

21世纪环境科学前沿问题探索丛书·产业生态学

# 物质流分析与管理

Material Flow Analysis and Management

毕 军 黄和平 袁增伟 刘凌轩◎著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪环境科学前沿问题探索丛书·产业生态学

# 物质流分析与管埋

毕 军 黄和平 袁增伟 刘凌轩 著

国家社会科学基金重大项目(06&ZD026)

国家科技支撑计划重大项目课题(2006BAC02A15) 资助

国家自然科学基金(40471057)

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书阐述了物质流分析的主要观点和研究思路,科学构建并简要评价了物质流分析的研究框架和指标体系,并以实现区域可持续发展为出发点、以产业生态学和循环经济理论为基础、以物质流分析为突破口,通过对我国东部典型地区——江苏省环境-经济系统物质流各项指标的辨别、分析及评价,在区域尺度上详尽剖析了环境-经济系统物质流通量及动态特征,阐述了物质流指标和区域社会经济指标的耦合现象及规律,对江苏省循环经济发展动态予以科学合理的评估;引入了物质流管理的理念和模型应用,对区域物质流分析与管理研究进行了总结。本书的研究内容为区域社会、经济、自然、环境的协调可持续发展研究和决策提供理论依据。

本书可为环境管理领域的政府官员、学者和企业提供参考,亦可作为环境规划与管理专业研究生教育的阅读材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

物质流分析与管理 / 毕军等著. —北京: 科学出版社, 2009

(21世纪环境科学前沿问题探索丛书·产业生态学)

ISBN 978-7-03-024500-7

I. 物… II. 毕… III. 自然资源-资源利用-研究-江苏省 IV. F124.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第064219号

责任编辑: 李晓华 卜 新/责任校对: 鲁 素

责任印制: 赵德静/封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市农林印务有限公司印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009年6月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009年6月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—2 500 字数: 263 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 总序

改革开放 30 年是中国社会经济高速发展的时期，是社会经济-环境矛盾加剧、资源生态系统遭受严重破坏的过程，是充满了机遇与挑战的转型期。其间，环境科学作为一门新兴学科，在我国起步较晚，但却是综合性、交叉性、实用性极强的一门应用基础学科，为我国环境管理与科学发展提供了必要的科学指导。然而，在当前的环境科学研究中，基础理论体系相对薄弱，对传统自然科学、社会科学的依赖性很强，影响了学科的全面发展和实践应用。环境科学在 21 世纪所面临的重要任务是：完善研究领域、研究框架、基础理论及工具，为有中国特色的可持续发展提供科学指导，从而应对区域、国家、全球层面的各类环境问题。这是每一位环境科学工作者肩头的重担。

在长期的研究中，我们认识到：任何一个环境问题都不能仅靠单一的科学知识或实践方法来解决，尤其是一些在实验室里、在技术上看似能够解决的问题，往往因存在经济学、社会学、政治学范畴的障碍而无法实施。很多看似可以量化的研究在实践中往往面临数据或手段上的困难等。在 21 世纪日益严重的社会经济-环境矛盾中，环境科学亟待构建一个系统性、整合性、开放性的理论框架，充分考虑环境科学前沿问题，解决不断出现的环境挑战。本丛书的出版正是对这一理论框架的尝试性构建和先行探索。

环境科学长期被追问：是否存在一个体系(paradigm)，这个体系应包括广为认可的基本理论和研究方法。我们的回答是模棱两可的。目前，这个体系还没有系统建立，也没有完全得到其他学科的认同。正因为如此，更有探索各学科(interdisciplinary)交叉的环境科学规律和方法学的必要。在长期的环境研究中，我们始终关注空间变异(spatial)、时间序列(temporal)、个性特点(unique)、现实有效(practical)、整体集成(integrated)、动态变化(dynamic)的视角。我们认为，把握好这六个方面，研究和实践就会成功一半。本丛书试图从不同角度来体现这样的研究思路。

中国环境科学研究的重要现实基础是：中国地区间发展很不平衡，一些发达地区社会经济发展水平较高，已基本形成包括循环经济规划、生态工业园建设、生态市建设、排污权交易等一系列较为成熟的“环境管理范式”，而大多数地区还

处于经济腾飞的发展中阶段，一些未开发地区还在能否温饱的困境中挣扎。这个前置条件要求我们在环境科学研究和环境保护实践中既要积极吸收环境保护先进国家的成熟理论和成功经验，也要紧密结合中国经济发展和环境保护的实际，注重本土化研究，形成有中国特色的环境保理论和实践体系。因此，本丛书致力于自下而上与自上而下相结合的研究思路，但更多是自下而上的，多从我国环境管理的第一线工作出发，结合地方案例，探索解决环境问题的新方式，提炼环境科学的新思想。

本丛书分为总论和三个系列。在总论中，我们重点探讨“经济增长”与“经济发展”的区别，并结合各地不同的发展方式与实践经验，试图厘清发展与环境之间的协同与矛盾，重新描绘发展与环境质量的内涵。接下来，我们在环境风险管理、环境政策分析与设计、产业生态学这三个综合性、交叉性极为显著的环境科学领域进行基于多角度、多主体的探讨与分析，这也是我们长期倾力研究的领域。

(1) 环境风险管理。这一研究方向从环境风险生命周期过程的视角解析环境风险源属性、环境风险场时空特征、环境风险受体抗风险能力与环境风险强度、危害程度之间的关系，并从环境风险全过程调控的角度探讨环境风险源识别与分级管理、环境风险场模拟、环境风险预警、环境风险应急管理等新理论、新技术和新方法。主要包括：环境风险发生机制、环境风险全过程评估、环境风险感知、环境风险预警及应急系统、环境风险源管理、区域环境风险管理等。

(2) 环境政策分析与设计。这一研究方向致力于研究已有环境法规 and 政策的实施绩效，解析政府、企业、公众环境行为模式，挖掘转型期我国社会环境价值观内涵，创新规制，引导不同主体环保行为模式的政策体系，探索环境经济和社会政策的新机制、新策略。主要包括：排污许可证、排污权交易、公众参与、流域环境管理、环境治理与政策绩效评估、绿色贸易与环境保险、全球气候变化及低碳经济、生态文明与生态现代化等。

(3) 产业生态学。这一研究方向从宏观层面评估、分析和预测我国资源环境形势，挖掘循环经济的战略内涵，创新其实施策略与方法；从中观层面解析产业共生体系的演化规律；从微观层面剖析典型工业行业的物质代谢过程，开发基于物质效率的工业过程优化模型，为重点工业行业节能减排提供技术支撑。主要包括：循环经济、产业共生、产业转型与升级、物质流分析与管理、生命周期评价、清洁生产与工业过程优化、生态工业园区/生态城市规划与建设等。

南京大学环境学院环境系统分析研究组的主要成员是本丛书的主要作者。该研究组是一个由教授、副教授、讲师、博士后、访问学者、研究生和本科生等组

成的知识结构合理、学科背景交叉、人员梯队完整、处于快速成长中的科研团队。该研究组以系统论为基本思维方式，以环境科学、环境工程、地理学、经济学、管理学、社会学等多学科的理论和方法为依据，以计算机模拟仿真技术为支撑，探索如何转变人们的价值观和行为方式，提高生产和消费系统资源生产力和生态效率，创造环境管理模式和有效实施环境管理手段的新机制、新技术和新方法。本丛书的出版，是该研究组近年来研究成果的积淀，是集体智慧的结晶，是团队不倦探索所得到的果实。我们真诚希望，通过本丛书，与国内同行、环境管理官员、企业家以及环保 NGO 交流看法和经验，获得更多的宝贵意见。

本丛书的出版得到国内外同人的大力指点和支持，也得到中国高技术研究发展计划(863 计划)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家社会科学基金重大项目等经费支撑，在此表示衷心感谢。

毕 军

2009 年 6 月

# 前言

在我国，随着社会经济的迅速发展，工业化和城市化速度大大加快，资源短缺和环境破坏问题日益凸现。循环经济已成为追求更大经济效益、更少资源消耗和更低环境污染的先进经济模式，是人类社会发展的必然结果。作为发展循环经济、促进资源节约利用、减少环境污染的基本理论和方法之一的产业生态学研究越来越深入，并引起了人们的广泛关注。当前，作为产业生态学研究领域之一的物质流分析与管理，为循环经济的发展和研究提供了重要技术支撑和核心调控手段。

本书分为三部分。

第一部分：理论与方法。引入了物质流分析的定义，指出了其与自然生态系统物质流的异同，回顾了物质流分析研究的发展历程，系统介绍了目前国外有关物质流分析的研究现状，从国家、区域和企业三个不同的层次总结了国内物质流分析研究的水平及进展，着重从系统功能角度对物质流分析在不同层次或尺度(经济系统、产业部门、生命周期)的应用研究予以详尽的分析和探讨。随后，阐述了物质流分析的主要观点和研究思路，科学构建并简要评价了物质流分析的研究框架和指标体系，详细交待了物质流及物质的分类方法、有关隐藏流系数和物质重量换算系数的列表，科学合理地拟定了物质流分析及有关指标的推算方法，同时对物质流分析的主要技术平台做了简要介绍，并对比主要软件的优缺点。

第二部分：案例分析与研究。以我国东部典型地区——江苏省环境-经济系统为研究对象，以实现区域可持续发展为出发点，以产业生态学和循环经济理论为基础，以物质流分析为突破口，以“3R”原则为框架，以提高资源生产力和生态效率为目标，通过对研究区物质流各项指标的辨别、分析及评价，在区域尺度上详尽剖析了江苏省环境-经济系统物质流量及动态特征，阐述了物质流指标和区域社会经济指标的耦合现象及规律，并对研究区循环经济发展动态予以科学合理的评估，以期为区域社会、经济、自然、环境的可持续发展研究和决策提供理论依据。

第三部分：结论与展望对物质流分析、管理和区域循环经济的进一步研究做了积极的展望，并对全书进行了总结。

著者

2009年1月10日

# 目录

## 总序 前言

## 第一部分 理论与方法

第 1 章 绪 论	3
第 2 章 物质流分析的国内外研究进展	6
2.1 定义与区别	6
2.2 物质流分析的发展历程	7
2.3 国外物质流分析的研究进展	9
2.4 国内物质流分析研究进展	13
2.5 物质流分析的应用研究	18
第 3 章 物质流分析的理论方法与指标体系	21
3.1 物质流分析的理论框架	21
3.2 物质流分析的指标体系	24
3.3 物质流分析的软件技术平台	35
3.4 物质流分析的基本方法	37

## 第二部分 案例分析与研究

第 4 章 江苏省物质流全景分析	47
4.1 江苏省自然概况	47
4.2 江苏省社会经济发展的时间序列分析	49
4.3 1990 年江苏省物质流全景分析	51
4.4 1995 年江苏省物质流全景分析	57
4.5 2000 年江苏省物质流全景分析	58



4.6	2005年江苏省物质流全景分析	59
4.7	本章小结	61
<b>第5章</b>	<b>江苏省物质输入分析</b>	<b>64</b>
5.1	1990~2005年江苏省物质输入总量的变化趋势分析	64
5.2	1990~2005年江苏省物质输入强度的变化趋势分析	72
5.3	本章小结	75
<b>第6章</b>	<b>江苏省物质输出分析</b>	<b>77</b>
6.1	1990~2005年江苏省物质输出总量的变化趋势分析	77
6.2	1990~2005年江苏省物质输出强度的变化趋势分析	85
6.3	本章小结	89
<b>第7章</b>	<b>江苏省水(物质)的输入与输出分析</b>	<b>90</b>
7.1	1990~2005年江苏省供水总量与强度的变化趋势分析	90
7.2	1990~2005年江苏省废水输出总量与强度的变化趋势分析	93
7.3	本章小结	96
<b>第8章</b>	<b>江苏省物质消费分析</b>	<b>97</b>
8.1	1990~2005年江苏省物质消费总量及其构成的变化趋势分析	97
8.2	1990~2005年江苏省物质消费强度的变化趋势分析	99
8.3	本章小结	100
<b>第9章</b>	<b>江苏省物质循环利用分析</b>	<b>102</b>
9.1	废物产生总量及循环利用的变化趋势分析	102
9.2	废水循环利用及其构成的变化趋势分析	103
9.3	废气循环利用及其构成的变化趋势分析	107
9.4	固体废弃物循环利用及其构成的变化趋势分析	113
9.5	本章小结	115
<b>第10章</b>	<b>江苏省物质生产力及生态效率分析</b>	<b>117</b>
10.1	1990~2005年江苏省物质生产力的变化趋势分析	118
10.2	1990~2005年江苏省能源效率的变化趋势分析	125
10.3	1990~2005年江苏省环境效率的变化趋势分析	127
10.4	本章小结	131
<b>第11章</b>	<b>区域经济发展与环境压力的协同效应分析</b>	<b>133</b>
11.1	分离指数分析	133

11.2	弹性系数分析.....	141
11.3	环境库兹涅茨曲线分析.....	143
11.4	经济发展与资源消耗、环境污染脱钩情况的进一步分析.....	149
11.5	本章小结.....	158
<b>第 12 章</b>	<b>基于物质流分析的区域循环经济发展评价</b> .....	<b>160</b>
12.1	基于物质流分析的循环经济发展评价指标体系的构建.....	160
12.2	区域循环经济发展评价模型的确立.....	164
12.3	区域循环经济发展评价指标的分级及标准化处理.....	165
12.4	结果与分析.....	168
12.5	本章小结.....	178
 <b>第三部分 结论与展望</b>  		
<b>第 13 章</b>	<b>物质流管理与应用</b> .....	<b>183</b>
13.1	物质流管理——理念的整合.....	183
13.2	物质流管理的时空轴模型.....	185
13.3	模型讨论：不同时空尺度下的物质流管理.....	186
13.4	本章小结.....	192
<b>第 14 章</b>	<b>结论与问题</b> .....	<b>193</b>
<b>主要参考文献</b> .....		<b>197</b>
<b>附录</b> .....		<b>210</b>
附录 1	术语解释.....	210
附录 2	物质详细分类表.....	212

# 第一部分 理论与方法



## 第1章 绪论

我国人口众多,资源相对不足,资源禀赋较差,生态环境承载能力弱。据统计,2004年末,我国人口约占世界人口的21%,占亚洲人口的1/3;而耕地、水资源、森林面积、石油、煤炭、铁矿分别只占世界的7.1%、7.0%、3.3%、2.3%、11.0%、8.8%。在人均拥有量方面,维系人们基本生存的水和耕地分别仅占世界平均水平的1/4和1/3,森林资源占1/5;45种主要矿产资源人均占有量不足世界平均水平的50%,石油、天然气、煤炭、铁矿、铜和铝等重要矿产资源人均储量分别相当于世界人均水平的11%、4.5%、55%、42%、18%和7.3%。一方面,经济快速增长带来的需求增加与能源、水资源、矿产资源和土地资源不足的矛盾越来越尖锐,资源短缺已经成为制约我国可持续发展的“瓶颈”,资源环境的约束也日趋严峻。另一方面,十六届三中、四中全会提出了全面协调可持续发展的科学发展观和构建社会主义和谐社会的新要求,十七大也提出建设生态文明的要求。在此背景下,我国政府适时地提出了发展循环经济(circular economy, CE)的战略。自2009年1月1日起,我国开始实施《循环经济促进法》。发展循环经济是建设资源节约型、环境友好型社会和实现可持续发展的重要途径。其本质是改造或调控现有的线性物质流动模式,提高资源和能源的利用及转化效率,形成效率较高的物质循环模式,其核心调控手段是基于多种尺度的物质流分析(material flow analysis, MFA)。

物质流分析是指在一定时空范围内关于特定系统的物质流动和储存的系统性分析。主要涉及物质流动的源、路径和汇。根据质量守恒定律,物质流分析的结果总是能通过其所有的输入、储存及输出过程来达到最终的物质平衡。这是物质流分析的显著特征,它为资源、废弃物和环境管理决策提供了方法学上的支持(Paul, Helmut, 2004)。从人类经济活动的角度看,物质流分析指的是对经济活动中物质流动的分析,它的基础是对物质的投入和产出进行量化分析,建立物质投入和产出账户,以便进行以物质流为基础的优化管理。可见,物质流分析的核心是对社会经济活动中物质流进行定量分析,了解和掌握整个社会经济体系中物质的流向、流量。物质流分析研究因其较强的政策导向和对政策的指导意义而受到国际关注。通过物质流分析,我们可以控制有毒有害物质的流向,分析物质流使用的总量和使用强度,为资源环境管理提供新的方法和视角。这为资源、废弃物和环境管理决策提供了方法学的支持,也为区域循环经济的评价与研究提供了新

的思路。这也是发展循环经济，建设资源节约型、环境友好型社会的一个重要手段和前提。

自然-经济-环境-社会相互依存、相互影响，系统之间和区域之间的物质和能量流动将各个环节联系在一起。在人类利益的驱动下，环境-经济系统的各种物质流动引起由区域环境-经济系统中各种要素组成的复合景观格局在时间和空间上的一系列变化，这些变化主要表现在各种功能系统中关键因素的相应变化，如地理空间上的工业化和城市化等引起的土地利用格局变化、人口的流动和聚集、土地退化和沙化、植被退化、生物多样性减少，资源开采引起的水土流失、植被覆盖减少，产业结构调整引起的区域经济结构的改变和经济财富的消长，废弃物输出引起的环境污染物的迁移和扩散等一系列生态、经济、环境和人口变化。上述变化过程和物质流动是相互耦合、相互制约的，这种相互作用对生态环境、社会及人类自身的生存和发展造成巨大压力，使区域循环经济建设及可持续发展受到影响。

环境-经济系统的物质流动对于区域循环经济建设及可持续发展过程将会产生什么样的影响？如何运用物质流分析的手段来分析和评价区域循环经济的状态、变化过程及机制？在区域循环经济及可持续发展过程中，如何根据人类自身生存和可持续发展的需要调整和完善产业结构，以利于控制和优化区域或国家层面的物质流动规模及模式？这是本书提出的关键科学问题，也是今后相关领域及部门需要研究的重要课题。

为此，本书以物质流分析为核心手段，以江苏省为例，旨在通过指标分析和模型模拟，以一系列的时间序列分析方法和环境经济学分析方法为手段，归纳总结资源、环境、经济、社会之间的相互耦合的特征和规律，构建物质流分析账户体系和区域循环经济评价指标体系，预测今后经济发展的方向和规模，及资源利用、环境压力对于生态承载力和环境容量的可及极限。这对于区域社会、经济、环境的相互协调和持续发展具有重要的理论指导和实践意义。

本书的主要内容包括：

(1) 基于时间序列的区域尺度的物质流系列指标的辨别、指标体系的构建及分析。本书将从环境经济学和自然资源生态学角度将物质流通量分为：输入部分，包括淡水输入量、非能源物质输入量、能源物质输入量及进口物质；输出部分，包括废气排放量、废水排放量、固体废弃物处理处置量、耗散物质投放量及出口物质等。在自然生态系统中，自然过程需要和排放的物质，如植物光合作用所需的  $\text{CO}_2$  量和释放的  $\text{O}_2$  量，生物呼吸、土壤呼吸所需的  $\text{O}_2$  量和排放的  $\text{CO}_2$  量，由于不直接参与人类经济活动而不列入本研究区环境-经济系统的输入与输出项目。

生态包袱是人类为获得有用物质和生产产品而动用的没有直接进入交易和

生产过程的物质,在物质流账户中又被称为隐藏流或非使用物质开采或非直接流。生态包袱可以从输入端全面地揭示产品对自然资源的消耗和对生态环境的冲击。由于物质种类繁多,对每一种物质流动产生的隐藏流都予以研究显然是不可能的,本书将按有关常识确定或套用欧盟或其他研究机构的各种物质隐藏流系数。鉴于此,本书没有对区域隐藏流或生态包袱的机制或过程予以更深入的分析和探讨。

(2) 区域环境-经济系统的生态效率分析。本书基于生态效率的狭义概念将单位物质输入的产值定义为物质生产力,包括资源生产力、水资源生产力、能源生产力等,而将单位物质输出(主要是污染物排放)的产值定义为生态效率或环境效率。

(3) 区域经济发展与环境压力的耦合关系分析。本书基于现有研究区的历年相关资料与数据,对研究区经济增长与环境压力的脱钩情况,反映资源消耗、环境污染的增长速度与国民经济增长速度之间比例关系的指标——弹性系数逐一予以详细分析,运用EKC假说对研究区物质消耗强度与环境污染强度予以进一步分析,以期与研究区政府“隧道化”决策提供理论依据。最后引用相对“脱钩”与相对“复钩”的概念模型对研究区目前的“脱钩”现象进一步分解剖析,以更确切地掌握区域经济增长与资源消耗、环境污染之间的响应关系和发展趋势。

(4) 区域循环经济发展评价指标体系的构建及可持续发展评价。基于可持续发展观点,运用物质流分析手段,按照“3R”原则,构建区域循环经济发展评价指标体系,具体方法主要有层次分析法、专家咨询法等,最后得出区域循环经济综合评价模型,并从循环经济的角度评价区域可持续发展能力。

在国内外物质流分析方法的研究基础上,本书结合江苏省省情和循环经济发展的需要,建立一个科学合理的评价指标体系,从而对区域循环经济发展水平进行准确评价,为政府及相关部门的经济发展和环境保护决策提供科学依据。

## 第 2 章 物质流分析的国内外研究进展

### 2.1 定义与区别

#### 2.1.1 物质流分析的定义

2004年, Paul 和 Helmut 在其著作 *Practical Handbook of Material Flow Analysis* 中将物质流分析定义为: “物质流分析是指在一定时空范围内关于特定系统的物质流动和储存的系统性分析或评价。”它将物质流动的来源(源)、路径、中间过程及最终去向(汇)联系在一起。根据质量守恒定律, 物质流分析的结果总是能通过比较其所有的输入、储存及输出过程以控制其简单的物质平衡。正是物质流分析的这种显著特征, 使其成为在资源管理、废弃物管理和环境管理等方面极具魅力的决策支持工具<sup>①</sup>。

因此, 物质流分析描述的是人类从自然界获取资源, 进行生产和消费的经济活动, 并产生废弃物质以及废弃物质的再使用和资源化再生利用的过程中物质的实物流向和流量(刘滨等, 2005 a, 2005 b; 周国梅等, 2005)。

#### 2.1.2 整体物质流与自然生态系统物质流的区别

物质流分析方法分为两种。一种称为材料流分析(substance flow analysis, SFA), 主要研究某种特定的物质流(岳强, 2006), 如铁、铜、锌等对国民经济有着重要意义的物质流(Johnson et al., 2005; Graedel et al., 2004, 2005), 砷、汞等对环境有较大危害的有毒有害物质流(Loebenstein, 1994; Szonpek, Goonan, 2000)以及钢铁、化工、林业等产业部门物质流(Müller, Tao Wang, 2001; Palm, Jonsson, 2001;

---

<sup>①</sup> Material flow analysis (MFA) is a systematic assessment of the flows and stocks of materials within a system defined in space and time. It connects the sources, the pathways, and the intermediate and final sinks of a material. Because of the law of the conservation of matter, the results of an MFA can be controlled by a simple material balance comparing all inputs, stocks, and outputs of process. It is this distinct characteristic of MFA that makes the method attractive as a decision-support tool in resource management, waste management, and environmental management (Paul, Helmut, 2004)



Korhonen et al., 2001); 另一种称为整体物质流分析(bulk-MFA), 主要研究国家经济系统的物质输入与输出。前者主要应用于 20 世纪 90 年代。随着可持续发展意识的不断增强以及经济全球化步伐的加快, 基于国家经济系统的整体物质流分析方法在 20 世纪 90 年代中期开始逐渐成为研究和应用的主流。90 年代末, Marina Fischer-Kowalski 和 Walter Hüttler 在 *Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis* 一书中对物质流分析的变革和演化做了较为详细的论述, 并对物质流分析领域的研究成果做了较为系统的整理和归纳(Fischer-Kowalski, 1998; Fischer-Kowalski, Hüttler, 1999)。本书研究的物质流就是整体物质流, 它可应用于不同层次的经济系统和产业部门、工业园区或企业个体, 与自然生态系统物质流有着本质的不同。

与自然生态系统物质流相比, 经济系统物质流主要存在两个问题(段宁, 2004a): ①没有形成良好和完备的循环代谢机制; ②每一环节的流动或代谢路径过长。

自然生态系统中有比较完备的食物链(food chain, FC)和食物网(food web, FW), 而且由于其捕食食物链(grazing food chain, GFC)和碎屑食物链(detrital food chain, DFC)相辅相成, 在生态效率(ecological efficiency or eco-efficiency)只有 1/10 左右的情况下(李博等, 2000), 各营养级的废弃物都能及时得以分解, 而不至于对生态环境产生任何压力, 从而形成代谢机制完备的封闭系统。反观经济系统, 由于人类干扰的因素占主导作用, 从生产、运输、加工、分配、消费, 直至遗弃, 每一环节的流动都是单向的, 而且每一环节都产生大量的废弃物, 并流向外部环境, 使得分解能力不足, 物质循环机制不完备, 因此形成线性的开放系统。经济系统的物质流动过程从一开始就造成生态破坏、环境污染等负面影响。

在自然生态系统中, 由于生产者、消费者、分解者在空间上相邻近, 物质在流动或循环代谢过程中的运输所需能量很少, 同时由于距离近, 对外界的扰动调节起来快; 而经济系统中, 由于消费者的消费量和遗弃量很大, 生产者和消费者之间的距离通常很长, 生产者、消费者、分解者之间物质运输消耗的能量过大, 进一步加剧了资源消耗、生态破坏和环境污染的程度。

## 2.2 物质流分析的发展历程

物质流分析方法作为研究经济生产活动中物质资源新陈代谢的一种方法, 其基本思想的发端可以追溯到 100 多年前, 而其概念则出现于 20 世纪不同年代的各个研究领域(Paul, Helmut, 2004)。在经济学领域, Leontief 在 20 世纪 30 年代就推出了输入-输出平衡表(Leontief, 1966, 1977)。第一个基于经济学观点的国家尺度物