的环保设备服务年限为 N 年，若第 T 年末进行环保设备更新，则旧环保设备的使用年限为 T 年，新环保设备的使用年限为（$N-T$）年。如果不考虑资金的时间价值，旧环保设备使用 T 年的总费用为

$$\mathrm{TC}^{\mathrm{O}} = K_0^{\mathrm{O}} - K_T^{\mathrm{O}} + \sum_{t=1}^{T} C_t^{\mathrm{O}} \tag{5-23}$$

式中　TC^{O}——旧环保设备使用 T 年的总费用；

K_0^{O}——旧环保设备在决策年份的价值；

K_T^{O}——旧环保设备第 T 年末的残值；

C_t^{O}——旧环保设备第 t 年的运行成本。

新环保设备使用（$N-T$）年的总费用为

$$\mathrm{TC}^{\mathrm{N}} = K_0^{\mathrm{N}} - K_{\mathrm{L}}^{\mathrm{N}} + \sum_{t=1}^{N-T} C_t^{\mathrm{N}} \tag{5-24}$$

式中　TC^{N}——新环保设备使用（$N-T$）年的总费用；

K_0^{N}——新环保设备的原始价值；

$K_{\mathrm{L}}^{\mathrm{N}}$——新环保设备使用（$N-T$）年后的残值；

C_t^{N}——新环保设备第 t 年的运行成本。

N 年内新环保设备总费用之和为

$$\mathrm{TC}_T = \mathrm{TC}^{\mathrm{O}} + \mathrm{TC}^{\mathrm{N}} = K_0^{\mathrm{O}} - K_T^{\mathrm{O}} + \sum_{t=1}^{T} C_t^{\mathrm{O}} + K_0^{\mathrm{N}} - K_{\mathrm{L}}^{\mathrm{N}} + \sum_{t=1}^{N-T} C_t^{\mathrm{N}} \tag{5-25}$$

如果新环保设备的生产效率高于旧环保设备，则新旧环保设备总费用之和可以表示为

$$\mathrm{TC}_T = \mathrm{TC}^{\mathrm{O}} + \frac{1}{\beta}\mathrm{TC}^{\mathrm{N}} = K_0^{\mathrm{O}} - K_T^{\mathrm{O}} + \sum_{t=1}^{T} C_t^{\mathrm{O}} + \frac{1}{\beta}(K_0^{\mathrm{N}} - K_{\mathrm{L}}^{\mathrm{N}} + \sum_{t=1}^{N-T} C_t^{\mathrm{N}}) \tag{5-26}$$

式中　β——生产效率系数，表示新环保设备的生产效率是旧环保设备的 β 倍。

一般情况下，更新年份 T 的不同，新旧环保设总费用之和 TC_T 也不同，对应于 TC_T 最小值的年份为最佳更新时机。

如果考虑资金的时间价值，则应以总费用现值最小为决策原则。服务年限为 N，更新年份为 T 时的新旧环保设备总费用现值之和为

$$\mathrm{PVC}_T = K_0^{\mathrm{O}} - \frac{K_T^{\mathrm{O}}}{(1+i)^T} + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_t^{\mathrm{O}}}{(1+i)^t} + \frac{1}{\beta}\left[\frac{K_0^{\mathrm{N}}}{(1+i)^T} - \frac{K_{\mathrm{L}}^{\mathrm{N}}}{(1+i)^N} + \sum_{t=T+1}^{N} \frac{C_{t-T}^{\mathrm{N}}}{(1+i)^t}\right] \tag{5-27}$$

式中　i——给定的折现率。

假定新旧环保设备的价值损耗与设备劣化过程都是线性的，在不考虑资金时间价值的情

况下，N 年内新旧环保设备总费用之和为

$$TC_T = T(\Delta K^O + C_0^O) + \frac{T(T+1)\lambda_0}{2} + \frac{1}{\beta}\left[(N-T)(\Delta K^N + C_0^N) + \frac{(N-T)(NT+1)\lambda_N}{2}\right] \tag{5-28}$$

式中　ΔK^N、ΔK^O——新、旧环保设备每年的价值损耗；

λ_N、λ_0——新、旧环保设备每年的劣化值增量；

C_0^N、C_0^O——新、旧环保设备的初始运行成本。

令$\frac{d(TC_T)}{dT}=0$，可解得

$$T^* = \frac{2\Delta K^N + 2C_0^N + (2N+1)\lambda_N - \beta(2\Delta K^O + 2C_0^O + \lambda_0)}{2(\lambda_N + \beta\lambda_0)} \tag{5-29}$$

式中　T^*——最佳更新年份。

【例 5-4】　某企业有一批旧环保设备尚可使用 3 年，如果现在出售每台设备可卖 4500 元，如果继续使用，3 年内每台设备的年末残值及年运行成本见表 5-4。

表 5-4　旧环保设备运行成本及年末残值数据/元

使用年限 t	0	1	2	3
年末残值 K_t^O	4500	4000	3300	2500
年运行成本 C_t^O		1400	1800	2300

市场上现有一种可代替在用旧设备的新设备，工作效率是旧设备的两倍，售价为每台 15000 元，可用 7 年，使用期间各年的设备残值及运行成本见表 5-5。

表 5-5　新环保设备运行成本及年末残值数据/元

使用年限 t	0	1	2	3	4	5	6	7
年末残值 K_t^N	15000	11000	8000	6000	4000	3000	2000	1000
年运行成本 C_t^N		1500	1900	2300	2700	3100	3500	3900

根据发展规划，企业要在 6 年后进行产品换代，不再需要此类设备。试确定哪一年是最佳的更新时机。

【解】　设决策时刻为 0 年末，若不考虑资金的时间价值，不同更新年份新旧设备总费用之和见表 5-6。

表 5-6　不同更新年份新旧设备总费用之和/元

更新年份 T	旧环保设备总费用 $TC^O = K_0^O - K_T^O + \sum_{t=1}^{T} C_t^O$	新环保设备总费用 $TC^N = (K_0^N - K_L^N + \sum_{t=1}^{N-T} C_t^N)/\beta$ $(K_L^N = K_{N-T}^N, \beta = 2)$	新、旧环保设备总费用之和 TC_T
0	0	14000	14000
1	1900	11750	13650
2	1400	9700	14100
3	7500	7350	14850

计算结果表明：旧环保设备使用一年后进行更新，新旧设备总费用之和最小，故一年后为最佳更新时机。在考虑资金时间价值的情况下，结论与此相同。

2. 广义环保设备更新方案比选

环保设备的大修理与现代化改装也是补偿设备磨损的方式，所以从广义角度来看，环保设备更新一般都有多种方案，如：

① 对旧环保设备进行大修理；

② 对旧环保设备进行现代化改装；

③ 用原型环保设备更新；

④ 用性能更好的新型环保设备更新。

可以分别计算各种方案在不同服务年限内的总费用，根据所需要的服务年限，按照总费用最小的原则进行更新决策。

如果有上面列举的四种方案供选择，各方案在特定服务年限 T 内总费用现值的计算公式为

$$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{r}}=\frac{1}{\beta_{\mathrm{r}}}\left[K_0^{\mathrm{r}}-\frac{K_T^{\mathrm{r}}}{(1+i)^T}+\sum_{t=1}^{T}\frac{C_t^{\mathrm{r}}}{(1+i)^t}\right] \tag{5-30}$$

$$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{C}}=\frac{1}{\beta_{\mathrm{C}}}\left[K_0^{\mathrm{C}}-\frac{K_T^{\mathrm{C}}}{(1+i)^T}+\sum_{t=1}^{T}\frac{C_t^{\mathrm{C}}}{(1+i)^t}\right] \tag{5-31}$$

$$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{n}}=\frac{1}{\beta_{\mathrm{n}}}\left[K_0^{\mathrm{n}}-K_0^{\mathrm{O}}-\frac{K_T^{\mathrm{n}}}{(1+i)^T}+\sum_{t=1}^{T}\frac{C_t^{\mathrm{n}}}{(1+i)^t}\right] \tag{5-32}$$

$$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{h}}=\frac{1}{\beta_{\mathrm{h}}}\left[K_0^{\mathrm{h}}-K_0^{\mathrm{O}}-\frac{K_T^{\mathrm{h}}}{(1+i)^T}+\sum_{t=1}^{T}\frac{C_t^{\mathrm{h}}}{(1+i)^t}\right] \tag{5-33}$$

式中　$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{r}}$、$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{C}}$、$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{n}}$、$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{h}}$——分别为设备大修理、现代化改装、原型更新和用新型环保设备更新方案在 T 年内总费用现值；

β_{r}、β_{C}、β_{n}、β_{h}——分别为大修理环保设备、现代化改装设备、原型新环保设备和新型新环保设备的生产效率系数；

K_0^{r}、K_0^{C}、K_0^{n}、K_0^{h}——分别为设备大修理、现代化改装、原型更新和用新型环保设备更新方案的投资额；

K_T^{r}、K_T^{C}、K_T^{n}、K_T^{h}——分别为大修理环保设备、现代化改装环保设备、原型新环保设备和新型新环保设备使用 T 年后的残值；

C_t^{r}、C_t^{C}、C_t^{n}、C_t^{h}——分别为大修理环保设备、现代化改装设备、原型新环保设备和新型新环保设备在第 t 年的运行成本。

K_0^{O}原有旧环保设备在决策年份的可售价值。

下面举例说明广义设备更新方案的比选方法。

【例 5-5】 某设备有 4 种更新方案，各方案的原始资料见表 5-7，折现率为 8%，找出不同服务年限的最佳更新方案。

【解】 根据前面介绍的公式可以求出各方案不同服务年限内的总费用现值，计算结果见表 5-8。

从以上计算结果可以看出，当服务年限为 1～2 年时，旧设备大修理方案总费用现值最低；当服务年限为 3～7 年时，旧设备现代化改装总费用现值最低；当服务年限为 8～9 年时，用新型设备更新总费用现值最低。

表 5-7　例 5-5 的原始数据/元

序号		1		2		3		4	
更新方案		旧环保设备大修理		旧环保设备现代化改装		原 型 更 新		新型环保设备更新	
投资		$K_0^{\mathrm{r}}=7000$		$K_0^{\mathrm{C}}=12000$		$K_0^{\mathrm{n}}=13300$		$K_0^{\mathrm{h}}=16250$	
生产效率系数		$\beta_{\mathrm{r}}=0.9$		$\beta_{\mathrm{C}}=0.2$		$\beta_{\mathrm{n}}=1$		$\beta_{\mathrm{h}}=0.3$	
各年份运行成本及年末设备残值	年份	C_t^{r}	K_T^{r}	C_t^{C}	K_T^{C}	C_t^{n}	K_T^{n}	C_t^{h}	K_T^{h}
	1	300	6000	300	9500	250	11000	200	14000
	2	1000	5000	550	8000	530	9600	500	12500
	3	1750	4000	1100	6800	1050	8200	1000	11000
	4	2500	3200	1700	5600	1600	7000	1500	9500
	5	3200	2400	2300	4600	2100	5800	200	8000
	6	4000	1800	3000	3600	2700	4600	2600	6500
	7	4800	1300	3800	2700	3400	3500	3200	5000
	8	6100	800	4700	1800	4200	2500	3800	3500
	9	7200	500	5700	1000	5100	1500	4500	2000

注：旧环保设备在决策年份的可售价值 $K_0^{\mathrm{O}}=1500$。

表 5-8　例 5-5 的计算结果/元

更新方案 / 服务年限	大修理	现代化改装	原型更新	新型环保设备更新
	$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{r}}$	$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{C}}$	$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{n}}$	$\mathrm{TC}_T^{\mathrm{h}}$
1	1969*	2091	3346	2670
2	4276*	4909	5755	4728
3	7054	6854*	8310	6866
4	10011	8963*	10850	9059
5	13229	11088*	13477	11290
6	16584	13383*	16227	13588
7	20114	15808*	19068	15930
8	24139	18427	22028	18299*
9	28343	21199	25180	20716*

注：* 为特定服务年限内各方案中总费用现值最低者。

三、环保设备更新收益率法

前面介绍的年费用比较法和总费用比较法都是以费用最小为目标进行设备更新决策的，没有考虑设备更新以外是否还有其他的投资机会，这里隐含着一个基本假定，即有足够的资金用于设备更新。实际上，一个企业可筹集到的资金往往是有限的，如果有更好的投资机会，并不一定要把资金用于环保设备更新。所以，在资金有限的情况下进行环保设备更新决策，还应考虑更新投资的收益能力。更新收益率法就是通过计算更新与不更新两种方案的差额投资的收益率来判断是否应该进行环保设备更新的。

1. 更新收益率法的原理公式

假定新设备的经济寿命为 n 年，设 NV_0 为设备更新净投资（准确地说是更新与不更新两种方案的差额投资），$B_t(t=1,2,\cdots,n)$ 为更新后第 t 年因设备更新而带来的收益（也就是使用新设备相对于使用旧设备运行成本的节约额与销售收入的增加额之和），K_{L} 为新设

备经济寿命结束时的残值。由下式可求得设备更新方案的内部收益率

$$NV_0=B_1(1+IRR)^{-1}+B_2(1+IRR)^{-2}+\cdots+B_n(1+IRR)^{-n}+K_L(1+IRR)^{-n}$$

上式表明，按照内部收益率折算，新设备在其经济寿命期内历年的净收益和期末残值的现值合计正好等于设备更新净投资。

如果把环保设备更新净投资看作是新环保设备的原始价值（新环保设备原始价值在这里具有特定涵义，确切地说是“设备更新方案”的原始价值），则新环保设备的原始价值可理解为新环保设备在经济寿命期间能带来的全部收益（指相对于使用旧环保设备的收益增量）与期末残值按内部收益率折算的现值合计。由于环保设备的有形磨损与无形磨损，新环保设备在使用过程中会不断发生价值损耗。假定到更新后的第 t 年新环保设备价值损耗的现值恰恰等于已获收益的现值合计，则新环保设备在第 t 年末的保留价值 NV_t 应等于从第（$t-1$）年到第 n 年历年收益和 n 年末残值以第 t 年为基准年的现值合计，即

$$NV_1=B_2(1+IRR)^{-1}+B_3(1+IRR)^{-2}+\cdots+B_n(1+IRR)^{-n+1}+K_L(1+IRR)^{-n+1}$$

$$NV_2=B_3(1+IRR)^{-1}+B_4(1+IRR)^{-2}+\cdots+B_n(1+IRR)^{-n+2}+K_L(1+IRR)^{-n+2}$$

……

$$NV_t=B_{t+1}(1+IRR)^{-1}+B_{t+2}(1+IRR)^{-2}+\cdots+B_n(1+IRR)^{-n+t}+K_L(1+IRR)^{-n+t}$$

$$=\sum_{j=1}^{n-t}B_{t+1}(1+IRR)^{-j}+K_L(1+IRR)^{-n+t}$$

……

$$NV_n=K_L$$

显然，更新后第一年新环保设备价值损耗的现值应等于新环保设备原始价值与第一年末保留价值的现值之差，即

$$NV_0-NV_1(1+IRR)^{-1}=B_1(1+IRR)^{-1} \tag{5-34}$$

上式等号右端为环保设备更新后第一年净收益现值。

由式（5-34）可解得

$$IRR=\frac{1}{NV_0}[B_1-(NV_0-NV_1)] \tag{5-35}$$

式（5-35）即为更新收益率法的原理公式。如果已知 NV_0、B_1 和 NV_1，就能很方便地求出更新投资的内部收益率，称之为更新收益率，如果更新收益率大于或等于给定的标准折现率，更新方案在经济上就是合理的，否则就是不合理的。

2. 更新收益率的计算

要实际计算更新收益率，首先要求出 NV_0、B_1 和 NV_1。

NV_0 是环保设备更新净投资，其计算公式为

$$NV_0=K_0^N-K_A^O \tag{5-36}$$

式中　K_0^N——购置安装新环保设备所需投资；

K_A^O——继续使用旧环保设备所必需的追加投资，如大修费、改装费。

B_1 是环保设备更新后第一年的净收益，其计算公式为

$$B_1=\Delta C+\Delta R+\Delta K^O \tag{5-37}$$

式中　ΔC——更新后第一年使用新环保设备相对于使用旧设备运行成本的节约额；

ΔR——更新后第一年使用新环保设备因产品产量和质量提高而带来的收益；

ΔK^O——旧环保设备继续使用一年的价值损耗。

由于旧环保设备原始价值一般相对较小，使用期限只有一年，计算 ΔK^{O} 时可忽略资金的时间价值，其计算公式为

$$\Delta K^{O}=K_0^{O}-K_1^{O} \tag{5-38}$$

式中　K_1^{O}——旧环保设备一年后的可售价值；

K_0^{O}——旧环保设备在决策时刻的可售价值。

计算更新收益率的关键在于确定新环保设备在第一年末的保留价值 NV_1。值得注意的是，NV_1 并非指新环保设备在第一年末的可售价值，而是指环保设备更新方案从第二年起直至新环保设备经济寿命结束时全部净收益和新环保设备期末残值以第一年末为基准年的现值合计。确定 NV_1 需要先确定设备更新方案在新设备经济寿命期内各年的净收益。

一般情况下，由于存在着环保设备的有形磨损与无形磨损，更新方案的净收益是逐年下降的。据研究，常见的收益下降模式有三种（图 5-2）。(a) 模式表示收益随使用年限的延长呈直线下降，到新环保设备经济寿命结束时收益为零。这种收益下降模式称标准型。(b) 模式与 (c) 模式表示收益随使用年限的延长呈指数曲线下降。因篇幅所限，这里只讨论标准型收益下降模式。

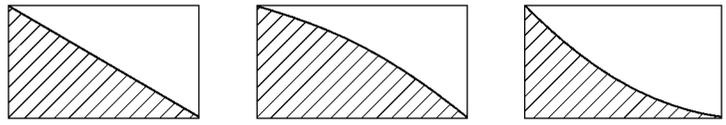


图 5-2　更新方案收益下降模式

对于标准型收益下降模式，若第一年的净收益为 B_1，则第 t 年的净收益为

$$B_t=B_1\left(1-\frac{t-1}{n}\right)\quad(t=1,2,\cdots,n) \tag{5-39}$$

如果更新收益率恰恰等于给定的标准折现率 i_o，新环保设备在第 t 年末的保留价值为

$$NV_t=\sum_{j=1}^{n-t}B_{t+j}(1+i_o)^{-1}+K_L(1+i_o)^{-n+1}$$
$$(t=0,1,2,\cdots,-n+1) \tag{5-40}$$

假定收益下降模式为标准型，则

$$NV_t=B_1\sum_{j=1}^{n-t}\left(1-\frac{j+t-1}{n}\right)(1+i_o)^{-j}+K_L(1+i_o)^{-n+1}$$
$$(t=0,1,2,\cdots,n-1) \tag{5-41}$$

在上述假定条件下

$$NV_0=B_1\sum_{j=1}^{n}\left(1-\frac{j-1}{n}\right)(1+i_o)^{-j}+K_L(1+i_o)^{-n}$$

$$NV_1=B_1\sum_{j=1}^{n-1}\left(1-\frac{j}{n}\right)(1+i_o)^{-j}+K_L(1+i_o)^{-n+1}$$

$$\frac{NV_1-K_L(1+i_o)^{-n+1}}{NV_0-K_L(1+i_o)^{-n}}=\frac{\sum_{j=1}^{n-1}\left(1-\frac{j}{n}\right)(1+i_o)^{-j}}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-\frac{j-1}{n}\right)(1+i_o)^{-j}}$$

令
$$A=\frac{\sum_{j=1}^{n-1}\left(1-\frac{j}{n}\right)(1+i_{\mathrm{o}})^{-j}}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-\frac{j-1}{n}\right)(1+i_{\mathrm{o}})^{-j}} \tag{5-42}$$

则有
$$\mathrm{NV}_1-K_{\mathrm{L}}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n+1}=A[\mathrm{NV}_0-K_{\mathrm{L}}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n}]$$

由上式可解得
$$\frac{\mathrm{NV}_1}{\mathrm{NV}_0}=A[1-\frac{K_{\mathrm{L}}}{\mathrm{NV}_0}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n}]+\frac{K_{\mathrm{L}}}{\mathrm{NV}_0}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n+1} \tag{5-43}$$

式（5-43）中，$\frac{\mathrm{NV}_1}{\mathrm{NV}_0}$称为新环保设备第 1 年末的保留价值率，$\frac{K_{\mathrm{L}}}{\mathrm{NV}_0}$称为期末残值率。根据新环保设备的经济寿命期 n 和期末残值率可以由式（5-43）求得在标准折现率下新设备第 1 年末的保留价值率，进而可求得新环保设备在第 1 年末的保留价值 NV_1。

上述对新环保设备第 1 年末保留价值率计算公式的推导没有考虑税收对净收益的影响。从企业角度进行环保设备更新决策还应考虑税收对净收益的影响。

假定税前收益 B^* 下降模式为标准型，设所得税税率为 r_{T}，采用直线折旧法，年折旧率为 r_{D}，若第 1 年税前收益为 B_1^*，则第 t 年税前收益为

$$B_t^*=B_1^*\left(1-\frac{t-1}{n}\right)$$

第 t 年税后收益的简化计算式为

$$B_t=B_1^*-r_{\mathrm{T}}(B_1^*-\mathrm{NV}_0 r_{\mathrm{D}})=B_t^*\left(1-\frac{t-1}{n}\right)(1-r_{\mathrm{T}})+\mathrm{NV}_0 r_{\mathrm{D}} r_{\mathrm{T}} \tag{5-44}$$

将式（5-44）代入式（5-40）可得

$$\mathrm{NV}_t=B_1^*(1-r_{\mathrm{T}})\sum_{j=1}^{n-t}\left(1-\frac{j+i-1}{n}\right)(1+i_{\mathrm{o}})^{-j}+\mathrm{NV}_0 r_{\mathrm{D}} r_{\mathrm{T}}\sum_{j=1}^{n-t}(1+i_{\mathrm{o}})^{-j}+K_{\mathrm{L}}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n+1}$$
$$(t=0,1,2,\cdots,n-1) \tag{5-45}$$

根据式（5-45）可导出在考虑税收对净收益影响的情况下新设备第 1 年末保留价值率的计算公式为

$$\frac{\mathrm{NV}_1}{\mathrm{NV}_0}=A\left[1-D_0-\frac{K_{\mathrm{L}}}{\mathrm{NV}_0}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n}\right]+\frac{K_{\mathrm{L}}}{\mathrm{NV}_0}(1+i_{\mathrm{o}})^{-n+1}+D_1 \tag{5-46}$$

式中
$$D_0=r_{\mathrm{D}} r_{\mathrm{T}}\frac{(1+i_{\mathrm{o}})^n-1}{i_{\mathrm{o}}(1+i_{\mathrm{o}})^n} \tag{5-47}$$

$$D_1=r_{\mathrm{D}} r_{\mathrm{T}}\frac{(1+i_{\mathrm{o}})^{n-1}-1}{i_{\mathrm{o}}(1+i_{\mathrm{o}})^{n-1}} \tag{5-48}$$

可以看出，计算新环保设备第 1 年末的保留价值率是相当麻烦的，在实际工作中，可以利用计算机预先制成“新设备价值损耗系数图”（图 5-3），使用时便可根据已知的新设备经济寿命（即预计使用时间）和期末残值率由图中直接找出新设备在第 1 年的价值损耗系数$\left(1-\frac{\mathrm{NV}_1}{\mathrm{NV}_0}\right)$。

显然，如果更新收益率不等于标准折现率，用根据标准折现率计算的新环保设备第 1 年的保留价值 NV_1 代入式（5-35），求得的更新收益率已不是原来意义上的环保设备更新投资方案的内部收益率。为了与原理公式（5-35）有所区别，用 PRR 代表更新收益率。

$$\mathrm{PRR}=\frac{1}{\mathrm{NV}_0}[B_1-(\mathrm{NV}_0-\mathrm{NV}_1)] \tag{5-49}$$

如果是从国民经济角度进行环保设备更新决策，B_1 代表税前收益，NV_1 根据式（5-43）求得；如果是从企业角度进行环保设备更新决策，B_1 代表税后收益，NV_1 根据式（5-46）求得。

按式（5-49）计算的更新收益率虽然与环保设备更新投资方案的内部收益率在经济涵义上有所不同，但这并不影响更新决策的结论，因为只要更新方案内部收益率大于标准折现率，按式（5-49）计算的更新收益率就会大于标准折现率；只要更新方案的内部收益率小于标准折现率，按式（5-49）计算的更新收益率就会小于标准折现率。

为了便于计算，可利用投资收益分析表求更新收益率。下面举例说明。

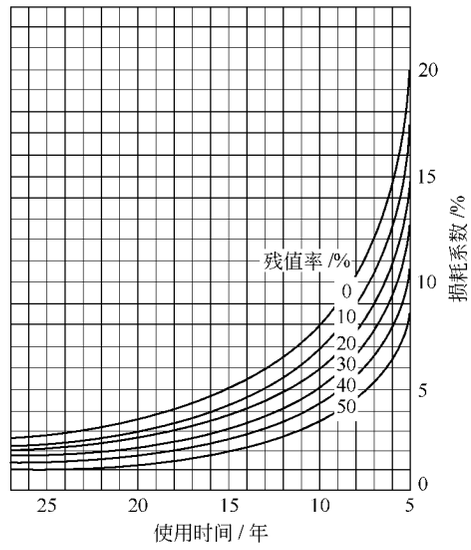


图 5-3　新设备价值损耗系数图

【例 5-6】 某企业拟用一台新环保设备更换现有的旧环保设备，有关数据及更新收益率的计算过程见表 5-9。

表 5-9　投资收益分析表/元

Ⅰ　更新投资		
(1)	购置安装新环保设备所需投资	16705
(2)	旧设备的可售价值	1300
(3)	继续使用旧环保设备所必需的追加投资	4520
(4)	更新投资(4)＝(1)－(3)	12185
Ⅱ　更新收益		
1. 运行成本的节约		
(5)	劳务费	2436
(6)	材料消耗	
(7)	燃料、动力消耗	
(8)	工夹模具费	
(9)	修理费	1055
(10)	废品损失及返工费	600
(11)	停工损失	525
(12)	委托加工费	
(13)	产品检验费	
(14)	固定资产税、保险费	170
(15)	设备占地费	
(16)	备用备件资金占用及库存费	
(17)	产成品资金占用及库存费	400
(18)	安全费	
(19)	其他费用	

续表

Ⅱ　更新收益		
2. 销售收入的增加		
(20)	因产品产量增加	
(21)	因产品质量提高	
3. 运行外收益		
(22)	旧环保设备继续使用1年的价值损耗	500
(23)	更新收益合计	5346
Ⅲ　新设备价值损耗		
(24)	新环保设备价值损耗系数	0.0502
(25)	新环保设备价值损耗(25)＝(4)×(24)	611
Ⅳ　更新收益率		
(26)	税前收益(26)＝(23)	5346
(27)	税后收益(27)＝(26)－0.55×[(26)－0.06×(4)]	2807.8
(28)	更新收益率(28)＝{[(27)－(25)]/(4)}×100%	18%

本例中取标准折现率10%，年折旧率6%，新环保设备经济寿命期10年，期末残值率20%，所得税率55%。求得的更新收益率为18%，大于标准折现率，故更新方案在经济上是合理的。

更新收益率法既可用于评价设备更新方案的经济效果，也可以用于不同更新方案的比选、排队，如果能预先制成新设备价值损耗系数图，更新收益率的计算也是很方便的。

第六章　环境经济“费用-效益”分析

第一节　环境经济“费用-效益”分析理论基础

一、“费用-效益”分析方法的发展

“费用-效益”分析方法最早产生于19世纪。1844年法国工程师杜波伊特（Jules Dupuit）发表《市政工程效用的衡量》提出了消费者剩余的概念，并指出市政工程的效益所产生的影响，一般来说和市政工程计划产生的直接收入并不相同。1805年，美国人加拉丁（Albert Gallatin），在关于运输规划的报告中也提出水利建设费用和效益的概念。1946年，美国联邦机构向流域委员会任命了一个费用-效益分委员会，协调联邦各部门效益-费用分析的具体工作。1950年，这个分委员会发表了《关于流域规划经济分析实践的建议》，把实用项目的经济分析和福利经济学两个平行独立发展的学科联系起来。以后美国又陆续发表了《水资源发展：计划评价的经济学》和《水资源系统设计》等著作，探讨了系统分析和计算机技术在费用-效益分析领域内的运用，为以后在其他学科领域的应用打下了基础。70年代以后，费用-效益分析的重点放到国民经济发展、环境质量、区域发展和社会福利部门，特别是在公共项目评价中得到越来越广泛的应用和发展。目前费用-效益分析重点用于自然资源领域的环境规划和环境管理中。

二、“帕累托（Pareto）”准则和“卡尔多-西科斯（Kaldor-Hicks）”检验

1.“帕累托（Pareto）”准则

传统的费用-效益分析方法的理论基础是福利经济学（welfare economics）。所谓福利是指个人或集体的好处或所得到的满足。福利经济学是研究经济政策（包括各种经济活动）对于个人或集团的福利水平的影响。它通过对两种社会经济状态下的福利水平的比较，试图得出一种社会经济状态是否比另一种社会经济状态好的结论。福利一般可以定义为好处，首先碰到的困难是如何去度量它？一种解决的办法是试图构造一个整个社会的福利函数（social-welfare-function），把影响社会福利的各种因素都包含在这个函数之内。必须说明的是这种社会福利函数是不可能建立的，也是无法使用的。但是可以找到一种解决的办法，即研究和分析社会福利函数的某些特定的方面。20世纪初，意大利政治经济学家帕累托提出了他的判定准则。

帕累托最优状态是指，社会经济达到这样一种状态，在不可能减少其他社会成员效益水平的条件下，使社会某一成员的效用有所提高。

2. 判定社会经济状态改进的准则——“卡尔多-西科斯”检验

一项技术方案、一个工程项目的实施是否对社会有利？或者说，是否会对社会经济状态做出改进？用什么准则来进行判断呢？这些是经济管理中的核心问题。

与帕累托最优状态相对应的是“卡尔多-西科斯”检验，也称作“帕累托改进准则”。即如果社会经济状态的变化至少使一个社会成员的效用水平提高，而其他社会成员觉得无差别，那么这种变化是一种经济状态的改进，即帕累托改进（弱）准则。

“有社会经济状态 x 和 x'，如果至少有一个社会成员偏好经济状态 x' 胜于 x，而其他社

会成员觉得经济状态 x 与 x' 无差别，那么从经济状态 x 变化到经济状态 x' 是一种社会经济状态的改进”。

如果偏好是连续的，且有单调递增性，那么上述准则可改为帕累托改进（强）准则。

“有社会经济状态 x 和 x'，如果所有社会成员都偏好 x' 胜于 x，那么从 x 变化到 x' 是一种社会经济状态的改进。”

显然，除了分配不公的问题未被涉及外，这个准则应该是被普遍接受的，但实际问题是：一工程项目或一项经济政策的实施不可能对社会成员只产生好处，不产生坏处，也就是说，帕累托改进准则的要求太高了，很难做到，为此便产生了“帕累托的补偿准则”，即社会经济状态的改变有得益者也有损失者，如果得益者有可能补偿损失者，而且还有余，那么，这种改变也是社会经济状态的改进。应该注意，按照补偿准则，只是说补偿的可能性，并不要求真的实行，如果真的实行补偿，就变成帕累托改进了。有人把这种补偿准则称为潜在的帕累托改进准则，可以表达为“补偿准则”，即“社会经济状态 x 和 x'，如果有可能对 x' 进行调整（补偿）为 x''，$\{\sum_i (x^i)'' = \sum_i (x^i)'\}$，使所有社会成员 i 都感到经济状态 x' 是 x 的符合补偿准则的改进”。作为补偿准则，认为社会产出的这块蛋糕总的来说是变大了，至于如何切蛋糕可以通过其他途径，例如征税等方法解决。补偿准则是“费用-效益”分析价值判断的基础，目前已被广泛接受为评价准则。

三、在完成竞争市场均衡条件下，费用-效益度量

如果社会成员的偏好、厂商的耗费等都在完全竞争的市场中得到体现，而且形成均衡的价格 p 和均衡状态 x，如果建议的社会经济措施使 x 改变为 x'，那么判断定理如下。

定理　如果 x' 是按补偿准则 x 的一个改进，那么必有 $\sum_i p(x^i)' > \sum_i px^i$，也就是说，按现行价格量度的 x' 的国民生产净值（或国民收入）大于 x 时的国民生产净值。

证明　如果 x' 是按补偿准则 x 的一个改进，那么存在 x''，$\sum_i (x^i)'' = \sum_i (x^i)'$，加和后有 $\sum_i p(x^i)'' > \sum_i p \cdot x^i$，但是，使

$$\sum_i p(x^i)'' = \sum_i p(x^i) \tag{6-1}$$

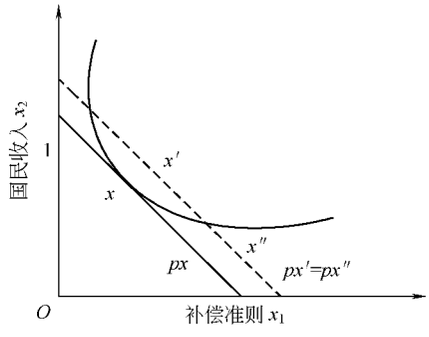


图 6-1　补偿准则与国民收入

用国民收入的增量来度量效益还需要证明，凡增加国民收入的项目和措施都必定符合补偿准则，这一点并不能完全保证，只要改变 x' 离原来的均衡状态 x 不太远，这个逆定理也是成立的。我们用图 6-1 表示，其中，$x = \sum_i x^i$，$x' = \sum_i (x^i)'$，$x'' = \sum_i (x^i)''$。图中曲线的右上方表示符合潜在帕累托改进的配置 x 的 $\sum_i x^i$ 的集合，凡在该集合中的 x' 都有比 x 的国民收入大；反之，有大的国民收入的配置，如 x''，不一定保证符合补偿准则，但是当改变离 x 相当近时，有大于国民收入 px 的配置都符合补偿准则。

下面对这个逆定理进行证明。如果（x，p）是完全竞争的均衡状态，那么有如下定理。

定理　如果 $p\sum_i (x^i)' > p\sum_i x^i$，$|(x^i) - x^i|$ 很小，则 x' 是 x 的一个潜在的帕累托

改进。

证明　令 $x=\sum_i x^i$，$x'=\sum_i (x^i)'$，定义 x'' 为 $(x^i)''=x^i+\dfrac{x'-x}{I}$　(6-2)

式中，I 为社会成员 i 的总数。

对社会成员 i 的效用函数用泰勒极数展开有（x''变化较小时）

$$u^i(x^i)''-u^i(x^i)\approx\sum_l \frac{\partial u^i(x^i)}{\partial x_l^i}[(x_l^i)''-x_l^i] \tag{6-3}$$

由消费者效用最大化的一阶条件

$$\frac{\partial u^i(x^i)}{\partial x_l^i}=\lambda^i p_l \quad (l=1,2,3,\cdots,n)$$

代入式（6-3），得

$$u^i(x^i)''-u^i(x^i)\approx\lambda^i p[(x^i)''-x^i]=\lambda^i p(x^i+\frac{x'-x}{I}-x^i)=\lambda^i p(\frac{x'-x}{I})$$

$$=\lambda^i\left(\frac{p\cdot\sum_i (x^i)'-p\cdot\sum_i x^i}{I}\right)>0$$

如果现在价格基本上符合完全竞争的均衡价格，用这些价格衡量项目或措施的效益和费用，如果有正的净效益，那么项目或措施的实施则是有利于社会的。

四、支付者意愿和消费者剩余

消费者因开支费用节省或价格的变化而引起效益的变化，这是很多公共项目和设施在进行费用-效益分析时所要考虑的问题。

对消费者的效用函数按二级泰勒级数展开，得

$$u^i(x^i)'-u^i(x^i)\approx\lambda^i p[(x^i)'-x^i]+\frac{1}{2}\sum_K\sum_l[(x_l^i)'-x_l^i]\frac{\partial^2 u^i(x^i)}{\partial x_{Kl}^i\partial x_l^i}[(x_K^i)'-x_K^i] \tag{6-4}$$

为使问题简便，假设只有一种物品，并略去上标 i。

令　$\Delta x=x'-x$

$$u(x')-u(x)\approx\lambda p\Delta x+\frac{1}{2}\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2}(\Delta x)^2$$

由

$$\frac{\partial u(x)}{\partial x}=\lambda p(x)$$

有

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2}=\lambda\frac{\partial p(x)}{\partial x}+p(x)\frac{\partial\lambda}{\partial x}$$

而$\dfrac{\partial\lambda}{\partial x}$，即收入的边际效用随物品的变化不大，可忽略不计，因此可简化 $\Delta u=u(x')-u(x)$ 为

$$\Delta u\approx\lambda p\Delta x+\frac{1}{2}\lambda\frac{\partial p(x)}{\partial x}\Delta x\Delta x$$

较为精确的效益变化可以用图 6-2 中阴影的部分来表示。

$$\Delta u\approx\lambda p\Delta x+\frac{1}{2}\lambda\cdot\Delta p\Delta x=\lambda\left(\frac{p+p'}{2}\right)\Delta x \tag{6-5}$$

也就是说，效用的增量可以用支付意愿的增量来表示，支付意愿除考虑实际支付 $p'\Delta x$ 外，还有一块三角形面积 $1/2(\Delta p\Delta x)$，这就是消费者剩余的变化。以上所考虑消费者剩余

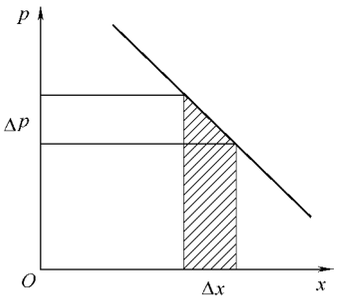


图 6-2　效益的量度

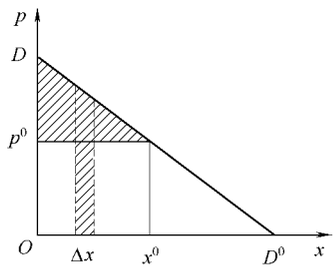


图 6-3　消费者剩余

变化的效用量度是针对一社会成员的，作为一种粗略的估计，可以把整个市场的需求曲线下面的面积变化（支付意愿）作为效益量度的基础。

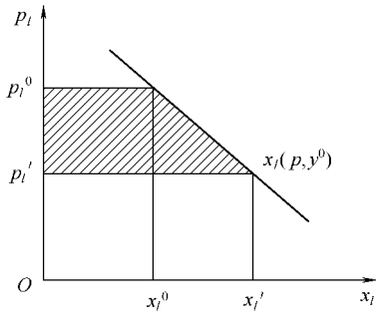


图 6-4　消费者剩余的变化

消费者剩余（consumer's surplus）是指消费者为获取一定数量的物品所愿支付的总额超过了实际支付的部分。

如图 6-3 所示，消费者在获取 x^0 的消费物品时，实际支付 p^0x^0。但从需求曲线的性质来看，当提供物品 Δx 时，消费者本来愿意支付超过实际支付，因此形成支付意愿超过实际支付的超额部分，即 p^0x^0 矩形上面打阴影的三边形。这个三边形面积代表的货币量就是消费者剩余。

通常是研究消费者剩余的变化，如图 6-4 中，价格从 p^0 降为 p'，消费者剩余的增加在一定程度上代表了消费者的效用增加，

$$x(p,y^0)=\frac{-\dfrac{\partial V(p,y^0)}{\partial p_l}}{\dfrac{\partial V(p,y^0)}{\partial y^0}}$$

式中 $x(p,y_0)$ 是需求函数，$V(p,y^0)$ 是间接效用函数。按消费者剩余的定义，价格 p_l 从 p_l^0 降为 p_l' 的消费者剩余增加为

$$S=\int_{p_l^0}^{p_l^1}-x_l(p,y^0)\mathrm{d}p_l=\int_{p_l^0}^{p_l^1}+\frac{\partial V(p,y^0)}{\partial p_l}\Big/\frac{\partial V(p,y^0)}{\partial p^0}\mathrm{d}p_l \tag{6-6}$$

如果消费者收入的边际效用 $\dfrac{\partial V(p,y^0)}{\partial y^0}$ 保持不变，则消费者剩余的变化与消费者的效用的变化成正比，即

$$\begin{aligned}S&=\int_{p_l^0}^{p_l^1}-x\cdot(p,y^0)\mathrm{d}p_l=[V(p',y^0)-V(p^0,y^0)]\Big/\frac{\partial V(p,y_0)}{\partial p^0}\\&=\frac{1}{\lambda}[V(p',y^0)-V(p^0,y^0)]\end{aligned} \tag{6-7}$$

消费者面临多种价格变动下的消费者剩余的变化为

$$S=\int_{\widehat{C}}x(p,y^0)\mathrm{d}p$$

$$S=\int_{\widehat{C}}\sum_{l=1}^{n}x_l(p_1,p_2,p_3,\cdots,p_n,y)\mathrm{d}p_l \tag{6-8}$$

此处 $\vec{C}$ 表示向量 p 从初始状态 p^0 到终点 p'的路径。在一般情况下，这个积分与路径有关。也就是说，消费者剩余 S 不仅与状态的起点和终点有关，还与价格变动的先后次序和路线有关。可以证明，只有当$\frac{\partial x_l}{\partial p_K}=\frac{\partial x_K}{\partial p_l}$对所有 l、K 成立时，消费者剩余的变化才是路径独立的，但是，一般需求函数 $x(p,y^0)$ 并不具有这样的对称性。

补偿变异与等效变异

例如，价格变动在收入不变的情况下，消费者的效用是要发生变化的。如果保持效用水平不变，应给消费者的收入以多少补偿（或征收多少收入税）？这笔收入的变化称为补偿变异（compensating variation），记为 CV，用消费者支出函数表示。

$$\mathrm{CV}=e(p^0,u^0)-e(p',u^0) \tag{6-9}$$

而

$$\frac{\partial e}{\partial p_l}=\tilde{x}_l(p,u^0)$$

因此，

$$\mathrm{CV}=-\int_{\vec{C}}\tilde{x}(p,u^0)\mathrm{d}p$$

因为补偿需求函数$\tilde{x}$具有对称性，$\frac{\partial \tilde{x}_l}{\partial p_K}=\frac{\partial \tilde{x}_K}{\partial p_l}$对所有 l、K 给定 u^0 下的 CV 计算结果是唯一的，从直觉也可知，如果社会状态变动使所有社会成员 i 有

$$\sum_i CV^i>0$$

则这种变动是符合补偿准则的。只要 $\sum_i CV^i>0$，就可以用这笔收入来增加至少一个人的收入，增加其效用而不影响其他人的效用水平。

类似地，把变化后的效用水平作为基准，为了达到原来计算的效用变化后的水平，按现在的（价格）标准，应该给予多少等效的收入，把这笔收入的变化称为等效变异（equivalent variation），记为 EV，用支出函数可表示为

$$\mathrm{EV}=e(p^0,u')-e(p',u')=-\int_{\vec{C}}\tilde{x}(p,u')\mathrm{d}p \tag{6-10}$$

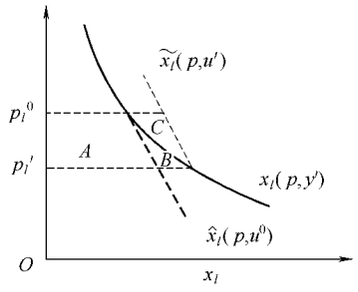


图 6-5　三种消费者剩余的变化

可见 EV 的概念和性质与 CV 类似，只有计算的基准点不同，两者的缺点是相同的：补偿需求函数不易从市场中直接观察到。

作为比较，在一种价格变动下的 S、CV 和 EV 如图 6-5 所示。

从图中可以看出：

$$S=A+B$$
$$\mathrm{CV}=A$$
$$\mathrm{EV}=A+B+C$$

五、社会福利函数与社会效益的叠加

前面曾提到个别社会成员的效用随物品或服务的变化，即

$$\Delta u^i\approx\lambda^i p(x^i)\Delta x^i$$

以及个别消费者因价格或费用的变化而引起的消费者剩余的变化及其效用变化的关系，即

$$\Delta V^i=\lambda^i\Delta S^i=N^i x^i(p,y^0)\Delta p$$

由于个别成员的效用是由序数量度的，直接累加个别人的效用变化值将没有任何意义。

如从整个社会出发考虑“社会效用”函数，经济学上把这样的函数称为社会福利函数。如何看待社会福利水平的高低，是一个价值判断问题，甚至每个社会成员都可有他自己的社会福利函数。勃格松（Bergoson）简单地把社会函数 SW 定义为

$$\mathrm{SW}=\mathrm{SW}(u^1,u^2,u^3,\cdots,u^i) \tag{6-11}$$

与社会成员效用水平有关的某种函数，当社会状态由 x 变为 x' 时，$\Delta x^i=(x^i)'-x^i$

$$\mathrm{dSW}=\sum_i \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\mathrm{d}u^i \approx \sum_i \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\lambda^i p\,\Delta x^i$$

如果假定 $\sum_i \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\lambda^i$ ——个别成员的效用在整个社会福利函数中变化权重与收入的边际效用之积与社会成员无关（即对所有的 i 相等），那么有

$$\mathrm{dSW}\approx \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u}\lambda \sum_i p\,\Delta x^i = \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u}\lambda\left(p\sum_i (x^i)' - p\sum_i x^i\right) \tag{6-12}$$

社会福利的变化与整个市场的需求曲线下的面积变化之和成正比。另外，由社会福利函数推导的这个结果与潜在的帕累托改进准则的结论是一致的。

另外，消费者因价格（费用）变化而引起的社会福利水平的变化

$$\mathrm{dSW}\approx \sum_i \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial V^i}\cdot\lambda^i x^i\Delta p = \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial V}\lambda\sum x_i^i\Delta p = \frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial V}\lambda\,\Delta p\left(\sum_i x^i\right) \tag{6-13}$$

消费者剩余可以通过整个市场的需求叠加计算后得到，它与社会福利水平的变化成正比。

可以证明，当社会福利函数达到最大化时，$\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\lambda^i$ 或 $\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial V^i}\lambda^i$ 是相等的。也就是说，假定社会福利已处于最优状态，用叠加的消费者支付意愿或消费者剩余的变化，确实能反映社会效益的变化。约束条件下的社会福利最大化模型可表达为

目标函数 $(\max)\mathrm{SW}=\mathrm{SW}(u^1,u^2,u^3,\cdots,u^i)$

约束条件 $(\mathrm{s.t.})\,T(x)=0$

其中 $x=\sum x^i$，$T(x)=0$ 表示生产约束，极值存在的一阶条件是

$\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\frac{\partial u^i}{\partial u_l^i}=Q\frac{\partial T}{\partial x_l}$，对所有的 i 和 l

其中 Q 为对应生产约束条件的拉格朗日乘子：

$$\frac{\partial u^i}{\partial u_l^i}=\lambda^i p_l$$

因此，对所有 i，

$$\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^i}\lambda^i=\frac{Q}{p_l},\ \frac{\partial T}{\partial x_l}=\text{常数}(\text{与 } i \text{ 无关}) \tag{6-14}$$

六、生产者剩余、外部效果和公用物品

1. 生产者剩余

和消费者剩余相对的一个概念是生产者剩余（producer's surplus）。它是指供应曲线上部的那块面积，即图 6-6 所示的厂商收入减去边际成本曲线下面的面积而多余的一块。这是因为厂商在完全竞争下，供应曲线就是边际成本曲线。

生产者剩余的经济含义是厂商用收入抵补可变成本后剩余的部分。生产者剩余大于厂商的不变成本（租金、利息和折旧）等，则表现厂商还有利润。由

$$\text{生产者剩余}=p^*\cdot y^*-\int_0^{y^*}C'(y)\mathrm{d}y=p^*\cdot y^*-C(y^*)+C(o) \tag{6-15}$$

可见生产者剩余就是利润加上不变成本 $C(o)$。

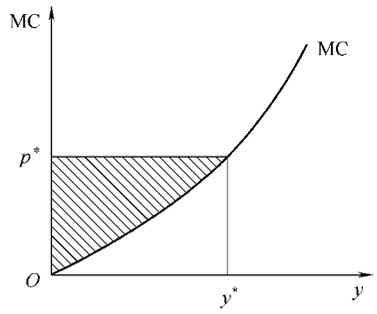


图 6-6　生产者剩余

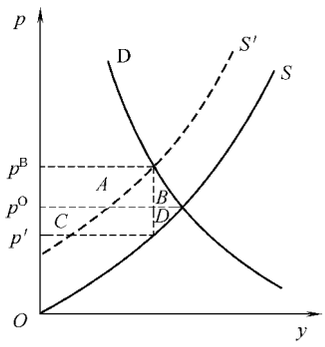


图 6-7　税收的效益损失

征收销售税的效果是为了增加消费者和厂商的负担，这种负担可以表现为消费者剩余和生产者剩余的减少，以图 6-7 为例，征税后供应曲线向左上移相当于税率为 t 的垂直距离，从 S 移到 S'，达到新的供求均衡时，消费者剩余损失以面积（$A+B$）代表，生产面积损失以面积（$C+D$）表示。（$A+C$）作为政府的税收收入，属于效益转移部分，除此之外，还有 B 和 D 两块机会损失。

2. 外部效果

如前所述，社会成员互相间影响的一切经济活动都是通过价格来协调的，需求和供应都可描述为价格的函数。即使在市场经济为主的社会里，由于种种原因，很多经济活动无法或不一定能通过价格媒介来实现交换。例如，生产和消费过程中产生的污染对其他社会成员产生了影响，而这种影响并没有通过价格让产生污染的社会成员来补偿所有的影响。通常这种影响称为外部效果（externalities）。外部效果的出现，使市场的价格机制失效，作为市场机制的基础的消费行为和厂商行为不再导致帕累托最优状态。

设某钢厂钢的生产函数为

$$S = f_s \cdot l_s \tag{6-16}$$

式中　l_s——钢生产的劳动收入；

S——钢的产出；

f_s——系数。

钢厂附近有一厂商经营的养鱼场。钢厂的排污 $h(s)$ 对鱼的产出有一定的影响，鱼的生产函数为

$$C = f_C[l_C, h(s)] \tag{6-17}$$

式中　l_C——渔业的劳动力收入；

C——鱼的产出；

$h(s)$——钢厂的排污量。

设 p_s、p_C 和 W 分别表示钢、鱼和劳动力的价格，如按各自利润的最大化，则有

$$p_s \frac{\mathrm{d}f_s(l_s)}{\mathrm{d}l_s} = W \tag{6-18}$$

$$p_C \frac{\mathrm{d}f_C[l_C, h(s^*)]}{\mathrm{d}l_C} = W \tag{6-19}$$

式中　s^*——钢厂利润最大化的最优产出。

此时产生的外部效果 $h(s^*)$ 强加给养鱼场。很明显，钢厂的最优生产计划没有考虑到

对渔业的生产影响，因此，它不是全局最优的，如果从钢和鱼生产的全局考虑，应该是

$$\max\{p_s f_s(l_s)+p_C f_C[l_C,h(s)]-Wl_s-Wl_C\} \tag{6-20}$$

上式的一阶导数有

$$p_s\frac{\mathrm{d}f_s(l_s^*)}{\mathrm{d}l_s}+p_C\frac{\partial f_C\cdot(l_C^*,h^*)}{\partial h}\frac{\partial h(s^*)}{\partial s}\frac{\partial f_s(l_s^*)}{\partial l_s}-W=0 \tag{6-21}$$

$$p_C\frac{\partial f_C(l_C^*,h^*)}{\partial l_C}-W=0 \tag{6-22}$$

由式（6-21）得

$$\left[p_s+p_C\frac{\partial f_C(l_C^*,h^*)}{\partial h}\frac{\partial h(s^*)}{\partial s}\right]f_s'(l_s^*)=W \tag{6-23}$$

和钢厂单独决策的最优化一阶条件比较，上式括号内的第二项为负（负的外部边际效果），$f_s''(l_s^*)<0$，即 $f_s'(l_s^*)$ 递减，由此可以推出：从全局出发钢厂劳动力的投入要少于钢厂自身单独考虑的投入。

3. 公用物品

公用物品（public goods）是相对于私用物品（private goods）而言的。以前所说私用物品，消费者 i 的效用 $u^i(x^i)$ 主要取决 i 独占或独自享用的物品 x^i，整个社会被占或被享用的 $X=\sum_i x^i$，在讨论中已假设物品具有独占性（rivalry）和排他性（excludability）。也就是说，物品或服务一旦被某消费者所占或享用，其他人就无法占用和享用。

公用物品与此相反，这些物品不具有独占性（non-rivalry），也不具有排他性（non-excludability），一旦提供，就不能阻止其他人享用。公用物品指国防安全措施、环境改善措施、无线电广播和公共照明等。

公用物品的存在被认为是对市场机制的破坏，公用物品不能通过价格进行交换，一般不进入消费者的预算约束，它一般由政府向消费者直接征税来弥补其资源的耗费。

设社会成员 i 的效用函数为 $u^i(x^i,x_p)$，其中 x^i 为私用物品，x_p 为公用物品（不随 i 而变化），生产约束可以表达 $T(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n,x_p)=0$，帕累托最优状态时有

目标函数　$\max\quad u^r(x^r,x_p)$

约束条件　$\text{s.t.}\quad u^i(x^i,x_p)=\overline{u}^i(x^i,x_p)$

式中　$i=1,2,3,\cdots,I$

$$T(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n,x_p)=0 \tag{6-24}$$

极值存在时的一阶条件为

$$\frac{\lambda^i\partial u^i}{\partial x_l^i}=Q\frac{\partial T}{\partial x_l}$$

$$(i=1,2,3,\cdots,I;\quad l=1,2,3,\cdots,n) \tag{6-25}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\lambda^i\frac{\partial u}{\partial x_p}=Q\frac{\partial T}{\partial x_p}$$

式中　λ^i——取值为 1；

Q——对应生产约束的拉格朗日乘子。

由此，可以得到：$\mathrm{MRS}_{lK}^i=\mathrm{RPT}_{lK}$，对所有 i、l 和 K，公用物品的边际替代率（各消费者相等）与产品的转移率相等，从而可以推出公用物品与其他私用物品的替代关系有

$$\sum\mathrm{MRS}_{pl}^i=\mathrm{RPT}_{pl} \tag{6-26}$$

与私用物品的本质区别在于边际替代率的和与产品转移率相等。如果假设物品 l 是货币基准物，那么 $\mathrm{MRS}_{\mathrm{p}l}^{i}$ 就是公用物品 P 的边际支付意愿（增加微量的意愿牺牲多少货币），RPT 就是公用物品生产的边际成本，帕累托最优状态要求边际成本与社会成员的边际支付意愿之和相等，如图 6-8 所示。

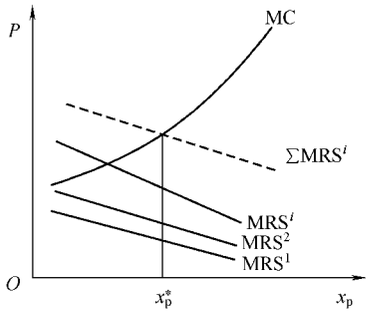


图 6-8　公用物品竖向叠加

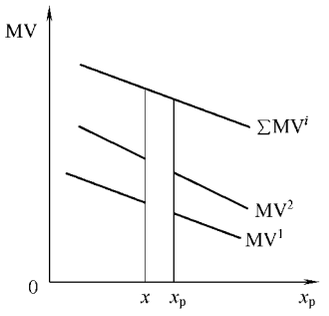


图 6-9　公用物品的效益

和私人物品相反，边际支付意愿的竖向叠加（vertical summation）与边际成本相等决定公用物品 P 的最优产出 x_{p}^{*}，同样地，提供公用物品 Δx_{p} 的社会效益量度也是由消费者边际效用的竖向叠加得到的。

$$\Delta \mathrm{SW}=\sum_{i}\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^{i}}\frac{\partial u^{i}}{\partial x_{\mathrm{p}}}\Delta x_{\mathrm{p}} \tag{6-27}$$

式中　$\Delta \mathrm{SW}$——社会福利函数所表达的社会福利水平。

若 $\dfrac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u^{i}}$ 是与 i 无关的常数，且令

$\dfrac{\partial u^{i}}{\partial x_{\mathrm{p}}}=\mathrm{MV}^{i}$（消费者对公用物品 P 的边际效用），那么

$$\Delta \mathrm{SW}=\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u}\sum_{i}\mathrm{MV}^{i}\Delta x_{\mathrm{p}}=\frac{\partial \mathrm{SW}}{\partial u}\Delta x_{\mathrm{p}}\sum_{i}\mathrm{MV}^{i} \tag{6-28}$$

其效益与消费者边际效用的竖向叠加成正比，见图 6-9。通常边际效用可用 $\lambda^{i}=\dfrac{\partial u^{i}}{\partial y^{0}}$（消费者收入的边际效用）来转移为边际支付意愿 $\dfrac{\mathrm{MV}^{i}}{\lambda^{i}}$。

七、社会效益的时间价值——社会折现率

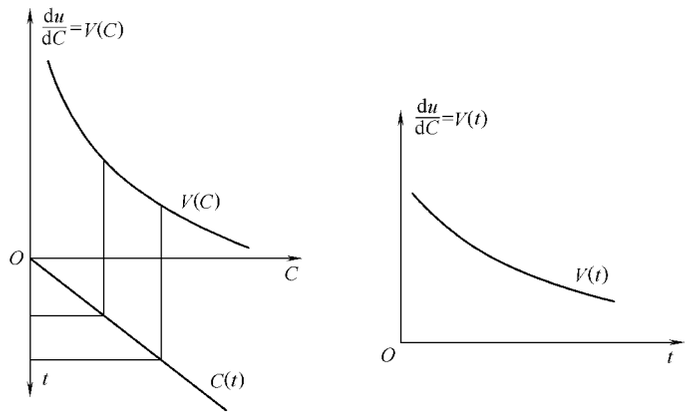
从社会角度出发的经济效益或费用时间价值称为经济折现率或社会折现率。这种时间价值存在的原因，可从以下两个方面来考察。

① 消费者对消费时间的偏好，即偏好于现在的消费胜于将来的消费，这种偏好出自于人们普遍存在的短见和风险的规避，也出自于消费的边际效用的递减。当消费的边际效用递减，而消费水平随时间递增，那么消费的边际效用也随时间而递减，如图 6-10 所示。u 为某人的效用，C 为消费水平，t 为时间。

若消费的边际效用为

$$V(C)=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}C}=\left(\frac{b}{C}\right)^{\eta} \tag{6-29}$$

式中　b、η——常数。



(a)　　(b)

图 6-10　边际效用随时间而递减

对 V 求导后有

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}C}=-\left(\frac{b}{C}\right)^{\eta}\frac{1}{C}$$

$$\eta=-\frac{C}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}C} \tag{6-30}$$

常数 η 就是边际效用对消费水平变化曲线的弹性。

若令单位时间的消费时间偏好率为 i，即

$$\frac{\dfrac{\partial u(C_t)}{\partial C_t}}{\dfrac{\partial u(C_{t+1})}{\partial C_{t+2}}}=1+i$$

若令

$$V(C)=\frac{\partial u(C_0)}{\partial C_0}=1$$

则边际效益时间 t 后贬值为

$$V(t)=\frac{1}{(1+i)^t}=\mathrm{e}^{-it}$$

对时间 t 求导后有

$$\frac{\mathrm{d}V(t)}{\mathrm{d}t}=\mathrm{e}^{-it}(-i)$$

或

$$i=-\frac{1}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$$

若令 $V=V[C(t)]$，则上式可写成

$$i=-\frac{1}{V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}C}\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}=\eta\cdot g \tag{6-31}$$

$$g=\frac{1}{c}\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t}$$

式中　g——消费水平的增长率。

② 从生产角度也提供了现在消费或将来消费上选择的可能性，现在不消费，可以把节省下来的资源用于投资。由于投资提供了活劳动创造剩余价值的机会，造成将来多于现在可

能的消费，这种边际增值率用 r 表示，称为投资的边际增值率。在给定资源下，

$$1+r=\frac{\partial C_{t+1}}{\partial C_t} \tag{6-32}$$

如果存在社会对于消费的效用函数 $M(C_t,C_{t+1})$，那么生产（投资增值）上的可能进行优化的模型有

$$\begin{aligned} &\max \quad u(C_t,C_{t+1}) \\ &\text{s. t.} \quad T(C_t,C_{t+1})=0 \end{aligned} \tag{6-33}$$

式中　T——泛指从生产角度考虑的投资增值的可能性约束。

从这种极值存在的一阶条件可得

$$\frac{\partial u/\partial C_t}{\partial u/\partial C_{t+1}}=\frac{\partial T/\partial C_t}{\partial T/\partial C_{t+1}} \tag{6-34}$$

容易看出 $1+i=1+r$，或 $i=r$。

从理想状态出发，效益或费用的时间价值应定在现在消费与未来消费的边际替代率与生产上可能的转换率相等的那点上，即

$$\mathrm{MRS}_{C_t,c_{t+1}}=\mathrm{RPT}_{C_t,c_{t+1}} \tag{6-35}$$

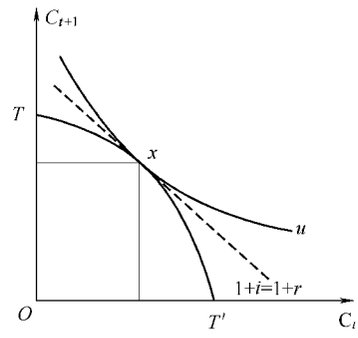


图 6-11　消费的时间偏好与生产上的转换

由图 6-11 中 T-T' 曲线代表时间 t 和（$t+1$）消费转换可能曲线，曲线 u 代表不同时间消费组合的等效用曲线，两者相切点 x 的公切线的斜率相等 $1+i=1+r$，此时为效用最大。

第二节　影 子 价 格

一、完全竞争状态下的市场价格

按西方经济学的论点，以市场价格代替影子价格的理论基础是完全竞争均衡理论（perfect competition equilibrium theory），且这种市场价格就是效益，即分析的影子价格。众所周知，企业在决定生产规模时，和社会的目标是一致的，它的根本目标是追逐最大利润，企业的利润（M）可由企业的收益（R）和企业的成本（C）之差求得，即

$$M=R-C \tag{6-36}$$

一般说来，R 和 C 都是企业生产量 q 的函数，为使利润最大、亏损最小，则有

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}q}=\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}q}-\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}q}=0$$

即

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}q}=\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}q} \tag{6-37}$$

式中的 $\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}q}$ 为边际效益（marginal revenue），$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}q}$ 为边际成本（marginal cost），前者表示生产达到某一水平时，每增加单位（微量）产出而获取的收益的增加值。后者表示每增加单位（微量）产出所需要增加的成本。当企业利润最大化（或亏损最小化）时，要求边际效益等于边际成本，否则它就要增加或减少产出使利润增加（或者是亏损减少）。当买主和卖主的产品数量相对整个市场来说很小时，企业可以现行价格卖出全部产品，如果企业产出以固定的价格（p）出售，那么企业的收益 $R=pq$，则可得

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}q}=\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}q}=p \tag{6-38}$$

即边际收益等于边际成本，等于市场价格。

从费用-效益分析的角度看，应该使消费者的支付意愿（社会效益 SB）减去社会成本 SC，即社会利润 SM 为最大，即

$$\mathrm{SM} = \mathrm{SB} - \mathrm{SC}(q) = \int_0^q p(q)\mathrm{d}q - \mathrm{SC}(q)$$

为最大，令其一阶导数等于零，则有

$$\frac{\mathrm{dSB}}{\mathrm{d}q} = p(q) = \frac{\mathrm{d}(\mathrm{SC})}{\mathrm{d}q} \tag{6-39}$$

边际效益等于价格并等于社会的边际成本，边际效益不同于边际收益是由于前者是支付意愿的增量与物品增量之比，由支付意愿的定义可知，它恰好是价格曲线 $p(q)$，即需求曲线。

二、价格失真——边际效益、边际成本

物品通过市场交换，而市场使交易双方的福利为最大，而不是使社会的福利为最大。如果所有成本都由生产者（销售者）承担，而所有的效益都归消费者（或购买者）享用，那么交易双方的福利和整个社会的福利是一致的，因为没有任何非交易的一方受到影响。

在一般情况下，只要有任何一方受到活动的影响（无论是不利影响还是有利影响），那么，可以说："市场未起到能够使社会福利为最大这一作用。"这时，这一活动的边际社会效益（或价值）（MSB），等于边际私人效益（MPB，单位物品对购买者增加的收益）之和，加上边际外在效益（MEB，对第三者附加的效益）。同样，边际社会成本（MSC）等于边际私人成本之和（MPC，单位物品对生产者增加的成本），加上边际外在成本（MEC，施加于外在一方的附加成本）。用方程式来表达则为

$$\mathrm{MSB} = \mathrm{MPB} + \mathrm{MEB} \tag{6-40}$$

$$\mathrm{MSC} = \mathrm{MPC} + \mathrm{MEC} \tag{6-41}$$

通过市场交易，使交易双方的福利为最大，公共市场使边际私人效益（或价值）与边际私人成本相等，即

$$\mathrm{MPB} = \mathrm{MPC}$$

但是，使社会福利为最大的条件却是

$$\mathrm{MSB} = \mathrm{MSC}$$

如果一活动能造成外在效益，而没有外在成本，则

$$\mathrm{MSB} > \mathrm{MPB}，\ \mathrm{MSC} = \mathrm{MPC}$$

由于 MPB 与 MPC 相等，可知 MSB＞MSC，就是说，对该物品的生产，可以超过市场需求，而多生产一些。

与此相反，如果一物品具有外在成本，但无外在效益（或价值）则

$$\mathrm{MSB} = \mathrm{MPB}，\ \mathrm{MSC} > \mathrm{MPC}$$

由于 MPB 与 MPC 相等，可知 MSB＜MSC，就是说，在市场力量的作用下，使该物品的生产达到这样一个水平，在该水平下，增加产品给社会带来的是负效益、净成本。

三、市场价格修正

在市场调节的范围内，应该考虑市场价格偏离影子价格的方向和大小，以便做出尽可能正确的费用-效益分析。对市场价格进行修正时，要考虑市场垄断的影响，这种影响分两种情况来分析。第一种情况是对最终消费品销售的垄断。此时，销售者可以控制市场价格，以高于边际成本的价格销售。按照社会效益是以支付意愿来计量的原则，这种

垄断势力并不影响边际社会效益的度量。不论价格控制在什么水平，它代表了最后一个消费者购买最后一个产品的支付意愿。因此价格始终表示边际的社会效益，不需要对市场价格进行修正。第二种情况是垄断生产者对原料和半成品等投入往往低估了它们的社会"价值"。例如，某垄断者控制了电力生产，以成本 C 元购入单位煤来发电，如果扣除其他费用，每单位煤可以产生收益为 p 的电。所定的 p 往往高于边际成本。应该用什么价格来度量煤的社会价值呢？从机会成本（opportunity cost）角度来看，煤的价格应该是 p 而不是 C。因为，如果没有这一单位的煤，消费者要减少支付意愿为 p 的电，那么这一单位的社会价值应该是 p。

假设某企业用一种半成品 x 生产最终产品 Q，生产函数决定 $x=X(Q)$；半成品的采购价格为 p_x，那么，企业的收益为 $R(Q)$，总成本为 $x \cdot p_x$，若使利润最大，则有

$$\frac{\mathrm{d}R(Q)}{\mathrm{d}Q}=p_x \cdot \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}Q}$$

$$p_x = \frac{\mathrm{d}R(Q)}{\mathrm{d}Q} \cdot \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} \tag{6-42}$$

从社会角度来看，Q 就是总收益累计的支付意愿

$$S(Q) = \int_0^Q p(Q)\mathrm{d}Q$$

那么每单位半成品的社会效益是

$$S_x = \frac{\mathrm{d}S(Q)}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}S(Q)}{\mathrm{d}Q} \cdot \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} = p_Q \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} \tag{6-43}$$

S_x 与 p_x 之差即为半成品 x 的社会"价值"与实际价格的偏离，即

$$S_x - p_x = \left[p_Q - \frac{\mathrm{d}R(Q)}{\mathrm{d}Q}\right]\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} \tag{6-44}$$

或

$$S_x - p_x = \left(p_Q - \frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}Q}\right)\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}x} \tag{6-45}$$

如果最终产品 Q 的价格与其边际成本相等时，就没有这种价格的偏离。

四、影子工资率和影子利率

1. 关于社会贴现率

"费用-效益"分析方法中除价格问题之外，另一个比较困难的问题是如何选择适当的贴现率，对将来的项目效益和费用进行贴现。从社会角度来看，效益中除了能用于投资的资金（利润和税金中的一部分）外，还有用于增加社会消费的部分（工资和福利等），而且，作为社会生产的主要目标还在增加目前的和长远的消费。那么，从消费角度来看，有没有时间价值呢？西方学者对社会贴现率的理论通常从消费和生产两个角度来研究。

（1）社会时间偏爱率（social time preference rate）　这种社会折减率称为消费利息率（consumption rate of return），用 i 来代表。如果用 $v(t)$ 表示在 t 年后每一元钱的效用，在每年折减率 i 等于常数时，有

$$v(t)=\mathrm{e}^{-i}$$

取对时间的导数

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\mathrm{e}^{-i}(-i)$$

那么

$$i = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{6-46}$$

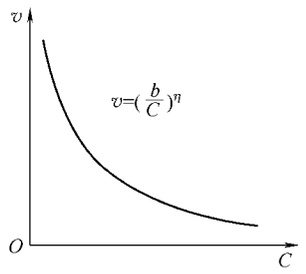


图 6-12　单位消费效用与消费水平

下面介绍求解消费利息率 i 的方法。

假设单位消费效用 v 与消费水平 C 有如下关系（图 6-12）：

$$v=\left(\frac{b}{C}\right)^{\eta} \tag{6-47}$$

式中　v——单位消费效用；

b——常数；

η——消费的边际效用递减曲线的弹性；

C——单位消费水平。

上式对 C 求导，则

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}C}=-\left(\frac{b}{C}\right)^{\eta-1}\eta\frac{b}{c^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}C}=-\left(\frac{b}{C}\right)^{\eta}\frac{b}{C}\eta$$

或

$$\eta=-\frac{C}{v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}C} \tag{6-48}$$

η 即消费边际效用递减曲线的弹性，把它代入式（6-46），有

$$i=\eta\frac{1}{C}\cdot\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}$$

如果令 $\frac{1}{C}\cdot\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}$ 为消费水平的增长率 g，那么有

$$i=\eta\cdot g \tag{6-49}$$

如果每人每年平均消费水平递减率 $g=2\%$，$\eta=2$，那么 $i=4\%$。

（2）社会机会成本率（social opportunity cost rate）　从资金的合理利用角度分析，既然国有化项目和私人项目在西方国家中同时存在，而总的资源又是有限的，因此社会贴现率不应比私人项目的贴现率低得太多，否则会造成资源在低效率上的利用。

西方国家（主要指西欧和美国）的投资者通常有两种投资机会：一种是购买政府的公债（bonds），其利率在 6%左右，一般没有风险；另一种是购买公司的股票，有一定风险，其利率为 8%左右，但公司还需付 50%左右的所得税给政府，所以实际投资者的收益率要在 16%以上。目前西方发达国家公共项目的贴现率都在 10%左右。

2. 关于影子工资率和影子利率

（1）影子工资率　指工程项目增加一名职工而付出的社会代价。在企业盈利分析中，劳动力的消耗直接表现为企业付给工人的工资和有关福利，从整个社会角度出发的“费用-效益”分析所付出的工资不完全构成社会成本，影子工资率可表示为

$$W_s=C'-\frac{1}{S}(C-M) \tag{6-50}$$

式中　W_s——影子工资率；

C'——用于就业的资源消耗；

S——用于投资的积累升值；

C——职工的平均消费；

M——职工在原来社会部门的边际产出。

上式右边第一项可理解为，由于支付工资，使原来可以用作投资的资源减少，这是一种社会费用。第二项是每名职工就业后增加的社会消费，并以积累的价值来度量。C' 和 C 略有不

同，提供给消费者的资源可能大于消费者的实际消费。例如，城镇就业人口增加后，需要把消费品运往城市，这些运输费包括在 C' 内，但不包括在职工的消费 C 内。式（6-50）还可以写成为如下表达式：

$$W_s = M + (C' - C) + \left(1 - \frac{1}{S}\right)(C - M) \tag{6-51}$$

即增加一名工人的社会费用由三部分组成：

① M　其他部门产出的减少；

② $(C'-C)$　安排职工消费而增加的运输费和管理费等；

③ $\left(1-\frac{1}{S}\right)(C-M)$　把原来可用于投资的资金用于消费而造成的贬值。

在估计这些参数时，必然会碰到非贸易品，而这些物品的分解又包含了影子工资率，这就形成了循环。解决的办法有两种：

a. 对影子工资率先做一假定，确定有关参数的影子价格，再由式（6-50）求 W_s，进行逐步修正。

b. 用一未知数 w 代替影子工资率 W_s，计算各参数的影子价格（包含未知数 w），代入式（6-50），求解 w。

（2）影子利率　在实际问题中，通常把贴现率理解为政府计划部门合理调节投资的手段，如果影子利率定得太低，会导致投资过多，资金积压，就业太多，引起通货膨胀；如果影子利率定得太高，则投资太少，积累的资金利用不充分，经济发展迟缓、失业现象严重。根据长期的发展战略，要有一个较为稳定的影子利率（SRI），而且 SRI 不能起伏太大。实践可知，高的 SRI 会使前期收益高，则投资少的方案可取；低的 SRI 则对投资大、长期发挥效益的方案比较有利。当经济暂时受灾或资金不足时，可以适当调高 SRI 若干年，然后恢复 SRI 到正常水平，这样做不会影响长寿命期的项目，而主要作用是使那些可以暂缓的或立即需要大量集中投资的项目暂缓下来。当经济出现短期繁荣、资金充裕时，应该多上些项目而不是专搞长命项目，并可以通过把最近几年的 SRI 调低，然后立即恢复到正常水平。

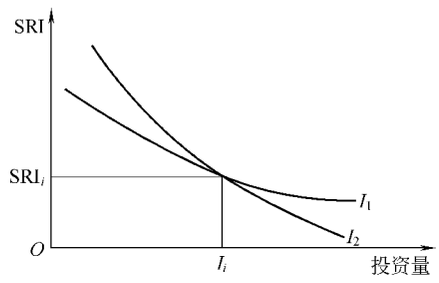


图 6-13　影子利率与投资量

既然用影子价格代替了实际价格，那就排除了造成价格歪曲的各种因素，把项目放到同一尺度来进行量度，因而也就没有必要规定各个部门的不同贴现率了。只有在相同的贴现率下，资源才能得到最充分的利用。假设国民经济只有两个部门 1、2 组成。各部门的投资 I_1 和 I_2 的大小与采用的影子利率 SRI_1 和 SRI_2 有关，如图 6-13 所示。用函数形式可表示为

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= I_1(SRI_1) \\ I_2 &= I_2(SRI_2) \end{aligned}\right\} \tag{6-52}$$

令各部门投资产出的社会效益是 $B_1(I_1)$ 和 $B_2(I_2)$，总的可供投资用的资金是 I，那么使社会效益最大的数学模型是

目标函数　$$\max\{B_1(I_1) + B_2(I_2)\} \tag{6-53}$$

约束条件　$$I_1 + I_2 = I \tag{6-54}$$

由拉格朗日乘子可得

$$L = B_1[I_1(\mathrm{SRI}_1)] + B_2[I_2(\mathrm{SRI}_2)] + \lambda[I - I_1(\mathrm{SRI}_1) - I_2(\mathrm{SRI}_2)] \tag{6-55}$$

一次求导，其最大化的必要条件是

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial B_1}{\partial I_1}\frac{\partial I_1}{\partial(\mathrm{SRI}_1)} - \lambda\frac{\partial I_1}{\partial(\mathrm{SRI}_1)} = 0 \\ \frac{\partial B_2}{\partial I_2}\frac{\partial I_2}{\partial(\mathrm{SRI}_2)} - \lambda\frac{\partial I_2}{\partial(\mathrm{SRI}_2)} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{6-56}$$

以上方程联立求解又得

$$\frac{\partial B_1}{\partial I_1} = \frac{\partial B_2}{\partial I_2} \tag{6-57}$$

上式说明，两个部门投资的边际效益要相等，根据影子利息率的定义，即有

$$1 + \overline{\mathrm{SRI}_1} = 1 + \overline{\mathrm{SRI}_2} \tag{6-58}$$

也就是说，各部门最终采用的影子利率 SRI_i 相等时，资源才能得到充分的利用。

第三节　“费用-效益”分析方法应用

一、由“费用-效益”分析方法确定污染物的最优去除水平

把污染物的去除可以类比为一种“商品生产”，可以得出图 6-14。图 6-14（a）表示总费用与总效益的货币值，横坐标表示去除污染物的数量，纵坐标表示费用；图 6-14（b）表示边际去除费用与边际去除效益，横坐标也表示污染物的去除数量，纵坐标表示去除单位污染物所花费的费用。所谓边际去除费用就是表示去除单位污染物所需的费用；边际去除效益表示去除单位污染物所获得的收益，也叫作临界费用和临界效益。利用图 6-14 中的曲线关系，找出均衡点所对应的污染物去除量 x_0，x_0 即为最优去除水平，也就是说在该去除水平下，社会净效益为最大。

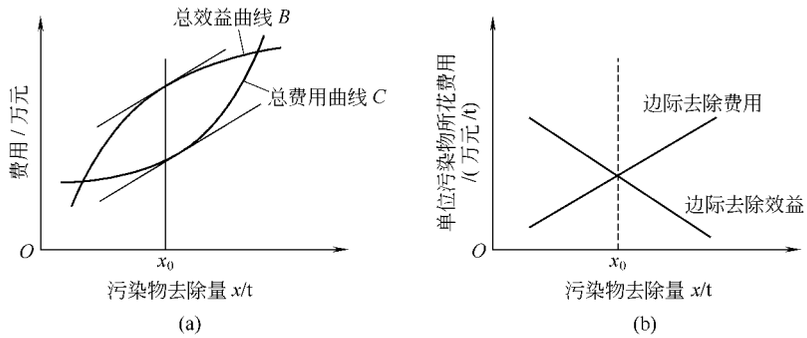


图 6-14　污染物最优去除水平

由此可以看出，所谓污染物去除的最优水平，是综合了环境和经济因素，以社会净收益最大为准则，而不是去除量愈大愈好，以达到零排放，这样做即使技术上可以解决，在经济上也未必是合理的。

二、环境经济“费用-效益”分析实例

1.“费用-效益”分析基本方法

（1）环境污染或生态破坏的总经济损失

$$E_{总}=\sum_{i=1}^{n}E_i=\sum_{i=1}^{n}K_iW_iC_i \tag{6-59}$$

式中　K_i——换算系数；

W_i——参与计算的各物质的量，t；

C_i——各种物质的单位费用，万元/t。

（2）单项环境经济损失计算

① 市场价格法（也称生产率法）　如计算农业损失、渔业损失、资源流失损失等。

$$E_i=K_iW_iC_i \tag{6-60}$$

式中　E_i——分项经济损失金额；

K_i——经济损失系数；

W_i——各资源产品量；

C_i——各资源单位产品的价值。

例如湘江流域因水环境污染所造成的渔业减产损失，每年176.6万元。广东省因污染对农业造成的损失每年约为125万元。

② 影子工程法　影子工程法的实质是恢复费用法。环境破坏后，人工建设另一个工程来代替原来的环境功能，另建工程的费用，就是环境破坏所造成的经济损失。

例如某水源被污染后，需另建新水源来代替原来的水源工程，另建水源的供水费用计量可按下式计算

$$E=f_1+f_2/N \tag{6-61}$$

式中　E——地下水源总污染损失总额，万元/年；

f_1——水处理费用，万元/年；

f_2——新建水源地工程投资费用，万元；

N——工程折旧期，年。

用以计量工业污染给海域所造成的经济损失额的“影子价格”按下式计算

$$E=\sum p\cdot q\cdot m\cdot n \tag{6-62}$$

式中　E——渔业总损失，万元/年；

p——海产品现价，元/kg；

q——每日每只船海产品捕捞量，kg/d；

m——捕捞时间；

n——捕捞船数。

③ 人力资本法　环境污染对人体健康产生不良影响，这种不良影响引起的经济损失计量，目前多采用人力资本法（或工资损失）。目前国外多采用“米山”（Misham）公式计算。

$$E_1=\sum Y_tP_T^t(1+r)^{-(t-T)} \tag{6-63}$$

式中　E_1——人体健康损失额；

Y_t——预测个人在t年的工资收入额；

P_T^t——某个人从T年活到t年的可能性；

r——t年到T年的有效社会贴现率。

因环境污染引起的疾病患者的医药、医疗费用损失计算公式为

$$E_2=\sum P_{x_1}^n P_{x_2}^n P_{x_3}^n Y_n(1+r)^{-(n-x)} \tag{6-64}$$

式中　E_2——人体健康损失额；

$P^n_{x_1}$——年龄从 x_1 年活到 n 年的概率；

$P^n_{x_2}$——年龄从 x_2 年活到 n 年，并有劳动能力的概率；

$P^n_{x_3}$——年龄从 x_3 年活到 n 年有劳动能力，并仍在工作岗位上的概率；

Y_n——n 年时的工资收入。

由于我国国内各地掌握的资料和数据有限，故多采用米山公式的变型来计算健康的人均国民收入损失，劳动力创造利润损失以及医药、医疗费用损失，并引入换算系数 K。其基本公式为

$$E = E_1 + E_2 = K_1 Y_1 P_1 + K_2 Y_2 P_2 \tag{6-65}$$

式中　E——人体健康损失值；

Y_1、Y_2——人均国民收入额（或创利润额）和人均医药、医疗费用；

P_1、P_2——丧失劳动力、患病人数（或参与计算人口数）；

K_1、K_2——换算系数，由两部分组成，一是标准死亡率、发病率，二是环境因素对人体健康的影响程度。

2. 环境经济“费用-效益”指标确定

（1）环境保护措施费用（一般分为三项）

① 投资费用 T

$$T = \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} X_{ij} \tag{6-66}$$

式中　X_{ij}——包括“三同时”在内的用于防治污染、“三废”综合利用以及为减轻污染而进行的生产工艺改革的项目费用；

i——“三同时”项目的个数，$i=1,2,3,\cdots,n$；

j——“三同时”以外项目个数，$j=1,2,3,\cdots,m$。

② 运行费用 Y

$$Y = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{6-67}$$

式中　R_i——每年用于环保固定资金维护和运行的日常性开支，也包括由每年的预计拨款和其他来源的开支；

i——项目数。

③ 日常费用 G

$$G = \sum_{i=1}^{n} S_i + \sum_{i=1}^{n} P_i + \sum_{i=1}^{n} Z_i \tag{6-68}$$

式中　S_i——事务费用，包括收集资料；

P_i——意外污染事故赔偿费用；

Z_i——咨询、学术交流费用；

n——年数。

（2）环境污染的损失费用　众所周知，环境污染的结果，最终以经济形式反映出来，它主要由“三废”排放对环境污染所造成的所有损失来确定。

① 排放污染物折算成资源和能源流失量的价值 A

$$A = \sum_{i=1}^{n} Q_i P_i \tag{6-69}$$

式中　Q_i——“三废”排放物累积总量；

P_i——“三废”排放物按产品计算的不变价格；

i——“三废”排放物品种。

② 各种污染物或转换为其他物质后，对周围环境中的生产和生活资料造成的损失费用 B

$$B = \sum_{i=1}^{n} C_i \tag{6-70}$$

式中　C_i——生产和生活资料的各种损失；

i——各种损失的类别。

③ 各种污染物质对人体健康的影响及其造成的劳动能力丧失的价值 C

$$C = \sum_{i=1}^{n} L_i + \sum_{i=1}^{n} B_i + \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{6-71}$$

式中　L_i——由于环境污染引起的疾病，劳动者在患病期间净产值的损失；

B_i——由于环境污染引起的疾病和死亡，从社会福利基金支付的金额；

F_i——医疗保健部门用于治疗因环境污染而患病的人员开支。

（3）环境保护“费用-效益”分析计算法

① 环境保护措施费用与工业总产值的比例 HZ

$$\mathrm{HZ} = \frac{T+Y+G}{\mathrm{GE}} \times 100\% \tag{6-72}$$

式中　T——投资费用；

Y——运行费用；

G——日常费用；

GE——工业生产总值。

② 环境保护措施费用与基本建设投资费用比例 HJ

$$\mathrm{HJ} = \frac{T+Y+G}{\mathrm{JT}} \times 100\% \tag{6-73}$$

式中　JT——基本建设投资。

③ 环境保护措施的经济效益 HS

$$\mathrm{HS} = \frac{T+Y+G}{\mathrm{WS}} \times 100\% \tag{6-74}$$

式中　WS——环境污染的总损失。

④ 环境保护措施费基本投资的总的经济效果 ZJ

$$\mathrm{ZJ} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \mathrm{TS}_{ij} - Y}{\mathrm{ZT}} \tag{6-75}$$

式中　TS_{ij}——环境保护投资的 j 个项目（$j=1,2,3,\cdots,m$），由于防止（或减少）损失 i 类（$i=1,2,3,\cdots,n$）的经济效益；

Y——用于设施维护的运行费用；

ZT——环保设施基建总投资。

3. 某市环境保护“费用-效益”分析

（1）因自来水水质恶化所造成的经济损失　某市因地处某江段下游，江水严重污染，致使自来水水质恶化，严重影响着市区 600 多万居民的健康，使许多工业部门的产品受到影

响，并造成较大的经济损失。该市算了一笔账，相当于每年损失 3.4 亿元人民币。

（2）对人体健康影响所造成的经济损失　环境污染对人体健康的影响主要来自水和大气的污染。其中由水污染造成的人体健康的经济损失已包括上述自来水水质损失，以下主要是大气污染所造成的人体健康的影响。

根据国内调查研究发现，大气污染对人体健康的影响主要是肺癌和呼吸道疾病。现以该市某郊区为对照点（1980 年对照点 SO_2 浓度为 0.018mg/m³，TSP 浓度为 0.107mg/m³），由弹性系数来估计大气污染所造成的健康影响，如下式

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta I}{I}} \tag{6-76}$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_{0i}} \tag{6-77}$$

式中　ε——弹性系数；

ΔY——市区死亡率和对照点死亡率之差（作为空气污染物所造成的死亡率增加值）；

Y——市区死亡率；

ΔI——市区空气污染物超标指数和对照点空气污染物超标指数之差；

I——市区空气污染物超标指数（仅考虑 SO_2 和 TSP）；

C_i——i 污染物实测和预测日平均浓度，mg/m³；

C_{0i}——i 污染物标准日平均浓度，mg/m³。

空气污染所造成的死亡率增加预测公式为

$$\Delta Y = \frac{\varepsilon Y_0 (I + I_0)}{I(1-\varepsilon) + \varepsilon I} \tag{6-78}$$

式中　Y_0——对照点死亡率；

I_0——对照点空气污染物超标指数。

由空气污染造成的死亡所产生的经济损失为

$$V_t = \Delta Y P S R n \tag{6-79}$$

式中　V_t——由空气污染造成的死亡所带来的经济损失；

P——市区人口；

R——市区某病 18～60 岁死亡数占该病总死亡数比率；

S——该市职工年人均国民收入；

n——职工（18～60 岁）中值年龄和 60 岁之差（21 年）。

① 肺癌　一般肺癌死亡和发病受空气污染影响的潜伏期为 5～10 年，因此在考虑肺癌死亡和发病受大气污染影响时，一般用 5～10 年以前的大气环境质量（表 6-1）。肺癌死亡率受大气污染影响的弹性系数为 $\varepsilon = 0.926$。该市 1982 年肺癌死亡所造成的经济损失为 6380 万元。肺癌发病率和死亡率的关系为 1∶1，因此可由大气污染造成的肺癌死亡率增加代替肺癌发病率增加。由肺癌造成的经济损失为

$$V_b = \Delta Y P [(C_h + C_d) + RS] \tag{6-80}$$

式中　V_b——由大气污染造成的肺癌发病经济损失；

C_h——平均肺癌住院床位费；

C_d——人均肺癌住院药费。

表 6-1　肺癌死亡率和相应大气污染物超标指数比较

肺癌死亡率[1/(10×10⁴)]1978 年～1979 年		大气污染物超标指数 1972 年～1974 年	
市区	对照点	市区	对照点
36.4	11.5	3.87	1.01

该市 1982 年肺癌发病率经济损失为 360 万元。

② 呼吸系统病　呼吸系统病死亡和大气污染的关系不考虑潜伏期问题，因此可用当年大气环境质量来表示（表 6-2）。呼吸系统病死亡率受大气污染影响的弹性系数 $\varepsilon=0.121$。

表 6-2　呼吸系统病死亡率和相应大气污染超标指数比较

呼吸系统病死亡率[1/(10×10⁴)]1976 年～1979 年		大气污染物超标指数 1976 年～1979 年	
市区	对照点	市区	对照点
66.13	60.29	3.70	1.01

$$\varepsilon_H=\frac{\frac{\Delta H}{H}}{\frac{\Delta I}{I}} \tag{6-81}$$

$$\varepsilon_P=\frac{\frac{\Delta P}{P}}{\frac{\Delta I}{I}} \tag{6-82}$$

$$\Delta H=\frac{\varepsilon_H H_0(I-I_0)}{I(1-\varepsilon_H)+\varepsilon_H I_0} \tag{6-83}$$

$$\Delta P=\frac{\varepsilon_P P_0(I-I_0)}{I(1-\varepsilon_P)+\varepsilon_P+\varepsilon_P I_0} \tag{6-84}$$

式中　ε_H、ε_P——弹性系数；

ΔH——市区住院率和对照点住院率之差；

ΔP——市区门诊率和对照点门诊率之差；

H、H_0——分别为市区和对照点住院率（表 6-3）；

P、P_0——分别为市区和对照点门诊率（表 6-3）。

表 6-3　住院率、门诊急诊率和大气污染超标指数比较

项　目	住院率/(1/100)	门诊急诊率/(1/100)	大气污染物超标指数
市区	9.72	11.9	3.49
对照	8.01	3.5	1.01

由呼吸系统发病所造成的经济损失为

$$V_b=\Delta HPH_R\left(H_c+\frac{RSH_d}{365}\right)+\Delta PPH_R\left(P_c+\frac{RS}{365}\right) \tag{6-85}$$

式中　V_b——因大气污染造成呼吸系统发病所致经济损失；

H_R——呼吸系统病住院人数占住院人数比例；

H_d——平均每个呼吸系统病人住院天数；

P_c——平均每次门诊、急诊费用；

H_c——人均每次呼吸系统病住院费（包括床位费和药费）。

由式（6-85）可得由大气污染所造成的呼吸系统发病而带来的经济损失为6680万元。

（3）物质材料所造成的损失　大气污染对物质材料的影响是相当严重的。1982年经济损失估计约为8000万元。

（4）土地利用的经济损失　由于地价和固体废物堆场所引起的土地经济损失为2.2亿元。

（5）河道疏浚所造成的经济损失　该市因河道疏浚所造成的经济损失为1亿元。

（6）农业所造成的经济损失　该市农业由于受污染所造成的经济损失约为3500多万元。

（7）清洁影响所造成的经济损失　该市1982年因大气污染所造成的清洁的经济损失为2.13亿元。

（8）赔、罚款和停产经济损失　1982年因赔、罚款和停产所交的经济损失为26.38亿元。

4. 环境污染的“费用-效益”分析

（1）由环境污染预测所造成的经济损失　由过去和现在的污染经济损失和排放的超基系数的关系，可以预测某一年份的污染经济损失（表6-4）。

$$\frac{\text{1982年超基指数}}{\text{预测年超基指数}}=\frac{\text{1982年污染经济损失}}{\text{预测年污染经济损失}} \tag{6-86}$$

表6-4　1990～2000年某市污染造成的经济损失预测

经　济　方　案	污染经济损失/10^8元	经　济　方　案	污染经济损失/10^8元
D90　SB 1(1990)	38	D90　SB 1(2000)	120
D90　SB 8(1990)	21	D90　SB 8(2000)	38

注：1. SB 1是按行业发展的经济方案。

2. SB 8是该市产业结构调整优化后的经济方案。

（2）环境污染的“费用-效益”分析　环境保护的投资包括投资和运转成本两部分。该市1982年环保固定资产原值为4.07亿元，仅为工业污染所造成的经济损失的16%，环境保护的经济效益为

$$\text{环境保护经济效益}=\frac{\text{环境污染经济损失}}{\text{环境污染防治经济总费用}}$$

该市因污染所造成的经济总损失为25亿元，总费用为4.07亿元，所以环境保护的经济效益为6.2亿元。经济效益比例见表6-5。

表6-5　不同国家防治污染与污染经济损失费用比例

国　家　名　称	环境保护经济效益	年　份/年
前苏联	1∶10	1970
美国	1∶3	1970～1975
其他经济发达的国家	1∶(25～3)	

一般来说，污染损失总要大于防污染投资的3～6倍。

对经济比较发达的国家进行比较，见表6-6。

表 6-6　经济发达国家环境保护费用与工业总产值和基建投资的比例

国　家	环保费用与工业总产值比例/%	环保费用与工业基建投资比/%	国　家	环保费用与工业总产值比例/%	环保费用与工业基建投资比/%
日 本	4.0	3.5～5	瑞典	1.2	—
美国	3.4	2～2.5	联邦德国	2.3	1.8
荷兰	2.7	0.6	挪威	0.5	—

（3）**环境保护费用与工业总产值和基建投资之比**　环境保护的效果还可以从环保费用与工业总产值和基建投资为比例来比较。

第七章　环境经济费用模型优化

第一节　环境经济费用模型的特点和要求

在环境保护和环境规划中，都需要进行环境工程和环保项目的可行性研究，进行环境工程的优化设计。为此，为合理安排环境保护和环境治理的工程和项目，必须归纳和总结环境经济的费用模型。

1. 环境经济费用模型的特点

① 环境经济费用模型必须是环境工程费用分析资料的概括或抽象；

② 费用模型必须体现环境治理费用与有关各因素之间的关系；

③ 费用模型应易于表达出经济费用的变化规律；

④ 费用模型应基本反映环境治理费用的经济形态；

⑤ 费用模型应易于进行数学运算和计算机的模拟运算，并为环境治理工程优化设计、优化控制、可行性经济分析提供便利的条件。

2. 建立环境经济费用模型的要求

① 环境经济费用模型必须具有一定的精确度；

② 环境经济费用模型必须简单明了；

③ 环境经济费用模型依据要充分；

④ 环境经济费用模型要有一定的通用性。

第二节　环境经济费用模型建立的步骤和方法

1. 建立环境经济费用模型的步骤

① 明确建模的目标；

② 收集与建模有关的各种数据；

③ 对有关的数据进行筛选和处理；

④ 分析与环境经济费用有关的各种关系和主要因素，并确定其中的主要变量；

⑤ 找出并明确约束条件；

⑥ 用数字和运算符号表明相关关系、相应的表达式，并演算环境经济费用模型的代表性。

2. 环境经济费用模型数据的收集和处理

（1）环境经济费用模型的统计分析方法　环境经济费用模型是用统计分析的方法调查收集大量已实施的环境治理项目，建设投资费用和运行管理费用资料，统计并筛选各项设计图标，求出经济费用与主要参数之间的关系。例如，上海黄浦江研究办公室在对上海各行业的废水治理做了大量调查研究的基础上，通过收集筛选数据处理回归分析和系统分析，总结归纳出主要工业行业的废水治理费用函数。美国环保部城市环境调查研究所采用同样的方法总结开发出“处理饮用水的费用函数模型”。

（2）环境经济费用模型的模型设计法　如果环境治理工程的资料较少，而又无标准设计

或通用设计资料可资利用时，可采用典型的设计方法，即拟定设计原则，按照不同的规模进行一些系列设计，确定主要的工艺尺寸和结构尺寸，然后计算环境治理项目的工程数量，并按统一的定额和价格求得其建设费用。

（3）环境经济费用模型参数分析计算法　在环境治理工程的各构筑物中，首先应找出对费用起主导和支配作用的参数，然后确定其建设费用。例如环境经济费用模型为

$$C = f(Q) \tag{7-1}$$

式中　C——建设费用；

Q——处理规模。

3. 环境经济费用模型变量的选择

环境经济费用模型是否通用和切实可行，选择恰当的变量是重要的环节之一。

① 环境经济费用模型变量的选择首先应满足经济目标和使用目标，不同的经济目标要求建立不同变量的环境经济费用模型。

② 环境经济费用模型应该是对模型起重大影响的一些参数。例如环境治理构筑物的建造费用模型可能是多方面的因素所决定的，在选择参数时，应该通过敏感性的分析，选择一些起决定因素的变量来建立环境经济费用模型。

③ 环境经济费用模型参数的选择应便于计算，利于应用。环境经济费用模型的建立应该有较大的实用性和典型性，它的形式必须简单明了，计算方便。

第三节　环境经济费用模型

近几年来，国内外不少学者在环境经济费用模型的开发方面做了大量分析研究工作，提出了各种费用函数模型，归纳其类型大致分为两类，第一类通式为

$$C = ax_1^{a_1}x_2^{a_2}x_3^{a_3} \tag{7-2}$$

第二类通式为

$$C = a + bx_1^{a_1}x_2^{a_2}x_3^{a_3} \tag{7-3}$$

式中　a——常数；

b、a_1、a_2、a_3——系数；

x_1、x_2、x_3——分别为各项设计参数。

一、给水工程的费用函数模型

1. 机械加速澄清池的费用函数模型

某设计院根据多年的经验和对几十个机械加速澄清池工程的造价费用的归纳、分析研究，提出了机械加速澄清池的费用函数模型

$$C = a + bQ^{a_1}v^{a_2} \tag{7-4}$$

式中　C——建造机械加速澄清池的工程费用；

Q——澄清池的处理水量（或设计流量），m^3/h；

v——澄清池的上升流速，mm/s；

a——常数，$a=13000$；

b、a_1、a_2——系数，其中 $b=20$，$a_1=1.72$，$a_2=-0.90$。

所以式（7-4）还可以写为

$$C = 13000 + 20 \times Q^{1.72} \times v^{-0.9} \tag{7-5}$$

而其中土建费用还可以表示为下面两种形式［式（7-6）和式（7-7）］

$$C_C = 7500 \times 6.7 Q^{1.72} v^{-0.9} \tag{7-6}$$

式中 C_C——土建工程费用；

Q——澄清池处理水量（或设计流量）m^3/h；

v——澄清池的上升流速，mm/s。

$$C'_C = 350 Q^{0.11} E^{0.4} R^{0.79} \tag{7-7}$$

式中 C'_C——澄清池土建费用；

Q——澄清池处理水量（或设计流量），m^3/h；

E——建筑容积系数，是指建筑容积与单池处理水量的比值（它接近于总停留时间）；

R——钢筋混凝土总量（钢筋混凝土工程费用在土建工程造价中占有极为重要的地位，可达70%～80%）。

2. 给水管网的费用函数模型

给水管网是给水系统中的重要组成部分。给水管网的造价约占整个给水工程造价的70%，因此给水管网设计是否合理，对整个给水工程造价的影响甚大。

给水管网经济技术计算和费用函数模型建立的目的，主要是为了在满足用户对水量、水压及其他设计目标要求的前提下，求出一定年限内“管网建造费用”和管理费用之和为最小的管网管径。

① 压力式单水源管网的费用函数模型——管网年费用折算值 W

$$W = \left(\frac{p}{100} + E\right) \sum_{i=1}^{p} (a + b \cdot d_i^a) l_i + K(H_0 + \sum_{i \in LM} h_i) Q_p \tag{7-8}$$

$$E = \frac{1}{t}$$

$$K = \frac{8760 \times 1000 Y\sigma}{102\eta} = 86000 \frac{Y\sigma}{\eta} \text{ 元}$$

$$\sum h_i = \sum \frac{K q_i^n l_i}{D_i^m}$$

式中 p——管网每年大修、折旧所占的百分比；

E——基建投资效果系数；

t——基建投资回收期，年；

d_i——管网管段的直径；

l_i——管网管段的长度；

$a + b \cdot d_i^a$——管网单位管长造价费用（包括水管材料和施工费用），元/m；

H_0——水泵的静扬程，m；

H_p——水泵扬程，$H_p = H_0 + \sum h_i$；

K——水泵抽水的经济指标，即抽送 $1m^3/s$ 的水到 1m 的高度每年所需电费；

σ——每 1kW·m 的电费，元；

Y——计算年限内供水能量的不均匀系数；

η——泵站总效率，一般为 0.55～0.85；

$\sum_{i \in LM} h_i$——管网管段的水头损失，m；

$\in$——基于、属于，即 i 属于 LM；

LM——从泵站到控制点 M（m）的管段集合；

p——管网管段数；

Q_p——进入管网的总流量，m^3/s。

② 压力式管网，如给水水源为多水源，且水源的集合为 S 时，则费用函数模型为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{p}(a+b\cdot d_i^a)l_i+\sum_{\phi\in S}K[H_{0,\phi}+\sum_{i\in \mathrm{LM}}K(H_{0,\phi}+\sum_{i\in \mathrm{LM}}h_{i,\phi})]Q_p \quad (7\text{-}9)$$

式中所有符号与公式（7-8）相同。

③ 重力式管网的费用函数模型　当管网为重力式管网时，$K=0$，此时费用函数模型为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{p}(a+b\cdot d_i^a)l_i \quad (7\text{-}10)$$

式中所有符号与公式（7-8）相同。

3. 由线性规划法求给水管网费用函数模型

设管线 l_i 由直径 $d_{i,f}$ 和长度 $l_{i,f}(f=1,2,3,\cdots,F)$ 的管段组成，于是编号为 $l_{i,f}$ 的管段，其费用和水头损失是 $l_{i,f}$ 的一次函数，年折算费用函数模型为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{p}\sum_{f=1}^{F}C_{i,f}l_{i,f}+KQ_{\mathrm{p}}H_{\mathrm{p}} \quad (7\text{-}11)$$

式中　$l_{i,f}$——管网管段长度；

$C_{i,f}$——系数；

K——系数；

Q_{p}——泵站流量；

H_{p}——泵站扬程。

其中，管段长度 $l_{i,f}$ 和管段长度 l_i 之间有线性约束条件，即

$$l_{i,1}+l_{i,2}+l_{i,3}+\cdots+l_{i,F}=l_i(i=1,2,3,\cdots,p) \quad (7\text{-}12)$$

水压约束条件为

$$H_{\mathrm{p}}-\sum_{i\in L_1}\sum_{f=1}^{F}I_{i,f}l_{i,f}\geqslant Z_{\mathrm{m}}-Z_{\mathrm{p}}+H_{\mathrm{a}} \quad (7\text{-}13)$$

式中　$I_{i,f}$——管段水力坡度；

$l_{i,f}$——管段长度。

由水头损失公式可以写出水力坡度 $I_{i,f}$ 的公式：

$$I_{i,f}=C_i^{-1/a}q_i^{1/a}d_{i,f}^{-b/a} \quad (7\text{-}14)$$

式中　C——系数；

q_i——管段流量；

d_i——管段直径；

a、b——系数。

综上所述，压力式管网的线性规划问题可为：

目标函数（最小值）为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{p}\sum_{f=1}^{F}C_{i,f}l_{i,f}+\sum_{i\in \mathrm{INR}}Qx_iKQ_{\mathrm{p}}(H'_{\mathrm{p}}-X_{\mathrm{p}}) \quad (7\text{-}15)$$

约束条件为

$$\left.\begin{aligned} l_{i,1}+l_{i,2}+l_{i,3}+\cdots+l_{i,F}&=l_i\\ H'_{\mathrm{p}}-\sum_{i\in \mathrm{LM}}\sum_{f=1}^{F}I_{i,f}l_{i,\ f}-x_i&=Z_{\mathrm{m}}+H_{\mathrm{a}}\\ l_{i,f}\geqslant 0(i&=1,2,3,\cdots,p,f=1,2,3,\cdots,F)\\ x_i\geqslant 0(i&\in \mathrm{INR})\\ H_{\mathrm{p}}&>0\\ H'_{\mathrm{p}}&=H_{\mathrm{p}}+Z_{\mathrm{p}} \end{aligned}\right\} \tag{7-16}$$

式中　LM——**从配水源到节点** m **的管线上的管段集合**；

INR——**配水源以外的节点集合**；

x_i——**松弛变量**；

H'_{p}——**水泵扬水高度**，m；

H_{p}——**水泵几何扬程**；

Z_{p}——**水泵泵轴高程**；

Z_{m}——**管网末端节点** m **的高程**，m；

H_{a}——**最小允许的自由水压**，m。

重力式管网的目标函数为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{p}\sum_{f=1}^{F}C_{i,f}l_{i,f} \tag{7-17}$$

约束条件为

$$\sum_{i\in \mathrm{LM}}\sum_{f=1}I_{i,f}l_{i,f}+x_i=H_{\mathrm{s}}-Z_{\mathrm{m}}-H_{\mathrm{a}} \tag{7-18}$$

式中　H_{s}——**配水水源的水面高程**，m。

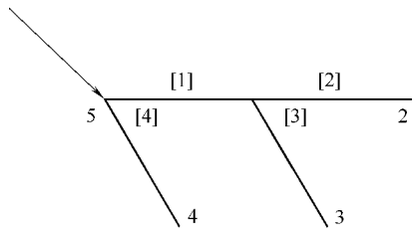


图 7-1　树枝网

如以图 7-1 树枝网为例，节点数 $J=5$，**管段数** $p=4$；**假定水管分段数** $F=3$，**按公式**（7-12）**的管段约束条件，并引入人工变量** $y_i(i=1,2,3,\cdots,p)$，**得以下方程组**

$$\left.\begin{aligned} l_1&=l_{1,1}+l_{1,2}+l_{1,3}+y_1\\ l_2&=l_{2,1}+l_{2,2}+l_{2,3}+y_2\\ l_3&=l_{3,1}+l_{3,2}+l_{3,3}+y_3\\ l_4&=l_{4,1}+l_{4,2}+l_{4,3}+y_4 \end{aligned}\right\} \tag{7-19}$$

由式（7-16）**引入人工变量** $Z_i(i=1,2,3,\cdots,J-1)$ **得**

$$\left.\begin{aligned} Z_1+H_{\mathrm{a}}&=H'_{\mathrm{p}}-\sum_{f=1}^{3}I_{1,f}l_{i,f}-x_1+Z_1\\ Z_2+H_{\mathrm{a}}&=H'_{\mathrm{p}}-\sum_{f=1}^{3}I_{1,f}l_{i,f}-\sum_{f=1}^{3}I_{2,f}l_{2,f}-x_2+Z_2\\ Z_3+H_{\mathrm{a}}&=H'_{\mathrm{p}}-\sum_{f=1}^{3}I_{1,f}l_{i,f}-\sum_{f=1}^{3}I_{3,f}l_{3,f}-x_3+Z_3\\ Z_4+H_{\mathrm{a}}&=H'_{\mathrm{p}}-\sum_{f=1}^{3}I_{1,f}l_{i,f}-x_4+Z_4 \end{aligned}\right\} \tag{7-20}$$

式中　x——松弛变量。

包含罚系数的目标函数如下：

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{4}\sum_{f=1}^{3}C_{i,f}+KQ_{\mathrm{p}}H'_{\mathrm{p}}+O\sum_{i=1}^{4}x_2+A\cdot\left(\sum_{i=1}^{4}Y_i+\sum_{i=1}^{4}Z_i\right)-K\cdot Q_{\mathrm{p}}\cdot Z_5 \tag{7-21}$$

式中　A——罚因子。

当管网为重力流时，目标函数为

$$W=\left(\frac{p}{100}+E\right)\sum_{i=1}^{4}\sum_{f=1}^{3}C_{i,f}l_{i,f}+O\sum_{i=1}^{4}x_i+A\sum_{i=1}^{4}Y_i \tag{7-22}$$

二、排水工程的费用函数模型

1. 污水处理厂的费用函数模型

污水处理厂的费用函数模型除了采用“统计回归方法”得出费用函数模型外，还可以采用“系列设计方法”求得费用函数模型。

目前常用费用函数模型形式如下。

（1）第一种表达方法

$$C=\alpha\cdot Q^{\beta} \tag{7-23}$$

式中　α、β——待定系数；

Q——设计流量，$10^4\,\mathrm{m^3/d}$；

C——污水处理费用。

① 对于一级污水处理厂

a. 投资费用函数模型

$$C_{\mathrm{C}}=74.1Q^{0.72} \tag{7-24}$$

b. 污水处理厂的运行费用函数模型

$$C_{\mathrm{O}}=13.5Q^{0.48} \tag{7-25}$$

② 对于二级污水处理厂

a. 投资费用函数模型，一般通式为

$$C_{\mathrm{C}}=208.7Q^{0.75} \tag{7-26}$$

式中　C_{C}——污水处理厂投资费用，万元。

国内对数百套污水处理设施的调查资料进行归纳分析，总结出｛C（费用）-Q（处理规模）-S（等标负荷量）｝法所建立的石油、化工、印染、造纸、电镀、冶金、选矿等行业的污水处理费用函数模型，以及去除 COD、酚、氰化物等污染物的费用函数模型。该费用函数模型为

$$C=aQ^{\beta_1}S^{\beta_2} \tag{7-27}$$

式中　C——污水处理所需投资费用，万元；

Q——污水处理的规模，$\mathrm{kt/d}$；

S——所去除各种污染物的负荷总量，$10^7\,\mathrm{m^3}$/年或 $10^6\,\mathrm{m^3}$/年；

a——常数，单位为万元·（$\mathrm{kt}\times10^7\,\mathrm{m^3}$）或万元·（$\mathrm{kt}\times10^6\,\mathrm{m^3}$）；

β_1、β_2——为无量纲因子，均为常数。

其中的 S 可由下式求得：

$$S=\sum_{i=1}^{n}S_i(10^7\,\mathrm{m^3}) \tag{7-28}$$

$$S_i = \frac{q_i}{C_{0i}} \times 10^6 (\mathrm{m^3}) = \frac{0.1q_i}{C_{0i}} (10^7 \mathrm{m^3}) \tag{7-29}$$

式中　S_i——去除第 i 种污染物的等标负荷量，$\mathrm{m^3}$；

n——去除污染物的个数；

q_i——去除第 i 种污染物的折纯量，t；

C_{0i}——第 i 种污染物排放标准，$\mathrm{g/(d \cdot m^3)}$。

部分工业废水投资费用函数模型汇总于表 7-1 内。

表 7-1　部分工业废水投资费用函数模型

序号	废水种类	投资费用函数模型	变量单位		
			C	Q	S
1	含油废水	$C=19.21\ Q^{0.3470}\ S^{0.5713}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
2	化工废水	$C=65.84\ Q^{0.5196}\ S^{0.3950}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
3	造纸废水	$C=6.21\ Q^{0.8947}\ S^{0.3455}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
4	印染废水	$C=25.46\ Q^{0.7045}\ S^{0.2228}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
5	电镀废水	$C=23.28\ Q^{0.0384}\ S^{0.1962}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
6	选冶废水	$C=3.46\ Q^{1.2038}\ S^{0.1099}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
7	有机废水	$C=88.17\ Q^{0.3817}\ S^{0.653}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
8	含酚废水	$C=29.14\ Q^{0.4800}\ S^{0.1853}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$
9	含氰废水	$C=7.34\ Q^{0.3453}\ S^{0.3401}$	万元	kt/d	$10^7\mathrm{m^3}$

表 7-2　工业废水处理（部分）设施运行费用函数模型

废水种类	运行费用函数模型	废水种类	运行费用函数模型
石油废水	$C_R=0.2195C_T$	选冶废水	$C_R=0.1338C_T$
化工废水	$C_R=0.2100C_T$	COD 废水	$C_R=0.2101C_T$
造纸废水	$C_R=0.1584C_T$	含酚废水	$C_R=0.1470C_T$
印染废水	$C_R=0.2505C_T$	含氰废水	$C_R=0.2090C_T$
电镀废水	$C_R=0.1165C_T$		

b. 废水处理运行费用模型一般通式为

$$C_R = 24.3Q^{0.9} \tag{7-30}$$

废水处理厂的运行费用包括能源消耗、工资、维修保养和其他费用。

根据调查，统计运行费用和投资费用之间有一定的关系

$$C_R = KC_T \tag{7-31}$$

式中　C_R——废水处理厂的运行费用；

C_T——废水处理的投资费用；

K——常数。

氧化塘处理废水的投资费用函数模型为

$$C = 0.551Q^{0.8100} x_1^{0.5335} x_2^{0.4025} \tag{7-32}$$

式中　C——氧化塘的投资费用，万元；

Q——氧化塘的处理规模，万吨/d；

x_1——氧化塘单位处理规模的占地面积，亩/万吨；

x_2——氧化塘单位面积每日去除 COD 的负荷量，$\mathrm{g/m^2}$。

（2）第二种表达方法

$$C = K_1 Q^{K_2} + K_3 Q^{K_2} \eta^{K_4} \tag{7-33}$$

式中　K_1、K_2、K_3、K_4——待定系数，其中 $K_1=9$、$K_2=0.657$、$K_3=22$、$K_4=1.7$。

所以上式为

$$C = 9Q^{0.657} + 22Q^{0.657} \eta^{1.7} \tag{7-34}$$

式中　C——污水处理厂投资费用，万元。

2. 污水处理厂费用函数模型线性化的解析推导方法

如前所述，污水处理费用函数模型的形式为

$$C = K_1 Q^{K_2} + K_3 Q^{K} \eta^{K_1} \tag{7-35}$$

假设在污水处理厂规模 Q 不变的条件下模型进行线性化，则费用 C 只是变量 η 的函数，令

$$F_1 = K_1 Q^{K_2}$$
$$F_2 = K_3 Q^{K_2}$$
$$F_3 = K_4$$

则式（7-33）可写成

$$C = F_1 + F_2 \tag{7-36}$$

公式（7-36）说明当污水处理厂规模不变时，废水处理费用是废水去除效率的函数，根据函数的逼近理论，该式可采用多段直线逼近。

假定在 $0 \leqslant \eta \leqslant 1$ 的区间里用几段线性函数来逼近原函数，横坐标的效率分段为 $0, \eta_1, \eta_i, \cdots, \eta_n$，每一段的直线斜率分别为 $a_1, a_2, \cdots, a_n$，则第 i 段费用的线性近似表达式为

$$C_i = F_1 + \sum_{i=0}^{i=1} a_i(\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i(\eta - \eta_{i-1}) \tag{7-37}$$

其中，$\eta_{i-1} \leqslant \eta \leqslant \eta_i$。

为使每一直线段与式（7-37）原函数造成的误差为最小，则要求直线段与函数之间所夹面积最小，见图 7-2。

在横坐标上取 η 的微小增量 $\mathrm{d}\eta$，于是，直线线段与原函数之间的面积可写作

$$\mathrm{d}S = \left[F_1 + \sum_{i=0}^{i=1} a_i(\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i(\eta - \eta_{i-1}) - (F_1 + F_2 \eta^{F_3})\right]\mathrm{d}\eta \tag{7-38}$$

为使 $\mathrm{d}S \geqslant 0$，构造一个函数

$$\mathrm{d}E = \left[F_1 + \sum_{i=0}^{i=1} a_i(\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i(\eta - \eta_{i-1}) - (F_1 + F_2 \eta^{F_3})\right]^2 \mathrm{d}\eta \tag{7-39}$$

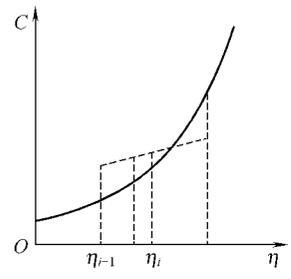


图 7-2　直线段与函数间所夹面积最小

式（7-37）、式（7-38）、式（7-39）中 $\sum_{i=0}^{i=1}$ 表示在 $0 \leqslant \eta \leqslant 1$ 区间里用几段线性函数来逼近原函数。

在 $\eta_{i-1} \leqslant \eta \leqslant \eta_i$ 区间内求和，得

$$E = \int_{\eta_{i-1}}^{\eta_i} \cdot \mathrm{d}E \tag{7-40}$$

令 $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}a_i} = 0$，求出使 E 为最小值的 a_i 值，得

$$a_i = \left\{\frac{2F_2}{F_3+2}(\eta_i^{F_3+2}-\eta_{i-1}^{F_3+2})-\frac{2F_2\eta_{i-1}}{F_3+1}(\eta_i^{F_3+1}-\eta_{i-1}^{F_3+1})-\left[\sum_{i=1}^{i-1}a_i(\eta_i-\eta_{i-1})\right](\eta_i-\eta_{i-1})^2\right\}\Big/\left[\frac{2}{3}(\eta_i-\eta_{i-1})^3\right] \tag{7-41}$$

将式（7-41）结果代入式（7-36），可求出式（7-36）的分段线性化结果，即式（7-35）在 Q（污水处理厂规模）不变时的分段线性化结果。

3. 排水沟道系统的费用函数模型

排水沟道系统在整个环境治理工程和市政工程建设中占有相当大的投资比例，因此好的排水系统的费用函数模型对于节约工程投资、提高经济效益、优化排水沟道系统设计都有很大意义。

（1）排水沟道单位管长的费用函数模型（包括材料和施工费用）

$$C_p=\begin{cases}a_{11}+a_{12}D^2+a_{13}x^2D\leqslant 1,\ x\leqslant 3\\ a_{21}+a_{22}D^2+a_{23}x^2D\leqslant 1,\ x>3\\ a_{31}+a_{32}D^2+a_{33}x^2D>1,\ x\leqslant 4\\ a_{41}+a_{42}D^2+a_{43}x^2D>1,\ x>4\end{cases} \tag{7-42}$$

式中　a_{ij}——拟合系数，其中 i 为 1～4，j 为 1～3；

D——管径，m；

x——管顶＋管径的平均埋深，m；

C_p——单位管长造价，元/m。

（2）排水系统窨井（或跌水井）费用函数模型

$$C_d=\begin{cases}b_{11}+b_{12}D^2+b_{13}x^2D\leqslant 1,\ x\leqslant 3\\ b_{21}+b_{22}D^2+b_{23}x^2D\leqslant 1,\ x>3\\ b_{31}+b_{32}D^2+b_{33}x^2D>1,\ x\leqslant 4\\ b_{41}+b_{42}D^2+b_{43}x^2D>1,\ x<4\end{cases} \tag{7-43}$$

式中　b_{ij}——拟合系数，i 为 1～4，j 为 1～3；

D——排水管管径，m；

x——（管顶＋管径平均直径）的埋深，m；

C_d——窨井（或跌水井）造价。

（3）排水系统提升泵站费用函数模型

$$C_{pu}=\begin{cases}K_1Q^2+K_2Q+K_3 & Q>Q^0\\ C_{pu}^0 & Q\leqslant Q^0\end{cases} \tag{7-44}$$

式中　K_i——拟合系数，i 为 1～3；

Q——提升流量，L/s；

Q^0——界限流量值，L/s；

C_{pu}^0——相当于界限流量 Q^0 的泵站造价；

C_{pu}——提升泵站造价，元。

（4）排水系统雨水调节池费用函数模型

$$C_{\mathrm{T}}=\begin{cases}K'_1V^2+K'_2V+K'_3 & V>V^0\\ C_{\mathrm{T}}^0 & V\leqslant V^0\end{cases} \tag{7-45}$$

式中　K'_i——拟合系数，i 为 1～3；

V^0——界限体积，由掌握的数据材料确定，m^3；

C_{T}^0——相当于界限体积 V^0 的调节池造价，元；

C_{T}——调节池造价，元。

（5）泵站在投资偿还期内的运行费用函数模型

$$C_{\mathrm{op}}=K365\times24QHT\sigma\mathrm{g}/(\eta\xi1000)=85.848K\frac{QHT\sigma}{\xi\eta} \tag{7-46}$$

式中　Q——泵站提升流量，L/s；

H——水泵提升扬程，m；

σ——电费，元/度；

η——泵站的效率；

ξ——日流量变化系数；

K——泵站类型系数，当泵站为污水泵站时，$K=1$，当泵站为雨水泵站时，$K<1$；

T——泵站的运转时间；

g——重力加速度，$\mathrm{g}=9.8\mathrm{m/s}^2$。

（6）在投资偿还期内，管线、窨井、调节池、提升泵站的折旧和维修费用函数型　假定在投资偿还为 T 年内，管网管线、窨井、提升泵站及雨水调节池的年折旧费、维修费所占百分数分别为 e_{p}、e_{d}、e_{pu}及 e_{T}，则

管网沟道系统　$$C'_{\mathrm{p}}=T_{e_{\mathrm{p}}}C_{\mathrm{p}} \tag{7-47}$$

窨井　$$C'_{\mathrm{d}}=T_{e_{\mathrm{d}}}C_{\mathrm{d}} \tag{7-48}$$

泵站　$$C'_{\mathrm{pu}}=T_{e_{\mathrm{pu}}}C_{\mathrm{pu}} \tag{7-49}$$

雨水调节池　$$C'_{\mathrm{T}}=T_{e_{\mathrm{T}}}C_{\mathrm{T}} \tag{7-50}$$

当引进“0～1”变量时，则有如下情况：

① 当 ϕ_{1i}、ϕ_{2i}、$\phi_{i1}=0$ 时，表示管段上游节点处不设泵站；

② 当 $\phi_{1i}=1$ 时，表示该节点处要设泵站；

③ 当 $\phi_{2i}=0$ 时，表示管段 i 上游不设调节池；

④ 当 $\phi_{2i}=1$ 时，表示管段 i 的上游设置调节池。

设整个系统的管段数为 m，窨井或跌水井数目为 n，则排水系统费用函数模型为

$$C=\min\Big\{\sum_{i=1}^{m}[C_{\mathrm{p}i}+C'_{\mathrm{p}i}+\phi_{1i}(C_{\mathrm{pu}i}+C'_{\mathrm{pu}i}+C'_{\mathrm{op}i})+\phi_{2i}(C_{\mathrm{T}}+C'_{\mathrm{T}})]+\sum_{i=1}^{n}(C_{\mathrm{d}i}+C'_{\mathrm{d}i})\Big\} \tag{7-51}$$

上式转化为

$$C=\min\Big\{\sum_{i=1}^{m}[(1+e_{\mathrm{p}}T)C_{\mathrm{p}i}+\phi_{1i}C_{\mathrm{pu}i}(1+e_{\mathrm{p}}T)+\phi_{1i}C_{\mathrm{op}i}+\phi_{2i}C_{\mathrm{T}}(1+e_{\mathrm{p}}T)]+\sum_{i=1}^{n}(1+e_{\mathrm{p}}T)C_{\mathrm{d}i}\Big\} \tag{7-52}$$

三、地下水资源开采的最大效益函数模型

假设以 S_t^1 和 S_t^2 分别代表两个地区在 t 时间的地下水储量；$\overline{X}^1$ 和 $\overline{X}^2$ 代表其补给量（假定

为常数）；x_t^1和x_t^2代表两个地区在t时间的地下水抽水率；x_t^1C（S_t^1）和x_t^2C（S_t^2）是抽水的费用。在抽水过程中，随着地下水位的下降，抽水的单位费用也将随之提高，因而费用是地下水储量的递减函数。

令$\overline{Y}$为地面水的稳定流量，Y_t^1和Y_t^2分别是这两地区的地面水消费率。这样，在t时间，这两地区水的总消费率为（$x_t^1+y_t^1$）和（$x_t^2+y_t^2$），而假定设B^1（$x_t^1+y_t^1$）和B^2（$x_t^2+y_t^2$）是这两个地区用水所获得的总效益函数，从而可以得出该地区的抽水的总效益函数为

$$F=[B^1(x_t^1+y_t^1)+B^2(x_t^2+y_t^2)-x_t^1C(S_t^1)-x_t^2C(S_t^2)] \tag{7-53}$$

如果使式（7-53）有最大值，则

$$\int_0^{\infty}[B^1(x_t^1+y_t^1)+B^2(x_t^2+y_t^2)-x_t^1C(S_t^1)-x_t^2C(S_t^2)]e^{-r\cdot t}\mathrm{d}t \tag{7-54}$$

约束条件为

$$\left.\begin{aligned}&\mathrm{d}S_t^1/\mathrm{d}t=\overline{x^1}-x_t^1\\&\mathrm{d}S_t^2/\mathrm{d}t=\overline{x^2}-x_t^2\\&Y_t^1+Y_t^2\leqslant\overline{Y}\end{aligned}\right\} \tag{7-55}$$

第四节 环境经济费用模型的应用

环境经济费用模型是按不同要求建立起来的，因此，它应用的方面亦不相同。一般环境经济费用模型可以应用在以下几个方面：

① 环境经济费用模型可以用于环境治理项目的可行性研究，概估环境治理项目的工程造价；

② 环境经济费用模型可以用于环境治理工程设计方案的经济方案比较；

③ 环境经济费用模型可以用来检验环境工程设计的经济指标，掌握设计工作中的经济动向；

④ 环境经济费用模型可以用来掌握环境项目的经济规律，为环境工程优化设计创造条件。

一、应用“拉格朗日乘子法则”进行环境经济费用优化

目前，我国水环境污染相当普遍，有的水域污染已经相当严重，因此加速建设和完善我国城市水处理系统，已刻不容缓。我国工业生产大都集中于少数江河沿岸的几十个大城市，一般都以排放口形式排放污水，因此，在规划城市污水处理系统时，应考虑合理利用水体的环境容量。在通过水体自净计算出污染物总减少量的条件下，以该区域污水处理系统总经济代价最小为目的，对各种污染源进行污染物去除量的最优化分配，决策各污水处理厂的污染物的最佳处理效率。

由前述可知，一般城市污水二级处理厂的费用函数模型为

$$C=K_1Q^{K_2}+K_3Q^{K_2}\eta^{K_4}$$

当K_1、K_2、K_3、K_4各项参数代入后得

$$C=9Q^{0.657}+22Q^{0.657}\eta^{1.7}$$

假如某流域江段某城市有n个污染源排放口排放污水，由水体自净能力计算，可以求出该区域某项主要污染物$\mathrm{BOD_5}$的总的削减量，即其去除量。

根据污水处理厂的费用函数模型，该江段的总的经济费用函数模型为

$$F=\sum_{i=1}^{n}C_i=(K_1Q_1^{K_2}+K_3Q_1^{K_2}\eta_1^{K_4})+(K_1Q_2^{K_2}+K_3Q_2^{K_2}\eta_2^{K_4})+$$
$$(K_1Q_3^{K_2}+K_3Q_3^{K_2}\eta_3^{K_4})+\cdots+(K_1Q_n^{K_2}+K_3Q_n^{K_2}\eta_n^{K_4}) \tag{7-56}$$

根据该区域水体自净能力，算出的某项污染物 BOD_5 的总的削减量为 N，则约束条件为

$$N=\sum_{i=1}^{n}q_i\eta_i=q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_n\eta_n$$

由拉格朗日乘子法，即用拉格朗日乘子 λ 与约束条件相乘得

$$\lambda\left(N-\sum_{i=1}^{n}q_i\cdot\eta_i\right)=\lambda(N-q_1\eta_1-q_2\eta_2-q_3\eta_3-\cdots-q_n\eta_n)=0 \tag{7-57}$$

把式（7-56）与式（7-57）合并得

$$L=(K_1Q_1^{K_2}+K_3Q_1^{K_2}\eta_1^{K_4})+(K_1Q_2^{K_2}+K_3Q_2^{K_2}\eta_2^{K_4})+$$
$$(K_1Q_3^{K_2}+K_3Q_3^{K_2}\eta_3^{K_4})+\cdots+(K_1Q_n^{K_2}+K_3Q_n^{K_2}\eta_n^{K_4})+$$
$$\lambda(N-q_1\eta_1-q_2\eta_2-q_3\eta_3-\cdots-q_n\eta_n)=0 \tag{7-58}$$

式（7-58）中，η 为未知数，$L=0$，对 η_i 求偏导数得

$$\begin{cases}\dfrac{\partial L}{\partial\eta_1}=K_3K_4Q_1^{K_2}\eta_1^{K_4-1}-\lambda q_1=0\\ \dfrac{\partial L}{\partial\eta_2}=K_3K_4Q_2^{K_2}\eta_2^{K_4-1}-\lambda q_2=0\\ \dfrac{\partial L}{\partial\eta_3}=K_3K_4Q_3^{K_2}\eta_3^{K_4-1}-\lambda q_3=0\\ \vdots\\ \dfrac{\partial L}{\partial\eta_n}=K_3K_4Q_n^{K_2}\eta_n^{K_4-1}-\lambda q_n=0\\ \dfrac{\partial L}{\partial\lambda}=N-q_1\eta_1-\eta_2\eta_2-\eta_3\eta_3-\cdots-q_n\eta_n=0\end{cases} \tag{7-59}$$

由式中

$$K_3K_4Q_n^{K_2}\eta_n^{K_4-1}-\lambda q_n=0$$

得

$$\lambda=K_3K_4\frac{Q_n^{K_2}\eta_n^{K_4-1}}{q_n}$$

且

$$\left(K_3K_4\frac{Q_n^{K_2}}{q_n}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_n=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}} \tag{7-60}$$

所以式（7-60）变为

$$\begin{cases}(K_3K_4Q_1^{K_2})^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}q_1^{\frac{1}{K_4-1}}\\ (K_3K_4Q_2^{K_2})^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_2=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}q_2^{\frac{1}{K_4-1}}\\ (K_3K_4Q_3^{K_2})^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_3=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}q_3^{\frac{1}{K_4-1}}\\ \vdots\\ (K_3K_4Q_n^{K_2})^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_n=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}q_n^{\frac{1}{K_4-1}}\\ q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_n\eta_n=N\end{cases} \tag{7-61}$$

整理得

$$\begin{cases}\left(K_3K_4\dfrac{Q_1^{K_2}}{q_1}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}\\ \left(K_3K_4\dfrac{Q_2^{K_2}}{q_2}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_2=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}\\ \left(K_3K_4\dfrac{Q_3^{K_2}}{q_3}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_3=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}\\ \vdots\\ \left(K_3K_4\dfrac{Q_n^{K_2}}{q_n}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_n=\lambda^{\frac{1}{K_4-1}}\\ q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_n\eta_n=N\end{cases}\tag{7-62}$$

式（7-62）消去 $(K_3K_4)^{\frac{1}{K_4-1}}$，得

$$\begin{cases}(Q_1^{K_2}/q_1)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=(Q_2^{K_2}/q_2)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_2\\ (Q_1^{K_2}/q_1)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=(Q_3^{K_2}/q_3)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_3\\ (Q_1^{K_2}/q_1)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=(Q_4^{K_2}/q_4)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_4\\ \vdots\\ (Q_1^{K_2}/q_1)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_1=(Q_n^{K_2}/q_n)^{\frac{1}{K_4-1}}\eta_n\\ q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_n\eta_n=N\end{cases}\tag{7-63}$$

由方程 $$q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_i\eta_i+\cdots+q_n\eta_n=N$$

解得 η_i 代入式（7-63）中，整理得

$$\begin{cases}\left[q_2+\left(\dfrac{Q_2^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_2}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+q_n\eta_n=N\\ q_2\eta_2+\left[q_3\left(\dfrac{Q_3^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_3}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_3+\cdots+q_n\eta_n=N\\ q_2\eta_2+q_3\eta_3+\left[q_4+\left(\dfrac{Q_4^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_4}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_4+\cdots+q_n\eta_n=N\\ \vdots\\ q_2\eta_2+q_3\eta_3+\cdots+\left[q_n+\left(\dfrac{Q_n^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_n}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_n=N\end{cases}\tag{7-64}$$

式（7-64）写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \left[q_2+\left(\dfrac{Q_2^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_2}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right] & q_3 & q_4 & \cdots & q_n\ N \\ q_2 & \left[q_3+\left(\dfrac{Q_3^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_3}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right] & q_4 & \cdots & q_n\ N \\ q_2 & q_3 & \left[q_4+\left(\dfrac{Q_4^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_4}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right] & \cdots & q_n\ N \\ & \vdots & & \vdots & \vdots \\ q_2 & q_3 & q_4\cdots & \left[q_n+\left(\dfrac{Q_n^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_n}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right] & N \end{bmatrix} \tag{7-65}$$

式（7-65）矩阵即为污染物去除量优化分配的经济费用函数模型。解此矩阵可以求得 η_2、η_3、η_4、…、η_n，将其值代入式（7-56），可以解得 η_1；把 η_i 代入污水处理厂费用函数模型内，即可以解得 C_1、C_2、C_3、…、C_i、…、C_n。即当总费用为最小时，各污水处理厂所分配的最佳污染物去除量，并由此可以求出各污水处理厂污染物的去除量以及各厂最优的费用分配。

有一城市沿江而立，城市内有多个污水排放口，排放污水至江河内，水质污染严重，该市人民身体健康和工业生产都受到很大影响。市政府下决心治理，由市环境监测部门调查统计，市 BOD_5 总排放量约为 138t/d。目前准备规划建造的污水处理厂共 5 个，排入这 5 个厂的 BOD_5 的量为 104.18t/d（占全市 BOD_5 总排放量的 75.5%，见表 7-3）。根据该水体环境标准要求，按 90%频率计算，水体的自净能力要求的 BOD_5 削减量为 85.36t/d。如何优化分配这五个处理厂的污染物去除量？要处理这些污染物总共需多少投资？这些投资如何优化分配？

表 7-3　某市废水处理系统污染物调查表

序　号	污染源名称	废水流量 Q		BOD_5 排放量	
		m^3/d	m^3/h	m^3/d	m^3/h
Ⅰ	A 造纸厂	40000	1666.67	7.0	0.29
Ⅱ	B 造纸厂	1920	80.00	1.34	0.06
Ⅲ	化纤厂	14400	600.00	4.32	0.18
Ⅳ	城市污水处理厂	175000	7291.67	52.82	2.20
Ⅴ	化工综合污水处理厂	120000	5000.00	38.70	1.61
合计		351.320	14638.34	104.18	4.34

根据总费用方程，写出该城市废水治理工程总费用模型方程

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^{5} C_i \\ &= [K_1 Q_1^{K_2} + K_3 Q_1^{K_2} \eta_1^{K_4}] + [K_1 Q_2^{K_2} + K_3 Q_2^{K_2} \eta_2^{K_4}] + [K_1 Q_3^{K_2} + K_3 Q_3^{K_2} \eta_3^{K_4}] + \\ &\quad [K_1 Q_4^{K_2} + K_3 Q_4^{K_2} \eta_4^{K_4}] + [K_1 Q_5^{K_2} + K_3 Q_5^{K_2} \eta_5^{K_4}] \end{aligned} \tag{7-66}$$

约束条件为

$$N = \sum_{i=1}^{5} q_i \eta_i = q_1\eta_1 + q_2\eta_2 + q_3\eta_3 + q_4\eta_4 + q_5\eta_5 \tag{7-67}$$

由表 7-3 知，该市化工综合废水处理厂已建成运行，故应减去该厂 BOD_5 的量：$38.70\times 90\%=34.83$，则

$$q_1\eta_1+q_2\eta_2+q_3\eta_3+q_4\eta_4=85.36-34.86=50.5$$

$$\eta_1=\frac{(50.5-q_2\eta_2-q_3\eta_3-q_4\eta_4)}{q_1} \tag{7-68}$$

现 $n=4$，目的是要求出 η_1、η_2、η_3、η_4，根据式（7-64）得

$$\begin{cases}\left[q_2+\left(\dfrac{Q_2^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_2}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_2+q_3\eta_3+q_4\eta_4=50.5\\ q_2\eta_2+\left[q_3+\left(\dfrac{Q_3^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_3}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_3+q_4\eta_4=50.5\\ q_2\eta_2+q_3\eta_3+\left[q_4+\left(\dfrac{Q_4^{K_2}q_1^{K_4}}{Q_1^{K_2}q_4}\right)^{\frac{1}{K_4-1}}\right]\eta_4=50.5\end{cases} \tag{7-69}$$

把废水量 Q_i 和污染物 BOD_5 的量 q_i（单位均为 m^3/h）代入式（7-69）中并以矩阵形式表示：

$$\begin{bmatrix}\left[0.0558+\left(\dfrac{80^{0.657}\times 0.29^{1.7}}{1666.7^{0.657}\times 0.0558}\right)^{\frac{1}{1.7-1}}\right] & 0.18 & 2.20 & 2.1042\\ 0.0558\left[0.18+\left(\dfrac{600^{0.657}\times 0.29^{1.7}}{1666.7^{0.657}\times 0.18}\right)^{\frac{1}{1.7-1}}\right] & & 2.20 & 2.1042\\ 0.0558\ 0.18\left[2.20+\left(\dfrac{7291.67^{0.657}\times 0.29^{1.7}}{1666.7^{0.657}\times 2.20}\right)^{\frac{1}{1.7-1}}\right] & & & 2.1042\end{bmatrix} \tag{7-70}$$

$$\begin{bmatrix}0.2347 & 0.1800 & 2.2008 & 2.1042\\ 0.0558 & 0.4028 & 2.2008 & 2.1042\\ 0.0558 & 0.1800 & 2.2655 & 2.1042\end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix}1 & 0.7669 & 9.3771 & 8.9665\\ 1 & 7.2186 & 39.4409 & 37.7097\\ 1 & 3.2240 & 40.6004 & 37.7097\end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix}1 & 0.7669 & 9.3771 & 8.9665\\ 0 & 6.4517 & 30.0638 & 28.7442\\ 0 & 2.4571 & 31.2233 & 28.7442\end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix}1 & 0.7669 & 9.3771 & 8.9655\\ 0 & 1.0000 & 4.6548 & 4.4553\\ 0 & 1.0000 & 12.7074 & 11.6942\end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix}1 & 0.7669 & 9.3771 & 8.9655\\ 0 & 1.0000 & 4.6598 & 4.4553\\ 0 & 0.0000 & 8.0476 & 7.2389\end{bmatrix}$$

所以得

$$\eta_4=\frac{7.2389}{8.0476}\times100\%=89.95\%$$

$$\eta_3=(4.4553-4.6598\times0.8995)\times100\%=26.38\%$$

$$\eta_2=(8.9665-9.3771\times0.8995-0.7669\times0.2638)\times100\%=32.85\%$$

$$\eta_1=\frac{2.1042-0.0588\times0.3285-0.18\times0.2638-2.2008\times0.8995}{0.2917}\times100\%=20.14\%$$

由 η_i 代入费用方程得各处理厂费用为

$$C_1=9\times1666.7^{0.657}+22\times1666.7^{0.657}\times0.2014^{1.7}=1336.74\ \text{万元}$$

$$C_2=9\times80^{0.657}+22\times80^{0.657}\times0.3285^{1.7}=219.24\ \text{万元}$$

$$C_3=9\times600^{0.657}+22\times600^{0.657}\times0.2638^{1.7}=754.75\ \text{万元}$$

$$C_4=9\times721.7^{0.657}+22\times7219.7^{0.657}\times0.8995^{1.7}=9446.35\ \text{万元}$$

$$C_5=9\times5000^{0.657}+22\times5000^{0.657}\times0.901^{1.7}=7386.36\ \text{万元}$$

该市处理 BOD_5 所需总费用为

$$C=\sum_{i=1}^{5}C_i=C_1+C_2+C_3+C_4+C_5=19173.44\ \text{万元}$$

该市处理污水 $351.320m^3/d$（含污染物 BOD_5 $104.18t/d$）约需投资 2 亿元左右，如表 7-4 所示。

表 7-4　某市废水处理系统污染物去除量优化分配表

序号	污染源名称	废水流量 $Q_i/(m^3/d)$	BOD_5 排放量 $q_i/(t/d)$	污染物去除率 $\eta_i/\%$	污染物去除量 $\Delta q_i/(t/d)$	各处理厂处理费用 C_i/万元
Ⅰ	A 造纸厂	40000	7.00	20.14	1.41	1366.74
Ⅱ	B 造纸厂	1920	1.34	32.85	0.44	219.24
Ⅲ	化纤厂	14400	4.32	26.38	1.14	754.75
Ⅳ	城市污水处理厂	175000	52.82	89.95	47.51	9446.35
Ⅴ	化工综合污水处理厂	120000	38.70	90.10	34.86	7386.36
合计		351.320	104.18		85.36	19173.44

二、污水系统最优化均匀处理费用函数模型

用以下数学模型来描述污水系统最优化均匀处理，其数学模型为

目标函数

$$\min Z=\sum_{i=1}^{n}C_i(Q_i)+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(Q_{ij}) \tag{7-71}$$

约束条件

$$q_i+\sum_{j=1}^{n}Q_{ji}-\sum_{i=1}^{n}Q_{ij}-Q_i=0\quad Q_i、q_i\geqslant0\quad Q_{ji}、q_{ij}\geqslant0 \tag{7-72}$$

式中　$C_i(Q_i)$ ——第 i 个污水处理厂的处理费用（它是污水量 Q_i 的单值函数）；

$C_{ij}(Q_{ij})$ ——由节点 i 至节点 j 的输水费用；

q_i ——第 i 个小区内所收集的污水量；

Q_{ji} ——从第 j 小区输往第 i 小区的污水处理厂的水量；

Q_{ij} ——从第 i 小区输往第 j 小区的污水处理厂的水量；

Q_i ——在第 i 小区的污水处理厂接受处理的污水量。

1. 污水“全部处理与全不处理”

由于污水处理规模的经济效应的存在，一个节点处汇集的污水，不可能被“分裂”成两部分或多部分进行处理。对某一个节点来说，它本身收集的污水加上由其他节点转输来的污水，只可能存在着要么全部就地处理；要么全部转输到其他节点去处理，这就是所谓“全部处理或全不处理”的策略。

如把一个污水处理系统分成几个小区，每个小区设有一个潜在的污水处理厂，各处理厂之间可以互相转输污水量，图 7-3 表示了第 i 个小区与第（$i+1$）个小区的处理厂之间相互转输污水量的关系，图中方框表示相应的污水处理厂。

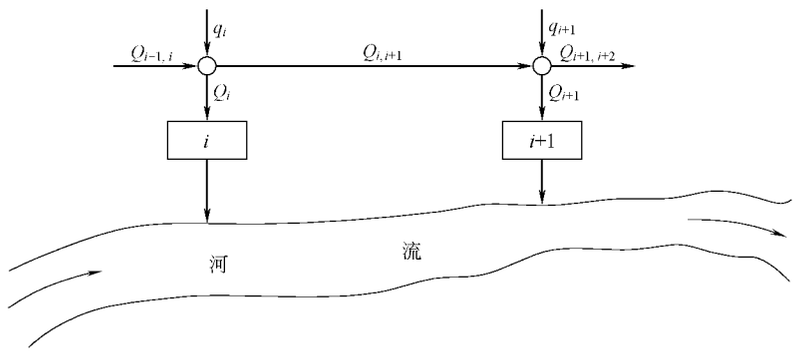


图 7-3　相邻处理厂的关系

第 i 小区本地产生的污水量是 q_i，由第（$i-1$）小区转输来的污水量是 $Q_{i-1,i}$；由 i 小区输往第（$i+1$）小区的污水量是 $Q_{i,i+1}$；在 i 小区内处理的污水量是 Q_i，即为第 i 小区的污水处理厂的规模。

对于第 i 小区来说，污水处理费用为

$$C_1^i = K_1 Q_i^{K_2} + K_3 Q_i^{K_2} \eta_i^{K_4} \tag{7-73}$$

对于一条线路确定的管线，输水费用可写为

$$C_2^i = K_5 Q_{i,i+1}^{K_6} \tag{7-74}$$

对于含有 n 个小区的系统，总费用可以表示成上述两项费用之和：

$$Z = \sum_{i=1}^{n} (C_1^i + C_2^i) = \sum_{i=1}^{n} \{(K_1 Q_2^{K_2} + K_3 Q_i^{K_2} \eta_i^{K_4}) + K_5 Q_{i,i+1}^{K_6}\} \tag{7-75}$$

$$Q_{i,i+1} = Q_{i-1,i} + q_i - Q_i$$

$$Q_{n,n+1} = 0$$

$$0 < K_2 < 1,\ 0 < K_6 < 1,\ K_4 > 1$$

以下是上述约束条件下，求 Z 为最优值的 Q_i 和 Q_{ij}。定义下述 Lagrange 函数：

$$L = \sum_{i=1}^{n} C_i + \sum_{i=1}^{n-1} \phi_i (Q_{i-1,i} + q_i - Q_i - Q_{i,i+1}) + \phi_n (Q_{n-1,n} + q_n - Q_n) \tag{7-76}$$

式中　ϕ_i——拉格朗日乘子（Lagrange）。

为检验流量的组合变化对 L 的影响，写出 L 的 Hessian 矩阵：

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q^2}=\begin{bmatrix}\frac{\partial^2 L}{\partial Q_{1,2}^2} & & & & & \\ & \frac{\partial^2 L}{\partial Q_{2,3}^2} & & & 0 & \\ & & \frac{\partial^2 L}{\partial Q_{n-1,n}^2} & & & \\ & & & \frac{\partial^2 L}{\partial Q_1^2} & & \\ & 0 & & & \frac{\partial^2 L}{\partial Q_2^2} & \\ & & & & & \frac{\partial^2 L}{\partial Q_n^2}\end{bmatrix} \tag{7-77}$$

因为

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q_{ij}\cdot\partial Q_{ji}}=0(\text{对 } ij\neq ji) \tag{7-78}$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q_i\partial Q_j}=0(\text{对 } i\neq j) \tag{7-79}$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q_{i,j+1}\partial Q_i}=0 \tag{7-80}$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q_{i,i+1}^2}=\frac{\partial^2 C_2^i}{\partial Q_{i,i+1}^2}<0 \tag{7-81}$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial Q_i^2}=\frac{\partial^2 C_1^i}{\partial Q_i^2}<0 \tag{7-82}$$

因为 Hessian 矩阵主对角线上的元素全不是零，其余元素全为零，Hessian 矩阵的奇数阶主子式全部小于零，而偶数阶主子式全部大于零，所以原函数区间 $0<Q_i<(Q_{i-1,i}+q_i)$ 内取得极大值，也就是说，只有在 $Q_i=0$（全不处理）或在 $Q_i=q_i+Q_{i-1}$（全部处理）时，污水处理系统的费用才取得极小值；根据这种性质来确定污水处理厂的规模的策略称为“全部处理与全不处理”策略，它可以利用图 7-4 来说明。图中 C 为输水费用，当在 i 点，$Q_i=0$，则取得 C_1^i 最大值，随着在 i 点处理的流量 Q_i 的增大，且随着转输流量 $Q_{i,i+1}$ 的减小，C_1^i 值逐渐减小；若在 i 点上，将转输来的流量 $Q_{i-1,1}$ 和本地的污水量 q_i 全部处理时，转输流量 $Q_{i,i+1}=0$，因而 $C_1^i=0$；而 C_2^i 的变化正好与 C_1^i 相反。

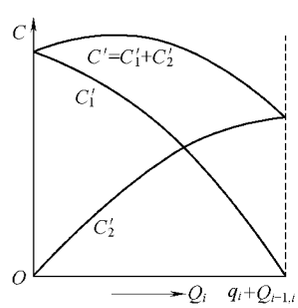


图 7-4　污水处理的策略

C_1^i 和 C_2^i 合成为 C^i。

在 0 至 $(q_i+Q_{i-1,i})$ 区间里 C^i 是凸曲线，只有在 $Q_i=0$ 或 $Q_i=q_i+Q_{i-1,i}$ 时才取得极小值。

2. 混合整数规划法（MIP）

整数规划和混合整数规划模型只能适用于线性模型。因此，必须首先对污水处理系统的费用函数（包括污水处理和污水输送的费用函数）实施线性化。污水处理和输送的费用值都是流量的函数。

污水处理费用

$$C_i=K_1Q_i^{K_2} \tag{7-83}$$

污水输送费用

$$C_{ij}=K_3Q_i^{K_4} \tag{7-84}$$

由于存在规模经济效应，$0<K_2$、$K_4<1$，因此 C_i 和 C_{ij} 都是凹函数。可将 Q_i 和 Q_{ij} 分成三个区间，进行分段线性化。

设污水处理费用函数分段线性化的斜率分为 a_1、a_2、a_3，各线段在纵坐标上的截距分别为 a_1^0、a_2^0 和 a_3^0，如图 7-5 所示；污水输送费用函数分段线性化的斜率分别为 b_1、b_2、b_3，各线段在纵坐标上的截距分别为 b_1^0、b_2^0 和 b_3^0，如图 7-6 所示。

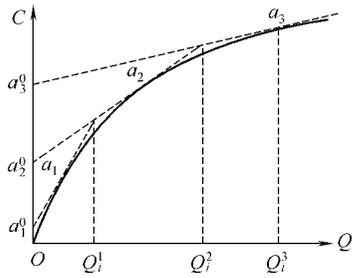


图 7-5　处理费用线性化

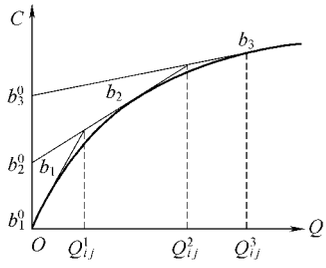


图 7-6　输水费用线性化

系统的污水处理费用是

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}a_{ik}Q_{ik}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}a_{ik}^0y_{ik} \tag{7-85}$$

式中，k 表示 1～3 的三个流量 Q_i、Q_{ik} 的三个区间。

污水输送费用是

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}b_{ijk}Q_{ijk}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}b_{tijk}^0\delta_{ijk} \tag{7-86}$$

式中，y_{ik} 和 δ_{ijk} 为逻辑变量，即

$$y_{ij}=\begin{cases}0，若\ Q_{ik}=0；\\ 1，若\ Q_{ik}\neq 0\end{cases} \tag{7-87}$$

$$\delta_{ijk}=\begin{cases}0，若\ Q_{ijk}=0；\\ 1，若\ Q_{ijk}\neq 0\end{cases} \tag{7-88}$$

式中，角标 k 表示费用线性化的分段区间。

一个系统的目标函数就可以写作污水处理的费用函数与污水输送的费用函数之和，即

$$\min X=\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}a_{ik}Q_{ik}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}a_{tk}^0y_{ik}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}b_{ijk}Q_{ijk}+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}b_{tijk}^0\delta_{ijk}\right\} \tag{7-89}$$

对目标函数最小化所要满足的约束条件有以下几方面。

① 带点的流量约束

$$q_i+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}Q_{ijk}+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}Q_{jik}-\sum Q_{ik}=0 \tag{7-90}$$

式中　q_i——在 i 小区内收集的污水量；

Q_{ijk}——从 i 小区输送到 j 小区的污水量；

Q_{jik}——从 j 小区输送到 i 小区的污水量；

Q_i——在 i 小区内处理的污水量。

② 在处理地点提供的处理厂的能力不大于排入水体的允许流量，即

$$\sum_{i=1}^{3} Q_{ik} \leqslant u_{ik} y_{ik} \tag{7-91}$$

式中　u_{ik}——在 i 小区允许排入河道的污水量。

③ 任一条输水管线的设计流量应不大于某个限制流量。

$$\sum_{k=1}^{3} Q_{ijk} \leqslant v_{ijk} \delta_{ijk} \tag{7-92}$$

式中　v_{ijk}——给定的管线最大输水能力。

④ 保证每一小区至多只建造一座污水处理厂。

$$\sum_{k=1}^{3} y_{ik} \leqslant 1 \tag{7-93}$$

⑤ 在 i 小区和 j 小区之间只存在一个流量，不可能出现双向流。

$$\sum_{k=1}^{3} \delta_{ijk} + \sum_{k=1}^{3} \delta_{jik} \leqslant 1 \tag{7-94}$$

⑥ 变量的非负约束

$$Q_{ijk} \geqslant 0 \tag{7-95}$$

$$Q_{ik} \geqslant 0 \tag{7-96}$$

⑦ 逻辑变量约束

$$\begin{aligned} \delta_{ijk} &= 0\text{（或 }1\text{）} \\ y_{ik} &= 0\text{（或 }1\text{）} \end{aligned} \tag{7-97}$$

由式（7-89）至式（7-97）构成了一个混合整数规划模型。求解这个模型可以得到污水处理系统总费用最低（包括污水处理费用与污水输送费用）的污水处理厂的位置和规模，以及污水输水管线的走向与输水量。

3. 污水系统区域性最优化处理

（1）系统的分解　污水系统区域最优化处理的规划模型为

目标函数

$$\min X \sum_{i=1}^{n} C_i(Q_i, \eta_i) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} C_{ij}(Q_{ij}) \tag{7-98}$$

约束条件满足

$$\left.\begin{aligned} & u\vec{L} - \vec{m} \leqslant \vec{L_0} \\ & v\vec{L} - \vec{n} \geqslant \vec{L}^0 \\ & q_i + \sum_{j=1}^{n} Q_{ji} - \sum_{j=1}^{n} Q_{ij} - Q_i = 0 \\ & L \geqslant 0 \\ & Q_i, q_i \geqslant 0 \\ & Q_{ij} Q_{ji} \geqslant 0 \\ & \eta_i^1 \leqslant \eta_i \leqslant \eta_i^2 \end{aligned}\right\} \tag{7-99}$$

式中　$C_i(Q_i, \eta_i)$——第 i 个小区的污水处理厂的污水处理费用，它既是污水处理规模（Q_i）的函数，又是污水处理效率（η_i）的函数。

（2）试探法　比较常用的试探法由开放节点试探、封闭节点试探和最优输水路线试探三个子程序组成。

开放节点是建有污水处理厂的节点，它处理本小区收集的污水和由其他小区转输来的污水；封闭节点又称转输节点，是指那些不设污水处理厂，而将污水送到邻近小区去处理的节点。

① 开放节点试探　对一个原先开放的节点来说，它担负着本地区收集的污水与由其他节点转输来的污水处理，在进行开放节点试探时，将被节点的污水送到相邻的开放节点去处理，而将原污水处理厂关闭。若所试探的节点是 i，与其相邻的另一个开放节点是 j（j 可以在 i 的下游），则 i 节点是否应该关闭的判据为

$$\left[C_i(Q_i,\eta_i)+C_j(Q_j,\eta_j)+\sum_{\substack{k=1\\k\neq i,j}}^{n}C_k(Q_k,\eta_k)\right]-\left[C_j(Q_i+Q_j,\eta'_j)+\sum_{\substack{k=1\\k\neq i,j}}^{n}C_k(Q_k,\eta'_k)+C'_{ij}(Q_{ij})\right]>0 \tag{7-100}$$

式中　C_i、C_j、C_k——系统内各节点的污水处理费用；

C_{ij}——由节点 i 输水至节点 j 的污水输运费用；

Q_i、Q_j、Q_k——系统内各污水处理厂的规模；

η_i、η_j、η_k——各污水处理厂的污水处理效率；

Q_{ij}——由节点 i 输往节点 j 的流量。

在 i 节点进行试探时，

$Q_i=0$，$a_j=Q_j+Q_i$，$Q_{ij}=Q_i$；节点 j 和 k 的污水处理效率也随之变为 η'_j 和 η'_k。

上式左边第一部分代表对 i 节点试探前的系统总费用（式中没有包括输水费用）。若上述不等式成立，说明节点 i 应该封闭，封闭后，可使系统总费用下降，否则节点 i 将继续开放。

② 封闭节点试探　封闭节点试探是开放节点试探的反过程。一个封闭节点一旦重新开放，则该节点收集本小区的污水及经由该节点转输的污水全部在该节点进行处理。

假设所试探的节点是 i，原接受 i 节点的污水的相邻开放节点是 j，那么，该封闭节点是否开放的判别式为

$$\left[C_j(Q_i+Q_j)\cdot\eta'_j+\sum_{\substack{k=1\\k\neq i,j}}^{n}C_k(Q_k,\eta'_k)+C_{ij}(Q_{ij})\right]-\left[C_j(Q_i,\eta_i)+C_j(Q_j,\eta_i)+\sum_{k=1}^{n}C_k(Q_k,\eta_k)\right]>0 \tag{7-101}$$

若不等式成立，则 i 节点应该开放，否则应继续封闭。

③ 输水路线试探　在污水管网中，一节点的污水输送到另一节点去处理，有可能不必经过中间的转输节点，即在两个节点之间存在捷径。

由图 7-7 所示，i 和 k 是两个封闭节点，j 是接受它们的污水的开放节点。根据前两个试探子程序的试探结果，i 节点的污水经 k 节点与 k 节点的污水共同输往 j 节点。问题是 i 节点的污水直接输送到 j 节点好呢，还是原先的输送途径好呢？这就需要进行污水输送费用的比较。

$$[C_{ij}(Q_i)+C_{kj}(Q_i+Q_k)]-[C_{ik}(Q_i)+C_{kj}(Q_k)]>0 \tag{7-102}$$

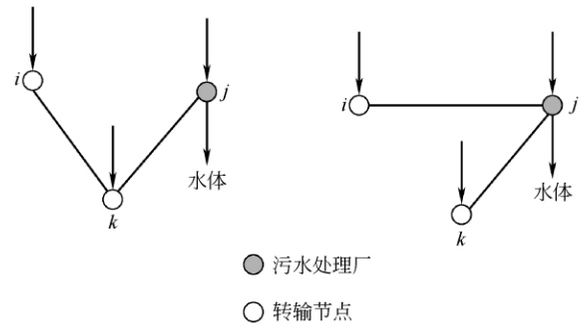


图 7-7　最优输水线路试探

若不等式成立，则 i 节点的污水应直接输送到 j 节点；否则仍需由 k 节点输至 j 节点。

第八章　环境经济“投入-产出”分析

投入-产出分析是对经济系统各个部分间（它包括作为生产单位或消费单位的产业部门、行业、产品等）的投入与产出关系进行数量分析的方法。投入-产出分析是经济学和数学相结合的产物，属于交叉学科。

所谓投入，是指产品生产所需原材料、辅助材料、燃料、动力、固定资产折旧和劳动力的投入；所谓产出，是指产品生产的总量及其分配使用的方向和数量，如用于生产消费（中间产品）、生活消费、积累和进出口等（后三者总称为最终产品）。在商品经济条件下，经济系统各部分间投入和产出的相互依存关系表现为商品交换关系。

投入-产出是美国经济学家瓦西里·列昂惕夫在总结前人关于经济活动相互依存性的基础上，于1931年开始研究的，1919年和1929年他分析美国的经济结构和经济均衡问题，并编制了投入-产出分析表；1953年，列昂惕夫与他人合作，出版了《美国经济结构研究》一书，阐述了投入-产出分析的基本原理及其发展；1968年联合国将其推荐为国民经济中的经济核算方法，现已在世界上一百多个国家中推行和应用。

我国于1974年编制了包括61种实物产品的《1973年投入-产出分析表》，另外上海、山西、黑龙江、河南、广东、北京和天津等省市及一些大中城市也编制了投入-产出分析表，用于制定经济综合平衡计划、研究经济结构的合理性，并进行经济预测。

进入20世纪70年代后，世界经济学家对环境保护和经济发展关系十分重视，把投入-产出分析应用扩展到环境问题中来，建立了一系列的环境经济的投入-产出模型，以研究环保和经济发展的协调关系；美国、日本、加拿大以及欧洲共同体在这一领域已取得了一些成绩。我国在这方面也取得了一些成果，但应该说是刚刚起步。

第一节　静态物品投入-产出模型

所谓静态模型就是不包括时间因素的投入-产出模型。静态产品投入-产出模型是静态模型的核心，其他各种类型的静态模型，可以看成是产品静态模型的扩充。

一、实物型投入-产出模型

简化实物型投入-产出模型见表8-1，其中共包括几类产品。从横行看，反映了各类产品分配使用的情况；它一部分作为中间产品供其他产品生产使用，另一部分作为最终产品供积

表8-1　简化实物型投入-产出模型

产出 / 投入	中间产品					最终产品	总计
	1	2	3	…	n		
1	q_{11}	q_{12}	q_{13}	…	q_{1n}	y_1	Q_1
2	q_{21}	q_{22}	q_{23}	…	q_{2n}	y_2	Q_2
3	q_{31}	q_{32}	q_{33}	…	q_{3n}	y_3	Q_3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	q_{n1}	q_{n2}	q_{n3}	…	q_{mn}	y_n	Q_n
劳动	q_{01}	q_{02}	q_{03}	…	q_{0n}	—	V

累与消费使用，两部分相加，就是一定时期内各类产品的生产总量 Q。从纵列看，反映了各类产品中要消耗其他产品（包括本身）的数量，由于各种产品的计量单位不一致，所以无法相加。此外，将各类产品生产中的劳动消耗单列一行，用 q_{0j} 表示，总的劳动消耗量为 V；q_{ij} 表示 j 产品生产中要消耗 i 种产品的数量；q_{ii} 表示各种产品自身的消耗量（i 代表横行的产品，j 代表纵列的产品）。

由上表可写出以下方程式：

$$\left.\begin{aligned} &q_{11}+q_{12}+q_{13}+\cdots+q_{1n}+y_1=Q_1\\ &q_{21}+q_{22}+q_{23}+\cdots+q_{2n}+y_2=Q_2\\ &q_{31}+q_{32}+q_{33}+\cdots+q_{3n}+y_3=Q_3\\ &\vdots\\ &q_{n1}+q_{n2}+q_{n3}+\cdots+q_{m}+y_n=Q_n\\ &q_{01}+q_{02}+q_{03}+\cdots+q_{0n}=V \end{aligned}\right\} \tag{8-1}$$

或写成

$$\sum_{j=1}^{n}q_{ij}+y_i=Q_i\quad(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-2}$$

$$\sum_{j=1}^{n}q_{0j}=V \tag{8-3}$$

1. 直接消耗系数

直接消耗系数又称投入系数（或技术系数），一般用 a_{ij} 表示，说明每生产单位 j 产品要消耗的 i 种产品的数量；产品直接消耗系数以下式表示：

$$a_{ij}=\frac{q_{ij}}{Q_j}(i,\ j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-4}$$

劳动的直接消耗系数为

$$a_{0j}=\frac{q_{0j}}{Q_j}(j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-5}$$

并且可以得到以下方程：

$$\sum_{j=1}^{n}a_{ij}Q_j+y_i=Q_i\quad(i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-6}$$

$$\sum_{j=1}^{n}a_{0j}Q_j=V \tag{8-7}$$

将上式展开就得

$$\left.\begin{aligned} &a_{11}Q_1+a_{12}Q_2+a_{13}Q_3+\cdots a_{1n}Q_n+y_1=Q_1\\ &a_{21}Q_1+a_{22}Q_2+a_{n3}Q_3+\cdots a_{2n}Q_n+y_2=Q_2\\ &\vdots\\ &a_{n1}Q_1+a_{n2}Q_2+a_{n3}Q_3+\cdots a_{m}Q_n+y_n=Q_n\\ &a_{01}Q_1+a_{02}Q_2+a_{03}Q_3+\cdots a_{0n}Q_n=V \end{aligned}\right\} \tag{8-8}$$

上式的矩阵形式为

$$\boldsymbol{AQ}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{Q} \tag{8-9}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——直接消耗系数矩阵；

$\boldsymbol{Q}$——各类产品总产量的列向量；

$\boldsymbol{Y}$——各类产品用于最终产品的列向量。

整理得

$$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Y} \tag{8-10}$$

式中　$\boldsymbol{I}$——单位矩阵；

$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})$——特殊形式的矩阵，其形式为

$$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})=\begin{bmatrix} 1-a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & \cdots & -a_{1n} \\ -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} & \cdots & -a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & -a_{n3} & \cdots & 1-a_{mm} \end{bmatrix}$$

在该矩阵的每一列中“正”号表示产出，每一列都说明生产一个单位的各种产品，需要消耗（投入）其他产品（包括本身）的数量。而对角线上各元素，则是各种产品扣除自身消耗以后的净产出。

式（8-10）表明，在已知各部门总产品条件下，乘上一个投入产出矩阵，就能够得到各部门的最终产品。公式（8-10）还可以写成

$$\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y} \tag{8-11}$$

式中　$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$——$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})$ 的逆矩阵，又称列昂惕夫系数矩阵。

2. 完全消耗系数

各种产品在生产过程中除了有直接联系外，还有间接联系，使得各种产品间的相互消耗，除了有直接消耗外，还有间接消耗。完全消耗系数则是这种直接、间接联系的全面反映。例如采煤要直接消耗电力，形成采煤对电力的直接消耗系数；同时采煤也要消耗设备、钢材、坑木等产品，而这些产品生产时也要消耗电力，这就是采煤对电力的间接消耗，形成间接消耗系数。完全消耗系数就是直接消耗系数加上全部间接消耗系数。

国民经济部门的完全消耗系数公式为

$$b_{ij}=a_{ij}+\sum_{k=1}^{n}b_{ik}a_{kj} \tag{8-12}$$

式中　k——中间产品；

$\sum_{k=1}^{n}b_{ik}a_{kj}$——通过 k 种中间产品而形成 j 产品对 i 种产品的全部间接消耗。

上式以矩阵形式表示为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{A} \tag{8-13}$$

并可写成

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})=\boldsymbol{A}$$

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1} \tag{8-14}$$

以 $\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{I}+\boldsymbol{A})$ 代入上式，得到

$$\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}-\boldsymbol{I} \tag{8-15}$$

由式（8-11）和式（8-15）可知，最终产品与总产品之间的关系就是完全消耗系数矩阵 $\boldsymbol{B}$ 加上一个单位矩阵，式（8-11）可以改写成

$$\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{I})\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Y} \tag{8-16}$$

由此可见，完全消耗系数 b_{ij} 是与最终产品相联系的，它表示每生产单位 j 种最终产品，要

直接与间接（完全）消耗 i 种产品的数量。

除了用（$I-A$）矩阵求逆的方法来计算完全消耗系数外，还可以用矩阵的幂级数来计算完全消耗系数，并在计算机上进行迭代运算。

利用方程 $AQ+Y=Q$ 的一组初始值 $Q^{(0)}$ 代入，并逐次迭代运算，得

$$
\begin{aligned}
Q^{(1)} &= AQ^{(0)}+Y \\
Q^{(2)} &= AQ^{(1)}+Y=A(AQ^{(0)}+Y)+Y=A^2Q^{(0)}+(I+A)Y \\
Q^{(3)} &= AQ^{(2)}+Y=A[A^2Q^{(0)}+(I+A)\ Y]+Y=A^3Q^{(0)}+(I+A+A^2)Y \\
&\vdots \\
Q^{(K)} &= A^kQ^{(0)}+(I+A+A^2+A^3+\cdots+A^k-1)Y
\end{aligned}
$$

当 $k\to\infty$ 时，$A^k\to 0$，所以 $(I+A+A^2+\cdots+A^{k-1})Y$ 就是方程的近似解。如果将（$I-A$）矩阵乘上这个解，则

$$
\begin{aligned}
(I-A)(I+A+A^2+\cdots+A^{k-1}) &= I-A^k\approx I \\
(I+A+A^2+\cdots+A^{k-1}) &\approx (I-A)^{-1}
\end{aligned}
$$

所以 $(I+A+A^2+\cdots+A^{k-1})-I=A+A^2+A^3+\cdots+A^{k-1}=B$

即矩阵的幂级数（$A+A^2+A^3+\cdots+A^{k-1}$）就是完全消耗系数矩阵 B，而其中 A 是直接消耗矩阵，$A^2+A^3+\cdots+A^{k-1}$ 是一次、二次、…、（$k-2$）次间接消耗。

二、价值型投入-产出模型

价值型的投入-产出模型简称价值模型。在价值模型中，将整个国民经济分为若干部门，并以货币为计量单位。价值模型的横行反映各部门产品的实物运动过程，纵列反映各部门产品的价值运动过程，其模型形式如表 8-2 所示。

表 8-2　简化价值型投入-产出模型

投入来源		分配去向										
		中间产品						最终产品				总产出
		部门（1）	部门（2）	部门（3）	…	部门（n）	小计	固定资产更新改造	消费	积累	小计	
物质消耗	部门（1）	x_{11}	x_{12}	x_{13}	…	x_{1n}	u_1	g_1	w_1	k_1	y_1	x_1
	部门（2）	x_{21}	x_{22}	x_{23}	…	x_{2n}	u_2	g_2	w_2	k_2	y_2	x_2
	部门（3）	x_{31}	x_{32}	x_{33}	…	x_{3n}	u_3	g_3	w_3	k_3	y_3	x_3
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	部门（n）	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	…	x_{nn}	u_n	g_n	w_n	k_n	y_n	x_n
	小计	C_1	C_2	C_3	…	C_n	C	G	W	K	Y	X
	折旧	d_1	d_2	d_3	…	d_n	D					
活劳动消耗	劳动报酬社会纯收入	v_1	v_2	v_3	…	v_n	V					
		m_1	m_2	m_3	…	m_n	M					
	小计	N_1	N_2	N_3	…	N_n	N					
总产值		X_1	X_2	X_3	…	X_n	X					

表中 x_{ij} 表示 j 部门生产中消耗 i 部门产品的数量，或者 i 部门生产的产品中，分配给 j 部门作为中间产品的数量。

1. 按行建立的价值模型

价值模型投入-产出模型的行与实物模型相类似，它反映各部门产品生产和分配的使用情况，建立最终产品与总产品之间的平衡关系，n 个部门有 n 个方程

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} + Y_i = X_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-17}$$

其式展开为

$$\left.\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} + \cdots + x_{1n} + y_1 &= x_1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + \cdots + x_{2n} + y_2 &= x_2 \\ &\vdots \\ x_{n1} + x_{n2} + x_{n3} + \cdots + x_{nn} + y_n &= x_n \end{aligned}\right\}$$

在模型中引入直接消耗系数 a_{ij}，直接消耗系数是指每生产单位 j 部门产品要消耗 i 部门产品的数量，直接消耗系数公式为

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_{ij}} \quad (i、j = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-18}$$

将上式代入式（8-17）得

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} X_j + Y_i = X_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-19}$$

将上式展开

$$\left.\begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + \cdots + a_{1n}X_n + Y_1 &= X_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + \cdots + a_{2n}X_n + Y_2 &= X_2 \\ &\vdots \\ a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + a_{n3}X_3 + \cdots + a_{nn}X_n + Y_n &= X_n \end{aligned}\right\} \tag{8-20}$$

式（8-20）用矩阵形式表示为

$$\boldsymbol{AX} + \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X} \tag{8-21}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——直接消耗系数矩阵，为 $n \times n$ 阶方阵；

$\boldsymbol{X}$——各部门总产量列向量，$\boldsymbol{X} = (X_1, X_2, X_3, \cdots, X_n)^{\mathrm{T}}$；

$\boldsymbol{Y}$——各部门总产量列向量，$\boldsymbol{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3, \cdots, Y_n)^{\mathrm{T}}$。

2. 按列建立的价值模型

按列所建立的模型，说明各部门产品价值的形成过程，即反映生产和消耗之间的平衡情况，建立新创造价值与总价值之间的平衡关系，即

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} + d_j + N_j = X_j \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-22}$$

式中　N_j——j 部门新创造价值。

上式展开为

$$\left.\begin{aligned} x_{11} + x_{21} + x_{31} + \cdots + x_{n1} + d_1 + N_1 &= X_1 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + \cdots + x_{n2} + d_2 + N_2 &= X_2 \\ &\vdots \\ x_{1n} + x_{2n} + x_{3n} + \cdots + x_{nn} + d_n + N_n &= X_n \end{aligned}\right\} \tag{8-23}$$

在模型中引入直接消耗系数 a_{ij}，得到

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} X_j + d_j + N_j = X_j \quad (j = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-24}$$

其式展开为

$$\left.\begin{aligned}
&a_{11}x_1+a_{21}x_1+a_{31}x_1+\cdots+a_{n1}x_1+d_1+N_1=X_1\\
&a_{12}x_2+a_{22}x_2+a_{32}x_2+\cdots+a_{n2}x_2+d_2+N_2=X_2\\
&\cdots\\
&a_{1n}x_n+a_{2n}x_n+a_{3n}x_n+\cdots+a_{mn}x_n+d_n+N_n=X_n
\end{aligned}\right\} \tag{8-25}$$

建立各部门产品总值与活劳动消耗间的关系或是活劳动消耗与产品总价值量间的联系，由式(8-24)得

$$\left(1-\sum_{i=1}^{n}a_{ij}\right)X_j=d_j+N_j\quad(j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-26}$$

式中　$\sum_{i=1}^{n}a_{ij}$ ——生产单位部门产品的全部物质消耗系数。

$\sum_{i=1}^{n}a_{ij}$ 可以用 a_{ij} 来表示，而 $\left(1-\sum_{i=1}^{n}a_{ij}\right)$ 则是固定资产折旧系数与新创造价值系数的总和，由此矩阵表示

$$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_c)\boldsymbol{X}=\boldsymbol{D}+\boldsymbol{N} \tag{8-27}$$

式中　$\boldsymbol{A}_c$——物质消耗系数矩阵，为对角矩阵。

其中（$\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_c$）可称新创造价值系数矩阵，即由各部门新创造价值总产量的比重所组成的矩阵。

$$\begin{bmatrix}
\sum_{i=1}^{n}a_{i1} & 0 & 0 & \cdots & 0\\
0 & \sum_{i=1}^{n}a_{i2} & 0 & \cdots & 0\\
0 & 0 & \sum_{i=1}^{n}a_{i3} & \cdots & 0\\
\vdots & \vdots & & \ddots & \vdots\\
0 & 0 & 0 & \cdots & \sum_{i=1}^{n}a_{in}
\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}
a_{c1} & 0 & 0 & \cdots & 0\\
0 & a_{c2} & 0 & \cdots & 0\\
0 & 0 & a_{c3} & \cdots & 0\\
\vdots & \vdots & & \ddots & \vdots\\
0 & 0 & 0 & \cdots & a_{cn}
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_c)^{-1}(\boldsymbol{D}+\boldsymbol{N}) \tag{8-28}$$

3. 横行模型与纵列模型的关系

投入产出模型中，在不考虑进口的情况下，纵列中各部门产品的生产量应等于横行中各部门的分配使用量，所以国民经济中第 k 部门有以下平衡式

$$\sum_{i=1}^{n}x_{ik}+D_k+N_k=\sum_{j=1}^{n}x_{kj}+Y_k\quad(k=1,2,3,\cdots,n)$$

即

$$\sum_{i=1}^{n}a_{ik}X_k+D_k+N_k=\sum_{j=1}^{n}a_{kj}X_j+Y\quad(k=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-29}$$

而从整个国民经济看，各部门生产的总量与分配使用的总量应该相等，所以

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}+\sum_{j=1}^{n}D_j+\sum_{j=1}^{n}N_j=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}x_{ij}+\sum_{i=1}^{n}Y_i$$

即
$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j+\sum_{j=1}^{n}D_j+\sum_{j=1}^{n}N_j=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j+\sum_{i=1}^{n}Y_i \tag{8-30}$$

上式方程去掉 $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j$，则上式为

$$\sum_{j=1}^{n}D_j+\sum_{j=1}^{n}N_j=\sum_{i=1}^{n}Y_i$$

说明在整个国民经济中，在不考虑进口因素的情况下，国民收入的生产量和最终使用量的平衡情况。

第二节　部门、企业和地区间的投入-产出模型

一、部门投入-产出模型

部门投入-产出模型同样可分为实物型和价值型两种，价值型部门投入-产出模型见表8-3。

表 8-3　价值型部门投入-产出模型

投入			产出												
			部门中间产品		部门外需求										总产品
			$1,2,\cdots,n$	小计	其他部门中间产品		最终产品								
					$1,2,\cdots,K$	小计	消费	基建投资	增加库存等	进口（－）	出口（＋）	小计	
生产资料投入价值	本部门产品	1	$X_{11}\ \cdots\ X_{1n}$		（Ⅱ）	W_1			（Ⅲ）			Y_1	X_1
		2	⋮ （Ⅰ） ⋮			⋯						⋮	⋮
		⋮	⋮ ⋮										
		n	$X_{n1}\ \cdots\ X_{nn}$			W_n						Y_n	X_n
		小计											
	外部门提供的产品	1	$E_{11}\ \cdots\ E_{1n}$										
		2	⋮ （Ⅳ） ⋮										
		⋮	⋮ ⋮										
		m	$E_{m1}\ \cdots\ E_{mn}$										
		小计											
	固定资产折旧		$D_1\cdots D_n$										
	合计		（Ⅴ）										
新创造价值	劳动报酬		$V_1\cdots V_n$										
	纯收入		（Ⅴ）										
	合计		$M_1\cdots M_n$										
总计			$X_1\cdots X_n$										

从表的水平方向看，反映了这个部门生产的各种产品的使用情况。共分三部分，即本部门的中间产品、其他部门中间产品和最终产品。其他部门中间产品是指本部门生产的各种产品作为其他部门的生产消耗。其中，第Ⅰ部分反映部门内部 n 种产品之间的相互消耗关系；第Ⅱ部分反映本部门产品用于部门外产品的生产消耗关系；第Ⅲ部分反映本部门产品作为最终产品使用的情况。

从水平方向有如下关系式

$$X_{i1}+X_{i2}+X_{i3}+\cdots+X_{in}+W_i+Y_i=X_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

或

$$\sum_{j=1}^{n}X_{ij}+W_i+Y_i=X_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-31}$$

以 a_{ij} 表示本部门内第 j 种产品对第 i 种产品的直接消耗系数，得

$$\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j+W_i+Y_i=X_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-32}$$

上式写为矩阵形式为

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{W}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X}$$

或

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}(\boldsymbol{W}+\boldsymbol{Y}) \tag{8-33}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——直接消耗系数矩阵；

$\boldsymbol{W}$——其他部门中间产品消耗列向量，W_i 反映其他部门对本部门的第 i 种产品（子部门）的生产消耗量；

$\boldsymbol{Y}$——最终产品列向量；

$\boldsymbol{X}$——总产品列向量。

从表 8-3 垂直方向看，反映各种产品和各个子部门产品的价值构成。表中第Ⅳ部分反映其他部门提供给本部门的各种原材料、辅助材料、燃料、动力等的消耗情况。表中第Ⅴ部分反映本部门内各种产品在生产过程中所消耗的固定资产价值（折旧额）、劳动报酬和社会纯收入的数量。从垂直方向，可以表示为以下方程

$$\sum_{i=1}^{n}X_{ij}+\sum_{i=1}^{n}E_{ij}+D_j+V_j+M_j=X_j \quad (j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-34}$$

式中　E_{ij}——本部门第 j 种产品（子部门）在生产过程中对外部门第 i 种产品（子部门）的消耗量。

令

$$e_{ij}=\frac{E_{ij}}{X_i} \quad (i=1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ m;\ j=1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ n)$$

e_{ij}——第 j 种本部门产品（子部门）对外部门提供的第 i 种产品（子部门）的直接消耗系数。

将 a_{ij} 和 e_{ij} 代入式（8-34）中，得

$$\sum_{i=1}^{n}a_{ij}X_j+\sum_{i=1}^{m}e_{ij}X_j+D_j+V_j+M_j=X_j \quad (j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-35}$$

写为矩阵形式为

$$(\hat{\boldsymbol{C}}+\hat{\boldsymbol{E}})\boldsymbol{X}+\boldsymbol{D}+\boldsymbol{V}+\boldsymbol{M}=\boldsymbol{X} \tag{8-36}$$

$$\hat{\boldsymbol{C}}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}a_{i1} & & & \\ & \sum_{i=1}^{n}a_{i2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{i=1}^{n}a_{in}\end{bmatrix},\quad \hat{\boldsymbol{E}}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{m}e_{i1} & & & \\ & \sum_{i=1}^{m}e_{i2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{i=1}^{m}e_{im}\end{bmatrix}$$

由于（$\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{C}}-\hat{\boldsymbol{E}}$）满秩，故有

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{C}}-\hat{\boldsymbol{E}})^{-1}(\boldsymbol{D}+\boldsymbol{V}+\boldsymbol{M}) \tag{8-37}$$

二、企业投入-产出模型

表 8-4 企业价值型投入-产出模型/元

		企业中间产品		最终产品					总产品
		1,2,…,n	合计	外销	本厂基建用	增加库存	其他	合计	
企业自产产品	1 2 ⋮ n	X_{11} X_{1n} (Ⅰ) X_{n1} X_{nn}				(Ⅱ)		Y_1 Y_n	X_1 X_n
	合计								
外购产品	1 2 ⋮ m	G_{11} G_{1n} (Ⅲ) G_{m1} G_{mn}				(Ⅳ)		Y_1^g Y	G_1 G_m
	合计								
固定资产折旧		D_1(Ⅴ)D_n							
企业管理费		S_1(Ⅴ)S_n							
工资		V_1(Ⅴ)V_n				(Ⅵ)			
税金及利润		M_1(Ⅴ)M_n							
合计									
总产值		X_1 X_n							

从表 8-4 水平方向看，第Ⅰ部分反映企业内部中间产品的技术联系；第Ⅱ部分反映了本企业所生产产品的最终使用；第Ⅲ、Ⅳ部分反映外购产品的使用情况；第Ⅴ部分反映了生产中消耗的固定费用（包括基本折旧、大修理和管理人员工资等）和新创造价值（包括生产工人工资和税金、利润）。

从垂直方向看，表中第Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ部分表明企业各种产品的产值和成本的组成情况，其中包括了本厂各种产品生产过程中对自制产品、外购原材料、辅助材料、燃料、动力等消耗以及对固定资产的折旧、其他货币的开支、工人工资、上缴税金和所得利润等。

1. 从表的横向看

（1）企业自产产品的分配去向，方程式为

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} + y_i = x_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-38}$$

令

$$a_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_i} \quad (i、j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中，a_{ij} 表示企业中第 j 种自产产品对第 i 种自产产品的直接消耗系数。

将 a_{ij} 代入式（8-38）得

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j + y_i = x_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-39}$$

上式改写为矩阵形式为

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X} \tag{8-40}$$

由于（$\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}$）满秩，故有

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y} \tag{8-41}$$

（2）外购产品的调入与使用平衡方程

$$\sum_{j=1}^{n}G_{ij}+Y_i^{g}=G_i\ (i=1,2,3,\cdots,m) \tag{8-42}$$

令

$$h_{ij}=\frac{G_{ij}}{X_i}\ (i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中　h_{ij}——表示企业第 j 种自产产品对第 i 种外购产品的直接消耗系数。

由 h_{ij} 代入式（8-42）中，则有

$$\sum_{j=1}^{n}h_{ij}X_i+Y_i^{g}=G_i\ (i=1,2,3,\cdots,m) \tag{8-43}$$

将式（8-43）改写为矩阵形式为

$$\boldsymbol{HX}+\boldsymbol{Y}^{g}=\boldsymbol{G} \tag{8-44}$$

这里，

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}h_{11}&h_{12}&h_{13}&\cdots&h_{1n}\\h_{21}&h_{22}&h_{23}&\cdots&h_{2n}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\h_{m1}&h_{m2}&h_{m3}&\cdots&h_{mn}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}g_1\\g_2\\\vdots\\g_m\end{bmatrix},\ \boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}y_1^0\\y_2^0\\\vdots\\y_m^0\end{bmatrix},\ \boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_n\end{bmatrix}$$

将式（8-41）代入式（8-44）得

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Y}^{g}=\boldsymbol{G} \tag{8-45}$$

这里 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 是企业自产产品对外购产品的完全消耗系数。

2. 从表的纵向看

从表的纵向看

$$\sum_{i=1}^{n}X_{ij}+\sum_{i=1}^{m}G_{ij}+D_j+S_j+Z_j=X_j\ (j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-46}$$

写成矩阵形式为

$$\hat{\boldsymbol{C}}_{\mathrm{A}}\boldsymbol{X}+\hat{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{D}+\boldsymbol{S}+\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{X} \tag{8-47}$$

或

$$(\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{C}}_{\mathrm{A}}-\hat{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{H}})\boldsymbol{X}=\boldsymbol{D}+\boldsymbol{S}+\boldsymbol{Z}$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{\mathrm{A}}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}a_{i1}&0&0&\cdots&0\\&\sum_{i=1}^{n}a_{i2}&0&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\\0&0&\cdots&\cdots&\sum_{i=1}^{n}a_{in}\end{bmatrix}\quad\hat{\mathbf{C}}_{\mathrm{H}}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{m}h_{i1}&0&0&\cdots&0\\&\sum_{i=1}^{m}h_{i2}&0&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\vdots&\ddots&\\0&0&\cdots&\cdots&\sum_{i=1}^{m}h_{in}\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{S}$、$\boldsymbol{Z}$ 均为列向量。

式（8-46）和式（8-47）反映出本企业自产产品的价值构成。

三、地区间投入-产出模型

地区间模型是把所有生产部门按地区进行详细划分，而且在模型中把不同地区的相同部门看作为不同部门。假定全国分为 m 个地区，每个地区有几个部门，如表 8-5 所示。

表 8-5 地区间投入-产出模型

投入			产出：中间产品：地区Ⅰ 部门 1	… 部门 n	…	地区 m 部门 1	… 部门 n	最终产品：地区 1	…	地区 m	全国 $m+1$	合计	总计
补偿价值	地区 T	部门 1	X_{11}^{11}	X_{n1}^{11}	…	X_{11}^{1m}	X_{1n}^{1m}	Y_1^{11}	…	Y_1^{1m}	Y_1^{1m+1}	Y_1^{10}	X_1^1
		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮						
		部门 n	X_{n1}^{11}	X_{nn}^{11}	…	X_{n1}^{1m}	X_{nn}^{1m}	Y_n^{11}	…	Y_n^{1m}	Y_n^{1m+n}	Y_n^{10}	X_n^1
	…		…	…	…	…		…	…	…	…	…	…
	地区 m	部门 1	X_{n1}^{m1}	X_{1n}^{m1}	…	X_{11}^{mm}	X_{1n}^{mm}	Y_1^{m1}	…	Y_1^{mm}	Y_1^{mm+1}	Y_1^{m0}	X_1^m
		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		部门 n	X_{n1}^{m1}	X_{nn}^{m1}	…	X_{n1}^{mm}	X_{nn}^{mm}	Y_1^{m1}	…	Y_n^{mm}	Y_n^{mm+1}	Y_n^{m0}	X_n^m
	小计												
	固定资产折旧		$D_1^1 \cdots D_n^{m1}$		…	$D_1^m \cdots D_n^m$							
新创造价值	劳动报酬		$V_1^1 \cdots V_n^1$		…	$V_1^m \cdots V_n^m$							
	社会纯收入		$M_1^1 \cdots M_n^1$		…	$M_1^m \cdots M_n^m$							
总计			$X_1^1 \cdots X_n^1$		…	$X \cdots X^{m1}$							

在上述符号中，用上标表示地区，下标表示部门；如上标 pq 表示 p 地区供应 q 地区；下标 ij 表示 i 部门产品用于 j 部门。

则 X_{ij}^{pq}——表示 p 地区供应 q 地区的 i 部门产品用于 j 部门生产消耗的数量；

Y_i^{pq}——表示 p 地区 i 部门产品供应 q 地区作为最终产品的数量，当 $q=m+1$ 时，$Y_i^{p,m+1}$ 就表示 p 地区生产的 i 部门产品用来满足全国性最终需要的数量；

Y_i^{p0}——p 地区生产的 i 部门产品提供给各个地区及全国作为最终产品的总量。即

$$Y_i^{p0} = \sum_{q=1}^{m+1} Y_i^{pq} \ ;$$

Y_i^{0q}——q 地区从各个地区得到的 i 部门最终产品的数量，故 $Y_i^{0q} = \sum_{p=1}^{m} Y_i^{pq}$ ；

V_j^q、M_j^q、X_j^q——分别表示 q 地区 j 部门的劳动报酬、社会纯收入及总产品数量。

从表 8-5 水平方向看，有如下关系式

$$\left.\begin{aligned}
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} X_{1j}^{1q} + Y_1^{10} &= X_1^1 \\
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} X_{2j}^{1q} + Y_2^{10} &= X_2^1 \\
&\vdots \\
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} X_{nj}^{1q} + Y_n^{10} &= X_n^1 \\
&\vdots \\
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} X_{1j}^{mq} + Y_1^{m0} &= X_1^m \\
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} X_{2j}^{mq} + Y_2^{m0} &= X_2^m \\
&\vdots \\
\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} X_{nj}^{mq} + Y_n^{m0} &= X_n^m
\end{aligned}\right\} \tag{8-48}$$

这个方程组说明分地区的各部门产品的使用情况，并可简写为

$$\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}X_{ij}^{pq}+Y_i^p=X_i^p\quad(p=1,2,3,\cdots,m;i=1,2,3,\cdots,n)\tag{8-49}$$

令　　$$a_{ij}^{pq}=X_{ij}^{pq}/X_j^q\quad(p、q=1,2,3,\cdots,m;i,j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中　a_{ij}^{pq}——表示第 q 地区生产单位 j 种产品所消耗的由 p 地区供应的 i 种产品的数量，它称为分区产品直接消耗系数。

以 a_{ij}^{pq} 代入式（8-49）得

$$\sum_{q=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}^{pq}X_j^q+Y_i^{pq}=X_i^p\quad(p=1,2,3,\cdots,m;i=1,2,3,\cdots,n)\tag{8-50}$$

令

$$\boldsymbol{A}^{pq}=\begin{bmatrix}a_{11}^{pq}&a_{12}^{pq}&a_{13}^{pq}&\cdots&a_{1n}^{pq}\\a_{21}^{pq}&a_{22}^{pq}&a_{23}^{pq}&\cdots&a_{2n}^{pq}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\a_{n1}^{pq}&a_{n2}^{pq}&a_{n3}^{pq}&\cdots&a_{mm}^{pq}\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{A}^{pq}$ 表示分区直接消耗系数矩阵，即地区 q 的各部门产品生产过程中对地区 p 各部门产品的直接消耗系数矩阵。

将式（8-50）以矩阵式表示

$$\sum_{q=1}^{m}A^{pq}X^q+Y^p=X^p\quad(p=1,2,3,\cdots,m)\tag{8-51}$$

再令

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}A^{11}&A^{12}&A^{13}&\cdots&A^{1m}\\A^{21}&A^{22}&A^{23}&\cdots&A^{2m}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\A^{m1}&A^{m2}&A^{m3}&\cdots&A^{mm}\end{bmatrix},\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}Y^{10}\\Y^{20}\\\vdots\\Y^{m0}\end{bmatrix},\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}X^1\\X^2\\\vdots\\X^m\end{bmatrix}$$

则式（8-51）可通过上述分块矩阵符号写为

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X}\tag{8-52}$$

因价值型地区间投入产出模型的分区直接消耗系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 具有以下两个性质：

① 所有元素为非负，即

$$a_{ij}^{pq}\geqslant 0(p,q=1,2,3,\cdots,m;i,j=1,2,3,\cdots,n)$$

② 每列元素之和小于 1，即

$$\sum_{q=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^{pq}<1\quad(q=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)$$

因此矩阵（$\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}$）是满秩的，这里 $\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵，故有

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y}\tag{8-53}$$

由公式（8-53）可知，当已知分区产品直接消耗系数矩阵 $\boldsymbol{A}$ 及计划期各地区最终产品列向量 $\boldsymbol{Y}$ 以后，即可求出计划期各地区各部门的总产量 $\boldsymbol{X}$。

从表 8-5 垂直方向看，有如下关系式

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}X_{i1}^{p1}+D_1^1+V_1^1+M_1^1=X_1^1\\
&\cdots\\
&\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}X_{i1}^{p1}+D_q^1+V_n^1+M_n^1=X_n^1\\
&\cdots\\
&\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}X_{i1}^{pq}+D_1^m+V_1^m+M_1^m=X_1^m\\
&\cdots\\
&\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}X_{in}^{pm}+D_n^m+V_n^m+M_n^m=X_n^m
\end{aligned}\right\} \tag{8-54}$$

这个方程组说明地区的各部门产品的价值形成过程，以上方程组的第一个方程说明第 1 地区第 1 部门产品的价值形成。该方程组可简写为

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}X_{ij}^{pq}+D_i^q+V_j^q+M_j^q=X_j^q\ (q=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-55}$$

以 $a_{ij}^{pq}=X_{ij}^{pq}/X_j^q$ 代入式（8-55）得

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{p=1}^{n}a_{ij}^{pq}X_j^q+D_j^q+V_j^q+M_j^q=X_j^q\ (q=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-56}$$

现以 $\boldsymbol{D}^q$ 表示地区 q 各部门固定资产折旧列向量，以 $\boldsymbol{V}^g$ 表示地区 q 各部门劳动报酬列向量，以 $\boldsymbol{M}^q$ 表示地区 q 各部门社会纯收入列向量，即

$$\boldsymbol{D}^q=\begin{bmatrix}D_1^q\\D_2^q\\\vdots\\D_n^q\end{bmatrix},\ \boldsymbol{V}^q=\begin{bmatrix}V_1^q\\V_2^q\\\vdots\\V_n^q\end{bmatrix},\ \boldsymbol{M}^q=\begin{bmatrix}M_1^q\\M_2^q\\\vdots\\M_n^q\end{bmatrix}$$

式（8-56）写成矩阵形式：

$$\left.\begin{aligned}
\hat{\boldsymbol{C}}^1\boldsymbol{X}^1+\boldsymbol{D}^1+\boldsymbol{V}^1+\boldsymbol{M}^1=\boldsymbol{X}^1\\
\hat{\boldsymbol{C}}^2\boldsymbol{X}^2+\boldsymbol{D}^2+\boldsymbol{V}^2+\boldsymbol{M}^2=\boldsymbol{X}^2\\
\cdots\\
\hat{\boldsymbol{C}}^m\boldsymbol{X}^m+\boldsymbol{D}^m+\boldsymbol{V}^m+\boldsymbol{M}^m=\boldsymbol{X}^m
\end{aligned}\right\} \tag{8-57}$$

$\hat{\boldsymbol{C}}^q$ 表示为如下对角形矩阵

$$\hat{\boldsymbol{C}}^q=\begin{bmatrix}\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}a_{i1}^{pq} & & & \\ & \sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^{pq} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}a_{in}^{pq}\end{bmatrix}$$

将式（8-57）简写为

$$\hat{\boldsymbol{C}}^{0}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{D}+\boldsymbol{V}+\boldsymbol{M}=\boldsymbol{X} \tag{8-58}$$

$$\hat{\boldsymbol{C}}^{0}=\begin{bmatrix}\hat{C}^{1} & & \\ & \hat{C}^{2} & \\ & & \hat{C}^{m}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}D_1\\D_2\\\vdots\\D^{\mathrm{m}}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}V^{1}\\V^{2}\\\vdots\\V^{m}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}M^{1}\\M^{2}\\\vdots\\M^{m}\end{bmatrix}$$

将式（8-58）改写为下列形式：

$$(\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{C}}^{0})\ \boldsymbol{X}=\boldsymbol{D}+\boldsymbol{V}+\boldsymbol{M} \tag{8-59}$$

由式（8-59）可直接写出解的形式：

$$X_j^q=\frac{D_j^q+V_j^q+M_j^q}{1-\sum_{p=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^{pq}}\quad(q=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-60}$$

由式（8-60）可以看出，地区间各物质生产部门总产值与新创造价值（净产值）之间的转换关系。若能预测出计划期各地区各部门的净产值，则可通过式（8-60）算出计划期各地区各部门的总值。

第三节　环境经济投入-产出模型

随着经济的发展，生产过程中产生的污染物（废气、废水、废渣等）日益增多，对人类健康及自然环境的影响日趋严重，人们迫切要求在发展生产的同时保护环境。环境经济的投入-产出方法可以帮助环境保护工作者进行定量分析和研究工作。

一、环境经济投入-产出模型［一］

1. 投入-产出模型结构

环境经济的投入-产出模型基本结构［一］见表 8-6。该表属于扩展的投入-产出表。其

表 8-6　环境经济投入-产出模型基本结构［一］

		中间产品				最终产品及最终需求领域产生的污染	总计
		生产部门		消除污染部门			
		1　2　…n	小计	1　2…m	小计		
生产部门	1	$X_{11}X_{22}\cdots X_{1n}$		$E_{11}E_{12}\cdots E_{1m}$		Y_1	X_1
	2	$X_{21}X_{22}\cdots X_{2n}$		$E_{21}E_{22}\cdots E_{2m}$		Y_2	X_2
	⋮	⋮　⋮　⋮　⋮		⋮　⋮　⋮　⋮		⋮	⋮
	n	$X_{n1}X_{n2}\cdots X_{nn}$		$E_{n1}E_{n2}\cdots E_{nn}$		Y_n	X_n
	小计						
污染部门	1	$P_{11}P_{22}\cdots P_{1n}$		$F_{11}F_{12}\cdots F_{1m}$		R_1	Q_1
	2	$P_{21}P_{22}\cdots P_{2n}$		$F_{21}F_{22}\cdots F_{2m}$		R_2	Q_2
	⋮	⋮　⋮　⋮　⋮		⋮　⋮　⋮　⋮		⋮	⋮
	m	$P_{m1}P_{m2}\cdots P_{mn}$		$F_{m1}F_{m2}\cdots F_{mn}$		R_m	Q_m
	小计						
固定资产折旧		$D_1D_2\cdots D_n$		$\overline{D}_1\overline{D}_2\cdots\overline{D}_m$			
新创造价值	劳动报酬	$V_1V_2\cdots V_n$		$\overline{V}_1\overline{V}_2\cdots\overline{V}_m$			
	纯收入	$M_1M_2\cdots M_n$		$\overline{M}_1\overline{M}_2\cdots\overline{M}_m$			
	小计						
总产品		$X_1X_2\cdots X_n$		$S_1S_2\cdots S_m$			

特点是，在行中，增加了若干数目的污染部门；在列中，增加了消除污染部门。对于生产部门来说，计量单位可以是价值单位，也可以是实物单位。但是对于污染部门和消除污染部门来说，计量单位只能取实物单位。在这个模型中，假设污染部门与消除污染部门是对应的，例如污染部门分为废水、废气、废渣三大类，消除污染部门也相应地包括废水处理、废气处理、废渣处理三个部门。

表中符号含义如下：

n——生产部门数目；

m——污染部门（或消除污染部门）数目；

X_{ij}——第 i 部门产品用作第 j 个生产部门生产消耗量；

P_{ij}——第 j 部门产品生产过程中所产生的第 i 种污染物的数量；

E_{ij}——第 j 个消除污染部门在消除污染过程中所耗用的第 i 个生产部门产品的数量；

F_{ij}——第 j 个消除污染部门在消除污染过程中所产生的第 i 种污染物的数量；

Y_i——第 j 部门最终产品数量；

X_i——第 j 部门总产品数量；

R_i——最终需要领域产生的第 i 种污染物的数量；

Q_i——第 i 种污染物的总量；

D_j——第 j 个生产部门固定资产折旧额；

V_j——第 j 个生产部门劳动报酬数额；

M_j——第 j 个生产部门纯收入数额；

$\overline{D}_j$——第 j 个消除污染部门固定资产折旧额；

$\overline{V}_j$——第 j 个消除污染部门劳动报酬数额；

$\overline{M}_j$——第 j 个消除污染部门纯收入数额；

S_j——第 j 个消除污染部门消除污染物总量。

从表水平方向上看，说明产品按经济用途的使用情况及各种污染物的产生情况，在表前几行中有以下平衡关系式：

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} + \sum_{j=1}^{m} E_{ij} + Y_i = X_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8-61}$$

在上述方程组中，引入直接消耗系数 a_{ij} 及污染部门的消耗系数 e_{ij}，

$$e_{ij} = \frac{E_{ij}}{S_j} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n; j = 1,2,3,\cdots,m)$$

e_{ij} 说明消除第 j 种污染物一个单位所消耗的第 i 种产品的数量。例如处理 1t 废水所消耗的电力。得到以下方程组

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j + \sum_{j=1}^{m} e_{ij} S_j + Y_i = X_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,n)$$

以上方程组写成矩阵形式

$$\boldsymbol{AX} + \boldsymbol{ES} + \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X} \tag{8-62}$$

这里，$\boldsymbol{A}$ 表示直接消耗系数矩阵，$\boldsymbol{Y}$、$\boldsymbol{X}$ 表示最终产品及总产品列向量，$\boldsymbol{E}$ 表示消除污染部门的消耗系数矩阵，$\boldsymbol{S}$ 表示污染物消除量列向量，即

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \cdots & e_{2m} \\ & & \cdots & & \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & \cdots & e_{nm} \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{bmatrix}$$

在表中第（$n+1$）行到第（$n+m$）行说明各种污染物的产生情况，其平衡方程组如下

$$\sum_{j=1}^{n} P_{ij} + \sum_{j=1}^{m} F_{ij} + R_i = Q_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,m) \tag{8-63}$$

引入生产部门的污染产生系数 P_{ij} 和消除污染部门的污染物产生系数 f_{ij}：

$$p_{ij} = \frac{P_{ij}}{X_j}, f_{ij} = \frac{F_{ij}}{S_j} \quad (i = 1,2,3,\cdots,m; j = 1,2,3,\cdots,n)$$

p_{ij} 表示第 j 个生产部门单位产值所产生的第 i 种污染物的数量，f_{ij} 表示第 j 种污染物消除一个单位所产生的第 i 种污染物的数量。可以得到以下方程组

$$\sum_{j=1}^{n} p_{ij} X_j + \sum_{j=1}^{m} f_{ij} S_j + R_i = Q_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,m)$$

这个方程组说明第 i 种污染物的产生总量 Q_i 是由各生产部门产生的第 i 种污染物 $\sum_{j=1}^{n} p_{ij} X_j$、各消除污染部门所产生的该种污染物 $\sum_{j=1}^{m} f_{ij} S_j$，以及最终需要领域所产生的该种污染物 R_i 所组成，这个方程组的矩阵形式如下

$$\boldsymbol{PX} + \boldsymbol{FS} + \boldsymbol{R} = \boldsymbol{Q} \tag{8-64}$$

式中　$\boldsymbol{P}$——表示生产部门污染的产生系数矩阵；

$\boldsymbol{F}$——表示消除污染部门污染的产生系数矩阵；

$\boldsymbol{S}$——表示污染物消除列向量；

$\boldsymbol{Q}$——表示污染物产生列向量。

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2n} \\ & & & \cdots & \\ p_{m1} & p_{m2} & p_{m3} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdots & f_{2n} \\ & & \cdots & & \\ f_{m1} & f_{m2} & f_{m3} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_m \end{bmatrix}$$

在上述方程组中，Q_i 表示第 i 种污染物的产生总量，S_i 表示通过消除污染部门的努力第 i 种污染物的消除总量，以 a_i 表示第 i 种污染物的消除比例，即

$$a_i = \frac{S_i}{Q_i} \quad (i = 1,2,3,\cdots,m)$$

显然，有

$$0 \leqslant a_i \leqslant 1 \quad (i = 1,2,3,\cdots,m)$$

如以 $\hat{a}$ 表示对角矩阵，即

$$\hat{\boldsymbol{a}} = \mathrm{diag}\ \{a_1,\ a_2,\ a_3,\ \cdots,\ a_m\}$$

$$\boldsymbol{S}=\hat{a}\boldsymbol{Q} \tag{8-65}$$

以 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,w_3,\cdots,w_m)^{\mathrm{T}}$ 表示各种污染物的净增量列向量，则

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}&=\boldsymbol{Q}-\boldsymbol{S}=\boldsymbol{Q}-\hat{a}\boldsymbol{Q}\\&=(\boldsymbol{I}-\hat{a})\boldsymbol{Q}\end{aligned}$$

利用式（8-65），可把式（8-62）和式（8-64）改写为

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{E}\hat{a}\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X} \tag{8-66}$$

$$\boldsymbol{PX}+\boldsymbol{F}\hat{a}\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{R}=\boldsymbol{Q} \tag{8-67}$$

2. 污染物的完全产生系数

在利用投入-产出方法研究环境保护中的环境经济时，除了讨论污染物的直接产生系数外，也讨论污染物的完全产生系数。

污染物的完全产生系数表示某个部门为了得到单位最终产品，在生产过程中所直接和间接产生的污染物的数量。

（1）在不考虑消除污染部门情况下的污染物的完全产生系数的计算公式　以 h_{ij} 来表示第 j 个生产部门对第 i 种污染物的完全产生系数，其计算公式如下

$$h_{ij}=p_{ij}+\sum_{k=1}^{n}h_{ik}a_{kj}\ (i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-68}$$

兹以每吨钢对空气的灰粒污染为例，其完全产生系数应当等于在炼钢过程中所直接产生的排放到空气的灰粒，加上炼钢过程中所消耗的生铁、电力、焦炭、重油、原煤等的数量分别与生铁、电力、焦炭、重油、原煤等对空气的灰粒污染的完全产生系数的乘积之和，式（8-68）中右端第一项表示污染物的直接产生系数，第二项 $\sum_{k=1}^{n}h_{ik}a_{kj}$ 表示第 j 部门单位产品对第 i 种污染物的间接产生量，而第 j 部门产品对 i 种污染物的完全产生量就等于直接产生量与间接产生量之和。方程组（8-68）写成矩阵形式

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}&=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{HA}\\\boldsymbol{H}&=\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\end{aligned} \tag{8-69}$$

由于在计算污染物的完全产生系数时未考虑消除污染部门，即假设未进行消除污染活动，即 $\hat{a}=0$，这时式（8-66）、式（8-67）可简化为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{Y}&=\boldsymbol{X}\\\boldsymbol{PX}+\boldsymbol{R}&=\boldsymbol{Q}\end{aligned}$$

两个方程组可合并写为

$$\begin{bmatrix}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}) & 0\\ -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}\\ \boldsymbol{R}\end{bmatrix}$$

由此得出

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}\\ \boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}) & 0\\ -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{Y}\\ \boldsymbol{R}\end{bmatrix}$$

令 $\boldsymbol{L}$ 表示上式右端之逆矩阵，就有

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}) & 0\\ -\boldsymbol{P} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}^{-1}=\begin{bmatrix}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1} & 0\\ \boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1} & \boldsymbol{I}\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{L}$ 矩阵的左下子块 $\boldsymbol{L}_{21}$ 即为所求的对污染物的完全产生系数矩阵 $\boldsymbol{H}$，并且有

$$\begin{bmatrix} X \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I-A) & 0 \\ -P & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y \\ R \end{bmatrix}$$

也就是

$$X = (I-A)^{-1}Y \tag{8-70}$$

$$Q = P(I-A)^{-1}Y + R \tag{8-71}$$

当知道 Y 和 R 的数值以后，利用以上两式就可算出 X 和 Q 的数量，计算出各部门的总产品和各类污染物的总产生量。

（2）在考虑消除污染部门情况下的污染物的完全产生系数的计算公式　式（8-66）和式（8-67）可写为

$$(I-A)X - E\hat{a}Q = Y$$

$$-PX + (I-F\hat{a})Q = R$$

即

$$\begin{bmatrix} (I-A) & -E\hat{a} \\ -P & (I-F\hat{a}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \\ R \end{bmatrix}$$

由此得出

$$\begin{bmatrix} X \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I-A) & -E\hat{a} \\ -P & (I-F\hat{a}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y \\ R \end{bmatrix}$$

同样地，令 L^0 表示上式右端之逆矩阵，可证明

$$L^0 = \begin{bmatrix} (I-A) & -E\hat{a} \\ -P & (I-F\hat{a}) \end{bmatrix}^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} (I-A)^{-1} + (I-A)^{-1}E\hat{a}[(I-F\hat{a}) & (I-A)^{-1}E\hat{a}[(I-F\hat{a}) \\ -P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}P(I-A)^{-1} & -P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1} \\ [(I-F\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}P(I-A)^{-1} & [(I-F\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1} \end{bmatrix}$$

矩阵 L^0 的左下子块，即为所求的对污染物的完全产生系数矩阵，以 H^0 表示这个矩阵，即

$$H^0 = [(I-F\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}P(I-A)^{-1} \tag{8-72}$$

这时，

$$\begin{bmatrix} X \\ Q \end{bmatrix} = L^0 \begin{bmatrix} Y \\ R \end{bmatrix}$$

也就是

$$X = (I-A)^{-1}Y + (I-A)^{-1}E\hat{a}[(I-F\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}[P(I-A)^{-1}Y + R] \tag{8-73}$$

$$Q = [(I-E\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}[P(I-A)^{-1}Y + R] \tag{8-74}$$

上式也可写为

$$Q = HY + [(I-F\hat{a}) - P(I-A)^{-1}E\hat{a}]^{-1}R \tag{8-75}$$

当知道 Y 和 R 的数值以后，利用式（8-73）和式（8-74）或式（8-75）就可算出 X 和 Q 的数值，也就是计算出各部门的总产品和各类污染物的总产量来。

3. 消除污染费用及其对产品价格的影响

由表的垂直方向可以看出各个消除污染部门在消除污染过程中生产、消耗以及排出污染物的情况。如果 $\hat{a}=0$，即社会不进行消除污染活动，那么产品价格就由生产过程中所消耗的生产资料价值以及新创造价值组成。如果 $\hat{a}\neq 0$，那么在各部门的生产费用中尚应包括消除污染费用在内，同时，也要求计算去除单位实物量的污染物的费用。

如在表中，各生产部门产品均按价值单位计算，也就是 X_{ij}、X_j、X_i 都是按价值单位

计算，而各个污染部门及消除污染部门均按实物单位计算。

如以 ϕ_i 表示第 i 个消除污染部门消除单位实物量的污染物的价格，以 π_i 表示第 i 个生产部门由于进行了消除污染活动而形成的新的单价与原有的未考虑消除污染费用的单价的比值（它等于 1 加提价比率）。

消除污染活动对产品价格的影响，可分为直接影响和间接影响。直接影响是指生产过程中所产生的污染物进行清除所产生的费用对产品价格的影响；间接影响是指由于很多部门都进行了消除污染活动，消除污染使产品价格上升，使生产过程中所消耗的原材料、辅助材料、燃料等的费用提高而引起的，由此可以得到以下方程组

$$\left.\begin{aligned}
\pi_1 X_1 &= \sum_{j=1}^{n}\pi_i X_{i1} + \sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i P_{i1} + D_1 + V_1 + M_1 \\
\pi_2 X_2 &= \sum_{j=1}^{n}\pi_i X_{i2} + \sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i P_{i2} + D_2 + V_2 + M_2 \\
&\cdots \\
\pi_n X_n &= \sum_{j=1}^{n}\pi_i X_{in} + \sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i P_{in} + D_n + V_n + M_n
\end{aligned}\right\} \tag{8-76}$$

式中 左端 $\pi_j X_j$（$j=1$，2，3，…，n）——表示考虑了消除污染费用后的第 j 部门的产值；

右端第一项 $\sum_{j=1}^{n}\pi_i X_{ij}\ (j=1,2,3,\cdots,n)$——表示由于各部门产品价格上升，第 j 部门中间投入的价值由 $\sum_{i=1}^{n}X_{ij}$ 增加到 $\sum_{i=1}^{n}\pi_i X_{ij}$；

右端第二项 $\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i P_{ij}\ (j=1,2,3,\cdots,n)$——表示第 j 部门的消除污染费用，第 j 部门所产生的第 i 种污染物数量为 P_{ij}，第 i 种污染物的消除百分比为 a_i，故消除量为 $a_i P_{ij}$，把第 i 种污染物消除量乘以消污单价 ϕ_i，即为 $\phi_i a_i P_i$，它表示第 i 部门由于消除部门第 i 种污染物所承担的费用。

以上方程组可写为

$$\pi_j X_j = \sum_{i=1}^{n}\pi_i X_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i P_{ij} + D_j + V_j + M_j \quad (j=1,2,3,\cdots,n)$$

该方程组两端同除以 X_j，得到

$$\pi_j = \sum_{i=1}^{n}\pi_i a_{ij} + \sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i p_{ij} + Z_j \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

式中 Z_j——表示单位产值中新创造价值和固定资产折旧，即 $Z_j = \dfrac{D_j + V_j + M_j}{X_j}$

$(j=1,2,3,\cdots,n)$

以上方程组写成矩阵形式

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{A}'\boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi} + \boldsymbol{Z} \tag{8-77}$$

这里 $\boldsymbol{\pi}$、$\boldsymbol{Z}$ 为 n 维列向量，$\boldsymbol{\phi}$ 为 m 维列向量，即

$$\boldsymbol{\pi}=\begin{bmatrix}\pi_1\\ \pi_2\\ \vdots\\ \pi_n\end{bmatrix},\ \boldsymbol{\phi}=\begin{bmatrix}\phi_1\\ \phi_2\\ \vdots\\ \phi_m\end{bmatrix},\ \boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}Z_1\\ Z_2\\ \vdots\\ Z_n\end{bmatrix}$$

现在讨论消除污染部门的生产费用。消除污染部门的产值由三部分组成。

第一部分是消除污染过程中消耗的各个生产部门的产品价值；第二部门是对消污过程中所排放的污染物进行再清除而产生的消污费用；第三部分是清除污染物过程中所消耗的固定资产价值（固定资产折旧），以及工资、纯收入等。可以得出以下方程组

$$\left.\begin{aligned}\phi_1 S_1 &= \sum_{i=1}^{n}\pi_i E_{i1}+\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i F_{i1}+\overline{D}_1+\overline{V}_1+\overline{M}_1\\ \phi_2 S_2 &= \sum_{i=1}^{n}\pi_i E_{i2}+\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i F_{i2}+\overline{D}_2+\overline{V}_2+\overline{M}_2\\ &\cdots\\ \phi_m S_m &= \sum_{i=1}^{n}\pi_i E_{im}+\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i F_{im}+\overline{D}_m+\overline{V}_m+\overline{M}_m\end{aligned}\right\}\tag{8-78}$$

以上方程组可简写为

$$\phi_j S_j=\sum_{i=1}^{n}\pi_i E_{ij}+\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i F_{ij}+\overline{D}_j+\overline{V}_j+\overline{M}_j\quad(j=1,2,3,\cdots,n)\tag{8-79}$$

在这个方程组中，等式左端 $\phi_j S_j$ 表示清除第 j 种污染物的总费用，它等于第 j 种污染物的消污单价 ϕ_j 与清除量 S_j 的乘积。等式右端第一项 $\sum_{i=1}^{n}\pi_i E_{ij}$ 表示第 j 部门消污过程中所消耗的各个生产部门产品的价值之和。等式右端第二项 $\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i F_{ij}$ 表示第 i 部门在消污过程中对所产生的污染物进行再清除而花费的费用，它等于消除量 $a_i F_{ij}$ 与费用单价 ϕ_i 乘积之和。把上述方程组等式左右两端都除以第 j 消污部门的活动量 S_i，得到

$$\phi_j=\sum_{i=1}^{n}\pi_i e_{ij}+\sum_{i=1}^{m}\phi_i a_i f_{ij}+Z_j\quad(j=1,2,3,\cdots,m)$$

$\overline{X}_j$ 表示第 j 种污染物清除一个单位所分摊的固定资产折旧和新造价值，即

$$\overline{Z}_j=\frac{\overline{D}_j+\overline{V}_j+\overline{M}_j}{S_j}\quad(j=1,2,3,\cdots,m)$$

上述方程组可写为矩阵形式

$$\boldsymbol{\phi}=\boldsymbol{E}'\boldsymbol{\pi}+\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi}+\overline{\boldsymbol{Z}}\tag{8-80}$$

这里，$\boldsymbol{Z}$ 是 m 维列向量，即 $\overline{\boldsymbol{Z}}=(\overline{Z},\overline{Z}_2,\overline{Z}_3,\cdots,\overline{Z}_m)$。由式（8-77）可以得到

$$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')\boldsymbol{\pi}=\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi}+\boldsymbol{Z}$$

故

$$\boldsymbol{\pi}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}(\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi}+\boldsymbol{Z})$$

把上式代入式(8-80)得

$$\boldsymbol{\phi}=\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}(\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi}+\boldsymbol{Z})+\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{\phi}+\overline{\boldsymbol{Z}}$$

由此得到

$$\boldsymbol{\phi}=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}]^{-1}[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]\tag{8-81}$$

$$\boldsymbol{\pi}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}]^{-1}[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z} \tag{8-82}$$

利用式（8-81）和式（8-82）就可算出消除各种污染物的费用单价及考虑了清除污染费用以后各部门产品价格的变动比例。应当指出，当表 8-6 各生产部门的计量单位为实物单位时，式（8-78）～式（8-82）仍然适用，但这时 π_i 的含义改变了，它表示考虑了消除污染物费用以后第 i 部门产品的平均价格。

在表 8-6 的基础上，可以提出简化的近似计算方法。第 j 部门所产生的第 k 种污染物为 P_{kj}，按公式（8-81）计算，消除 k 种污染物一个单位的费用为 ϕ，故第 j 部门由于第 k 种污染物消除比例提高 1%所增加的费用支出为 $0.01\phi_k P_{kj}$，由于第 k 种污染物消除比例提高 1%，第 j 部门产品价格应当提高

$$\frac{0.01\phi_k P_{kj}}{X_j}\text{，即 }0.01\phi_k p_{kj}$$

在上述简化计算方法中没有考虑很多的间接影响。

现在我们讨论比较复杂的计算方法，以 a_i 表示原有的第 i 类污染物消除比例，$\hat{\boldsymbol{a}}=\mathrm{diag}\{a_1, a_2, a_3, \cdots, a_m\}$。现假定第 k 类污染物的消除比例提高 1%，即由 a_k 提高到 $a_k+0.01$，以 $\hat{\boldsymbol{a}}_k$ 表示新的消除污染物比例的对角方阵，即 $\hat{\boldsymbol{a}}_k=\mathrm{diag}\{a_1, a_2, a_3, \cdots, a_k, a_k+0.01, a_{k+1}, \cdots, a_m\}$，以 π 表示消污比例为 $\hat{\boldsymbol{a}}_k$ 时，各部门产品的价格由消污活动而发生变动的比率的列向量。以 $\pi^*(k)$ 表示消污比例为 $\hat{\boldsymbol{a}}_k$ 时，各部门产品价格由于消污活动而发生变动的比率的列向量，即

$$\boldsymbol{\pi}=(\pi_1,\pi_2,\pi_3,\cdots,\pi_n)'$$
$$\boldsymbol{\pi}^*(k)=[\pi_1^*(k),\pi_2^*(k),\pi_3^*(k),\cdots,\pi_n^*(k)]'$$

由公式（8-82）提出

$$\boldsymbol{\pi}^*(k)=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^k[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}^k]^{-1}$$
$$[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}\quad(k=1,2,3,\cdots,m) \tag{8-83}$$

也就是

$$\left.\begin{aligned}
\boldsymbol{\pi}^*(1)&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^1[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^1-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}^1]^{-1}\\
&\quad[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}\\
\boldsymbol{\pi}^*(2)&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^2[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^2-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}^2]^{-1}\\
&\quad[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}\\
\boldsymbol{\pi}^*(3)&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^3[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^3-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}^3]^{-1}\\
&\quad[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}\\
&\cdots\\
\boldsymbol{\pi}^*(m)&=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^m[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{P}'\hat{\boldsymbol{a}}^m-\boldsymbol{F}'\hat{\boldsymbol{a}}^m]^{-1}\\
&\quad[\boldsymbol{E}'(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}+\overline{\boldsymbol{Z}}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}')^{-1}\boldsymbol{Z}
\end{aligned}\right\} \tag{8-84}$$

所以，由于第 k 种污染物消除比例提高 1%，第 j 部门产品价格应提高 $\pi^*(k)-\pi_j$。由于第 k 种污染物消除比例提高 1%，第 j 部门所增加的费用支出（包括直接影响与间接影响）为 $[\pi_j^*(k)-\pi_j]\cdot X_j$。

二、环境经济投入-产出模型［二］

环境经济投入产出模型基本结构［二］见表 8-7。该模型区别于模型［一］在于：

表 8-7　环境经济投入-产出模型基本结构［二］

		中间产品				最终产品及污染物的净生产量	总产品及污染物的总消除量
		生产部门		消除污染部门			
		1　2　…n	小计	1　2…m	小计		
生产部门	1	$X_{11}X_{12}\cdots X_{1n}$		$E_{11}E_{12}\cdots E_{1m}$		Y_1	X_1
	2	$X_{21}X_{22}\cdots X_{2m}$		$E_{21}E_{22}\cdots E_{2m}$		Y_2	X_2
	⋮	⋮　⋮　⋮		⋮　⋮　⋮		⋮	⋮
	n	$X_{n1}X_{n2}\cdots X_{nn}$		$E_{n1}E_{n2}\cdots E_{nn}$		Y_n	X_n
	小计						
消除污染部门	1	$P_{11}P_{12}\cdots P_{1n}$		$F_{11}F_{12}\cdots F_{1m}$		$-J_1$	S_1
	2	$P_{21}P_{22}\cdots P_{2n}$		$F_{21}F_{22}\cdots F_{2m}$		$-J_2$	S_2
	⋮	⋮　⋮　⋮		⋮　⋮　⋮		⋮	⋮
	m	$P_{m1}P_{m2}\cdots P_{mn}$		$F_{m1}F_{m2}\cdots F_{mn}$		$-J_m$	S_m
	小计						
固定资产折旧		$\overline{D}_1\overline{D}_2\cdots\overline{D}_n$		$\overline{D}_1\overline{D}_2\cdots\overline{D}_m$			
新创造价值	劳动报酬	$V_1V_2\cdots V_n$		$\overline{V}_1\overline{V}_2\cdots\overline{V}_m$			
	纯收入	$M_1M_2\cdots M_n$		$\overline{M}_1\overline{M}_2\cdots\overline{M}_m$			
	小计						
总产品		$X_1X_2\cdots X_n$		$S_1S_2\cdots S_m$			

① 该模型只讨论生产领域所产生的污染物及其消除情况，而不讨论最终需求领域所产生的污染，如居民所排出的废水、垃圾、废气等，与此相应，模型最后第二列为生产部门的最终产品以及污染物的净产生量。

② 该模型讨论两类部门，即生产部门和消除污染部门，行与列部门的分类是完全一致的，表中最后一列为各生产部门的总产值（总产量）及消除污染部门的总消除量。

该表从水平方向看，说明产品按经济用途的使用情况，以及生产领域污染物的产生及消除情况。该表前几行的平衡关系式为

$$\sum_{j=1}^{n}X_{ij}+\sum_{j=1}^{m}E_{ij}+Y_i=X_i\quad(i=1,2,3,\cdots,n)$$

并可得到以下方程组

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{ES}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X}\tag{8-85}$$

上表中第 $n+1$ 行第 $n+m$ 行说明生产领域产生的各种污染物的产生和消除情况。可得如下方程组

$$\sum_{j=1}^{n}P_{ij}+\sum_{j=1}^{m}F_{ij}-J_i=S_i\quad(i=1,2,3,\cdots,m)$$

式中　J_i——表示生产领域的第 i 种污染物的净产出。

J_i 等于各生产部门及消除污染部门所产生的第 i 种污染物的合计数 $\sum_{j=1}^{n}P_{ij}+\sum_{j=1}^{m}F_{ij}$ 减去第 i 种污染物的消除量 S_i；这里引入生产领域污染物的产生系数 p_{ij} 和消除污染部门污染物的产生系数 f_{ij}，则可得如下方程组

$$\sum_{j=1}^{n}p_{ij}X_i+\sum_{j=1}^{m}f_{ij}S_j-J_i=S_i\quad(i=1,2,3,\cdots,m)$$

这方程组写成矩阵形式

$$\boldsymbol{PX}+\boldsymbol{FS}-\boldsymbol{J}=\boldsymbol{S} \tag{8-86}$$

由式（8-85）和式（8-86）可得出

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{E}[(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{F})-\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{E}]^{-1}[\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y}-\boldsymbol{J}]+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y}$$

$$\boldsymbol{S}=[(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{F})-\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{E}]^{-1}[\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{Y}-\boldsymbol{J}]^{-1}$$

由此可以看出，当确定了某个年度生产部门的最终产品产量和各种污染物的净产出量以后，由上述公式就可以计算出各部门的总产值（总产量）和各消除污染部门的总消除量。

消除污染有两种方式，第一种是由各企业进行分散的处理；第二种方式是集中处理，例如城市集中销毁垃圾和处理水的活动。

在环境经济投入-产出模型中也有两种处理方法：第一种是消除污染活动，就应当既包括企业对污染物的分散处理，又包括城市对污染物的集中处理；第二种方法，企业所进行的消除污染活动是生产过程的一部分，其原料等的支出包含在 X_{ij} 之中，而消除污染部门只是指城市集中进行的二级消污活动，在 E_{ij} 中并不包括企业分散处理污染物的原材料、电力、燃料等的消耗。

三、环境水资源投入-产出模型

1. 环境水资源投入-产出模型

（1）**环境水资源投入-产出模型结构**　环境水资源投入-产出模型的基本结构见表 8-8。

表 8-8　环境水资源投入-产出模型基本结构

			中间产品					最终产品	总产品
			生产部门	水资源部门		污水处理	合计		
				新鲜水	回用水				
			1　2　…n	1　2　…k	$k+1$　…m				
生产部门		1	$X_{11}X_{12}\cdots X_{1n}$	$T_{11}T_{12}\cdots T_{1k}$	$T_{1,k+1}\cdots T_{1m}$	E_1		Y_1	X_1
		2	$X_{21}X_{22}\cdots X_{2n}$	$T_{21}T_{22}\cdots T_{2k}$	$T_{2,k+1}\cdots T_{2m}$	E_2		Y_2	X_2
		⋮	⋮　⋮　⋮　⋮	⋮　⋮　⋮　⋮	⋮　⋮　⋮　⋮	⋮		⋮	⋮
		n	$X_{n1}X_{n2}\cdots X_{nn}$	$T_{n1}T_{n2}\cdots T_{nk}$	$T_{n,k+1}\cdots T_{nm}$	E_n		Y_n	X_n
	合计								
水资源部门	新鲜水	1	$F_{11}F_{12}\cdots F_{1n}$	$H_{11}H_{12}\cdots H_{1k}$	$H_{1,k+1}\cdots H_{1m}$			Z_1	W_1
		2	$F_{21}F_{22}\cdots F_{2n}$	$H_{21}H_{22}\cdots H_{2k}$	$H_{2,k+1}\cdots H_{2m}$			Z_2	W_2
		⋮	⋮　⋮　⋮　⋮	⋮　⋮　⋮　⋮	⋮　⋮　⋮　⋮			⋮	⋮
		k	$F_{k1}F_{k2}\cdots F_{kn}$	$H_{k1}H_{k2}\cdots H_{kn}$	$H_{k,k+1}\cdots H_{km}$			Z_n	W_k
		小计							
	回用水	$k+1$	$F_{k+1,1}F_{k+1,2}\cdots F_{k+1,n}$	$H_{k+1,1}H_{k+1,2}H_{k+1,k}$	$H_{k+1,k+1}\cdots H_{k+1,m}$			Z_{k+1}	W_{k+1}
		⋮	⋮　⋮　⋮	⋮　⋮　⋮	⋮			⋮	⋮
		m	F_{m1}　F_{m2}　F_{mn}	H_{m1}　H_{m2}　H_{mk}	$H_{m,k+1}\cdots H_{mm}$			Z_m	W_m
		小计							
	合　计								
污水			$P_1P_2\cdots P_n$					R	Q
固定资产折旧			$D_1D_2\cdots D_n$	$\overline{D}_1\overline{D}_2\cdots\overline{D}_k$	$\overline{D}_{k+1}\cdots\overline{D}_m$	$\overline{D}$			
新创造价值	劳动报酬		$V_1V_2\cdots V_n$	$\overline{V}_1\overline{V}_2\cdots\overline{V}_k$	$\overline{V}_{k+1}\cdots\overline{V}_m$	$\overline{V}$			
	纯收入		$M_1M_2\cdots M_n$	$\overline{M}_1\overline{M}_2\cdots\overline{M}_k$	$\overline{M}_{k+1}\cdots\overline{M}_m$	$\overline{M}$			
	合计								
总产品			$X_1X_2\cdots X_n$	$W_1W_2\cdots W_k$	$W_{k+1}\cdots W_m$	S			

这个模型的主要特点是在投入-产出表中单列了水资源部门，从而使各部门的用水情况、水的分配情况、供水过程的耗费和排出污水情况等得到全面反映。水资源可以分为新鲜水及回用水两大类。新鲜水可分为地表水（如河水、水库灌渠引水等）及地下水（如井水等）。当把水资源供给人民生活消费和生产消耗时，必然会支出一定费用，如动力费、水渠、水泵的折旧费等。将取得、处理和管理水资源的过程看作是一种生产过程，并将水资源部门分为 m 个。其中新鲜水部门分为 k 个，它们可按水资源的取得和供给方式来划分，如划分为井水、河水、水库引水、城市供应的自来水等。回用水又称重复用水，它是指生产过程中使用后排出的水进行适当的处理后，再供给生产过程使用。它可按照各部门回用水的处理过程特点和所需费用来划分。在这个模型中假设回用水分（$m-k$）个部门。

表 8-8 中符号的意义如下：

n——生产部门数目；

m——水资源部门数目，其中前 k 个部门是新鲜水部门，后（$m-k$）个部门为重复水部门；

X_{ij}——各生产部门之间的流量；

T_{ij}——第 j 个水资源部门在取得、供给和分配水资源过程中所耗用的第 i 个生产部门产品的数量，如取得井水过程中耗用的电力、化工产品等；

E_i——在污水处理过程中，所消耗的第 i 个生产部门产品的数量；

Y_i——第 i 部门最终产品数量；

X_i——第 i 部门产品数量；

F_{ij}——第 j 个生产部门在产品生产过程中所耗用的第 i 类水资源数量；

H_{ij}——第 j 个水资源部门在取得、供给和分配水的过程中所耗用的第 i 类水资源的数量；

Z_i——最终需求领域，如居民、非生产部门等所耗用的第 i 类水资源的数量；

W_i——第 i 类水资源部门所生产的水的数量，当 $i=1, 2, 3, \cdots, k$ 时，W_i 表示该时期所生产的新鲜水数量，当 $i=k+1, \cdots, m$ 时，W_i 表示该时期所提供的回用水数量；

P_j——第 j 个生产部门所排出的污水数量；

R——最终需求领域所排出的污水数量；

Q——该时期生产领域和最终需求领域所排出的污水总量；

D_j——第 j 个生产部门固定资产折旧额；

V_j——第 j 个生产部门劳动报酬总额；

M_j——第 j 个生产部门纯收入数额；

$\overline{D}_j$——第 j 个水资源部门固定资产折旧额；

$\overline{V}_j$——第 j 个水资源部门劳动报酬总额；

$\overline{M}_j$——第 j 个水资源部门纯收入总额；

$\overline{D}$、$\overline{V}$、$\overline{M}$——污水处理部门的固定资产折旧额、劳动报酬和纯收入数额；

S——污水处理部门消除污水总量。

从以上模型表水平方向看，说明某时期各部门产品按经济用途的使用情况，在生产过程和消费过程中所耗用的各类水资源情况，以及污水的产生情况。它包括以下三个平衡方程。

① 各部门产品的生产与使用平衡方程

$$\begin{cases} X_{11}+X_{12}+\cdots+X_{1n}+T_{11}+T_{12}+\cdots+T_{1m}+E_1+Y_1=X_1 \\ X_{21}+X_{22}+\cdots+X_{2n}+T_{21}+T_{22}+\cdots+T_{2m}+E_2+Y_2=X_2 \\ \vdots \\ X_{n1}+X_{n2}+\cdots+X_{nn}+T_{n1}+T_{n2}+\cdots+T_{nm}+E_n+Y_n=X_n \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^{n}X_{ij}+\sum_{j=1}^{m}T_{ij}+E_i+Y_i=X_i\ (i=1,2,3,\cdots,n)$$

在表 8-8 中，中间产品分为三部分，即生产部门耗用的中间产品、水资源部门所耗用的中间产品，以及污水处理部门所耗用的中间产品。从数量上来说，后两部分占全部中间产品的比重很小。在上述方程组中，引入直接消耗系数 a_{ij} 及水资源部门的消耗系数 t_{ij}。

$$t_{ij}=\frac{T_{ij}}{W_j}\ (i=1,2,3,\cdots,n;j=1,2,3,\cdots,m)$$

t_{ij} 说明第 j 个水资源部门提供单位数量的水所消耗的第 i 个生产部门产品的数量。此外，以 e_i 表示污水处理部门对生产部门的消耗系数，即

$$e_i=\frac{E_i}{S}\ (i=1,2,3,\cdots,n)$$

e_i 说明消除污水一个单位所消耗的各部门产品的数量。可以得到以下方程组

$$\sum_{j=1}^{n}a_{ij}X_j+\sum_{j=1}^{m}t_{ij}W_j+e_is+Y_i=X_i\ (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-87}$$

写成矩阵形式如下

$$\boldsymbol{AX}+\boldsymbol{TW}+\boldsymbol{ES}+\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X} \tag{8-88}$$

式中 $\boldsymbol{A}$——直接消耗系数矩阵；

$\boldsymbol{T}$——水资源部门对各生产部门的直接消耗系数矩阵；

$\boldsymbol{Y}$——最终产品列向量；

$\boldsymbol{X}$——总产量列向量；

$\boldsymbol{W}$——水资源部门产量列向量；

$\boldsymbol{E}$——污水处理对生产部门消耗系数列向量。

即 $$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & \cdots & t_{1m} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & \cdots & t_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & t_{n3} & \cdots & t_{nm} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \end{bmatrix},\ \boldsymbol{E}=\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}$$

② 水资源的使用方程

$$\begin{cases} F_{11}+F_{12}+\cdots+F_{1n}+H_{11}+H_{12}+\cdots+H_{1m}+Z_1=W_1 \\ F_{21}+F_{22}+\cdots+F_{2n}+H_{21}+H_{22}+\cdots+H_{2m}+Z_2=W_2 \\ \vdots \\ F_{m1}+F_{m2}+\cdots+F_{mn}+H_{m1}+H_{m2}+\cdots+H_{mm}+Z_m=W_m \end{cases}$$

即 $$\sum_{j=1}^{n}F_{ij}+\sum_{j=1}^{m}H_{ij}+Z_i=W_i\ (i=1,2,3,\cdots,m)$$

式中 $\sum_{j=1}^{n}F_{ij}$——各生产部门消耗的第 i 类水资源的数量之和；

$\sum_{j=1}^{m}H_{ij}$——各水资源部门在提供水的过程中所消耗的第 i 类水资源的数量之和；

Z_i——各消费领域对第 i 类水资源的消耗量；

$\left(\sum_{j=1}^{n} F_{ij} + \sum_{j=1}^{m} H_{ij}\right)$——生产领域消耗的第 i 类水资源的总量。

该等式左端之和表示某个时期在生产领域与非生产领域对各类水资源的消耗量。

现在引入各生产部门对水的直接消耗系数 f_{ij} 和各水资源部门对水的直接消耗系数 h_{ij}，则

$$f_{ij} = \frac{F_{ij}}{X_{ij}} \quad (i = 1,2,3,\cdots,m; j = 1,2,3,\cdots,n)$$

式中　f_{ij}——第 j 生产部门单位产品对第 i 类水的消耗量。

$$h_{ij} = \frac{H_{ij}}{W_j} \quad (i = 1,2,3,\cdots,m; j = 1,2,3,\cdots,n)$$

式中　h_{ij}——第 j 产水部门在提供单位水量时所消耗的第 i 类水的数量。

引入这两个消耗系数以后，上述水资源使用方程可写为

$$\sum_{j=1}^{n} f_{ij} X_j + \sum_{j=1}^{m} h_{ij} W_j + Z_i = W_i \quad (i = 1,2,3,\cdots,m) \tag{8-89}$$

以上方程组写成矩阵形式

$$\boldsymbol{FX} + \boldsymbol{HW} + \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{W} \tag{8-90}$$

式中　$\boldsymbol{F}$——生产部门对水的直接消耗系数矩阵，它是一个 m 行 n 列矩阵；

$\boldsymbol{H}$——产水部门对水的直接消耗系数矩阵，它是 m 价方阵；

$\boldsymbol{Z}$——非生产领域耗水列向量；

$\boldsymbol{W}$——各产水部门供水列向量。

即

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & f_{m3} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & \cdots & h_{mm} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \end{bmatrix}$$

③ 污水的产生方程

$$\sum_{j=1}^{n} P_j + \boldsymbol{R} = \boldsymbol{Q}$$

式中　$\sum_{j=1}^{n} P_j$——各生产部门产生的污水总量；

$\boldsymbol{R}$——非生产领域产生的污水总量；

$\boldsymbol{Q}$——某个时期的污水产生总量。

现在引入各生产部门污水的直接产生系数 p_j，则

$$p_j = \frac{P_j}{X_j} \quad (j = 1,2,3,\cdots,n)$$

表示第 j 个生产部门单位产品产生污水的数量。于是得如下方程

$$\sum_{j=1}^{n} p_j X_j + \boldsymbol{R} = \boldsymbol{Q} \tag{8-91}$$

以上方程写为矩阵形式

$$\boldsymbol{PX} + \boldsymbol{R} = \boldsymbol{Q} \tag{8-92}$$

式中　$\boldsymbol{P}$——n 维行向量，即 $\boldsymbol{P}=(p_1,\ p_2,\ p_3,\ \cdots,\ p_n)$

如以 a 表示污水的消除比例，显然

$$0 \leqslant a \leqslant 1$$

$$\boldsymbol{S} = a\boldsymbol{Q}$$

把上式代入式（8-88）中，可得到水平方面的如下三组方程

$$\boldsymbol{AX} + \boldsymbol{TW} + \boldsymbol{EaQ} + \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}$$

$$\boldsymbol{FX} + \boldsymbol{HW} + \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{W}$$

$$\boldsymbol{PX} + \boldsymbol{R} = \boldsymbol{Q}$$

上述方程组可用分块矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{T} & \boldsymbol{E}a \\ \boldsymbol{F} & \boldsymbol{H} & 0 \\ \boldsymbol{P} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \\ \boldsymbol{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix}$$

即

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A} & -\boldsymbol{T} & -\boldsymbol{E}a \\ -\boldsymbol{F} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{H} & 0 \\ -\boldsymbol{P} & 0 & \boldsymbol{I} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \\ \boldsymbol{R} \end{bmatrix}$$

如逆矩阵存在，则可写为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{W} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} = \boldsymbol{L} \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \\ \boldsymbol{R} \end{bmatrix} \tag{8-93}$$

这里

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A} & -\boldsymbol{T} & -\boldsymbol{E}a \\ -\boldsymbol{F} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{H} & 0 \\ -\boldsymbol{P} & 0 & \boldsymbol{I} \end{bmatrix}^{-1}$$

$\boldsymbol{L}$ 为包含水资源部门及污水部门情况下的完全需要系数矩阵，即为扩展的列昂惕夫逆矩阵。

当已知 $\boldsymbol{Y}$、$\boldsymbol{Z}$、$\boldsymbol{R}$ 时，利用式（8-93）可以求出 $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{Q}$ 的数值。

（2）各生产部门对水的完全消耗系数　各生产部门产品对水的完全消耗等于各生产部门对水的直接消耗与对水的间接消耗之和，各生产部门单位产品对水的直接消耗系数为 f_{ij}，它可由表 8-8 算出。各生产部门对水的间接消耗分为以下三个部门。

① 在各部门生产过程中消耗了原材料、辅助材料、燃料、动力、机器设备等；这些部门在生产过程中消耗了水，这些水应看作是各部门产品对水的一种间接消耗，其数量为

$$\sum_{k=1}^{n} \overline{f}_{ik} a_{kj}$$

式中　a_{kj}——第 j 种产品对第 k 种产品的直接消耗系数；

$\overline{f}_{ik}$——第 k 种产品对第 i 类水的完全消耗系数。

以上两者相乘并对 k 求和，即为第 j 种产品通过生产过程所生产的产品对水的间接

消耗。

② 各部门生产过程消耗了水，但各产水部门在提供水的过程中又消耗了水，例如产水部门耗用了电力，在电力生产过程中又耗用了水等。这些水应看作为各部门产品对水的间接消耗，其数量为

$$\sum_{k=1}^{n}\overline{h}_{ik}f_{kj}$$

即第 j 部门对第 k 类水的直接消耗系数与第 k 类水在生产过程中对第 i 类水的完全消耗系数的乘积，然后对 k 求和，即为间接耗水之总和。

③ 在各部门生产过程中排出了污水，污水处理过程中消耗了某些产品，如电力、化工产品等，在它们的生产过程中又消耗了水等，这些水构成了各部门产品对水的一种间接消耗。其数量为

$$\sum_{k=1}^{n}\overline{f}_{ik}e_k a p_j$$

把 j 部门单位产品所排出的污水量 D_j，乘以污水处理系数 a，即为第 j 部门单位所排出的经过处理的污水数量。然后把处理的污水乘以消除单位数量污水所消耗的第 k 类产品数量 e_k，再乘以第 k 类产品对第 i 类水的完全消耗系数。把此乘积对 k 求和，即为第 j 部门单位产品通过污水处理时的间接消耗的总和。由此得出各部门产品对水的完全消耗系数的计算公式：

$$\overline{f}_{ij}=f_{ij}+\sum_{k=1}^{n}\overline{f}_{ik}a_{kj}+\sum_{k=1}^{n}\overline{h}_{ik}f_{kj}+\sum_{k=1}^{n}\overline{f}_{ik}e_k a p_j\quad(i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)\tag{8-94}$$

其矩阵形式为

$$\overline{\boldsymbol{F}}=\boldsymbol{F}+\overline{\boldsymbol{F}}\boldsymbol{A}+\overline{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{F}+\overline{\boldsymbol{F}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{a}\boldsymbol{P}\tag{8-95}$$

式中　$\overline{\boldsymbol{F}}$——部门产品对各类水的完全消耗系数矩阵，它是 m 行 n 列矩阵；

$\overline{\boldsymbol{H}}$——各产水部门对水的完全消耗系数矩阵，它是 m 阶方阵。

$$\overline{\boldsymbol{F}}=\begin{bmatrix}\overline{f}_{11} & \overline{f}_{12} & \overline{f}_{13} & \cdots & \overline{f}_{1n}\\ \overline{f}_{21} & \overline{f}_{22} & \overline{f}_{23} & \cdots & \overline{f}_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \overline{f}_{m1} & \overline{f}_{m2} & \overline{f}_{m3} & \cdots & \overline{f}_{mn}\end{bmatrix},\quad \overline{\boldsymbol{H}}=\begin{bmatrix}\overline{h}_{11} & \overline{h}_{12} & \overline{h}_{13} & \cdots & \overline{h}_{1m}\\ \overline{h}_{21} & \overline{h}_{22} & \overline{h}_{23} & \cdots & \overline{h}_{2m}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \overline{h}_{m1} & \overline{h}_{m2} & \overline{h}_{m3} & \cdots & \overline{h}_{mm}\end{bmatrix}$$

（3）各产水部门（供水部门）对水的完全消耗系数　各产水部门（供水部门）对水的完全消耗等于产水部门（供水部门）对水的直接消耗与对水的间接消耗之和，其间接消耗可分为以下两部分。

① 各产水部门（供水部门）在生产过程中消耗了各种产品，如动力、化工产品等，这些产品生产过程中对水的消耗即为各产水部门对水的一种间接消耗，其数量等于产水部门对各种产品的直接消耗系数与各种产品对水的完全消耗系数的乘积之和，即

$$\sum_{k=1}^{n}\overline{f}_{ik}t_{kj}$$

式中　t_{kj}——第 j 个产水部门对第 k 种产品的直接消耗系数；

$\overline{f}_{ik}$——第 k 种产品对第 i 类水的完全消耗。

以上其乘积之和即为第 j 个产水部门通过所消耗的各种产品，对第 i 类水的所有间接消耗。

② 各产水部门在产水过程消耗了一部分水，这些水在供水过程（制水过程）中又消耗了水，其间接消耗之和为

$$\sum_{k=1}^{n}\overline{h}_{ik}h_{kj}$$

即其数量等于第 j 个产水部门对第 k 类水的直接消耗与第 k 类水的生产过程（制水过程）对第 i 类水的完全消耗的乘积之和。

由此可得出各产水部门（供水部门）对水的完全消耗系数的计算公式

$$\overline{h}_{ij}=h_{ij}+\sum_{k=1}^{n}f_{ik}t_{kj}+\sum_{k=1}^{n}\overline{h}_{ik}h_{kj}\quad(i=1,2,3,\cdots,m;j=1,2,3,\cdots,n)$$

以上方程组写为矩阵形式

$$\overline{\boldsymbol{H}}=\boldsymbol{H}+\overline{\boldsymbol{F}}\boldsymbol{T}+\overline{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{H} \tag{8-96}$$

把式（8-95）和式（8-96）两个矩阵方程联立求解，就得各生产部门对水的完全消耗系数的计算公式

$$\overline{\boldsymbol{H}}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}+[\boldsymbol{I}+\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}][\boldsymbol{F}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})-\boldsymbol{T}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{F}-\boldsymbol{E}a\boldsymbol{P}]^{-1}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1} \tag{8-97}$$

在通常的投入-产出分析中，完全需要系数矩阵减去单位矩阵即为完全消耗系数矩阵。在包含水资源部门和污水处理部门的情况下，扩展的完全需要系数矩阵减去单位矩阵等于扩展的完全消耗系数矩阵，即

$$\boldsymbol{L}_{21}=\overline{\boldsymbol{F}}$$

$$\boldsymbol{L}_{22}-\boldsymbol{I}=\overline{\boldsymbol{H}}$$

由此不难验证，因有

$$[\boldsymbol{I}+\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}]=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}$$

故有

$$\overline{\boldsymbol{F}}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{F}[(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})-\boldsymbol{T}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{M})^{-1}\boldsymbol{F}-\boldsymbol{E}a\boldsymbol{P}]^{-1} \tag{8-98}$$

$$\overline{\boldsymbol{H}}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}+(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{F}[(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})-\boldsymbol{T}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{F}-\boldsymbol{E}a\boldsymbol{P}]^{-1}\boldsymbol{T}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{H})^{-1}-\boldsymbol{I} \tag{8-99}$$

（4）对水的使用量与消耗量　在表 8-8 中，产水部门为 m 个，其中前 k 个部门是新鲜水部门；第 j 个部门产品在生产过程中所使用的水量等于 $\sum_{i=1}^{n}F_{ij}$，耗用的新鲜水量为 $\sum_{i=1}^{k}F_{ij}$；因回用水是对排水的重复利用，实际消耗的仅为新鲜水部分，把 $\sum_{i=1}^{m}F_{ij}$ 称为水的使用总量，把 $\sum_{i=1}^{k}F_{ij}$ 称为水的消耗总量。如以 $\overline{f}_j$ 表示第 j 部门单位产品对全部水（包括重复用水）的使用系数，即

$$\overline{f}_j=\sum_{j=1}^{m}f_{ij}\quad(j=1,2,3,\cdots,n)$$

又以 f_i 表示第 j 部门单位产品对全部新鲜水的消耗系数，即

$$f_i = \sum_{j=1}^{k} f_{ij} \quad (j = 1,2,3,\cdots,n)$$

以上两指标反映了各部门对水的使用水平。由此可计算各部门对全部新鲜水的完全消耗系数，它也等于各种新鲜水的完全消耗系数之和，即

$$V_j^* = \sum_{i=1}^{k} \overline{f}_{ij} \quad (j = 1,2,3,\cdots,n)$$

（5）水的乘数　水的乘数等于水的完全消耗系数与直接消耗系数的比值。它有着重要的经济含义，对某些部门（例如食品工业部门、冶金工业部门等）耗用的原料、电力等对水的消耗量很大，它的完全消耗系数远远大于直接消耗系数，水的乘数都在 5 以上。

在计算水的乘数时，可按耗水种类加以计算，如以 f_{ii}/f_{ij} 就表示第 j 部门产品对第 i 种水的消耗系数；也可以对耗用的全部新鲜水加以计算，如以 V_j^*/f_j 表示第 j 部门产品对全部新鲜水的消耗系数。

2. 地区间环境水资源投入-产出模型

（1）地区间环境水资源投入-产出模型结构　地区间环境水资源投入-产出模型的基本结构见表 8-9。这个模型的主要特点是，假设把全国分为两个地区，即 c 地区和 a 地区。c 地区包括 n 个部门，a 地区包括 m 个部门，水资源不进行分类，另列一行，目的是反映各地区各部分对水的消耗。供水过程中的生产消耗已经直接包含在各地区各部门的生产消耗之中。很明显，这个模型可以很容易地扩展为全国的很多地区，以及水资源进行详细分类的情况。

表 8-9　地区间环境水资源投入-产出模型基本结构

		中间产品				最终产品		其他	总产量
		地区 c		地区 a		地区 c　地区 a	合计		
		1 … n	小计	1 … m	小计				
地区 c	1	$X_{11}^{cc} \cdots X_{1n}^{cc}$		$T_{11}^{ca} \cdots T_{1m}^{ca}$		Y_1^{cc}　Y_1^{ca}	T_1^c	Q_1^c	X_1^c
	⋮	⋮ ⋮ ⋮		⋮ ⋮ ⋮		⋮　⋮	⋮	⋮	⋮
	n	$X_{n1}^{cc} \cdots X_{nn}^{cc}$		$T_{n1}^{ca} \cdots T_{nm}^{ca}$		Y_n^{cc}　Y_n^{ca}	Y_n^c	Q_B^a	X_a^c
	小计								
地区 a	1	$T_{11}^{ac} \cdots T_{1n}^{ac}$		$X_{11}^{aa} \cdots X_{1m}^{aa}$		$Y_1^{ac} Y_1^{aa}$	Y_1^a	Q_1	X_1^a
	⋮	⋮ ⋮ ⋮				⋮　⋮	⋮	⋮	⋮
	m	$T_{m1}^{ac} \cdots T_{mn}^{ac}$		$X_{m1}^{aa} \cdots X_{mm}^{aa}$		$Y_m^{ac} Y_m^{aa}$	Y_m^a	Q_m^a	X_m^a
	小计								
水资源		$F_1^c \cdots F_n^c$		$F_1^a \cdots F_m^a$		$Z^c Z^a$	Z	Q	W
固定资产折旧									
新创造价值	劳动报酬								
	纯收入								
	合计								
总产品		$X_1^c \cdots X_n^c$		$X_1^a \cdots X_m^a$					

模型中符号意义如下：

X_{ij}^{cc}——c 地区第 j 部门生产过程中所消耗的本地区第 i 部门的产品数量；

X_{ij}^{aa}——a 地区第 j 部门生产过程中所消耗的本地区第 i 部门的产品数量；

T_{ij}^{ca}——c 地区第 i 部门产品用于 a 地区第 j 部门生产过程消耗的数量；

T_{ij}^{ac}——a 地区第 i 部门产品用于 c 地区第 j 部门生产过程消耗的数量；

F_j^c——c 地区第 j 部门产品生产过程中所消耗的水资源数量；

F_j^a——a 地区第 j 部门产品生产过程中所消耗的水资源数量；

X_j^c、X_j^a——c 地区和 a 地区第 j 部门产品的数量；

Y_i^{cc}——c 地区第 i 部门产品用作本地区最终产品的数量；

Y_i^{ca}——c 地区第 i 部门产品用作 a 地区最终产品的数量；

Y_i^{aa}、Y_i^{ac}——a 地区第 i 部门产品用作 a 地区和 c 地区最终产品的数量；

Y_i^c、Y_i^a—— c 地区和 a 地区第 i 部门产品用作两个地区最终产品的数量之和，即 $Y_i^c=Y_i^{cc}+Y_i^{ca}$（$i=1, 2, 3, \cdots, n$），$Y_i^a=Y_i^{ac}+Y_i^{aa}$（$i=1, 2, 3, \cdots, m$）；

Q_i^c、Q_i^a——c 地区和 a 地区第 i 种产品的其他用途数量；

Z^c、Z^a——c 地区和 a 地区最终需求领域耗水量；

$\overline{Q}$、W——其他用途耗水量及耗水总量。

这个模型从水平方面看，有如下三组平衡方程

① c 地区产品的生产与使用平衡方程

$$\sum_{j=1}^{n} X_{ij}^{cc}+\sum_{j=1}^{m} T_{ij}^{ca}+Y_i^c+Q_i^c=X_i^c \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

令 a_{ij}^c 表示 c 地区第 j 种产品对本地区生产的第 i 种产品的直接消耗系数；m_{ij}^a 表示 a 地区第 j 种产品对外地区输入产品的直接消耗系数，即

$$m_{ij}^a=\frac{T_{ij}^{ca}}{X_j^a} \quad (i=1,2,3,\cdots,n;j=1,2,3,\cdots,m)$$

则上式可写为

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^c X_j^c+\sum_{j=1}^{m} m_{ij}^a X_j^a+Y_i^c+Q_i^c=X_i^c \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \tag{8-100}$$

并写为矩阵形式：

$$\boldsymbol{A}^c\boldsymbol{X}^c+\boldsymbol{M}^a\boldsymbol{X}^a+\boldsymbol{Y}^c+\boldsymbol{Q}^c=\boldsymbol{X}^c \tag{8-101}$$

这里，$\boldsymbol{A}^c$ 是 n 阶方阵，$\boldsymbol{M}^c$ 是 n 行 m 列矩阵，即

$$\boldsymbol{A}^c=\begin{bmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & \cdots & a_{1n}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & \cdots & a_{2n}^c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^c & a_{n2}^c & a_{n3}^c & \cdots & a_{nm}^c \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{M}^a=\begin{bmatrix} m_{11}^a & m_{12}^a & m_{13}^a & \cdots & m_{1m}^a \\ m_{21}^a & m_{22}^a & m_{23}^a & \cdots & m_{2m}^a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1}^a & m_{n2}^a & m_{n3}^a & \cdots & m_{nm}^a \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X}^c=(x_1^c x_2^c x_3^c \cdots x_n^c),\ \boldsymbol{X}^a=(x_1^a x_2^a x_3^a \cdots x_m^a)$$

$$\boldsymbol{Y}^c=(y_1^c y_2^c y_3^c \cdots y_n^c),\ \boldsymbol{Q}^c=(Q_1^c Q_2^c Q_3^c \cdots Q_n^c)$$

② a 地区产品的生产与使用平衡方程

$$\sum_{j=1}^{n} T_{ij}^{ac}+\sum_{j=1}^{m} X_{ij}^{aa}+Y_i^a+Q_i^a \quad (i=1,2,3,\cdots,m)$$

引入 a 地区产品直接消耗系数 a_{ij}^a 和 c 地区对外地区输入产品的直接消耗系数 m_{ij}^c，则上

述方程组可写为

$$\sum_{j=1}^{n} m_{ij}^{c} X_j^{c} + \sum_{j=1}^{m} a_{ij}^{a} X_j^{a} + Y_i^{a} + Q_i^{a} = X_i^{a} \quad (i = 1,2,3,\cdots,m) \tag{8-102}$$

写为矩阵形式

$$\boldsymbol{M}^{c}\boldsymbol{X}^{c} + \boldsymbol{A}^{a}\boldsymbol{X}^{a} + \boldsymbol{Y}^{a} + \boldsymbol{Q}^{a} = \boldsymbol{X}^{a} \tag{8-103}$$

这里，$\boldsymbol{M}^{c}$ 是 m 行 n 列矩阵，$\boldsymbol{A}^{a}$ 是 m 阶方阵，即

$$\boldsymbol{M}^{c} = \begin{bmatrix} m_{11}^{c} & m_{12}^{c} & m_{13}^{c} & \cdots & m_{1n}^{c} \\ m_{21}^{c} & m_{22}^{c} & m_{23}^{c} & \cdots & m_{2n}^{c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1}^{c} & m_{n2}^{c} & m_{n3}^{c} & \cdots & m_{mn}^{c} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{A}^{a} = \begin{bmatrix} a_{11}^{a} & a_{12}^{a} & a_{13}^{a} & \cdots & a_{1m}^{a} \\ a_{21}^{a} & a_{22}^{a} & a_{23}^{a} & \cdots & a_{2m}^{a} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}^{a} & a_{m2}^{a} & a_{m3}^{a} & \cdots & a_{mm}^{a} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Y}^{a} = (y_1^{a}\, y_2^{a}\, y_3^{a} \cdots y_m^{a})', \quad \boldsymbol{Q} = (Q_1^{a} Q_2^{a} Q_3^{a} \cdots Q_m^{a})'$$

由式（8-101）和式（8-103）可得

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{c} & -\boldsymbol{M}^{a} \\ -\boldsymbol{M}^{c} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}^{c} \\ \boldsymbol{X}^{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}^{c} \\ \boldsymbol{Y}^{a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}^{c} \\ \boldsymbol{Q}^{a} \end{bmatrix}$$

由此得出

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}^{c} \\ \boldsymbol{X}^{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{c} & -\boldsymbol{M}^{a} \\ -\boldsymbol{M}^{c} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{a} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}^{c}+\boldsymbol{Q}^{c} \\ \boldsymbol{Y}^{a}+\boldsymbol{Q}^{a} \end{bmatrix}$$

令 $\boldsymbol{L}$ 表示地区间完全需要系数矩阵，即

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{11} & \boldsymbol{L}_{12} \\ \boldsymbol{L}_{21} & \boldsymbol{L}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{c} & -\boldsymbol{M}^{a} \\ -\boldsymbol{M}^{c} & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}^{a} \end{bmatrix}^{-1}$$

则上式可写为

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{L}(\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Q}) \tag{8-104}$$

这里，

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}^{c} \\ \boldsymbol{X}^{a} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}^{c} \\ \boldsymbol{Y}^{a} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}^{c} \\ \boldsymbol{Q}^{a} \end{bmatrix}$$

③ 水资源利用方程

$$\sum_{j=1}^{n} F_j^{c} + \sum_{j=1}^{n} F_j^{a} + Z + Z^{a} + \overline{Q} = W$$

两个地区所有生产部门用水总量以 $\boldsymbol{R}$ 表示，则

$$\boldsymbol{R} = \sum_{j=1}^{n} F_j^{c} + \sum_{j=1}^{m} F_j^{a}$$

以 f_j^{c} 和 f_j^{a} 分别表示 c 地区和 a 地区第 j 个生产部门的直接耗水系数，即

$$f_j^{c} = \frac{F_j^{c}}{X_j^{c}} \quad (j = 1,2,3,\cdots,n)$$

$$f_j^{a} = \frac{F_j^{a}}{X_j^{a}} \quad (j = 1,2,3,\cdots,m)$$

故

$$\boldsymbol{R} = \sum_{j=1}^{n} f_j^{c} \cdot X_j^{c} + \sum_{j=1}^{m} f_j^{a} \cdot X_j^{a} \tag{8-105}$$

令

$$\boldsymbol{F} = (f_1^{c}, f_2^{c}, f_3^{c}, \cdots, f_n^{c}; f_1^{a}, f_2^{a}, f_3^{a}, \cdots, f_m^{a}) = (F^{c}; F^{a})$$

则式（8-105）变为

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{X} \tag{8-106}$$

由式（8-104）有

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{FL}(\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Q})\ =\boldsymbol{V}^{*}(\boldsymbol{Y}+\boldsymbol{Q})$$

式中　$\boldsymbol{V}^{*}$——一个（$n+m$）维行向量，它表示各地区生产单位最终产品对水的完全需要系数。

$$\boldsymbol{V}^{*}=[\boldsymbol{V}^{\mathrm{c}},\boldsymbol{V}^{\mathrm{a}}]=\boldsymbol{FL}=[\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}},\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}]\begin{bmatrix}\boldsymbol{L}_{11} & \boldsymbol{L}_{12}\\ \boldsymbol{L}_{21} & \boldsymbol{L}_{22}\end{bmatrix}$$

$$=[\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{11}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{21},\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}_{12}\boldsymbol{L}_{12}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{22}]$$

所以

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{c}}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{11}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{21}$$

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{a}}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{12}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{22}$$

$\boldsymbol{V}^{\mathrm{c}}$ 是一个 n 维行向量，其分量 V_j^{c} 表示 c 地区第 j 个部门生产单位最终产品直接和间接耗水的数量（包括两个地区的水）。同样，$\boldsymbol{V}^{\mathrm{a}}$ 是一个 m 维行向量，V_j^{a} 表示 a 地区第 j 部门生产单位最终产品对水的完全消耗系数。

在完全消耗水系数 V_i^{ca} 中，一部分水是 c 地区消耗的，另一部分水则是在 a 地区消耗的。为此我们构造以下矩阵，令

$$\hat{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}f_1^{\mathrm{c}} & 0 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & f_2^{\mathrm{c}} & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & f_n^{\mathrm{c}}\end{bmatrix},\quad \hat{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{a}}=\begin{bmatrix}f_1^{\mathrm{a}} & 0 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & f_2^{\mathrm{a}} & 0 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & f_m^{\mathrm{a}}\end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{u}^{\mathrm{cc}}$ 是 n 阶方阵，而 u_{ij}^{cc} 表示 c 地区第 j 个部门生产单位最终产品对本地区第 i 部门的完全耗水量；

$\boldsymbol{u}^{\mathrm{ac}}$ 是 m 行 n 列矩阵，而 u_{ij}^{ac} 表示 c 地区第 j 个部门生产单位最终产品对 a 地区第 i 部门的完全耗水量；

$\boldsymbol{u}^{\mathrm{ca}}$ 是 n 行 m 列矩阵，而 u_{ij}^{ca} 表示 a 地区第 j 部门为了生产单位最终产品，c 地区第 i 部门对水的完全耗水量；

$\boldsymbol{u}^{\mathrm{aa}}$ 是 m 阶方阵，u_{ij}^{aa} 表示 a 地区第 j 部门为了生产单位最终产品，本地区第 i 部门对水的完全耗水量。

如以 $\boldsymbol{l}_n$ 表示所有分量均为 l 的 n 维行向量，即 $\boldsymbol{l}_n=(l,\ l,\ l,\ \cdots,\ l)$，令

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{cc}}=\left(\sum_{i=1}^{n}u_{i1}^{\mathrm{cc}},\sum_{i=1}^{n}u_{i2}^{\mathrm{cc}},\sum_{i=1}^{n}u_{i3}^{\mathrm{cc}},\cdots,\sum_{i=1}^{n}u_{im}^{\mathrm{cc}}\right)=\boldsymbol{L}_n\mathbf{u}^{\mathrm{cc}}$$

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{ac}}=\boldsymbol{L}_m\boldsymbol{u}^{\mathrm{ac}}$$

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{ca}}=\boldsymbol{L}_n\boldsymbol{u}^{\mathrm{ca}}$$

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{aa}}=\boldsymbol{L}_m\boldsymbol{u}^{\mathrm{aa}}$$

这里，$\boldsymbol{V}^{\mathrm{cc}}$ 是 n 维行向量，其分量 V_j^{cc} 表示 c 地区第 j 个部门生产单位最终产品直接和间接消耗的 c 地区的总量，即对 c 地区水的完全消耗系数。$\boldsymbol{V}^{\mathrm{ac}}$ 是 n 维行向量，其分量 V_j^{ac} 表示 c 地区第 j 个部门生产单位最终产品对 a 地区水的完全消耗系数。$\boldsymbol{V}^{\mathrm{cc}}$ 和 $\boldsymbol{V}^{\mathrm{aa}}$ 都是 m 维行向量，它们的分量 V_j^{cc} 和 V_j^{aa} 分别表示 a 地区第 j 个部门生产单位最终产品对 c 地区水的完全消耗系数和 a 地区水的完全消耗系数。因为

$$\boldsymbol{V}^{*}=(\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{11}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{21},\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{12}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{L}_{22})$$

以及

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{cc}}=\boldsymbol{L}_n\boldsymbol{u}^{\mathrm{cc}}=\ln\hat{\boldsymbol{F}}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{11}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{L}_{11}$$

$$\boldsymbol{V}^{ac}=\boldsymbol{L}_m\boldsymbol{u}^{ac}=\ln\hat{\boldsymbol{F}}^{a}\boldsymbol{L}_{21}=\boldsymbol{F}^{a}\boldsymbol{L}_{21}$$

$$\boldsymbol{V}^{ca}=\boldsymbol{L}_n\boldsymbol{u}^{ca}=\ln\hat{\boldsymbol{F}}^{a}\boldsymbol{L}_{12}=\boldsymbol{F}^{a}\boldsymbol{L}_{12}$$

$$\boldsymbol{V}^{aa}=\boldsymbol{L}_m\boldsymbol{u}^{aa}=\ln\hat{\boldsymbol{F}}^{a}\boldsymbol{L}_{22}=\boldsymbol{F}^{a}\boldsymbol{L}_{22}$$

故

$$\boldsymbol{V}^{*}=(\boldsymbol{V}^{cc}+\boldsymbol{V}^{ac},\boldsymbol{V}^{ca}+\boldsymbol{V}^{aa})$$

（2）地区间环境水资源投入-产出模型应用　美国西部部分地区水的供应很紧张，合理分配和利用环境水资源是一个众所关心的问题。加利福尼亚州和亚利桑那州都从科罗拉多河中取水，发生的问题很多，一部分学者比较早地编制了投入-产出表，利用环境水资源的投入-产出模型分析水的利用和分配问题。

1958 年两个州在经过部门分类目录和其含义都相同的基础上，总结归类分为 26 个部门，其中农业部门 10 个，即肉畜、禽蛋、干酪制品、谷类、棉花、蔬菜、水果、柑橘、饲料和其他农业；农产品加工部门 5 个，即谷类加工、肉与家禽加工、奶油干酪、罐头与贮藏及冷冻，以及其他农业加工；工业部门 7 个，即化工品及化肥、石油、机械制造、飞行器及部件、冶炼金属、其他制造业、矿业；劳动及其他 4 个部门，即公用事业、服务行业、贸易和运输、其他服务。

在收集水的耗用量资料时，涉及到指标的含义问题。有三种计量办法，即水的总使用量、水的吸收量和水的实耗量。这三种计量方法的含义不同，在水的总使用量中包括对新鲜水的使用量，也包括对回用水，即重复用水的使用量。水的吸取量是指工厂从水井或引水泵实际抽取的水量。在吸取量中包括抽取的水在抽取以后的损失，如蒸发等在内。水的实耗量是指被加工的产品实际吸收以及在加工过程中的损失量。这个模型中各个部门对水的耗用量是指各个部门实际吸取的水的数量。两个州的用水情况见表 8-10。

表 8-10　两州各部门回水量一览表

序　号	分　类	加利福尼亚州		亚利桑那州	
		用水量	百分比/%	用水量	百分比/%
1	农业	7705426	93.0	1992352	97.5
	其中				
	谷类	1355455	16.4	578517	28.3
	棉花	977553	11.8	616711	30.2
	蔬菜	698155	8.4	154304	7.5
	饲料	3075056	37.1	523997	25.6
2	农产品加工	74498	0.3	873	
3	工业	252639	3.1	26192	1.3
4	服务业	249210	3.0	24766	1.2
合　计		8281773	约 100	2044183	约 100

由上表可以看出，这两州的生产用水主要用于农业部门，加利福尼亚州农业用水占全部生产用水的 93%、亚利桑那州农业用水占全部用水的 97.5%。

在这两个州地区间环境资源投入-产出模型的基础上，计算两州的直接耗水系数矩阵 $\boldsymbol{F}^{c}$ 和 $\boldsymbol{F}^{a}$；两个州的完全耗水系数矩阵 $\boldsymbol{V}^{c}$ 和 $\boldsymbol{V}^{a}$；加利福尼亚州单位最终产品对本州水资源的完全消耗系数矩阵 $\boldsymbol{V}^{cc}$ 和对亚利桑那州完全消耗水系数矩阵 $\boldsymbol{V}^{ac}$，亚利桑那州单位最终产品对本州水资源的完全消耗系数矩阵 $\boldsymbol{V}^{aa}$ 和对加利福尼亚州水资源的完全消耗系数矩阵 $\boldsymbol{V}^{ca}$。

根据计算结果可得到如下结论。

① 从每千美元对水直接消耗系数和完全消耗系数来看，两个州的所有部门中种植产品耗水最多（表 8-11）。

表 8-11　两州种植业产品耗水率/(百万加仑/美元)

产品种类	加利福尼亚州	亚利桑那州	产品种类	加利福尼亚州	亚利桑那州
饲料	14.8864	15.2947	蔬菜	1.2737	2.0897
谷类	7.6543	20.5425	水果	2.0219	3.2424
棉花	3.2578	4.0897	柑橘	1.6017	3.6347

注：1 加仑＝3.78541dm³。

耗水较低的有三类部门，第一类是机械加工业，第二类是服务业，第三类是农产品加工部门。

② 从水的乘数来看，畜牧业最高，如亚利桑那州禽、蛋的乘数为 3082.78；肉、畜的乘数为 24.30。其次是农产品加工部门，如亚利桑那州谷类加工的乘数为 1039.61；肉与家禽加工为 565.28；奶油干酪为 973.74；罐头与贮藏及冷冻为 26.46；其他农业加工为 134.54；这两类部门在生产过程中消耗了大量的农产品，使农产品对水的消耗系数提高。所以，这两类部门的间接耗水量远较直接耗水量为多，水的乘数也特别高。水的乘数最低的是种植业产品，如亚利桑那州的谷类水的乘数为 1.03，棉花 1.08，蔬菜 1.02，柑橘 1.06，水果 1.02，饲料 1.003 等。

③ 从两个州的耗水系数看，10 个农业部门中 9 个部门亚利桑那州水的完全消耗系数比加利福尼亚州大，5 个农产品加工部门中 4 个部门亚利桑那州水的完全消耗系数比加利福尼亚州大，而 11 个工业和服务部门中 10 个部门亚利桑那州水的完全消耗系数比加利福尼亚州大。

④ 利用计算结果可以分析各个生产部门对水的地区间依赖关系。如亚利桑那州生产单位最终产品对加利福尼亚州的水的依赖关系，计算各部门对水的地区间依赖系数

$$\phi_i^{\mathrm{a}} = \frac{V_i^{\mathrm{ca}}}{V_i^{\mathrm{a}}} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n)$$

同样也可以计算加利福尼亚州各部门对亚利桑那州水的地区依赖系数

$$\phi_i^{\mathrm{c}} = \frac{V_i^{\mathrm{ac}}}{V_i^{\mathrm{c}}} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n)$$

由表 8-12 可以看出，亚利桑那州大部分生产部门对加利福尼亚州的水的依赖系数大于加利福尼亚州水的依赖系数。

表 8-12　两州各部门对水的地区间依赖系数

产品种类	亚利桑那州生产单位最终产品对加利福尼亚州水的依赖系数	加利福尼亚州生产单位最终产品对亚利桑那州水的依赖系数
谷类	0.0009	0.0010
棉花	0.0007	0.0005
家禽与蛋	0.1022	0.0326
化工品与化肥	0.1303	0.0072
机械制造	0.1141	0.0030

根据投入-产出模型还可以算出地区间水的完全输入量和完全输出量。

第二篇　循环经济

第九章　循环经济的产生及其发展

第一节　循环经济的产生

循环经济是“21世纪”全球经济可持续发展的新模式。有人说“循环经济”和“知识经济”是新世纪经济可持续发展的两大新模式。

循环经济以环境无害化技术为手段、以提高生态效率为核心，强调资源的减量、再利用和资源化，以环境友好方式利用经济资源和环境资源，实现经济活动的生态化。

人类社会进入20世纪70年代，全球人口急剧增加，资源出现短缺，环境污染、生态破坏、世界性难题不断涌现；传统的发展观面临严峻的挑战；传统经济以GDP为中心的经济增长模式应该反思。传统发展观为计算经济总量的增长，不重视经济增长的质量；只计量人类创造财富的积累，不计量经济增长对环境的污染和生态环境的损失；所以通常一个国家和地区GDP增长越快，其自然资源消耗得越多，环境破坏就越厉害，这不仅不能反映环境的缓冲能力、自净能力和抗逆能力的下降，反而将环境污染的经济活动计入GDP，也计算成对经济的“贡献”。

美国人杜德利·西尔斯在《发展的含义》中指出：“增长”和“发展”是两个不同的范畴；增长仅仅是物质量的增长；发展则包括一系列综合的社会目标。在此基础上人们提出以人为本的综合发展观。

以人为中心的发展观虽然正确地看到了发展进程中社会内部诸要素的相互利用和影响，但很少关注社会经济系统与环境系统之间的协调统一，导致了人们对自然掠夺性地开发和利用，造成了全球性生态环境问题。

同时，以人为中心的发展观没有充分考虑到“代际”之间的公平问题。“佩奇”首次提出“代际”公平概念：在动态资源（自然环境资源）和财富的配置中，由于资源和财富都掌握在当代人手中，当代人就成为以后几代人资源和财富的托管者，因此当代人必须考虑后代人的获取资源和财富的数量和机会，不能“竭泽而渔”，而应该以持续发展的眼光和循环经济措施发展经济和优化资源配置。

1992年联合国“环境与发展大会”提出了可持续发展的理念，持续发展的核心即要求社会的发展要既能满足当代人的需要，同时又不对后代人的生活构成威胁和危害。可持续发展观强调：自然界生态环境的承载能力和自然资源是有限的，经济和社会的发展不可能长期超越自然生态环境的承载能力。只有建立在生态环境平衡稳定的基础上，经济的发展才是可持续的。

从我国目前发展的形势上看，需要推动循环经济！改革开放20多年来，我国经济快速

增长，到2003年，我国人均GDP已达到1090美元。国际经济发展经验表明：一个国家在人均GDP达到1000～5000美元阶段，产业结构将进入急剧变动时期，发展中的各种矛盾会逐步显现出来。例如巴西、墨西哥、阿根廷等国家在GDP达到1000美元以后，都放慢了经济增长速度，甚至出现现代化过程中断的社会危机。因此应正确认识我国经济持续发展和环境资源的永续利用问题。

（1）我国经济发展已进入以大众消费为特征的工业化加速时期，经济高速增长具有内在动力。

目前，从我国人均收入水平和产业结构特征来看，经济发展已跨越了罗斯托说的起飞阶段和成熟阶段，进入了大众消费的时代；我国已进入工业化四个阶段的第三个阶段，即工业加速发展的时期，其标志是人均收入水平在一定程度上已经满足了基本食物、住房、穿衣的消费，汽车大规模生产，而且汽车已逐步进入家庭，家用电器已快速普及。

一方面，我国工业产品为提高质量，降低成本，需要采用国际上先进的生产体系；另一方面，由于生产上自动化程度提高，人员的减少，造成大量劳动力需要重新就业，要解决这一矛盾，就需要经济的持续增长。

另外，我国城市化的加速发展带来两个转移：一是农民向城市转移，二是农业人口向非农业人口转移。当然这两个转移都会促进生产率提高，为经济增长提供强大的动力；但同时也会带来一系列矛盾，如住房、能源、教育等问题。

（2）基础工业、化工产业为主导是未来经济高速增长的基础特征，这种增长与生态环境保护的矛盾将会更加尖锐。

在未来的发展中，国内投资和消费都将对基础工业、化工产业形成强大的需求能力；城市建设和农村都将对其基础工业和化工产业形成巨大的需求。经济增长对能源、钢铁、有色金属、水泥、化工等高能耗、高污染的产品依赖性将增强。从出口需求角度看，中国商品在国际上价格低廉，具有较强的市场竞争力；但是中国的产品在某种程度上是以牺牲生态环境为代价的，未来我国生态环境压力将会日益加大。

（3）生态环境将会加剧二元经济结构。

在收入差距扩大的情况下，高收入人群通过占有更多物质财富和自然资源，可以补偿因环境污染给生活质量带来的损失；低收入人群无法选择其生活环境，更无法补偿因生态环境恶化而带来的健康损失，因此生态环境破坏实际上扩大了二元化的经济结构。

（4）经济发达地区与经济落后地区的差距将会继续存在，而要缩小这种差距的难度将会加大。

改革开放以来，我国东西地区的经济发展出现较大的不平衡，由此而造成东西部地区人民生活水平的差距越来越大，这些问题必须解决。我国西部地区因受地理地貌的影响，气候恶劣、水资源严重缺乏，所以不适合高密度经济发展；西部地区的沙漠化、石漠化越来越严重，因生态植被减少引起的旱灾与洪灾逐年加剧，由此可以说明西部地区人口密度和农业开发程度超过了环境的承载能力；西部地区作为我国的生态环境“屏障”，其生态和气候等特点决定了这些地区不能再过度发展农业和污染性产业。因此说，在总体的生态环境压力日益上升的情况下，在短时间内，缩小东西部地区经济发展和人民生活水平差距的难度将会更大。

（5）中国的经济增长对国外资源的依赖程度不断增大。

到2003年，中国已成为世界钢铁第一大国、水泥第一大国、家用电器第一大国、电话

第一大国、服装第一大国，但资源和能源对进口的依赖性日益上升。目前，我国铁矿石的进口量将逐步达到50%左右；石油进口量也将达到50%，今后还将逐步增加。

从本源上说，人类社会发展追求的终极目标是发展经济，提高人民的生活质量，因此，人类必须不断地推动经济增长。但经济增长是否能带来生活质量的提高呢？这取决于两个因素：一是收入分配是否均衡和公平；二是以什么方式实现经济增长。

从收入分配来看，如果经济增长的成果主要被一部分人享用，其他人享用很少，则会导致人们生活水平差距拉大。如果这种状况长期保持下去，就会导致社会不公平，社会不稳定，最终使得每个人的生活质量都下降，从而形成有增长而无发展的结果。

我国现阶段实行的是社会主义的市场经济，而市场经济的社会主义内核，不仅仅体现在所有制上，更应该体现在分配的公平和社会和谐方面。要解决好市场不能解决的公共资源保护和利用的外部性问题，对市场失败的领域进行调控，处理好局部与全局、人与自然、国内与国际、经济与社会的关系，实现人口、资源和环境的综合协调，实现人类社会的可持续发展。

我国人口众多，人均资源拥有量少，生态环境具有选择性，但是我国生态环境整体上的特性决定了我国必须走资源消耗少、污染排放小的经济发展道路，我国必须在不断减少单位产出资源消耗的基础上，最大限度地推进资源的循环利用，最大限度地降低污染的排放强度，必须综合运用法律和行政手段，运用市场价格机制，重新塑造一种节约资源、减少污染的循环经济发展模式；应该看到循环经济模式是实现可持续发展的客观要求，是科学发展观的具体体现。

总之，对于我国经济社会可持续发展来说，人与自然的和谐是基础；以城乡、区域，及经济与社会统筹等发展为内涵的社会公平、和谐是目标；国内国外统筹发展是手段。只有发展循环经济才是实现人与自然和谐的重要出路；循环经济可以将人口、资源和环境三者有机地统一起来，防止“环境贫困”，因而可以在更高的层次上推进社会公平、缩小全国范围生活水平、生活质量的差距。因此，可以说只有发展循环经济，才是社会经济持续发展的唯一途径！

第二节　循环经济的发展

环境经济学家预言：21世纪应该是一个绿色文明的时代！

20世纪90年代以来，循环经济在发达国家已发展成为一种新的潮流和趋势。德国1996年颁布实施了《循环经济与废物管理法》；2000年日本召开第一届“环保国会”，通过了多项环保法规，如《推进形成循环型社会基本法》、《推进资源有效利用法》、《食品循环资源再生利用促进法》和《绿色采购法》。

中国积极推进清洁生产和循环经济的理论：1996年国务院在《关于环境保护若干问题的决定》中，要求新建、改建、扩建工业项目应当尽量采用清洁生产工艺；1999年九届全国人大常委会把《清洁生产法》列入立法规划，要由“环境与资源保护”委员会组织起草，这是世界上第一部冠名为“清洁生产”的法律，并于2003年1月1日起正式实施。

从循环经济的基本特征来看，它是人们模仿自然生态系统，按照自然生态系统物质循环和能量流动规律建构的经济系统，并且把经济系统和谐地纳入自然生态系统的物质循环过程。传统经济与循环经济的不同之处在于：传统经济是“资源→产品→消费→污染排放”物质单向流动的线形经济，把资源持续不断变成废物实现经济的数量型增长，这就导致了许多

自然资源的短缺和枯竭，并导致环境的严重污染与破坏；与此相反，循环经济倡导的是建立在物质不断循环利用基础上的经济发展模式，把经济活动按照自然生态系统模式，组织成为“资源→产品→消费→再生资源”物质循环流动的过程，在这整个经济系统中，要求基本不产生或只产生很少的废物，使物质和能量得到合理持久的利用，使经济活动对自然环境的影响降到最小的程度。

清洁生产表现为单个生产者和消费者行为，这种微观的清洁生产和消费行为，通过发展为工业生态链和农业生态链，实现区域和产业层次的废物和资源的自利用，并通过政府、企业和消费者在市场上的互动行为，上升为循环经济。因此，清洁生产是循环经济形态的微观基础；循环经济则是清洁生产的终端发展目标；各种产业的、区域的生态链和生态经济系统则构成中间环节。

清洁生产和循环经济都强调污染物的源头削减和再利用，其政策之间也是密切关联和一致的。因此说，循环经济是实施持续发展战略的必然选择和重要保证，而清洁生产则是实现循环经济的基本途径。

① 在生产系统中要建立符合清洁生产和循环经济的设计原则，并把它贯彻到各种工程、产品和服务的设计中去，把经济效益、社会效益和环境效益统一起来，做到物质的循环利用，物尽其用。

② 依靠先进的科学技术，积极采用无害或低害的新工艺、新技术，降低原材料和能源的消耗，尽可能实现低投入、高产出、少污染，并把污染物的排放消除在生产过程之中。

③ 对环境资源、自然资源和废物实行综合利用和循环利用，使废物资源化、减量化和无害化，这是循环经济的重要原则和重要标志。

④ 建立工业生态园，推进循环经济。仿效自然生态系统使资源和能源在生态园中循环利用；做到资源共享，各得其利，共同发展。

⑤ 建立并健全相关的政策和法律体系，规范地方和国家经济，使其朝着循环经济的方面发展。

1. 循环经济的制度建设

众所周知，经济学对污染的定义可表述为外部不经济性，即生产者通过污染物的排放对环境的污染将生产成本的一部分强加给他人，使得他人的利益受到损失。很显然这是违背商品经济等价交换原则的。从经济学的角度看，这源于生态环境没有划分生产要素并界定其产权。从其自然特征上看，资源和生态环境的天然性、流动性、外部性等特征决定了其产权难以实现私有化，任何私人和企业都无法有效行使对生态环境的产权，只能由国家政府代表社会来实施。因此，以推进可持续发展为目标，以最有效的方式利用资源和保护环境为内涵的循环经济，本质上是国家行为或政府引导和规制的经济模式。

由于外部不经济性，生产者在给社会带来效用的同时，给他人带来成本，按照市场公平的原则，污染者应该给他人（污染受害者）以补偿。如何补偿，补偿多少，一时难以解决。一是受害者对生态环境没有清晰可见的产权界限；二是污染补偿价格计量没有统一的市场标准；三是社会成员生活中共同造成的污染如何处理。因此，要解决以上问题，首先需要国家制定一系列法律法规，维护社会公民的共同产权，降低交易费用。其次，由国家统一制定污染价格标准。如果没有明确的污染主体，或主体是社会大众的情况下，由政府划分公共事业来治理。这些问题都需要立法机构、政府及相关社会组织协同解决。政府是循环经济制度和规则的设计者；执法机构是法律、法规的监督者；生产企业是行动的主体；市场机制是循环

经济发展的基本体制，政府必须对市场进行调控和规制。

2. 循环经济与经济发展阶段的关系

发达国家的实践表明，环境问题是工业化时期的共性问题。发达国家工业发展走的是先污染后治理的道路。我国经济发展正处于工业化攻坚阶段，对能源消耗高和污染排放强度大的产业正在进入快速增长阶段。我国到 2020 年人口将会超过 14 亿，比美、日、德、法、英、加六国人口总和还多一倍，而我国的国土面积只有六国国土面积总和的二分之一；按单位面积计算，我国国土面积承受的污染强度将比发达国家高四倍，显然我国的生态环境是绝对无法承受的。因此，我们应避免走先污染后治理、以牺牲环境为代价的不可持续发展的道路，必须坚定地走循环经济的发展道路。

3. 循环经济与生态经济的关系

从生态学的观点出发，生态经济学家主张以生态学的规律来指导人类的经济活动，希望人类活动能够按照生态学规律进行，在完全不改变自然的情况下发展经济，当然这里是难以实现的。因为在市场商品经济社会中，每个经济人都在追求自身效用的最大化，他们总是追求创造最大的利润。但是，如果社会、政府把自然生态环境划分为社会共有的生产要素确定价格，并做到有偿使用后，他们自然会按照费用最小的原则使用它们，因此发展循环经济就可以逐步做到运用经济规律来减少资源消耗和保护生态环境。

从另外的角度看，生产者免费使用生态环境，实际上是对公众利益的侵占，如果不给予补偿，对公众就产生了不公平！循环经济要求减少资源消耗和环境污染，为后发达地区和子孙后代留下更多的资源和发展空间，这就为生态环境公平解决了出路。

4. 循环经济伦理与环境伦理

循环经济的发展需要一种新的伦理观，这是循环经济取得成功的一块重要的基石。循环经济的伦理，既不完全等同于市场经济的伦理，也有别于现实的环境伦理。前者对环境价值观缺乏认知，后者则难于在现实中通过制度和政策手段得以实现。循环经济的伦理观应是环境伦理与市场伦理观的结合。应该指出的是，在循环经济伦理的探索中，必须区分人类中心主义与“以人为本”的差别。科学发展观的“以人为本”是指把人民的利益作为一切工作的出发点和落脚点，不断满足人们多方面的需求和促进人的全面发展，而不是环境伦理学中的人类中心主义。人类中心主义有其合理成分，但它否定了人类认识的有限性。在处理人与自然的关系时，以人类为中心，并不能防止我们去做眼前有利于人类，而最终损害了人类的决策。

第三节　循环经济的内涵及意义

循环经济是对物质闭环流动型的简称，其本质是生态经济。循环经济倡导在物质不断循环利用的基础上发展经济；循环经济的模式是“资源-产品-再生资源”，彻底改变“资源-产品-污染排放”直流式或单向流动的经济模式，从而把经济活动对环境的影响降低到最小程度。

循环经济是依据“3R”原则，所谓“3R”原则即减量化（reduce）、再利用（reuse）、再循环（recycle），其目标要求在经济流程中系统地避免和减少废物。循环经济的实施，可以实现经济、环境、社会三者发展的有机结合使资源得到可持续利用；它可以拉长生长链，增加就业机会，有利于社会的持续发展。

众所周知，资源是人类赖以生存的物质基础，是人类发展生产和创造财富的源泉；资源

的最便捷、最高效利用是人类生产追求的永恒主题和最大目标。

资源内涵是随时间的推移而变化的增函数。资源内涵随着人类改变自然能力的加倍，社会的发展以及科学技术水平的提高而不断拓展。

资源系统从其内涵上讲，可以分为三个子系统：自然资源子系统，社会资源子系统，经济资源子系统。

① 自然资源子系统。自然资源原指在一定的时间、地点条件下，能够产生经济价值，能够提高人类当前和未来福利的自然因素的总和。自然资源子系统是社会生产的原材料、燃料来源和生产布局的必要条件与场所；自然资源禀赋与配置结构是衡量一个国家综合国力的重要指标。自然资源是存在于自然界中的自然物质资源，自然资源包括自然界中的矿产资源、生物资源和包括土地、大气、海洋的环境资源。

② 社会资源子系统。社会资源是指以非物质形式作用于人类生产活动过程的资源，它包括知识、文化、技术、信息、社会组织形态、管理手段、劳动力、人才、法律、宗教、道德等，是人类生产活动中社会和社会环境的重要构成部分。它决定了国家或地区资源总产出的方式与能力，是自然资源转化为经济资源的保障体系。自然资源只能在社会资源的参与下，才能发挥作用，成为人类的使用财富。

③ 经济资源子系统。经济系统是自然系统经人类活动参与社会资源化后的产物，可分为生活资料和生产资料两大类，前者是人类自身生产和再生产的物质基础，后者是人类进行生产活动的物质基础。经济资源可以用货币来度量，经济资源总量可直观反映出一个国家或地区经济发展水平与人口承载力的大小，经济资源最大化是人类长久以来的价值取向和奋斗目标。

1. 资源系统的基本特征

资源系统的层次多元性。资源系统层次多元性表现在资源系统的内部和外部。就资源系统内部而言，它有自然资源、社会资源和经济资源三个子系统，而三个系统又可以细分，如自然资源子系统可分为矿产资源、生物资源和环境资源等，社会资源系统可以包括信息、技术、政治、法律等，经济资源系统可分为生活资料和生产资料。就资源系统的外部而言，它又是人、地区系统的一个子系统。

资源系统的宏观开放性。资源系统并非以孤立的形式存在，而是以开放的形态与人类社会系统和自然环境系统不断地进行着物质、能量、信息的交换和传输。也就是说，它以“流”的形式，即物质流、能量流、信息流、人口流、货币流、经济流贯穿其间，既维系资源系统与其他系统，又维系其系统内部各要素间的关系，形成一个动态的、可以反馈的开放系统。系统的宏观开放性是资源、人类社会和自然资源施加影响的重要机制，也是保持系统本身活动力和特殊性的重要属性。

资源系统的动态平衡性。自然、社会、经济资源构成了完备的资源系统。各子系统之间相互联系、互相转化、密不可分。一定的自然资源、经济资源和社会资源的组合是人类生存、生产得以持续发展的首要前提，离开了社会资源，自然资源不会自动转化为经济资源；离开了自然资源，社会资源也失去了施加对象。只有当社会资源丰富，自然资源得到充分利用时，人类所拥有的经济资源（物质、财富）才可能丰富，有人说三种资源存在以下关系：自然资源＋社会资源→经济资源。

2. 新资源观→循环经济

（1）新资源观

① 资源观。资源的系统观是资源观中最核心的观点。树立资源的系统观，需要从整体出发把各种资源视为多元系统，根据发展需要，科学地排列组合矩阵中的各个子系统并使之达到动态平衡。转变过去的认识，即资源只等同于自然资源的错误认识，把社会经济、环境因素都纳入资源范畴。在利用社会、经济、环境资源时，应和利用自然资源一样，充分考虑其可利用的阈值及循环周期，通过对各类资源的量化，建立资源系统各元素之间的关系模型，据此对每项即将出台的政策、法规及投资倾向，可能产生的社会经济、环境、效益予以预测，并做出最终取舍，尽可能避免资源使用不当而导致破坏资源系统的动态平衡。

② 资源的辩证观。资源的物质性具有有限性，但人类认识利用资源的潜在能力是无限的，所以一定要用发展的眼光来看待资源。对于资源的有用性和有害性，要求人类最大限度地开发资源的有用性，最大限度地预防和转变资源的有害性。资源的辩证观突出了科技进步的重要性，随着科技的进步，人类对资源认识范畴和利用程度将逐步扩展和加深。

③ 资源价值观。应该彻底转变“资源无价”论的观念，按照价值规律，对资源的再生产进行经济定价和经济招标。确定资源系统内所有要素的价值与价格，形成对资源要素的开发、利用和自然环境外部边际效应的补偿机制和良性循环，科学地建立资源的“租-税-费”体系。用市场经济规律处理资源问题与环境问题。对资源的开发、使用、管理、保护制定明确的法律规定，制定法律监督机构，监督资源的不合理利用行为；通过市场机制和法律机制，保证资源的内部交流和转化，保证资源、环境、社会与发展之间的动态平衡与可持续发展。

④ 新资源观→循环经济。人类对自然的认识，人类与自然的关系，人类对资源的依赖程度、利用方式和认识态度先后经历了天命论、决定论、征服论和协调论等不同阶段。人们在相当漫长的历史阶段，认为人类是大自然的主宰者，人类与自然是“主”与“仆”的非平衡状态关系；尤其是 20 世纪工业化以来，人类为获取最大利益，对资源采取掠夺式开发，导致大量不可再生资源的枯竭，使矿产资源锐减，淡水短缺，土地退化，森林大面积减少，引起了全球性生态环境恶化，如荒漠化、气候变暖、臭氧空洞等。循环经济就是在这种背景下被提出来的，循环经济是模仿自然生态系统，按照自然生态系统物资和能量流动规律构建的一种生态的经济系统。

循环经济的基石就是新资源观；循环经济主张协调人与自然的关系，而新资源观恰恰主张将社会、经济、环境等因素与自然资源一道纳入资源范畴，只有在这样一个涵盖广泛的资源范畴内，循环经济的理论才得以实行。循环经济要使资源有序、合理持久运行，而新资源观则为资源的有序、合理、持久地运行提供了新的视角和多维的保障。

（2）新资源观是循环经济的强大推动力　循环经济的宗旨是解决人与自然和谐共存的问题。它所要解决的是人类如何开发资源，而又不破坏环境，达到社会、经济、环境保护协调发展，因此循环经济主张对资源的“减量化”、“再使用”和“再循环”。传统的“资源论”无法对循环经济的这一主张提供支持，而且往往有碍于循环经济的发展。

新资源观对人类一切可利用的资源进行了全新的界定和诠释，这一全新的界定和诠释对循环经济的发展具有强大的推动作用。

新资源观认为：人们必须转变或摒弃传统的“资源无价”和资源“任人使用”的观点，必须建立资源的社会再生产检验体系，树立资源的价值观，有力地使用经济杠杆，使人们对资源尽可能地“减量化”、“再使用”和“再循环”。新资源观认为资源并不是“取之不尽，用之不竭”的，应该树立资源的辩证观；不仅提醒人们对资源的使用要“减量化”、“再使

用”和“再循环”，而且鼓励人们开发人类的聪明才智，推动科学技术进步，只有如此，才能有效地实行“循环经济”。

循环经济与新资源观都是在可持续发展理论指导下发展起来的新理念。新资源观对资源进行了全新的界定和理论阐述，为循环经济的发展提供了坚定的基石和强大的推动力；循环经济是实现人与自然之间的最佳效率效益与公平的最佳切入点和最佳途径。它为新资源观提供了广阔的应用天地，在推动社会、经济和环境协调发展方面，循环经济和新资源观是完全一致的。

第十章　循环经济的发展基础

第一节　循环经济的发展观

20 世纪 70 年代以来，全球人口剧增、食物匮乏、资源短缺、环境污染、生态破坏等全球性危机不断涌现，传统的发展观面临着严峻的挑战，促使人们对过去以 GDP 增长为中心的发展理念进行反思。传统的发展观更多的是计量人工创造的价值，而对自然资源，尤其是环境资源的价值，则较少计算，甚至不予计算；只计量人造财富的积累，而不计量经济增长对环境污染的产生与环境生态损害造成的损失；只重视经济增长的总量，而不重视经济增长的质量；只重视人造财富的创造，而不重视人造财富的分配。（正因如此，由于环境污染与生态破坏造成的外部不经济性日益严重，已经成为国家经济发展的重大障碍。）因此，传统 GDP 中并没有扣除发展过程中的资源和环境所付出的成本，从而造成了它对发展不真实地表达。它所反映的只是经济增长的“数量”，而没有全面反映经济增长的“质量”。从环境角度来看，它没有考虑自然资源的稀缺性和资源的枯竭性问题。从经济学角度看，它只记录看得见的，可以价格化的劳务，而其他对社会非常有贡献的劳务却被摒除在外。

英国学者托德利·西尔斯在《发展的含义》中首先指出：增长和发展是两个不同的范畴，增长仅仅是物质量的增长，发展则包括一系列社会目标。在此基础上，人们提出了“以人为本”的综合发展观。综合发展观摒弃了传统发展观单纯用国民生产总值衡量发展水平的做法，要求把发展看成是以民族、历史、文化为基础，包括经济增长、政治民主、科技水平提高、文化价值观念变迁、社会转型等多方面因素的综合过程。

以人为中心的发展观虽然正确地看到了发展进程中社会内部诸要素的交互作用和影响，但较少关注社会经济系统与自然环境系统之间的协调统一，从而导致了人们对自然掠夺性的开发和利用，造成了全球性生态环境问题。

同时，以人为中心的发展观没有充分考虑发展的代际之间的公平问题。由“佩奇”提出的“代际公平”，实际上是在动态资源（自然环境资源）和财富的配置中，当代人就成了以后几代人资源和财富的托管者，因此当代人必须考虑后代人的机会和可能获得的资源数量。

1992 年，联合国环境与发展大会提出了持续发展的理念，其核心内容是要求社会的发展既能满足当代人的需要，同时又不对后代人满足其需要构成威胁和危害。可持续发展观强调：生态环境的承载力和自然资源是有限的，经济和社会的发展不可能长期超越自然生态环境的承载力，只有建立在生态环境平衡稳定基础上的经济发展才具有可持续性。

可持续发展的战略已被世人认同，如何实施可持续发展，各国专家提出了一系列理论，进行了卓有成效的实践，如工业生态学、绿色化学、清洁生产、生态农业、生态城市等，循环经济可以说是上述新思想、新策略的一种实现方式。美国经济学家鲍尔丁在他的“宇宙飞船经济理论”中提出，要改变传统的经济发展模式，从增长型向储备型转变，从消耗型向生态型转变，从开环型向闭环型转变。这几种转变模式正是体现了循环经济的理念。循环经济包含了工业、农业、服务业等国民经济的各个领域，还包括经济、环境、社会，以及人民生活的各个层面，涉及到上层建筑的各个领域，如政策、法律、机构与机制、规章、科技等方

面，其核心思想是要在大大提高对自然资源的利用中，大大减少污染物的排放量，大大提高人们的生活质量，获得更高质量的经济发展，使人民的生活环境能够得到持续改善，使地球上的公民能够长久地生存下去。因此说，推行循环经济是实施可持续发展战略的具体体现。

发展的实质就是发展生产力。人类社会的发展就是先进生产力不断地取代落后生产力的过程。人和自然都是生产力的要素，其中人具有重要的地位，但同时，也受到作为劳动对象的自然因素的影响和制约。人与自然和谐，则生产力就顺利发展，否则生产力必然遭到破坏。发展先进生产力要求生产力必须朝着人与自然相协调和可持续的方向发展，自然环境是生产力发展的基础，为此，必须保护好自然资源和环境。

胡锦涛同志指出："发展全面建设小康社会的宏伟目标，必须使可持续发展能力不断增强，生态环境得到改善，资源利用效率显著提高，促进人与自然的和谐，推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。"

保护环境，实现人与自然协调与和谐是生产力发展水平的重要标志。可持续发展，就是追求合理投入、低消耗、环境友好型的经济发展。我国只要坚定落实环境保护的基本国策，大力推行循环经济模式，就能为先进生产力奠定良好基础，真正地实现可持续发展的战略。

第二节 循环经济发展的价值观

循环经济需要树立以循环、共生和可持续发展为核心的价值观，在充分认识到地球有限性和公共性的基础上，构建适合循环经济的新型理论。

地球是一个巨大的循环系统，地球的生成是物质世界相互作用循环发展的结果。循环是地球上各种物质的存在方式，所有物质都在进行广泛循环，人与自然之间物质循环是生命循环的一部分。

但是，人与自然的物质循环方式却是独特的，它是以生产劳动为中介进行的。在生产劳动中，人类把整个自然界作为资源，改变了自然界的本来面目，自然的循环变成了资源的循环。当今困扰世界的环境问题，诸如资源的枯竭、大气的污染、地球温室效应、土地的荒漠化、生物多样性的减少等，其实质就是物质循环遭到扰乱和破坏，并且影响到了整个自然界的物质循环。

造成环境危机的直接原因是人类的活动，要想避免恶性后果，就必须遵守自然界物质循环的法则，把人与自然的循环纳入到整个自然界循环中去，把人的行为限制在自然界所能容纳和净化的范围之内，必须做到人与自然和谐共处，做到"与天地合其德，与日月合其明，与四时合其序"。

新的价值观应包括两层含义，一是环境具有价值，人类通过劳动可以提高其价值，也可以降低其价值。从哲学高度解释价值的界定，应该以客体对主体的效应为理论依据，它是主体与客体在相互作用过程中，客体对主体的实践效应。环境资源的价值就是客体——环境资源对主体——人类的实践效应来界定的。二是发展活动所创造的经济价值，必须与其所造成的社会价值和环境价值相统一。传统的价值观把三者孤立起来，片面追求经济价值，而忽略了其所造成的社会价值与环境价值，从而使人类陶醉于其所创造的经济繁荣昌盛的假象之中，而忽视了假象背后的社会负效益与环境质量的恶化。因此，新的价值观强调把经济价值、社会价值和环境价值统一起来，正确评价开发与生产活动的真正效益。

可持续发展理念为循环经济的建设提供了理论基础，它强调的是自然的有限性、人与自然之间的和谐，并且给后代留下生存和发展的空间。

可持续发展理论，强调在不破坏自然环境的前提下，在自然界承载力内的发展；并且这种发展必须是公平的，既要在当代人之间实现公平，又不危及后代人的利益；它的战略目标是在发展的同时，处理好发展与环境，发展与代内及代际之间的关系。

人类要实现可持续发展，首先必须要维护自然的平衡与稳定，这是人类生存和发展的前提。可持续发展是在不破坏自然环境的前提下实现经济的增长，满足人民的物质需求。因为只有靠发展增加社会财富的总量，才能为解决发展中国家和贫困地区的生存问题提供条件，为代内实现公平提供物质基础。它以可持续性发展为前提，反对只顾眼前利益掠夺性地使用资源、污染环境，而是以最有效的方式利用资源、保护资源；它强调自然资源的有限性、人与自然之间的和谐，并且维持生态系统的平衡与稳定，给后代留下一个可供生存和发展的地球空间。

第三节　循环经济发展的道德、文明观

人类必须树立起正确的自然道德观，学会尊重自然，保护自然，把自己作为自然的一员，与自然和谐相处，并且把保护人类世代生存以及不危及其他物种生存作为人类社会的一项基本道德。人们应当把自然界视为是人类生命的源泉，而不是随意盘剥和利用的对象，对自然界既要“索取”，也要“给予”，并使之保持一种动态平衡，符合自然界的“演化规律”。

循环经济发展的道德观，体现在人与人之间的关系上：既要满足同时代人之间的关系，又要满足不同时代人之间的关系；既要遵循同时代人之间合理的行为规范，又要遵循代际人之间合理的行为规范，更进一步讲，不但要满足同时代代内公平问题，又要满足代际公平问题。

代际公平问题是指这一代人不要为自己的发展和需要而损害人类世世代代满足需求的条件——自然资源和环境。随着人口的不断增长和人类消费水平的不断提高，对自然资源的开发和索取在不断扩大和增加，如若不加限制，我们的子孙后代将无法生存，人类也就不能延续下去。所以我们不能只顾这一代人的利益，而不顾子孙后代的利益；只顾这一代的发展，而不顾子孙后代的生存和发展；应当树立持续发展，持续生存的观念，维护子孙后代人的利益，做到代际公平。1972 年，联合国人类环境会议上通过的《人类环境宣言》明确指出：“为了这一代和将来世世代代人的利益，地球上的自然资源，其中包括空气、水、土地、植物和动物……必须通过周密计划或适当管理加以保护。”

人类社会的文明是随着生产力的发展而延伸和发展的，它经历了一个由低级到高级的发展过程。

生态文明是物质文明和精神文明高度发达的产物，它具有鲜明的时代特征。生态文明主张人类社会的发展与人类赖以生存的自然环境协调发展；人类是大自然的一份子，而不是自然的单纯征服者，人类只有走生态文明的路子，才能与自然保持和谐，做到经济效益、社会效益和生态效益协调有序发展。

多年的生态实践使人们认识到生态利益是人类可超越一切的最高利益。在生态文明时代，人类的基本利益分为三个层次，即经济效益、社会效益和生态效益。这三个层次的效益在人类的利益结合体中各有不同的地位和作用。生态效益是指在满足大多数人需要的同时，保护和优化生态系统，保持生产力的可持续运行，以满足全人类的整体和长远需要的利益。由于生态效益代表的是全人类的整体和长远的利益，因而它必然是人类最高层次和压倒一切的根本利益。

生态文明所主张的生态利益，既然是人类的最高利益，那么就应该实行生态优先的原则，因此，人类的一切活动必须把生态利益放在首位，处理好生态效益、社会效益和经济效益三者之间关系，实行三者的完美统一和动态平衡。但是这种统一的基础就是生态优先，人类必须将保护和优化生态系统作为一切活动的出发点和归宿。生态优先规律是生产力运行的基本规律，人们必须尽快走出固守的关于生产力的认识和误区。

生态文明主张人类走出“以人为本主义”和“人定胜天”的认识和实践误区，要尊重多样性的物种生存权，走向以生态为中心的“天人合一”的境界。实践证明：人类高居自然之上，盲目创造人类的福利条件，并统治自然、战胜自然的方式是人类灾难的一个源头。人类要走出在人类社会内部的封闭循环中界定主要矛盾的认识误区，形成在人类与生态系统的开放循环中界定主要矛盾的新理念；人类要走出狭隘的单纯发展经济的认识误区，树立保护环境、持续发展的良好意识。

生态文明是社会发展到一定阶段时期所产生的一种社会文明。当今的社会已进入全球化的时代，社会经济的快速发展在物质文化生活基本消费解决之后，环境消费需要正日趋显现，人类社会随着生产模式和消费模式的发展，生态文明时代已呼之欲出。

生态文明既是物质文明、精神文明基础上全方位的一种社会文明，又是农业文明、工业文明之后，社会新阶段的社会文明。

物质文明、精神文明和生态文明三者全面高度发达的社会，是人类社会发展的方向，是全人类追求的目标。

第十一章　循环经济的发展理论

第一节　循环经济发展的指导原则

循环经济本质上是一种生态经济，它要求运用生态学规律而不是运用机械论规律，指导人类社会的经济活动。

循环经济是在“减量化”（reduce）、再利用（reuse）和再循环（recycle），即简称3R原则下建立起来的。

（1）减量化原则　循环经济的第一原则，即是“减量化原则”，该原则即减少进入生产和消费流程的物质量，所以又叫减物质化。它指导人们必须学会减少废物产生，而又不产生后处理。如制造厂商可以通过减少对每个产品的物质使用量，节约资源，减少排放；轻型轿车既能节省金属用量，又能节约能源，同时可以满足消费者的舒适度和安全感；而光纤技术能够大幅度减少传输线中对铜的使用，节约大量金属资源。在消费中，人们可以降低物品的过度需求，如果人们不是采取消费至上主义的态度购买物品，则社会将会大大减少废物、减少垃圾。

（2）再利用原则　在产品的使用和报废问题上，首先要考虑“再使用”，也就是说先要尽可能考虑延长产品的使用寿命，减少一次性使用的产品，然后才是产品报废后的循环问题。

所以循环经济“再利用原则”就是尽可能多次地使用产品，再减少丢弃和排放。在工业生产中，可以把上游生产工艺废料或排放物经过适当加工变成下游工艺生产中的原料，多次循环，重复利用。在产品生产中，制造商可以使用国际通用标准尺寸进行设计生产，使用户很方便地更换部分部件，而不必要更换整个物品。在人们的日常生活中同样存在大量的生活物品再利用的机会，做到减少丢弃、减少废品，尽可能地循环利用。

（3）再循环原则　循环经济的第三个原则就是再循环原则，就是尽可能多地进行再生利用和资源化。资源化就是把废物返回到工厂，经加工后融入新产品；再循环和资源化能够减少人类对资源使用的压力。目前有两种资源化的方式：

① 原级资源化　即将消费者遗弃的物品经加工后形成与原来相同的新产品；

② 次级资源化　将生活中的各种废物变成不同类型的产品，与再循环资源化过程相适应，消费者和生产者可通过购买最大比例消费后的再生资源制成的产品，使得循环经济的整体过程实现闭合。

运用3R原则是循环经济-资源利用的最优方式。自20世纪下半叶以来，人们在环境与发展问题上走过三个历程：

① 第一个历程　自20世纪下半叶以来，人们抛弃了在环境发展问题上以环境破坏为代价，单纯追求经济增长的理念；

② 第二个历程　人们认识到环境污染的实质是资源浪费，因此要求进一步从净化废物升华为利用废物；

③ 第三个历程　人们逐步认识到利用废物只是一种辅助性手段，按照循环发展最终目

标，应该实现从利用废物到减少废物的飞跃。

由此，在人类的经济活动中，产生三种不同的对待资源使用的方式：线性经济与末端治理相结合的传统“用完就扔”的方式；按照资源再利用、再循环方式的资源恢复方式；按照3R原则，实现生产和生活中废物的少排放和零排放的方式。循环经济的目标，不仅仅是减少废物的体积和数量，更主要的或者说从根本上讲为了保护环境保护资源，减少自然资源的耗竭，减少由线性经济所引起的环境退化。

第二节 循环经济发展的物质循环理论

一、循环经济发展的目的

人们发展循环经济的目的是为了更好地提高资源的利用率和资源效率。资源效率提高了，环境效率就会自动相应地提高，这将有利于实现经济社会的可持续发展。问题是资源效率和环境效率，在现有的基础上提高到什么程度才能满足可持续发展的要求呢？比较公认的说法是要“在一代人的时间内，把资源、能源和其他物质的效率提高10倍”［1997年，国际十倍因子俱乐部向世界各国的政府和产业领袖发表的卡诺勒斯（Carnoules）宣言］。

如何控制环境负荷，如何协调资源与环境的关系，有人提出了“控制方程”，即把环境负荷（即含资源和环境两方面）分解为三个因素，即人口、人均GDP、单位GDP的环境负荷。

以上环境负荷＝(人口)×(人均GDP)×(环境负荷/单位GDP)

假设我国20世纪人口为12亿，21世纪中叶将增至16亿，GDP将从800美元/人增加至4000美元/人，如若是环境负荷保持20世纪末的水平，按上式计算，单位GDP/环境负荷到21世纪中叶必定下降为20世纪的1/6.67，所以我国当前的环境与资源状况，并不完全符合持续发展的要求，到21世纪中叶，单位GDP的环境负荷应在现有的基础上降低更多倍，例如8～10倍才能满足持续发展的要求，当然这是巨大的挑战。

发展循环经济，提高资源效率，降低单位GDP的环境负荷，并不是唯一途径。除此之外，调整产业结构，调整产品结构，提高技术水平，节约能源，开发利用可再生资源，改变企业经营模式，改变消费观念等，都是有效途径。但是，所有这一切发展循环经济是最重要的途径之一。

二、循环经济中的物质循环

循环经济的核心是国民经济中的物质循环，例如在工业经济系统中有三种循环：

① 小循环 指企业内的物质循环，例如，下游工序的废品，返回上游工序，作为原料，重新利用，又如水的重复利用和循环。

② 中循环 指企业之间的物质循环，例如，下游企业的废物，返回到上游企业作为原料，重新利用，某一企业的工业废物、余能送往基地工业企业加以利用。

③ 大循环 国民经济中的工业产品经使用报废后，其中部分物质返回到原工业部门，部分原料重新利用。

发展循环经济，首先要考虑“减量化、再使用、再循环”，即3R原则。在企业内部和企业之间，首先考虑是“减量化”，也就是尽可能减少各工序和整个企业的废物产生量，以及自然资源的消耗量，然后才是废物的循环问题。在产品的使用和报废问题上，首先应考虑“再使用”，即尽可能延长产品的使用寿命，减少一次性使用的产品，然后才是产品报废后的循环问题。这些原则和优先排序问题，目前在我国尤其显得格外重要，因为不少企业在“减量化”

和“清洁生产”方面水平还很低，很多产品在“再使用”和“延长寿命”方面做的还不够。

1. 循环经济中物质的大循环问题

一个国家、一个地区的国民经济的规模随着时间的变化，它对物质的循环规律有很大影响。例如，工业生产中，工业产品随时间的变化，大体可分为三种不同的情况：产品产量基本保持稳定；产品产量持续增长；产品产量下降或较快下降。由此所产生的资源效率和循环效率之间有很大差别。

例如以钢铁产品在生命周期物质图为基础，通过对废钢资源的研究表明，一个国家或地区钢产量随时间的变化，对钢铁资源效率有着明显的影响。该研究中衡量废钢资源充足程度的指标是“废钢指数”。

$$\text{废钢指数}=\frac{(\text{回收折旧废钢量}+\text{加工钢量})(\text{指统计日期内})}{\text{生产钢产量}(\text{指统计日期内})}$$

不难理解，在其他条件相同的条件下，废钢指数越高、吨钢消耗的铁矿石量就越少，铁的资源效率就越高。

以下是钢产量变化的 3 个例题。

3 个例题共同的条件是：

① 钢材生产后，当年就被制造成钢铁制品，在其制造过程中，每吨钢材产生 0.05t 废钢，而废钢返回炼钢车间，重新利用；

② 钢铁制品使用 15 个月后报废，报废后每吨钢形成 0.4t 折旧废钢，同样作为炼钢原料重新利用；

③ 钢铁制品及钢材不考虑进口和出口。

【例 11-1】（钢产量保持不变）已知某月钢铁厂一直是稳定化 1 亿吨/年的水平，到 2000 年底已稳定生产 15 年以上，见图 11-1，求 2000 年该月的废钢指数值。

【解】 2000 年该月钢铁工业的废钢量为

$$\text{加工废钢}+\text{折旧废钢}=1\times10^8\times(0.05+0.40)=0.45\ \text{亿吨/年}$$

$$\text{废钢指数}=\frac{0.45\times10^8}{1\times10^8}=0.45$$

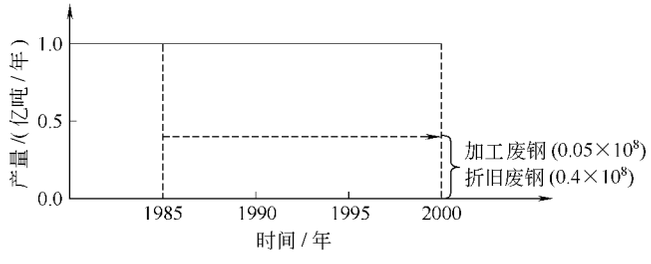


图 11-1　钢产量不变时的废钢量

【例 11-2】（钢产量持续增长）已知某国钢产量持续增长，1985 年 0.4 亿吨/年，15 年后（2000 年）为 1.2 亿吨/年，见图 11-2，求 2000 年该国的废钢指数。

【解】 2000 年钢铁工业可得废钢量为

$$\text{加工废钢}+\text{折旧废钢}=(1.2\times10^8\times0.05)+(0.4\times10^8\times0.4)=0.22\ \text{亿吨/年}$$

$$\text{故废钢指数}=\frac{(0.06+0.16)\times10^8}{1.2\times10^8}=0.18$$

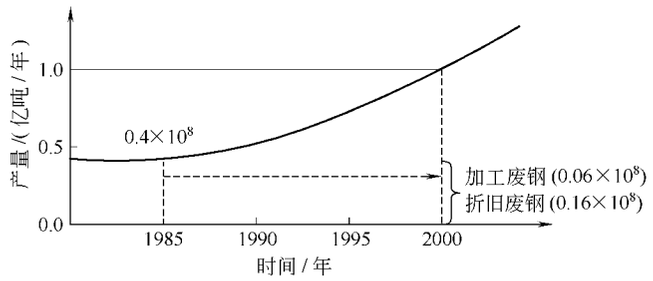


图 11-2　钢产量持续增长时的废钢量

【例 11-3】（钢产量下降）已知某国钢产量大幅度下降，1975 年为 1.3 亿吨/年，而 1990 年为 0.8 亿吨/年，见图 11-3，求 1990 年该国的废钢指数值。

【解】 1990 年该国钢铁工艺的废钢量为

$$\text{加工废钢}+\text{折旧废钢}=(0.8\times10^8\times0.05)+(1.3\times10^8\times0.4)=0.52\ \text{亿吨/年}$$

$$\text{废钢指数}=\frac{(0.52+0.04)\times10^8}{0.8\times10^8}=0.70$$

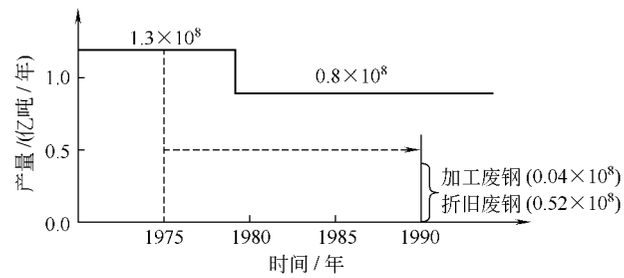


图 11-3　钢产量下降时的废钢量

以上 3 个例题的结果之所以有如此大的差别，原因是钢产量的变化情况不同。

从 1988 年到 1997 年 10 年间，日本、中国、美国三国的废钢指数的统计值，美国的废钢指数最高，为 0.57～0.75；日本居中，为 0.34～0.41；中国最低，为 0.08～0.18。三国废钢指数之所以有如此大的差别，主要是三国钢产量的变化情况不同。美国 20 世纪 70 年代末 80 年代初钢产量大幅度下降；中国钢产量自 20 世纪 80 年代以来持续高速增长；而日本近 30 年来钢产量比较稳定。

2. 循环经济中物质的中循环问题

物质的中循环问题是指工业生产中下游工业的废物，重返上游工业，重新处理使用。例如，机械工业的切屑返回冶金工业，重新进行熔炼，这样可以提高资源效率和环境效率。扩展来说，如工厂的废物、余能不送往上游工业，而是送往其他工业加以利用，这就是中循环，也就是“生态工业园”的基本思想（图 11-4）。中循环可使资源和能源在各企业之间形成互补的格局。

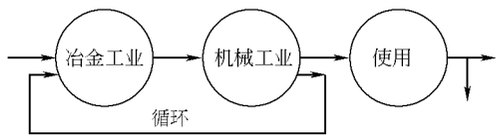


图 11-4　中循环示意

① “工业生态园”，如果现有 A、B、C 三家企业，生产的产品使用后都无法收回，而三家企业之间可形成资源、能源的互补格局，那么 A、B、C 三家即形成了生态工业园（图 11-5）。

② 如果在生态工业园中有些企业生产的产品使用后可以回收、加工和处理，这样在生态工业园中，既有中、小循环，又有大循环。例如企业 A、B、C 分别承担企业 A、B、C 产品使用报废后的回收、加工和处理，这样就使工业物质循环接近于闭路循环（图 11-6）。

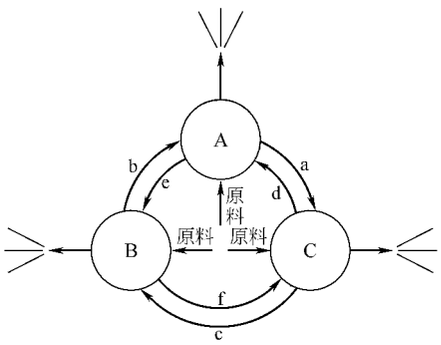


图 11-5　工业生态园示意

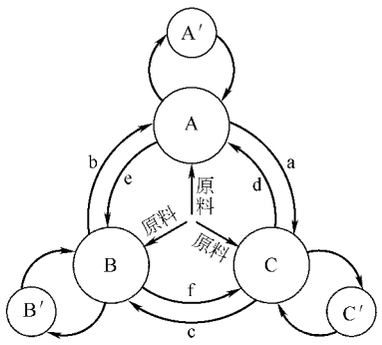


图 11-6　生态工业园示意

3. 循环经济中物质小循环问题

小循环问题是指企业内部的物质循环问题，企业内部的物质循环不仅有利于节约自然资源，而且也有利于改善环境。为了做好企业内部的小循环，必须全面地研究企业内部各生产流程的物流问题，其中包括工序之间的物质循环，包括企业外部之间的物质输入和输出，因为这些物流都是相互关联、相互影响的。

水资源是我国国民经济中最重要的资源之一，所以说水的循环利用尤其重要。提高水的利用率和循环率，是减少水资源的开采、减少污水排放的重要措施。图 11-7 表示我国长江流域各钢铁厂水资源效率和水循环效率之间的关系。

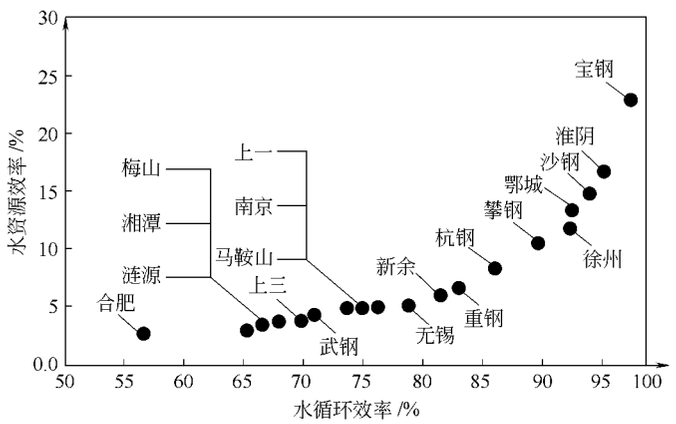


图 11-7　长江流域各钢厂水资源效率和水循环效率之间的关系

第三节　循环经济中的生态学理论

现代社会，国际经济格局正向着全球化、多元化、信息化和生态化发展。经过近 1 个世纪以来科技长足进步、经济腾飞和社会飞速发展的人类社会，正面临着环境问题的严峻挑战。尤其是迅速崛起的发展中国家，强烈的现代化需要，密集的人类开发活动，大规模的基础建设和高物质消耗，高污染的产业发展，给区域性生态系统造成了较为严重的生态危机，这些问题实质是资源代谢在时间、空间尺度上的滞留或枯竭，以及系统耦合在结构、功能关

系上的破碎和板结，社会行为在经济生产和生态关系上的冲突和失调。早期工业化国家环境污染和殖民地生态破坏的沉重代价是我们的子孙后代承受不起的，然而我们有着几千年“天人合一”的中华民族优良的生态传统，走一条非常规的现代化发展之路和开展一场中国式的产业革命、环境革命和文化革命，才能够实现在市场经济条件下的可持续发展之路。

循环经济是按生态经济原理和知识经济规律组织起来的进化型经济，循环经济具有高效的经济过程及整体、协同、循环、自立功能的网络型经济；循环经济通过纵向、横向和区域耦合，将生产、流通、消费、回收、环境保护及能力建设融为一体，使物质、能量多次利用、高效产出，自然资产和生态服务功能正向积累、持续利用，污染负效益变为经济正效益。企业发展的多样性和优势度，开放度与自立度，力度与柔度，速度与稳度达到有机结合；促进传统资源掠夺与环境耗竭型产品经济向新兴的循环经济转型，在促进复合生态理论基础上进行产业重组，见图 11-8。

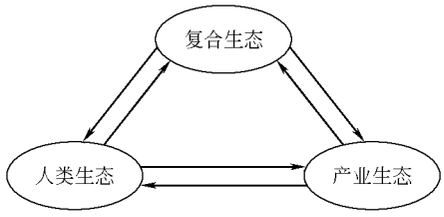


图 11-8　循环经济三大理论支柱

以循环经济为导向的产业生态转型建设需要在技术、体制和文化领域开展一场深刻的革命。产业生态转型的实质是变产品经济为功能经济，变环境投入为生态产出，促进生态资产与经济资产，生态基础建设与生态基础设施，生态服务功能与社会服务功能的平衡与协调发展。它产生两个创新：一是生态效率创新（eco-efficiency），即产品生产工艺改进到更好，以生态和经济上最合理的方式利用增值；二是生态效用创新（eco-effectiveness），即怎样设计生态和经济上更为合理的产品，以最大限度地满足社会的需求。生态产品开发战略管理，包括的内容有：改善材料质量、减少材料消耗、优化工艺流程、优化流通渠道、延长生命周期、减少环境负担、优化废物处置和优化系统功能等（图 11-9）。

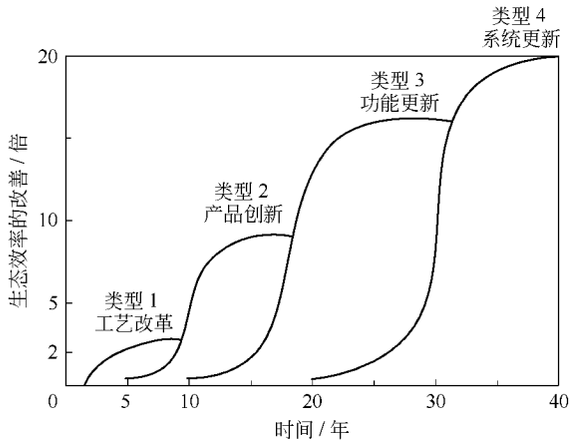


图 11-9　生态产品设计四种类型

1. 循环经济的复合生态系统基础

循环经济的主体从传统小作坊和大工业生产的资源-产品链过程转向以社会-经济-自然复合生态系统为基础的生命周期过程，具有生产、生活、供给、接纳、控制和缓冲的整合功能和比较复杂的人类生态关系。它包括人与自然之间的促进、抑制、建立、改造关系；人对资源的开发、利用、贮存、扬弃关系，以及人类生产和生活活动中的竞争、共生、隶属、乘补关系。我们所说的环境包括人类的栖息劳作环境（包括地理环境、生物环境、城市农村居住及设施环境）、区域生态环境（包括原材料供给的源、产品和废物的汇及缓冲调节的度）、文化环境（包括体制、组织、文化和技术等），它们与作为主体的人类构成了“社会-经济-自然”复合生态系统（图 11-10）。

复合生态系统演变的动力学机制源于自然和社会两种作用力。

自然力的源泉是各种形式的太阳能，它所流经系统的结果是导致各种物理、化学、生物

过程和自然变迁，特别是从个体、种群、群落等生态系统等不同生物组织的系统变化。而社会力的源泉有三个：一是经济杠杆，即资金；二是社会杠杆，即权利；三是文化杠杆，即精神。资金刺激竞争，权利推动共生，而精神孕育自由，三者相辅相成构成社会系统的原动力。自然力和社会力的耦合、控制导致不同层次复合生态系统具有特殊的运动规律。

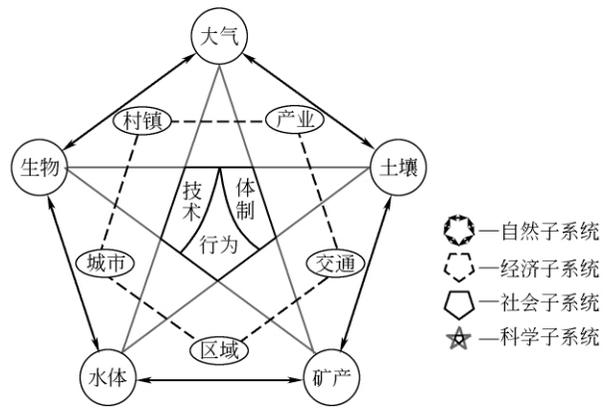


图 11-10　社会-经济-自然复合生态系统关系示意

复合生态系统的行为遵循生态控制规律。有人通过对中国几千年人类生态哲学研究总结了生态控制论原理，即①开拓适应原理；②竞争共生原理；③连锁反馈原理；④循环再生原理；⑤多样性主导原理；⑥生态发育原理。

竞争是促进生态系统僵化的一种正反馈机制，它就是社会发展中的市场经济体制。它强调发展的效率、力度和速度，强调资源的合理利用，潜力的充分发挥。倡导优胜劣汰，鼓励开拓进取。竞争是社会进化中的一种生命力。

共生是维持生态系统稳定的一种反馈机制。它强调发展的整体性、平稳性与和谐性；注意协调局部利益与整体利益，眼前利益与长远利益，经济建设与环境保护、物质文明与精神文明的相互关系；强调体制、法规和规划的权威性，倡导合理共生、协同进步；共生是社会矛盾与社会冲突的缓冲力和磨合剂。

自生是一切生物的生存本能，是生态系统适应环境变化的一种调节能力。我们的祖先早在 3000 年以前就形成了一套鲜为人知的“观乎天文以察时变，观乎人文以成天下”的人类生态理论体系。在中国历史上，历代社会的发展正是靠着对这些“天时、地利、人和”的关系的正确认识；靠着阴阳伦常、五行相通、和谐辩证及修身养性、自我调节的生态观。3000 多年的稳定社会结构和生态系统，养活了占世界 1/4 的人口，使中华民族在高强度的人类活动、频繁的自然灾害、脆弱的生态环境下得到自我维持，经久不衰。

循环经济就是集传统文化与现代技术为一身，吸收东西方经济发展的经验与教训，综合现代产业革命、社会革命与环境革命，以生态建设模式去促进竞争、共生和自生机制的完美结合，其目的是促进一种环境合理、经济高效、系统和谐的发展模式。

循环经济理论的核心在于生态综合，它不同于传统分析方法之处在于将整体论与还原论、定量分析与定性分析、客观评价与主管感受、内禀的竞争潜力和系统的共生能力相结合；强调物质、能量和信息三者的综合；强调竞争、共生和自生能力的综合；强调生产、消费与还原功能的协调，强调社会、经济与环境目标的耦合；强调时、空、量、构与序的统筹，强调科学、哲学与工程力学的联姻。

2. 循环经济建设的灵魂——生态文化

生态文化是循环经济建设的灵魂。当今世界，人对地球世界的控制能力已达到登峰造极的地步。人类似乎可以全面脱离自然、控制自然、改造自然。但是，人们庆贺征服大自然胜利的时候却惊奇地发现自然生态与人类生态的惊人退化。随着生物多样性的减少，全球环境的破坏，自然灾害的频发，淡水资源的减少以及土壤的沙漠化、盐渍化的加剧，自然生态系

统为人类生存与发展提供的服务功能越来越弱。随着高度现代化提供给人们的物质享受水平的提高，化石能代替了自然能，人工控制代替了自然调节，某些人群离开了电、离开了自来水、离开了高耗能的基础设施和服务体系，各种生活就会瘫痪，现代化城市就要崩溃。

东方“天人合一”的自然观，简朴和谐的消费方式和整体、协调、循环、自生的生态控制论手段，是中国发展循环经济的一种宝贵的生态财富。循环经济建设就是要把这种生态观与现代科学技术相结合，摸索出一条非传统的现代化道路。其核心是如何影响人的价值取向、行为模式，诱导一种健康、文明的生产消费方式，即生态文化。

生态文化是人与社会和谐共处、持续共生、稳定发展的文化，它包括体制文化、认知文化、物质文化和心态文化。自然的人化加上社会的自然化就是生态文化。从神本文化、人本文化到生态文化，是人类社会发展的必然结果。生态文化建设应包括以下内容，即“天人关系的认知”，“人类行为的规范”以及“社会经济体制”，“生产、生活消费行为”，“天人关系的物态产品、心态产品”以及“生态保健方法”的建设和规范。

生态文化不是返朴文化，它在扬弃当今工业文化弊病的同时要强调发展的力度、速度、资源利用的效率和效益，强调竞争、共生与自生机制，强调人类文明的连续性。

生态文明建设的总目标应该是，改革不合理的管理机制，培育可持续发展的运行机制，使生态文化在客观上逐步影响和诱导决策管理行为和社会机构，在微观上逐渐诱导人们的价值取向，即从金钱、功利取向转向社会的富足、健康和文明；生产方式从产品导向转向功能导向；矿物能源转向可再生能源，资源掠夺型转向保育再生型；在消费行为上从高能耗、高消费、负影响向低能耗、适度消费、正影响过度，促进社会从“物”的现代化向“天人合一”的现代化转变，塑造新型的企业文化、社区文化和“全社会的生态文化”。

总之，循环经济建设的实质是通过生态规划、生态工程和生态管理，将单一的生物环节、物理环节、经济环节和社会环节组成一个有较强生命力的生态经济系统；运用生态学的竞争、共生、再生和自生原理调节系统，使得资源得以高效利用，达到人与自然的和谐共生。

循环经济的宗旨在于通过生态体制、生态技术和生态文化的复合规划、建设与管理、孵化一批经济高效、环境和谐、社会适用的生态产业技术，诱导一种整体、和谐、循环、自生的融传统文化和现代技术为一体的生态文明，建设一批人与自然和谐共生的殷实、健康、文明的生态经济特区，进而实现人与社会、人与自然的和谐共生。

第四节 循环经济发展的实践

一、循环经济发展的实践

从循环经济发展的实践来看其实现形式有三个层次，即单个企业的清洁生产，企业与企业之间共生形成的生态工业园区，以及整个社会实现物质和能量的循环（称为区域循环经济）；三个层次不同，但却有序衔接。单个企业层面上的循环经济为小循环，即相关企业进行清洁生产，将单位产品的各项消耗和污染物排放量限定在先进标准许可范围之内；企业之间层面上的循环经济为中循环，即工业园区按照生态产业链发展的要求，将一系列彼此关联的生态产业链组合在一起，通过企业和产业间的废物循环利用，减少或杜绝废物的排放；社会层面的循环经济为大循环，即整个国家和社会按照循环经济的要求，制定相关法律和规则，实现清洁生产，资源循环利用。

1. 推行清洁生产——实现企业内部循环经济

清洁生产即从生产的源头，包括产品和工艺设计、原材料使用、生产过程、产品和产品使用寿命结束以后对人体和环境的影响各个环节都采取清洁措施，预防污染的产生或者把污染危害控制在最低限度，概括起来是：低消耗、低污染、高产出。同时，它也是一系列超越传统环境管理“命令-控制”的新的管理方式，倡导生产者不是作环境法律和标准的消极应付者，而是建立起政府和企业在环境保护中的合作伙伴关系。

清洁生产包括以下三方面的内容。

（1）清洁能源　它包括四项内容：①常规能源的清洁利用，例如洁净煤技术；②可再生能源的利用，如水力资源；③新能源的开发，例如太阳能、风能的开发和利用；④节能技术的创新和运用等。

（2）清洁生产过程　清洁生产过程内容有：尽量少用、不用有毒有害原料；生产过程中要尽量采用少废、无废工艺；高效的设备、物料的再循环。

（3）清洁的产品　清洁产品的内容有：产品在使用过程中以及使用后不应对人体健康和生态环境产生不利影响；包装合理，易于回收和再生；产品报废后易处理、易降解，具有合理使用功能和使用寿命。

总之，清洁生产应符合循环经济理念。

2. 构建生态工业园——实现企业之间的循环经济

生态工业园区是依据循环经济理念和工业生态学原理设计建立的一种新型工业组织形态，它是以工业生态学及循环经济理论为指导的，生产发展、资源利用和环境保护形成良性循环的工业园区的建设模式，是一个高效、稳定、协调、可持续发展的人工复合生态系统。它是高新技术开发区的升级和发展趋势，体现了新型工业化特征及实现可持续发展的战略要求。

生态型工业园具有高效益的转换系统、高效率的支持系统、高水平的环境质量、多功能的绿地系统、高质量的人文环境系统、高效益的管理系统。例如较为典型的是丹麦的“卡伦堡生态工业园”，它以发电、炼油、制药厂和石膏板厂为核心工业，电厂给制药厂供应高温蒸汽，给居民供热，给蔬菜大棚供应中低温循环热水，生产绿色蔬菜，其余热则供到养鱼池中养鱼，实现热能的多级使用。同样，粉煤灰用于生产水泥和筑路，脱硫石膏用来造石膏板等。通过企业间的工业共生和代谢的生态关系，建立了“纸浆→造纸”、“肥料→水泥”和“炼钢→肥料→水泥”等工业联合体，既降低了污染治理的费用，也取得了相当可观的经济效益。

3. 以整个社会进行物质和能量的循环使用——实现社会区域经济的大循环

以整个社会循环的角度出发，大力发展绿色产业、绿色消费和资源回收产业；把清洁生产同绿色消费和资源的回收利用结合起来，实现消费过程和消费后物质和能量的循环。德国的双元系统模式是社会层面上实施循环经济的代表，它的双轨制回收系统（DSD）是把“废物”与“资源利用厂”联系起来，做到物质的循环利用。

二、循环经济的技术支撑

循环经济需要强有力的技术支撑，这种技术支撑是以清洁生产技术和废物资源化技术为主要内容的环境保护技术载体。

1. 清洁生产技术

清洁生产技术是指在生产过程中实现无废少废的生产技术；清洁生产技术通过改变既有

的生产系统和工艺，实现生产过程废物的零排放或者少排放。清洁生产包括两个方面内容：①生产过程实现清洁生产，达到少污染或无污染；②生产的产品在使用完毕后，对环境不产生污染。

2. 污染治理技术

污染治理技术，即环境工程技术，主要是通过废物（废水、废气、废渣）净化处理装置来消除污染物，实现有毒有害废物的末端治理。这些治理的技术主要有大气污染治理技术，水污染治理技术，固体废物和噪声污染治理技术等。

3. 废物资源化技术

废物资源化技术是指对废物进行资源化处理的技术，即通过回收、筛选、加工和转换，把废物变为某些企业和产品的资源，实现循环经济的再利用原则。

第十二章　循环经济与“绿色国民经济核算体系——绿色 GDP”

第一节　经济总量指标

一个国家的经济总量有多种指标，如国内生产总值和国民生产总值等；它是反映一个国家总的经济成果和生产能力，衡量经济政策效果，分析经济行为的一个全面性的尺度；它在国民经济统计和国民经济核算中占有非常重要的地位。

一、国内生产总值

1. 国内生产总值的定义

国内生产总值（GDP，gross domestic product）是指一个国家（或地区）在一定时期内所生产和提供产品服务的总价值；它是综合性经济总量指标中的核心指标，是反映一个国家或地区的生产规模及综合实力的重要的总量指标；它是一个综合性的经济总量，是对最终产品的统计。在某些地区，例如香港特别行政区，国内生产总值被称为“本地区生产总值”。

（1）国内生产总值是一个综合性的经济总量　国内生产总值的统计范围包括产品和服务，采取了综合性生产观。产品是指对其有某种社会需求，而且能够确定其所有权的有形实体；服务是指生产者按照消费者的需求进行活动而实现的消费单位状况的变化。与产品相比，服务最大的特点是具有不可储存性和消费的同时性。

国内生产总值在统计过程中，它所认定的生产是指生产者利用投入生产和产出的活动，即国内生产总值基本上采用经济生产的概念，在政府机构和企业机构单位控制和负责下，利用劳动、资本、产品和服务的投入进行产品的生产和服务的活动。

所以说国内生产总值的统计范围是以广义的生产概念为基础，这是其最显著的特点。

（2）国内生产总值是对最终产品的统计　在国内生产总值统计中，为避免重复计算，提出了最终产品的概念。所谓最终产品是指本期生产，本期不再加工，可提供社会最终使用的产品；而相对于最终产品的中间产品，是指本期生产，但在本期仍需进一步加工的产品。最终产品与中间产品共同组成了总产品。

国内生产总值是最终产品的价值总和，所以国内生产总值衡量的是本期内新创造的价值，不包含中间消耗的部分。但有时确定一个产品的最终产品属性却很困难，因为有些产品同时具有中间产品和最终产品的双重属性。对如何确定某产品是否是最终产品，只能以价值构成的角度分析，即通过对每一生产环节的“增加性”加总的方法来估计最终产品的总量。

2. 国内生产总值的形态与计算

国内生产总值（GDP）有三种不同的表现形态，即价值形态、产品形态和收入形态。

（1）价值形态　即 GDP 表现为一个国家所有常住单位在一定时期内生产的全部货物和服务价值与同期投入的中间产品的价值的差额，即所有常住单位的增加值之和。

（2）产品形态　从产品形态来看，GDP 表现为所有最终产品的价值之和，这里的产品包括有形货物，也包括无形的服务；而最终产品是指那些不再被用于生产过程或虽被用于生产过程，但不会被一次性消耗或一次性转移到新产品中去的产品。

（3）收入形态 从收入形态上讲，GDP 表现为一个国家的所有常住单位在一定时期内直接创造的原始收入之和，包括常住单位因从事生产活动而对劳动要素的支付，对政府的支付，对固定资产的价值补偿，以及获得的盈余。

对 GDP 的计算是基于“三方等价原则”，即社会产品的生产、分配和使用的总量应该是恒等或平衡的；从不同角度去计量，就产生了不同的 GDP 的计算方法，即生产法、分配法、支出法。

① 生产法。生产法是从生产的角度计算 GDP，计算的基本公式为

GDP＝各部门所增加的价值之和＝各部门的总产出价值－各部门中间消耗的价值

② 分配法。分配法也称收入法，在收入法中主要有四部分收入，其基本公式为

GDP＝劳动者报酬＋固定资产折旧＋生产的进口税净额＋营业盈利

③ 支出法。支出法称最终使用法，是将全社会最终使用的支出汇总起来求得 GDP 的一种方法，其基本公式为

GDP＝全社会总消费＋资本形式总额(总投资)＋货物和服务净出口

3. 国内生产总值的作用

GDP 是目前世界通行的国民经济核算体系指标，它已经成为一个国家发展程度的唯一标准。国内生产总值指标的核心作用主要表现在：

① 国内生产总值（GDP）指标能综合反映国民经济活动的总量，表明国民经济发展全貌，而且能够反映这个国家的产业结构；

② 国内生产总值（GDP）指标是衡量国民经济发展规模、速度的基本指标；

③ 国内生产总值（GDP）指标是分析经济结构和宏观经济效应的基础数据；

④ 国内生产总值（GDP）指标有利于分析、研究社会最终产品和服务的生产、分配和最终使用情况，能够比较全面地反映国家、企业和居民个人三者之间的分配关系。

总而言之，国内生产总值（GDP）是经济总量的核心指标，其核心地位表现在：只有计算了国内生产总值指标，才能进行投入产出核算、资金流量核算、资金负债核算，以及国际收支核算；从另一方面讲，国内生产总值的统计是计算其他国民经济总量指标的条件，它是国民经济总量所有指标计算的前提。

二、国民生产总值与国民总收入

国民经济总量指标中，除了国内生产总值外，还有较为重要的是国民生产总值，即国总收入。

1. 国民生产总值

国民生产总值（GNP，gross national product）是反映国家常住单位全部收入（包括国内和国外）的指标，是一定时期内本国的生产要素所有占有者所占有的最终产品（货物）和服务的总价值。

随着国际经济交流的扩大，经济活动主体的跨国流动性也就增大，本国的常住居民可能到国外从事经济活动，而国外非常住居民也可能到本国来从事经济活动。这些活动会引起本国收入相应的变化，即本国人有可能从国外获得某种要素的收入，而国外单位也可以从国内获得某种收益。如何核算这些经济活动显然已超出国内生产总值的统计范围，需要设立另外的指标，即国民生产总值。

在 20 世纪 90 年代以前，国际上很多国家，如中国、美国等把国民生产总值作为经济统计的核心指标。但是到底采用国民生产总值还是国内生产总值作为统计核心指标的争论很

多，直到 20 世纪 90 年代初，国际上才就国内生产总值在统计中作为核心指标的地位达成了共识。中国在 1993 年以前是以国民生产总值为核心指标，到 1994 年才以国内生产总值取代国民生产总值成为统计年鉴的首要指标。美国在 1991 年 11 月以前，是以国民生产总值为基本指标，在这之后，才转向以国内生产总值作为核心指标。

2. 国民生产总值与国民总收入

国民生产总值是一个收入指标，1993 年联合国统计委员会通过国民经济核算体系的修订稿，正式提出国民总收入（GNI，gross national income）的概念，强调以国民总收入代替原来的国民生产总值的概念。

三、国民经济总量统计的其他指标

一个国家的国民经济总量统计中，国内生产总值是一个核心指标，但是仅有这一个指标还是不够的，为了更完整地反映国民经济总体的各个方面，还要其他一些计算分析总量的指标。这些指标包括：国民生产净值、国民净收入、国民可支配总收入及国民可支配净收入等。

1. 国内生产净值

国内生产净值（NDP，net domestic product）是指从国内生产总值中扣除固定资本消耗以后净增加值，所有国内净增价值之和就是国内生产净值。由于国内生产总值是常住单位的增加值之和，而增加值是由总产出减去中间消耗计算出来的，而中间的消耗并不包括资本的消耗，即固定资本消耗（折旧），所以国内生产总值所指的增加值是指总增加值，而真实的增加值应该用国内生产净值分析。

2. 国民净收入

国民净收入（NNI，net national income），同样是由国民总收入减去固定资本消耗以后的余额来表示。

3. 国民可支配总收入

国民可支配总收入（GNDI，gross national disposable income），是指全国可以最终支配，用作消费和积累的全部收入。

国民总收入和国民净收入还不是常住单位最终用于消费和储蓄的全部收入来源，它们只是国民经济成果初次分配的结果，只有经过再分配的过程，才能形成常住单位最终的可支配收入，以形成最终消费和总储蓄，最终消费和总储蓄就是国民可支配总收入。

在国民收入的再分配过程中，涉及到一些转移支付问题，这些转移支付有一部分可能是在常住单位和非常住单位之间进行的，这种转移会影响一国常住单位的最终消费和总储蓄，也就是说会影响国民可支配收入。

4. 国民可支配净收入

国民可支配净收入（NNDI，net national disposable income），也是由国民可支配总收入减去固定资产消耗的余额来表示的。

第二节　绿色 GDP——绿色国内生产总值

一、国内生产总值的局限性

GDP 经济总量指标是衡量所有国家与地区的经济表现的一把尺，是 300 多年来诸多经济学家、统计学家共同努力的成果。20 世纪 50 年代国内生产总值初步成型，此后于 1968 年和 1993 年在联合国的主持下，对国内生产总值统计上的技术缺陷进行了两次重大修改。

但是现行的国内生产总值核算体系仍然存在缺陷，这些缺陷表现在：GDP 不能反映经济发展对资源与环境造成的负面影响；GDP 不能准确地反映一个国家财富的变化；GDP 不能反映某些重要的非市场经济活动；GDP 不能全面地反映人们的福利状况。GDP 的局限性最主要地表现在实现可持续发展战略方面的缺陷。

人类已经清楚地认识到，经济产出总量增加的过程，必然是自然资源消耗增加的过程，也是环境污染和生态破坏的过程。国内生产总值反映了经济的发展，但是没有反映经济发展对资源利用和对环境所带来的质量的影响；国内生产总值它仅仅反映经济增长的数量，而在衡量经济总值的质量方面有比较大的缺陷。因为环境污染和生态破坏也会增加国内生产总值；而现行的国内生产总值核算体系对人类经济活动的外部不经济性不予考虑，由于没有将环境和生态因素纳入其中，所以在经济发展中，反映不出环境和生态的成本有多大，由此使得国内生产总值核算体系不能全面反映国家客观的经济情况。GDP 是单纯的经济增长数量的概念，它只能反映出国民经济收入总量，它没有统计环境污染、生态破坏，以及没有反映经济增长的可持续性。

美国著名经济学家萨谬尔森提出纯经济福利（净经济福利）的概念，他认为福利更多地取决于消费而不是生产。纯经济福利是在国内生产总值的基础上，减去对福利有负作用的项目，如环境污染、生态破坏和都市化的影响。同时萨谬尔森认为纯经济福利还要减去那些不能对福利做出贡献而没有计入在内的项目，还要加上闲暇的价值等。据有关资料显示：印度尼西亚 1971 年到 1984 年 GDP 增长率为 7.1%，除去石油耗损、木材减少、水土流失后年均增长率只有 4%；日本 1973 年 GDP 增长率为 8.5%，扣除污染后年增长率只有 5.8%；澳大利亚 1950 年至 1996 年 GDP 增长率只有官方公布的 70%。

二、绿色 GDP 的提出

1. 绿色 GDP 的概念

20 世纪中叶，随着环境保护运动的发展和可持续观念的兴起，世界上经济学家和统计学家尝试将环境要素纳入国民经济核算体系，以发展新的国民经济核算体系，即绿色 GDP。

绿色 GDP（常被缩写为 GGDP）即为绿色国内生产总值，是对 GDP 指标进行有关调整后用以衡量一个国家财富的总量核算指标。简而言之，绿色 GDP 就是从现行统计的 GDP 中扣除环境成本（包括环境污染、自然资源退化等）因素引起的经济损失成本，从而得出较为客观真实的国民财富总量。

所以说，绿色 GDP 是指在不减少现有资本资产水平的前提下，一个国家（或地区）所有常住单位在一定时期内所产生的全部最终产品和劳务价值总额；或者说是在不减少现有资本资产水平的前提下，所有常住单位的增加值之和。这里的资本资产实质上是指自然资本和资产，如矿产、森林、土地等自然资源，以及水、大气、地球等环境资源。

绿色 GDP 不仅能反映经济增长水平，而且能够体现经济增长与环境保护和谐统一的程度，还可以比较好地反映可持续发展的理念和思想。一般来讲，绿色 GDP 占 GDP 的比重越高，表明国民经济增长的正面效应越高，其负面效应就越低。

目前世界上许多国家都研究绿色 GDP，而且有些国家开始试行绿色 GDP。挪威早在 1981 年首次公布并出版了《自然资源核算》报告和刊物；美国也于 1992 年开始从事自然资源卫星核算方面的工作；荷兰建立和发表了以实物单位编制的 1989～1991 年期间年度的国民经济核算矩阵（包括环境核算在内）。他们对传统的国民经济体系进行了修正，从 GDP 中扣除了自然资源耗减价值与环境污染损失价值。虽然如此，但是迄今为止，全世界还没有一

套公认的绿色 GDP 核算模式，也还没有一个国家以政府名义发布“绿色 GDP 报告”。为此，世界上有识之士都在努力研究。

2. 绿色 GDP 计算公式

绿色 GDP 核算可在 GDP 核算的基础上，通过相应的环境调整而得到。简而言之，绿色 GDP 就是从 GDP 中扣除自然资源耗减价值与环境退化（污染）损失价值后的价值，即

绿色 GDP＝GDP－自然资源耗减价值－环境污染所造成的损失价值

更广义地说，绿色 GDP 不但应扣除自然资源耗减价值与环境退化（污染损失的价值）后的价值，还应扣除预防支出、恢复支出，以及调整费用，即

绿色 GDP＝GDP－自然资源耗减价值－环境污染所造成的损失价值－（预防支出＋恢复支出＋调整费用）

实际上，绿色 GDP 核算是在 GDP 核算的基础上，通过相应的调整而得到的。这种调整包括扣除：本时期自然资源耗减和环境退化货币价值的和；本时期环境损害预防费用支出（预防支出）；本时期资源环境恢复费用支出（恢复支出）；本时期因非优化利用资源而进行调整计算的部分。

绿色 GDP 不仅能够反映经济增长水平，而且能够体现经济增长与自然保护和谐统一的程度。如果绿色 GDP 占 GDP 比重越高，则国民经济增长对自然的负面效应就越低，经济增长与自然保护和谐度就越高，反之亦然。

如果以“人均绿色 GDP”来表示，则“人均绿色 GDP”更能体现以人为本的经济增长与自然保护和谐统一的程度。

绿色 GDP 的计算公式也可以表示为

绿色 GDP＝GDP－生产中使用的非生产自然资产值

生产中使用的非生产自然资产＝经济资产中的非生产自然资产耗减＋环境中非生产自然资产降级

（1）自然资产　指所有者在一定时期内，对它们具有所有权，能有效使用、持有或处置，并可从中获得经济利益的经济资源。自然资产可分为生产性自然资产和非生产性自然资产，其中，所有权已经界定，所有者能够有效控制并可从中获得预期经济效益的自然资源称为生产性自然资产。

（2）非生产性自然资产　指不属于具体单位，或者即使属于某个具体单位，但并不在其有效控制下，或者不经过生产活动也具有经济价值的自然资产。具体地讲，非生产性自然资产是未经过生产活动具有经济价值的资产，如土地、水源、原始森林、地下矿藏等。同时那些能在可预见的将来获得经济利益的，不经过生产过程的自然资源，如空气、公海海域资源，非培育生物中的不能为人类控制的野生动植物，以及在可预见的将来不具有商业开发价值的地下矿产等，都不能视为经济资产，而是属于非经济资产的自然资源。

（3）自然资源耗减　指在人类生产活动中使用和消费的自然资源，即自然资源减少，也就是自然资产耗减。

（4）环境降级　指由于环境质量恶化引起的经济损失，环境降级部分包括空气污染、水污染、噪声污染及废物污染等。

3. 实施绿色 GDP 尚需解决的问题

（1）绿色 GDP 核算问题所存在的困难　绿色 GDP 核算目前还存在相当大的困难，存在许多重大的技术方面的难题。

① 自然资产的产权界定及市场定价比较困难。许多自然资产同时具有生产性和非生产性资产的属性，因此其产权界定非常困难。如何界定自然资产产权并对其合理定价，一直是绿色 GDP 核算研究领域的一个主要难点，也是绿色国民经济核算不能取得实质性进展的一个重要原因。

② 环境成本的计算和计量比较难以处理。环境成本是指某一主体在其可持续发展过程中，因进行经济活动或其他活动，而造成的资源耗减成本、环境降级成本以及管理其活动对环境造成的影响而支出的防治成本的总和。环境成本计量是绿色 GDP 核算的基础，确定环境成本的概念比较容易，而真正实现环境成本的计量却是比较困难的。

③ 进行市场定价比较困难。绿色 GDP 与 GDP 不一样，GDP 有一个客观标准，即市场交易标准，所有的交易都有市场公认的价格。买卖双方认可的价格是客观存在的，但是绿色 GDP 对资源耗费估计没有标准，不同的人得出的结论是不同的，所以提供一个比较科学的，让大家都认可的绿色 GDP 的数据相当困难，因此说这方面的工作还是相当艰巨和复杂的，还有一段路是要走的。

（2）绿色 GDP 的某些局限性　绿色 GDP 概念的提出是重要的，但并不是绿色 GDP 可以解决可持续发展的所有问题。因为绿色 GDP 只能反映经济与环境之间的部分影响，而并没有反映经济与社会，环境与社会之间的相互影响，所以绿色 GDP 只是可持续发展的指标之一。

英国的一个智囊组织提出了一个新的国内经济发展指标（MDP，measure of domestic progress），来衡量一个国家和地区在经济、社会和环境等多方面的协调发展。MDP 比 GDP 和绿色 GDP 考虑的因素更多，例如犯罪率、政府投资能源消耗和污染等多种因素。MDP 能更好地反映人们在生活质量方面的发展，因为它考虑了经济增长带来的社会和环境成本，以及一些不拿报酬的工作，例如家务劳动和义工等。

还有一些学者提出了要实现三个 GDP 的协调增长。实现三个 GDP 的协调增长就是要树立全新的发展观，既要重视经济的高速增长（用经济 GDP 衡量），更要注重社会的可持续发展（用绿色 GDP 衡量），也要强调人的自身健康和全面发展（用人文 GDP 衡量）。人文 GDP 是为了保障人的全面发展投入财富的增长指标，包括文化教育、医疗卫生、体育娱乐等多方面。人文 GDP 是经济 GDP 和绿色 GDP 的保证，是科学发展观的重要内容之一。推进三个 GDP 的协调增长，才能树立起既重视增长，又重视发展的思维模式，促进经济、自然环境和人文社会的协调发展。

因此，理想 GDP 应该是在不减少现有资本资产水平的前提下，一个国家或地区所有常住单位在一定时期内所产生的全部最终产品和劳务的价值总额。应该知道，资本资产是一个非常广义的概念，它不但包括人造资本资产（如建筑物、机械设备、运输工具等），也包括人力资本资产（如知识和技术等），还包括自然资本资产（如矿产、森林、土地、水资源及大气资源），以及社会资本资产（如经济体制、社会制度及民俗文化等）。此外，国际上还有一个标准，叫国民幸福总值（GNH，gross national happiness）。国际学术界的研究表明：GDP 不能衡量的很多东西，其中就包括幸福。一般说来，经济增长确实能够给人民带来幸福感，但两者之间的关系非常复杂，绝不是简单的正相关关系。首先在经济发展水平很低的情况下，增加收入能够带来一定的满足和“幸福”，但是，当人均 GDP 达到一定的水平后，例如 3000～5000 美元以后，满足和“幸福”效应就开始递减。原因是，一方面收入提高后，人们的期望也在提高，幸福感在一定程度上被抵消；另一方面，环保是公共物品，由于环境

污染给社会的负外部效应，而环境保护给社会带来的正外部效应，以及环境资源的公共性等特征，所以环境资源的配置位置存在着“市场失灵”，在市场条件下，人人都选择多盈利、多赚钱、多消费、多污染，当污染加重以后，人人都不快乐。因此，当经济得到一定发展之后，如果不加强环境保护，不走可持续发展的道路，那么 GDP 虽然也在增长，但是人民“不快乐”和“不幸福”的指数也会增加！

GNH 最早是由不丹国王日热未·辛那·旺查克提出的，GNH 实际上在提醒人们重新思考在国民生活中，什么才是真正重要的，一个国家的国民经济成功与否，是根据其生产和消费能力来判断呢，还是根据国民的生活质量来判断呢？如果说 GDP 所体现的是以生产和物质为本的话，那么 GNH 所体现的则是以人为本的。

GNH 的标准可由四个方面来组成：政府善治，经济增长，文化发展，环境保护。如果经济的增长给社会、人民和环境带来的是正效应，那么这种经济的增长将是好的，应该受到鼓励！

第三节　绿色国民经济核算体系

一、国民经济核算体系（SNA）

国民经济核算体系是对国民经济运行状况的反映，它所提供的信息是宏观经济决策和分析研究的依据，它又是搞好宏观经济管理的前提和工具。

SNA 是国民账户体系（system of national accounts）的简称。西方市场经济国家国民经济核算体系是由国民收入发展而来的。最早的国民收入统计，可以追溯到 17 世纪，美国经济学家威廉·佩第在世界上首次进行国民收入活动以后，各国统计学家和经济学家经过 300 多年的积极探索与反复实践，于 1953 年正式公布了由联合国组织而成的《国民经济核算体系及其辅助表》（俗称 1953SNA 或旧 SNA），从而标志着 SNA 的正式诞生。

1929～1933 年世界性经济危机的发生导致了凯恩斯宏观经济理论的产生和广泛传播，使国民经济统计在 20 世纪 20 年代取得了巨大发展。

20 世纪 60 年代以后，在核算体系研究方面陆续出现了各分支，1968 年联合国又公布了包括国民收入核算、投入产出核算、国际收入核算、资金流量核算、国民资产负债核算在内的新国民经济核算体系，即新 SNA。

但新 SNA 存在一个问题，即形式完美但难以操作。在联合国等五大组织的共同努力下，最终形成了 1993 年的 SNA。1993 年的 SNA 与其他国际统计标准更加协调，更加适合不同发展阶段的国家使用。

传统的国民经济核算体系 SNA 不符合可持续发展的思想分析，存在明显的缺陷，主要表现在忽视对环境资源的核算，忽视对社会因素的核算，以及忽视对科技因素的核算；传统的 SNA 只记录人造资本的消耗，却将人类经济活动过程中所消耗的环境与自然资源视为投入成本；传统 SNA 未能将环境和自然资源真正纳入国民资产负债核算中；传统 SNA 在进行 GDP 核算时，对环境保护和环境破坏的处理方式存在着矛盾，例如恢复环境而发生的支出或污染处理费用，被有关主体作为其对 GDP 的贡献而计入产出成果之中，而对那些未经处理，或处理不完全的直接排入环境中的污染损失却不予扣除，由企业支出的内部环境保护费用作为成本从企业增加值中扣除，而由政府和居民个人所支付的外部的环境保护费用却反而计入了 GDP 中。

近十多年来，许多经济学家研究发展了“真实储蓄（genuine saving）”理论，用“真实

储蓄”判断社会经济可持续发展的趋势。所谓“真实储蓄”就是每一年期末和期初广义资本存量的变化。真实储蓄与当年国内生产总值的比值，称为“真实储蓄率”，真实储蓄与可持续性之间有着对应关系，即如果一个社会的真实储蓄小于零，则社会的经济发展处于不可持续状态。真实储蓄的含义是：持续负增长最终必将导致财富的减少，可持续发展就是一个创造财富和维持财富的过程。

真实储蓄以传统国民经济核算体系 SNA 为基础，建立并扩展了传统资本的概念，将自然资本、人力资本纳入资本的范畴，构成广义资本（包括人力资本、人造资本和自然资本）。世界银行声明：自然资源、环境价值、人力资源和社会资本一样都能再投资，同样也可能过度使用，在理论上存在折旧的可能。真实储蓄不仅要反映经济交易所引起的财富变动，还要考虑资源和环境被用于经济活动影响所付出的代价，真实储蓄要求对环境资产贬值进行货币化估值。目前全世界 103 个国家和地区采用“真实储蓄”用于可持续发展的评估方法。

二、中国国民经济核算体系的发展概况

中国开展绿色国民经济核算的研究工作始于 20 世纪 80 年代，通过一系列重大课题的研究与实践，中国绿色国民核算体系的构建研究已具有一定的基础。国家环保总局与国家统计局关于环境与资源核算方面做了许多研究与试点工作。

（1）国家环保总局的研究课题

①20 世纪 80 年代中国环境科学研究院开展了“全国环境污染损失和生态破坏损失的评估”；②1990 年完成了《中国典型生态区生态破坏经济损失及其计算方法》的研究；③1998 年与世界银行合作，采用世界银行“真实储蓄率”的概念，开展了真实储蓄率的核算，并在山东烟台和福建三明两个城市进行了试点；④2000 年开始与世界银行合作，开展了中国环境污染损失评估方法研究；⑤2003 年开始与国家信息中心合作，开展了建立中长期环境经济模拟系统及编制环境经济投入产出核算表研究；⑥2004 年，开展国家“十五”科技攻关课题《绿色国民经济核算体系框架研究》；⑦国家环保总局已于 2004 年开展全国环境污染损失评估调查，为本项工作提供很好的基础与平台。

（2）国家统计局组织的重要的研究课题　国家统计局作为“国民经济核算中心”，在绿色 GDP 的研究方面做了许多研究工作。①在制定《中国国民经济核算体系 2002》中设置了附属账户——自然资源实物量核算表，制定了核算方案；试编了 2002 年全国土地、森林、矿产、水资源实物量表。②与挪威统计局合作，编制了 1987 年、1995 年和 1997 年中国能源生产和使用账户；测算了我国二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、甲烷、颗粒物等八种大气污染物的排放量，并利用可计算的一般均衡模型分析、预测了未来 20 年中国能源使用、大气排放的趋势。③在黑龙江、海南和重庆市进行森林、水、工业污染损失等项目的核算试点。④与国家林业局、中国林科院、北京林业大学合作，已正式启动了“中国森林资源核算及纳入绿色 GDP 研究工作”。⑤与国家环保总局合作，正式启动了“将环境污染损失核算纳入绿色 GDP 研究”的工作。⑥在 2004 年 3 月发布了《中华人民共和国 2003 年国民经济和社会发展统计公报》第十一部分，单列一个指标体系，在公布全年社会经济发展情况的同时，把能源和重要原材料消耗、环境质量、生态状况等相关指标公诸于众。

从这里可以看出我国经济增长中，环境、资源、生态等方面取得的进展或付出的代价。

必须看到，建立绿色国民经济核算体系是一项长期的艰巨的工作。联合国发布的《环境与经济综合核算手册（SEEA）2003》文件中就多次指出，建立绿色国民经济核算体系是一个雄心勃勃的目标，但是在现阶段则是难以完成的。主要是由于环境资源成本估价方法和资

料来源的巨大困难，目前世界上尚无一国完成全面的资源环境核算能够计算出一个完整的绿色 GDP，所以说，绿色国民经济核算体系目前仍在探索和研究。

建立绿色国民经济核算体系对我国来说是刚刚起步和处于尝试阶段，是一项任重道远的工作，是一项长期的、跨部门的、政策性和技术性都很强的系统工程，目前，国家统计局和国家环保总局已经联合开展了这项工作。

与此同时，国内一些省市也在积极开展研究工作，如山西省社会科学院经过半年多的努力，核算出山西省 2002 年的绿色 GDP 占全部 GDP 的 66.6%（该省 2002 年 GDP 为 2017 亿元，绿色 GDP 为 1343.07 亿元，且山西省每年环境污染损失约占 GDP 的 15%）。

三、国内大核算体系的构建设想

在环境与经济综合核算体系（SEEA）研究发展的同时，一些专家学者提出了研究社会与经济综合核算体系（SSEA）和科技与经济综合核算体系（STEA）。并设想当“环境-经济账户（SEEA）”、“社会-经济账户（SSEA）”和“科技-经济账户（STEA）”的一体化核算技术发展到一定程度以后，一种以可持续发展理论为指导，分析范围更广，功能更为强大的国民核算新模式——国民大核算体系（system of national accounting on large scale，简称 SNALS）的建立就非常必要了。国民大核算体系的研究是对原有国民经济核算研究的重大发展，它涉及到国民经济核算、社会人口核算、科技技术核算与环境生态核算等众多领域，根据可持续发展理论，按照统一标准，可以把不同领域的核算体系有机结合起来，从而形成内容更为丰富、层次更高的可持续发展的核算体系。

参 考 文 献

1 曲格平著．中国环境问题对策．北京：中国环境科学出版社，1987
2 高廷耀，顾国维著．水污染控制工程．北京：高等教育出版社，1985
3 严煦世，赵洪宾著．给水管网理论与计算．北京：中国建筑工业出版社，1986
4 黄渝祥编著．费用-效益分析．上海：同济大学出版社，1987
5 W．金士博著．水环境数学模型．北京：中国建筑工业出版社，1987
6 黄渝祥，邢爱芳编著．工程经济学．上海：同济大学出版社，1985
7 秦麟源著．废水生物处理．上海：同济大学出版社，1989
8 吴庄著．给水排水工程基本建设概预算．上海：同济大学出版社，1991
9 杨钦著．给水外管网的设计与计算．北京：建筑工业出版社，1957
10 严煦世，许建华，曹瑞钰等编著．给水工程基本知识．北京：中国建筑工业出版社，1985
11 陆拥森，马仲文编著．环境评价．上海：同济大学出版社，1991
12 钟契夫，陈锡康著．投入-产出分析．北京：中国财政经济出版社，1986
13 黄仕诚．城市建设经济学．北京：中国建筑工业出版社，1987
14 国家科委，国务院技术经济研究中心．经济评价方法．大连：东北财经大学出版社，1985
15 刘洪亮，韩国刚．中国水环境预测与对策概论．北京：中国环境科学出版社，1988
16 傅国韦，程通声著．水污染控制规划．北京：清华大学出版社，1985
17 张兰生等编著．实用环境经济学．北京：中国文化书院，1988
18 杨贤智，徐景琨编著．环境管理学．北京：高等教育出版社，1990
19 陈锡康，李丙全等著．经济数学方法与模型．北京：中国财政经济出版社，1982
20 傅家骥，张吉平等著．工程师经济分析与决策．北京：中国科学技术出版社，1990
21 邓聚龙著．灰色预测与决策．武汉：华中理工大学出版社，1989
22 ［美］E. S. 布法，J. S. 狄尔著．管理学与运筹学．北京：国防工业出版社，1977
23 韦鹤平编著．最优化技术应用．上海：同济大学出版社，1987
24 张孟威，康德梦．环境问题的数学解法及计算机应用．北京：中国环境科学出版社，1989
25 ［美］L. D. 詹姆斯，R. R. 李著．水资源经济规划学．北京：水利电力出版社，1984
26 ［英］I. H. 西利著．建筑经济学．北京：中国建筑工业出版社，1985
27 Davide James，Muib Jansen，Hans Qpschoor. Economic approaches to environ mental problems. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam，1978
28 Ronald E Miller，Peter D Blair. Input-output analysis. U. S. A. 1985
29 Richard Leromber. The Economics of Natural Resource.
30 Benefield L D，Randall C W. Bvalogical Process Design for Waste-water-Treatment，1980
31 Ayres Robert. Rerources，Environment and Economics. Applications of the Materials/Energy Balance Principle. New York：Wiley Interscience，1978
32 Peter A victor. Pollution：Economy and Environment.
33 ［美］沃西里·里昂惕夫．投入产出经济学．北京：商务印书馆，1988
34 刘天齐．环境保护通论．北京：中国环境科学出版社，1997
35 张象枢，魏国印，李克国．环境经济学．北京：中国环境科学出版社，1994.5
36 王金南．环境经济学．北京：清华大学出版社，1994.5
37 李克国．环境经济学．北京：科学技术文献出版社，1993.7
38 厉以宁，章铮．环境经济学．北京：中国计划出版社，1995
39 张帆．环境与自然资源经济学．上海：上海人民出版社，1998.3
40 ［英］皮尔斯（Pearce，D. W.）等著．世界无末日：经济学、环境与可持续发展．张世秋等译．北京：中国财政经济出版社，1996
41 马中．环境与资源经济学概论．北京：高等教育出版社，2000
42 曲格平．梦想与期待——中国环境保护的过去与未来．北京：中国环境科学出版社，2000.10
43 张坤民．可持续发展论．北京：中国环境科学出版社，1997.3
44 中国大百科全书（环境科学）．北京：中国大百科全书出版社，2002
45 林肇信等．环境保护概论（修订版）．北京：高等教育出版社，1999
46 叶德磊．微观经济学．北京：高等教育出版社，2000

47 蔡继明．微观经济学．北京：人民出版社，2002
48 蔡继明．宏观经济学．北京：人民出版社，2002
49 王金南．环境经济学——理论·方法·政策．北京：中国环境科学出版社，1994
50 董小林等．费用效果分析及其在噪声控制中的运用．西安建筑科技大学学报，2000，32
51 邱东．国民经济统计学．大连：东北财经大学出版社，2001
52 李强．中国国民经济核算体系的建立、变化和完善．统计研究，1998，4
53 韩宝平．循环经济理论的国内外实践．中国矿业大学学报，2003，1
54 解振华．关于循环经济理论与政策的几点思考．环境保护，2004，1
55 Alchian A，Demsetz H. The Property Rights Paradigm. Journal of Economic History，1973，33：16～27
56 Alonso W. Location and Land Use. Cambridge，1964
57 Amelung T. Zur Rettung der tropischen Regenwalder：Eine kritische Bestandsaufnahme der wirtschaftspolitischen Losungsvorschlage. Die Weltwirtschaft，1989，2：152～165
58 Amelung T，Diehl M. Deforestation of Tropical Rain Forests：Economic Causes and Impact on Development，Final Report of a Study Commissioned by Greenpeacee. V. Hamburg，1991
59 Anderson R C，Ostro B. Benefit Analysis and Air Quality Standards，Natural Resources Journal，1983，23：565～575
60 Anderson F R，Kneese A V，Stevenson R，Taylor S. Environmental Improvement through Economic Incentives. Baltimore，Md，1977
61 Anderson C L. The Production Process：Inputs and Wastes. Journal of Environmental Economics and Management，1987，14：1～12
62 Anderson K. Agricultural Trade Liberalization and the Environment：A Global Perspective. The World Economy，1992，15：153～171
63 Anderson K. The Standard Welfare Economics of Policies Affecting Trade and The Environment. In：Anderson K，Blackhurst R. The Greening of World Trade Issues. New York，1992，25～48
64 Anderson K. Effects on the Environment and Welfare of Liberalizing World Trade：The Cases of Coal and Food. In：Anderson K，Blackhurst R. The Greening of World Trade Issuse. New York，1992，145～172
65 Archibugi F. Economy and Ecology. Towards Sustainable Development. Dordrecht，1989
66 d'Arge R C. Economic Growth and Environmental Quality，Swedish Journal of Economics，1971，73：25～41
67 Arnold V. Umweltschutz als internationals offentliches Gut. Komparative Kostenvorteile and Verhandlungsgewinne，Zeitschrift fur Wirtschafts-und Sozialwissen-schaften，1984，104：11～129
68 Arrow K J. Social Choice and Individual Values. New York，1951
69 Arrow K J. Applications of Control Theory to Economic Growth. In：Mathematics of the Decision Sciences. Dantzig G B，Veinott A F. Providence，1968
70 Arrow K J. Essays in the Theory of Risk Bearing. Chicago，1971
71 Arrow K J，Fisher A C Environmental Preservation，Uncertainty and Irreversibility. Quarterly Journal of Economics，1974，88：312～319
72 Atkinson S E. Marketable Pollution Permits and Acid Rain Externalities. The Canadian Journal of Economics，1983，16：704～722
73 Atkinson S E，Stiglitz J E. Lectures on Public Economics，New York，1980
74 Ayres，R. U.（1972），A. Materials-Process-Product Model. In：A. V. Kneese，B. T. Bower，ed. Environmental Quality Analysis. Baltimore，Md，1972，35～68
75 Bakun A. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. Science，1990，247：198～201
76 Baranzini A M Chesney，Morisset J. Uncertainty and Global Warming，An Option-Pricing，Approach to policy，Policy research working paper，International Bank for Reconstruction and Development，Washington，DC，1995
77 Barbier E B. Managing Trade and the Environment：The Demand for Raw Ivory in Japan and Hong Kong. The World Economy，1991，14：407～430
78 Barbier E B，Rauscher M. Trade，Tropical Deforestation and Policy Interventions. In：C. Carraro，ed. Trade，Innovation，Environment. Dordrecht：Kluwer Academic Publish-ers，1994
79 Barnett H J，Morse C. Scarcity and Growth：The Economics of Natural Resource Availability，Baltimore，Md，1963
80 Barnett H J. Environmental Protection，International Spillovers and Trade，Stockholm，1971
81 Barnett H J. The Theory of Environmental Policy. Englewood Cliffs，N. J，1975
82 Barnett H J. Economics，Environmental Policy，and the Quality of Life. Englewood Cliffs，N. J，1979
83 Barnett H J. On the Nature and Significance of International Environmental Agreements，mimeo，1989

84 Barnett S. Side-Payments in a Global Warming Treaty, OECD, mimeo, 1991
85 Barnett S. International Environmental Agreements as Games. In: R. Pethig, ed. Conflicts of Cooperation in Managing Environmental Resources. Berlin, 1992
86 Barnett S. Self-Enforcing International Environmental Agreements. Oxford economic papers to 46 (Special issue on environmental economics), 1994, 878～894
87 Barnett S. Straregic Environmental Policy and International Trade, Journal of public economics, 1994, 54 (3): 325～338
88 Baumol W J. On the Social Rate of Discount. American Economic Review, 1968, 58: 788～802
89 Baumol W J. On Taxation and the Control of Externalities, American Economic Review, 1972, 62: 307～322
90 Baumol W J, Oates W E. The Use of Standards and Prices for Protection of the Environment, Swedish Journal of Economics, 1971, 73: 42～54
91 Baumol W J, Oates W E. The Theory of Environmental Policy. 2nd ed. Cambridge, 1988
92 Beckerman W. Pricing for Pollution. An Analysis of Market Pricing and Government Regulation in Environment Consumption and Policy. 2nd ed. London, 1990
93 Beckerman L. General Equilibrium Effects of Environmental Policy-ACGE-Modelling Approach, Environmental and Resource Economics, 1991, 1: 43～61
94 Bertram I G, et al. Economic Instruments and the Greenhouse Effect, Economic Department, Victoria University of Wellington, mimeo, 1989
95 Bijman P, Nijkamp P. Innovation, Environmental Policy and Employment. An Exploratory Analysis, Zeitschrift fur Umweltpolitik, 1988, 1: 81～92
96 Binswanger H C, Faber M, Manstetten R. The Dilemma of Modern Man and Nature. An Exploration of the Faustian Imperative, Ecological Economics, 1990, 2: 197～223
97 Binswanger H C, Bonus H, Timmermann M, ed. Wirtschaft and Umwelt. Moglichkeiten einer okologievertraglichen Wirtschaftspolitik, Stuttgart, 1981
98 Birdsall N, Wheeler D. Trade policy and Industrial Pollution in Latin America: Where are the Pollution Havens? In: Low P, ed. International Trade and the Environment. New York: World Bank Discussion Paper, 1992, 159: 159～167
99 Bishop R C, et al. Contingent Valuation of Environmental Assets: Comparisons with a Simulated Market. Natural Resources Journal, 1983, 23: 619～633
100 Bohringer C. Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der energie-and umwelt-politischen Analyse: theoretische Grundlagen and empirische Anwendung, Frankfurt am Main, 1996
101 Bohm P. An Approach to the Problem of Estimating Demand for Public Goods. Swedish Journal of Economics, 1971, 73: 55～66
102 Bohm P. Pollution, Purification and the Theory of External Effects. Swedish Journal of Economics, 1979, 72: 153～166
103 Bohm P, Kneese A V. The Economics of Environment. New York, 1971
104 Bohm P, Russel C F. Comparative Analysis of Alternative Policy Instruments. In: Kneese A V, Sween J L, ed. Handbook of Natural Resource and Energy Economics, Vol, I, Amsterdam, New York, 1985, 395～460
105 Bojo J, K-G Maler, L Unemo. Environment and Development. An Economic Approach. 2nd ed. Dordrecht, 1992
106 Bonus H. Emissionslizenzen, Monopson and die raumliche Abschottung von Arbeitsmarkten, Bemerkungen zu Sieberts Anmerkung, Zeitschrift fur Wirtschafts-and Sozealwissenschaften, 1983, 103: 57～62
107 Bonus H. Marktwirtschaftliche Instrumente in Umweltschutz, Wirtschaftsdienst. 1984, 64: 169～172
108 Bonus H. Okologie and Marktwirtschaft-ein unuberwindbarer Gegensatz? In: Universitas, 1986, 486: 1121～1135
109 Boulding K E. Economics of Pollution. New York. 1971
110 Boulding K E. (1971b), The Economics of the Coming Spaceship Earth. In: H Jarret, ed. Environmental Quality in a Growing Economy. Baltimore, Md. 1971, 3～15
111 Bovenberg A L, R A de Mooij. Environmental Levies and Distortionary Taxation. American Economic Review (Papers and Proceedings), 1994, 94 (4): 1085～1089
112 Bovenberg, A. L. Environmental Levies and Distortionary Taxation: A Reply. American Economic Review, 1997, 87 (1): 252～253