

物质流分析研究述评

黄和平¹ 毕 军^{1,*} 张 炳¹ 李祥妹¹ 杨 洁^{1,2} 石 磊¹

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京大学环境学院环境管理与政策研究中心,南京 210093;2. 苏州科技学院,苏州 215011)

摘要 物质流分析方法近年来在循环经济和可持续发展研究领域发展迅速。阐述了物质流分析的定义及其与自然生态系统物质流的区别,着重回顾了该研究方法的发展历程,阐明了物质流分析的主要观点、理论基础、研究思路及研究框架,详细阐释和对比分析了物质流分析的六大类指标及分析方法,并在物质流分析框架的基础上,建立循环经济及可持续发展的评价指标体系,并对物质流分析指标体系和方法学的研究意义及其在环境经济学中的地位进行了客观的评价,进而指出了物质流分析方法的不足之处。对物质流分析在不同层次的应用研究也进行了充分的阐述和分析。对物质流分析今后相关领域的进一步研究予以了讨论和展望。

关键词 物质流分析;循环经济;可持续发展;物质生产力;去物质化;生态包袱

文章编号 1000-0933 (2007) 01-0368-12 **中图分类号** Q148 **文献标识码** A

A critical review of material flow analysis (MFA)

Huang Heping¹, Bi Jun^{1,*}, Zhang Bing¹, Li Xiangmei¹, Yang Jie^{1,2}, Shi Lei¹

1 State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, Centre for Environmental Management & Policy, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (1) 0368 ~ 0007.

Abstract : Material Flow Analysis (MFA) is a direct and useful tool for studying circular economy and sustainable development. At present, the study and practice of MFA have been spreading in some developed countries and are just beginning in China. In general, MFA can be applied at three levels: economy-wide, at the sector level and at the product level. This article comprehensively introduces the definition of MFA and explains its difference from the study of resource flows in natural ecosystems. The paper fully reviews the history of MFA and describes its theoretical fundamentals, main viewpoints, research routes and framework. The most widely used categories of indicators and the analytic methods by which they are employed in MFA are presented in detail and compared. The significance of the research, the status of the indicator system and the methodology of MFA in environmental economics are evaluated objectively. MFA indicators can be used to characterize or improve the knowledge of the input, storage and reclamation of resources and the processes of waste generation and recycling. A MFA-based index system for assessing the circular economy and sustainable development can be established as well. Some weaknesses in MFA are also analysed including: (1) the lack of transparency in the relation

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40471057);江苏省自然科学基金项目 (BK2003207);江苏省六大人才高峰第二批资助项目

收稿日期 2006-04-20; **修订日期** 2006-11-23

作者简介 黄和平 (1968 ~),男,江西人,博士生,主要从事植被生态学、生态经济学与环境规划与管理研究. E-mail: hphuang2004@163.com

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: jbi@nju.edu.cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471057) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2003207)

Received date 2006-04-20; **Accepted date** 2006-11-23

Biography :Huang Heping, Ph. D. candidate, mainly engaged in vegetation ecology, ecological economics and environmental planning and management. E-mail: hphuang2004@163.com

between MFA and its environment impacts ; (2) MFA's dependence on assessment of the total material flow through the boundary between the environmental and economic systems ,thereby leaving research objects such as economic systems and industrial sectors as a " black box " ; (3) the slow progress of MFA research in small scale regions ; and (4) the questionable significance of treating TMR as total material flow because of the uncertainty of hidden flow coefficient. Moreover ,the application of MFA at different levels of MFA was also explored and assessed in detail. Finally ,research needs in MFA in relevant fields are discussed. These include : (1) futher understanding and elaboration of the environmental ,economic and social significance and value of MFA results ; (2) combination with land use analysis through a bridge such as " ecological footprint (EF)" ; (3) exploration of input-output analysis in combination with monetary input-output tables (MIOTs) ; (4) further study of hidden flows and their coefficient needs efforts from all over the world.

Key Words : material flow analysis (MFA) ; circular economy (CE) ; sustainable development ; material productivity ; dematerialization ; ecological rucksack

近年来 ,循环经济 (Circular Economy ,CE)的研究和发展受到各学科领域和各级政府的高度关注^[1]。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^[2]。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 ,其核心调控手段就是基于多种尺度的物质流分析 (Material Flow Analysis ,MFA)^[3]。

然而长时期以来 ,有关物质流动对人类生存的基础——自然环境有何影响 ,以及这些影响如何量化的问题 ,并未受到人们足够的重视^[4]。20 世纪 80 年代后 ,人们认识到经济活动特别是工业生产活动中的物质流动 ,不仅对经济有较大的影响 ,而且与自然环境也存在复杂的相互作用。随着可持续发展研究的不断深入 ,在经济系统特别是工业系统与自然环境相互作用的研究中 ,逐步形成了物质流分析这一研究方向^[5]。

1 物质流分析的定义及其发展历程

1.1 物质流分析的定义及其与自然生态系统物质流的区别

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贮存的系统性分析。主要涉及的是物质流动的源、路径及汇。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、贮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、废弃物和环境的管理提供了方法学上的决策支持工具^[6]。这里所说的物质流分析主要是针对不同层次的经济系统、产业部门、工业园区或企业个体 ,它与自然生态系统的物质流有着本质的不同。

以经济系统物质流为例 ,与自然生态系统的物质流相比 ,经济系统的物质流主要存在两个问题^[6] : (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)只有十分之一左右的情况下^[7] ,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 ,而每一环节都产生大量的废弃物 ,并流向外部环境 ,造成分解能力不足 ,物质循环机制不完备 ,因此形成线性的开放系统。同时经济系统的物质流动过程从一开始就对环境造成生态破坏、环境污染等负面影响。

自然生态系统中 ,由于生产者、消费者、分解者在空间上相临近 ,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。

1.2 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 多年以前,而其概念则出现于 20 世纪不同年代的各个研究领域^[5]。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^[8,9]。而第一个基于经济学观点的国家尺度物质流分析的尝试发表于 1969 年^[10]。第一个关于资源保护和环境管理的研究则出现于 20 世纪 70 年代,而这两个最初应用的领域是:(1)城市新陈代谢 (Metabolism of Cities);(2)流域或城市区域的污染物迁移路径分析 (Analysis of Pollutant Pathways)^[5]。20 世纪 70~80 年代,物质平衡 (Physical Balance)^[11]、工业代谢 (Industrial Metabolism)^[12,13]等理论的提出和完善,为物质流分析方法应用于整个经济系统的研究奠定了基础。20 世纪 90 年代初,奥地利^[14]、日本^[15]和德国^[16]首先应用物质流分析方法对各自国家经济系统的自然资源和物质的流动状况进行了分析,从而揭开了经济系统物质流分析方法在世界范围广泛应用的序幕。

20 世纪 90 年代初,德国 Wuppertal 研究所 (Wuppertal Institute)提出了物质流账户体系 (Material Flow Accounts, MFA),它是定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具 (<http://www.wupperinst.org/>),并提出了生态包袱 (Ecological Rucksacks, ER)的概念,后来也称其为隐藏流 (Hidden Flow, HF)^[17]。1996 年,欧盟委员会 (European Commission, EC)组建了“ConAccount”平台 (www.conaccount.net),该平台的成立可认为是物质流分析国际合作的里程碑。从 1997 年开始,世界资源研究所 (World Resource Institute, WRI)着手对 5 个国家 (美国、日本、奥地利、德国、荷兰)经济系统的物质流动状况进行了全面的分析 (www.wri.org)。该研究所的第 1 份研究报告^[18]得到了上述 5 个国家经济系统的物质输入总量,并且给出了衡量物质输入状况的相关指标。在第 2 份研究报告^[19]中,该研究所得到了各个国家经济系统的物质输出总量,并且给出了衡量物质输出状况的相关指标。与此同时,运用物质流分析方法对本国经济系统进行分析的国家不断增加,比如意大利^[20]、丹麦^[21]、芬兰^[22]、瑞典^[23]、英国^[24]、捷克^[25]、中国^[26~32]等。2001 年,欧盟统计局 (EUROSTAT)出版了第一部经济系统物质流分析研究方法手册^[33],该手册的出版对经济系统物质流分析的深入研究起到了很大的作用。2004 年,Paul H. Brunner & Helmut Rechberger 合作编写了 Practical Handbook of Material Flow Analysis 一书 (<http://www.iwa.tuwien.ac.at/MFA-handbook.htm>),系统介绍了物质流分析的概念、历程、应用范围及目标,详细地陈述了其数据库管理、软件应用的具体操作方法,并列举了许多关于环境管理、资源保护、废弃物管理及区域物质流分析与管理的经典案例^[5]。

随着物质总量流动的分析研究的深入进行,单个物质或单质的流动分析已在全球、国家及区域水平得以细致的研究,如美国 Yale 大学森林与环境学院的研究人员对重金属如银、铜、锌等在不同尺度上的流动特征做了大量细致的研究^[86~88]。而日本在循环性社会方面做了大量的研究工作^[10,15]。

2 物质流分析的理论框架

2.1 主要观点与研究思路

物质流分析的基本观点是,人类活动所产生的环境影响在很大程度上取决于进入经济系统的自然资源和物质的数量与质量,以及从经济系统排入环境的废弃物质的数量与质量。前者产生对环境的扰动,引起资源的耗竭和环境的退化,后者则引起环境的污染。它从实物的质量出发,通过追踪人类对自然资源和物质的开发、利用及遗弃过程,研究可持续发展问题,即通过对自然资源和物质的开采、生产、转移、分配、消耗、循环、废弃等过程的分析,揭示物质在特定区域内的流动特征和转化效率,找出环境压力的直接来源,作为区域发展的可持续性指标,进而提出相应的减少环境压力的解决方案,为区域可持续发展目标的制定提供科学依据^[28,34,35]。

2.2 研究框架与主要指标

2.2.1 研究框架

从研究的层次上划分,物质流分析包括经济系统物质流分析、产业部门物质流分析和产品生命周期评价 3 个层次。它以质量守恒定律为基本依据,将通过经济系统、产业部门和企业的物质分为输入、贮存与输出三

大部分 通过研究三者的关系 跟踪、定位物质利用及迁移、转化途径^[36]。物质流分析方法对区域经济系统物质流动状况进行研究的框架可见图 1。

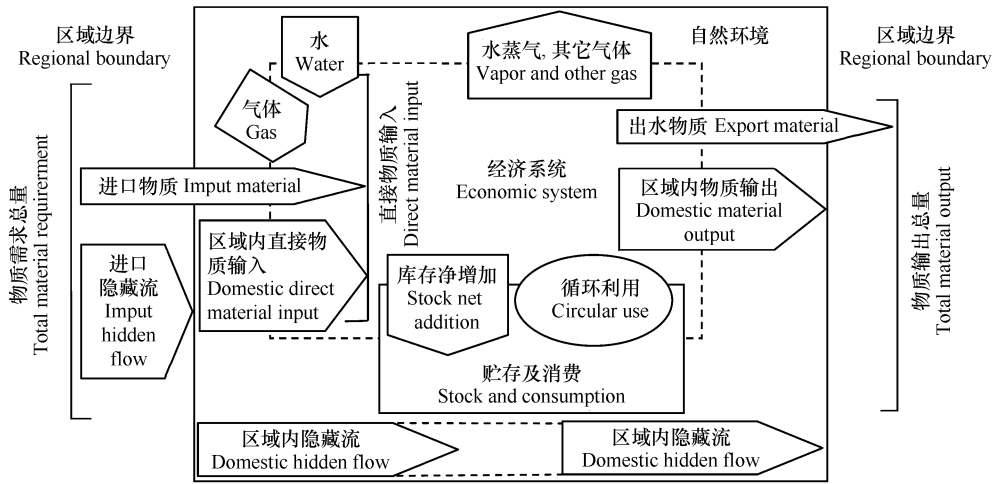


Fig. 1 Research frame of economy-wide MFA

在物质输入端 进入经济系统的自然物质分为直接物质输入和隐藏流两个部分。直接物质输入是指直接进入经济系统的自然物质 包括生物物质、固体非生物物质（包括化石燃料、工业矿物、建筑材料等）、水、空气四大类；隐藏流也称生态包袱 是指人类为获取直接物质输入而必须动用的数量巨大的环境物质 主要包括：①开采化石能源、工业原材料时移动的表土量和引起的水土流失量；②生物收获的非使用部分 木材砍伐的损失、农业收割的损失 等；③建筑遗弃土方及河流疏浚；④自然环境水土流失量^[37]。通常用隐藏流系数来衡量不同直接输入物质的隐藏流。直接物质输入和隐藏流又分为区域内部开采和进口两部分。

在物质输出端 物质输出总量由区域内物质输出、区域内隐藏流、出口物质 3 部分组成。其中 区域内物质输出由经济系统排出的固体废弃物、废水、废气组成。

2.2.2 物质流分析主要指标

国内外相关研究领域在可持续发展指标体系的研究中已取得了一些成果^[38-41]。物质流分析方法为制定区域可持续发展战略提供了可以量化的依据 并为可持续发展指标的建立提供一种新的思路^[29,42]。在对经济系统进行物质流分析的基础上 可得到输入指标、输出指标、消耗指标、平衡指标、强度和效率指标、综合指数六大类共 10 多个物质流分析指标 其中分离指数（Decoupling Factor, DF）^[43]和弹性系数（Elastic Coefficient, EC）^[44]是用来衡量物质消耗、环境退化与经济增长之间的相关关系的综合指数。综合各类文献 可得到这些指标的计算公式^[4,29-31,43,44] 见表 1。

3 物质流分析指标体系评价

(1)从输入方面看 上述指标中最为重要的指标是区域内物质输入总量。由于人类对自然环境的最根本影响是通过自然物质的输入产生的 并且每一种物质的输入必将带着巨大的隐藏流或生态包袱 这些隐藏流或生态包袱对当地的生态环境和资源造成了巨大的破坏和消耗 而进口物质流的生态包袱留在国外或研究区域外 对当地自然环境并未产生直接影响 因此 用物质输入总量来量度一个国家或地区资源利用与自然生态的可持续性应该比用物质需求总量^[4]表示要更准确些。一般而言 物质输入总量越小 自然资源和物质的动用就越少 生态系统为人类提供服务的质量也就越好 经济系统运行的可持续性则越强 反之 物质输入总量越大 自然资源和物质的动用就越多 生态系统为人类提供服务的质量也就越差 经济系统运行的可持续性则越弱。

(2)从输出方面看 应该以区域内物质输出总量最为重要。由于其主要由固、气、水等废弃物和区域内隐

藏流组成 ,它们是人类对其自身环境直接输出的环境压力 ,也是环境污染的直接来源 ,因此可用区域内物质输出总量来量度一个国家或地区的环境友好程度或人与环境的和谐程度 ,也可指示当地环境保护与建设的可持续性。一般来讲 ,物质输出总量越小 ,输出到环境中的废弃物就越少 ,环境的友好程度也就越高 ,环境的可持续性则越强 ;反之 ,物质输出总量越大 ,输出到环境中的废弃物就越多 ,环境的友好程度也就越低 ,环境的可持续性则越弱。

表 1 物质流分析指标分类及其计算公式

指标 Indicators	计算公式 Calculate formulae
1. 物质输入指标 Material input indices	(1)直接物质输入 = 区域内物质提取 + 进口 Direct material input = Domestic material extraction + Import (2)区域内物质输入总量 = 直接物质输入量 + 区域内隐藏流 Total domestic material input = Direct material input + Domestic hidden flow (3)物质需求总量 = 区域内物质输入总量 + 进口物质的隐藏流 Total material requirement = Total domestic material input + Hidden flow of input material
2. 物质输出指标 Material output indices	(4)直接物质输出量 = 区域内物质输出量 + 出口 Direct material output = Domestic material output + Export (5)区域内物质输出总量 = 区域内物质输出量 + 区域内隐藏流 Total domestic material output = Domestic material output + Domestic hidden flow (6)物质输出总量 = 区域内物质输出总量 + 出口 Total material output = Total domestic material output + Export
3. 物质消耗指标 Material consumption indices	(7)区域内物质消耗量 = 直接物质输入 - 进口 Domestic material consumption = Direct material input - Import (8)物质消耗总量 = 物质需求总量 - 出口及其隐藏流 Total material consumption = Total material requirement - Export and its hidden flow
4. 平衡指标 Balance indices	(9)物资库存净增量 = 贮存物质净增长量 Net addition of material stock = Net addition of stockpile material (10)物质贸易平衡 = 进口物质质量 - 出口物质质量 Material trade balance = Import - Export (11)物质消耗强度 = 物质消耗总量 ÷ 人口基数 或 物质消耗强度 = 物质消耗总量 ÷ GDP Material consumption intensity = Total material consumption ÷ Total population or Material consumption intensity = Total material consumption ÷ GDP
5. 强度和效率指标 Intensity and efficiency indices	(13)物质生产力 = GDP ÷ 国内物质消耗量 Material productivity = GDP ÷ Domestic material consumption (14)废弃物产生率 = 废弃物产生量 ÷ GDP Castoff produce rate = Castoff produce ÷ GDP
6. 综合指数 Comprehensive indices	(15)分离指数 = 经济增长速度 - 物质消耗增长速度 Decoupling factor = Increase speed of economy - Increase speed of material consumption (16)弹性系数 = 物质消耗增长速度 ÷ 经济增长速度 Elastic coefficient = Increase speed of material consumption ÷ Increase speed of economy

(3)从消耗方面看 ,物质消耗总量反映了人类对自然界物质的消耗程度。显然 ,物质消耗总量越大 ,意味着人类对自然界的干扰越强烈 ,也就越不利于资源节约型社会的建立 ,反之 ,物质消耗总量越小 ,意味着人类对自然界的干扰越弱 ,也就越有利于资源节约型社会的建立。因此 ,物质消耗总量指标对于可持续发展同样具有重要意义。

(4)从物质平衡方面看 ,物质库存的净增量反映了一个国家或地区的物质财富的增长水平 ,而在物质库存的增长量中 ,循环利用及废弃物质的资源化回收利用有多少贡献 ,目前国内外对此还未有系统的研究。因此 ,一方面增加物质库存的净增量 ,另一方面改善其增量的组成结构和循环利用的比例 ,对于建设循环型社会具有重要的战略价值。

(5)从强度和效率来看 ,物质生产力代表了一个国家或地区的资源利用效率的高低。作为物质流分析的

衍生指标 ,物质消耗强度、物质生产力、废弃物产生率等指标有助于分析经济系统与自然环境之间的关系 ,最终为提高经济系统的资源生产效率和降低资源消耗强度 ,揭示经济系统物质结构的组成和变化情况 ,并为实现去物质化 (Dematerialization)和社会、经济、环境的可持续发展奠定理论基础^[31]。

综合以上分析 ,物质流分析指标可以表述一个国家或地区的资源投入、贮存、回收、废弃物产生及废弃物再生利用的情况 ,并在物质流分析框架的基础上 ,建立循环经济及可持续发展的评价指标体系。从研究循环经济的角度 ,量化地描述自然资源的消耗、废弃物的产生以及废弃物的再使用和资源化再生利用与人类经济活动的关系。

4 物质流分析的应用技术平台比较

目前用于物质流分析或计算的比较成熟的技术平台或软件主要有 Excel、Umberto、Gabi 等^[5]。Microsoft Excel[®] 是一种电子表格和分析程序 ,也是 Microsoft Office[®] 软件包的一个子软件 ,是人们常用的一个软件 ,同样可用于 MFA 的分析 ,而且应用方便 ,不需为此设计专门的程序 ,更不需要专门的培训 ;Umberto 软件则是由海德尔堡公司能源与环境研究所 (Institute for Energy and Environmental Heidelberg Ltd. , IFEU)与汉堡公司环境情报研究所 (Institute for Environmental Informatics Hamburg Ltd. , IFU)联合开发的一种软件 ,最初应用于 1994 年 ,目前最新的版本为 Umberto 5.0 系列 ,该版本的演示本可在网站 (www. umberto. de/english/)上免费下载 ;Gabi 软件则是由斯图加特大学聚合体试验与科学研究所 (Institute for Polymer Testing and Polymer Science (IKP) at the University of Stuttgart)与欧洲 Gesellschaft mit beschränkter Haftung 股份有限公司 (PE Europe GmbH)联合研究开发的一个主要用于生命周期评价的软件系统 ,并于 1992 年开发出第一个版本 ,目前最新的版本是 Gabi 4.0 系列 ,其演示版本也可在网站 (www. gabi-software. com)上免费下载。这 3 种软件的特点及其应用优劣势见表 2。

表 2 物质流分析软件 Excel、Gabi 和 Umberto 的适用性对比^[5]

Table 2 Comparison of the suitability of Excel , Gabi and Umberto for MFA			
	Excel	Gabi 4	Umberto 5
安装向导 Installation guide	+	+	+
用户手册 User manual	+	+	+
在线帮助 On-line help	+	+	+
操作系统 Operating system	Microsoft Windows , Mac OS	Microsoft Windows	Microsoft Windows
语言 Languages	多种 several	德语/英语/日语 German/English/Japanese	德语/英语/日语 German/English/Japanese
用户友好性 User friendliness	+	+	+
支持 Support	+	+	+
稳定性 Stability	+	+	+
测试版本 Trial version	-	+	+
速度 Speed	+/-	+	+/-
程序运行性 Programmability	+	-	+
数据输入/输出			
Data import/export	+	+/-	+
静态模拟 Static simulation	+	+	+
动态模拟 Dynamic simulation	+	+/-	+
不确定性 Uncertainties	+/-	+	+/-
敏感度分析 Sensitivity analysis	+/-	+	-
Monte Carlo 误差检验 Monte Carlo error simulation	+/-	+	-
MFA 术语学/方法学 MFA terminology/methodology	+	+/-	+/-

+ 表示合适 (好)good ,+/- 表示一般 (平均)average ,- 表示不好 (不合适)not available

4 物质流分析的应用研究

4.1 经济系统物质流分析

经济系统物质流分析揭示了经济系统物质结构的组成和变化情况,有助于分析经济系统与自然环境之间的关系,最终为提高经济系统的资源生产效率和降低资源消耗强度,为实现去物质化 (Dematerialization) 和社会、经济、环境的可持续发展奠定理论基础^[51]。此外,如果将物质流指标与一些现有的社会经济统计指标 (人口、GDP、失业率等) 进行对照分析,可以衍生一些考虑经济、环境效应的综合指标 (如表 1 中的强度和效率指标、综合指数等),进而为政府的可持续发展战略提供决策依据^[45]。

经济系统物质流分析方法具有说服力的实际应用之一是对美国、德国、日本、荷兰和奥地利等国物质流的研究^[17,18]。研究结果表明,这些发达国家的人均年度物质需求介于 45 ~ 84 t 之间,以日本的数值最小,物质生产力平均为每创造 100 美元的 GNP 消耗 300 kg 的自然界物质,每年的物质输出量大约占物质输入量的 1/2 至 3/4。对我国物质输入量的计算结果显示,1994 年的物质需求总量已超过美国,虽然人均物质需求量明显少于发达国家,但物质生产力很低,平均每消耗 1 t 自然界物质只创造 17 美元的 GNP,是同年美国的 1/18^[26]。

近年来,欧美学者提出了以物质消耗总量的削减比率作为实现可持续发展奋斗目标的观点,并对未来 50 a 物质与资源利用效率提高 4 倍或 10 倍的可行性及其相应的政策、技术与管理措施进行了科学的论证^[46,47]。如果按照资源利用效率 4 倍和 10 倍跃进的目标削减物质消耗总量,到 21 世纪中叶,美、德、日、荷、奥等发达国家每创造 100 美元 GNP 所消耗的自然物质质量可望分别减少到 75 kg 和 30 kg,我国每创造 100 美元 GNP 的物质消耗量也将减少到大约 572 kg,这一数值仍然分别是 1994 年美、日、德、荷每创造 100 美元 GNP 物质消耗量的 1.8、4.4、2.1 倍和 1.9 倍^[27]。

由此可见,经济系统物质流分析对于认识经济活动与环境退化之间的关系有重要的意义,有助于政府决策部门制订提高自然资源利用效率和降低资源消耗强度的政策与法规,并且可为区域可持续发展的近、中、远期目标和具体实施方案提供定量的参考指标。

4.2 产业部门物质流分析

随着物质流分析方法和技术的日益成熟,产业部门的物质流分析也日渐增多。借助物质流分析手段,可以对生态产业链进行详细的分解,以此对各个环节的资源利用效率和物质消耗强度进行定量化评估,并为产业部门的可持续生产与消费提供科学依据。

产业部门物质流分析方法的具体应用是对荷兰冶金、纸浆、塑料等行业的研究^[48~50]。在冶金行业,通过物质流模型和应用综合平衡 (Applied General Model, AGE) 模型的结合为填补物质模型和经济模型之间的缺口进行了初步试验,通过应用 STREAMS 方法计算了 1990 年荷兰纸张、木材和塑料的物质流动状况。

Sven Hunhammar 分析了瑞典航空运输日益增长的物质流动所带来的潜在风险^[51]。Susanne Kytzia 等则用经济学扩展的物质流分析方法 (Economically Extended Material Flow Analysis, EE-MFA) 对瑞士食品生产链的资源利用效率进行了详尽的分析^[52]。Peter Michaelis 和 Tim Jackson 对英国的钢铁和铁矿石部门 1954 ~ 1994 年和 1994 ~ 2019 年的物质和能量流动做了细致的分析和预测^[53,54]。Seiji Hashimoto 等对 1960 ~ 1999 年间日本林木资源的 6 个物质流分析指标做了精确计算,并指出产品贮存是最难解决的问题^[55]。

国内产业部门物质流分析也已经有了初步的尝试,徐明、张天柱对 1990 ~ 2000 年间中国经济系统所使用的化石燃料数据进行统计分析^[56],研究结果表明,中国经济系统对化石燃料的利用存在很多问题,并指出为了实现化石燃料利用的可持续发展,2010 年和 2050 年中国对化石燃料的利用效率应该分别达到 1990 年西德和 1994 年日本的水平。

4.3 生命周期评价 (LCA)

生命周期评价是 20 世纪 80 ~ 90 年代欧美发展起来的一种对产品从摇篮到坟墓的环境影响的评价工具。不久作为保护组织的环境毒理与化学学会 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) 对生命周期评价做了进一步的发展,制定了标准化和可协调的程序,并最后开发了一系列的 ISO 生命周期评价

标准^[5,57,58]。

美国加利福尼亚大学巴克利分校民用与环境工程系研究人员开发了一套水-能源可持续性分析工具,并用生命周期评价方法评估水供应系统的建设、运行和维护的影响,为可持续水供应提供决策依据^[59]。Mathijs 等对物质流分析 (Substance Flow Analysis, SFA)、生命周期评价 (Life-Cycle Assessment, LCA) 和局部平衡模型 (Partial Equilibrium Models, PEM) 3 种分析工具在污染物管理中的应用进行了比较,并指出 LCA 只是和某种特定产品有关的决定因素^[60]。挪威科技大学产业经济与技术管理系生命周期评价方法和系统分析的方法对挪威渔业及渔产品运输系统的价值链进行了详细分析,并对其环境影响进行了评价^[61]。

目前有关生命周期评价在过程^[62,63]和系统水平^[64~69]上的研究还较少。尽管对 LCA 的实施有了明确的规则和方法,但在研究上还时有争论。物质流分析作为在 LCA 中创建详细目录的一种方法,特别是应用于系统而不是单个物质时更为有效^[5]。因此, LCA 的影响评价可被应用于物质流分析的结果中。

5 物质流分析的方法学评价

由于所处的环境-经济系统是一个复杂的非线性系统,其行为很难预测,因此很难对其建立模型进行分析以求其变化的结果(如自然资本的当前存量)和机理(如影响自然资本存量变化的因素)^[27]。物质流分析方法另辟蹊径,它利用投入-产出平衡表分析的方法,从作为经济系统表象的物质输入、输出数据出发,对整个系统物质流动的状况进行分析,得到了简洁的环境压力和可持续发展程度的示踪指标^[70,71],开阔了可持续发展研究方法的视野。此外,物质流指标采用物理量作为单位,弥补了使用货币单位不易进行不同地区和不同时期可持续性程度比较的缺陷,使可持续性度量建立在自然科学分析的基础上^[4]。

当然,现行的物质流分析方法也有其不足之处,这主要表现在以下几个方面:

(1) 现行的物质流分析只考虑物质的质量,对不同物质流可能带来的不同的环境影响视而不顾,弱化了物质流指标与物质流动带来的环境影响之间的联系,这在大的区域经济系统中更是如此。实际上,物质流的大小与其带来的环境影响之间的关系并不是成正比的。一些小的物质流,可能会带来很大的负面环境影响,比如含汞原料的流动。因此,经济系统物质输入的减少,只是实现可持续发展的必要条件,而不是充分条件^[4]。“为实现可持续发展,应该减少的(物质流)到底是什么?这是一个关键问题^[72]。”一些文献^[9,73]给出了可供借鉴的考虑不同物质环境影响的物质流分析方法,比如在输出端,依据不同物质流不同的排放数量、排放方式、排放速率对物质流的特点进行分析。

(2) 物质流分析方法的目的是对通过经济和环境两个系统界面的总的物质质量的实物变化进行量化研究,而不包括经济系统内的物质流如不同部门的产品转移,经济系统是作为“黑箱”处理的^[57]。这是物质流分析方法的一个盲区,从环境经济学来看,经济系统中每一环节的资源利用效率和强度的大小对于区域社会经济环境的可持续发展都是不可或缺的。如何把经济系统从“黑箱”转变为“灰箱”甚至“白箱”,系统研究经济系统内不同部门、不同生产和消费环节的产品转换效率和废弃物产生和处置效率,是今后该领域研究的重要课题。

(3) 迄今为止的大部分经济系统物质流分析都是基于国家尺度的,小区域尺度(省、市、开发区等)的物质流分析已有一定的探索^[74~76],但仍寥寥无几,究其根源是国家尺度与小区域尺度的统计数据之间存在着差异。经济系统物质流分析所需要的数据,在国家尺度上几乎都可以找到,但是小区域尺度的相关数据却经常由于一些客观原因(如统计内容的局限、当地大公司和企业的垄断等)很难获得,而这也限制了经济系统物质流分析方法的使用范围。

(4) 国际上常用总物质需求描述总的物质通量^[77],为直接物质输入量和隐藏流的加和,而且被认为是最重要的物质流分析指标^[4]。但是由于隐藏流系数的不确定性,导致物质总需求的不确定性,而且进口物质的隐藏流对研究区域本身并不会带来直接影响,因此从可持续发展角度来看,区域内物质输入总量(直接物质输入量和区域内隐藏流的总和)和物质总需求的减量更能说明自然环境对经济系统总的物质投入的变化,因而具有更大的现实意义。

6 物质流分析的研究展望

(1) 物质流动与哪些社会成员(消费者、企业等)的关系最为密切,物质流动路径中的哪些节点更具有环境经济学意义,仍是尚未明晰的重要问题^[78],不同社会成员是如何影响物质流动的,比如消费者的消费结构与物质流动的关系,社会、经济、环境的和谐与可持续发展和资源利用效率的累计效应的关系,都是具有重要研究意义的课题。但是,迄今为止的大部分经济系统物质流分析都只是止步于物质输入-输出分析基础上相关物质流指标值的获得,并没有对上述问题进行深入的研究,因而无法提供有助于实施国家物质减量化战略可操作的途径和手段,对政府的决策也没有太大的参考价值。因此,深入挖掘经济系统物质流分析结果所蕴含的环境、经济和社会研究价值,是未来研究应该注重的方向之一。

(2) 土地也是经济生产活动所需的重要的自然资源^[79],土地的利用状况从一个方面反应了人类活动对自然界物质资源的消耗程度。如果将经济系统物质流分析和土地利用分析结合起来,可以明晰物质流动和土地利用之间的内在联系,比如可以建立不同经济活动的物质消耗强度和土地利用强度之间的关系。未来该领域的相关研究应该将物质流分析和土地利用分析结合起来,着重解决以下问题:区域土地利用的状况是否可以并且如何衡量该区域物质消耗的状况^[4]?

“生态足迹”理论及其计算方法^[80-82]的提出,为土地利用分析提供了分析工具,也为物质流分析和土地利用的分析搭建了桥梁,例如物质消耗强度和生态足迹之间的耦合关系等。另外,充分利用统计数据中的土地覆盖数据,也许是将土地利用分析与物质流分析结合起来的更有效的途径^[4]。

(3) 经济系统物质流分析只是着眼于经济系统和自然环境的界面对整个经济系统的物质输入输出进行分析,并没有深入经济系统内部对各种经济生产活动中的不同物质流动进行分析,而物质投入产出表^[83](Physical Input-Output Table, PIOT)却能对经济系统与自然环境之间,以及经济系统内部的物质流动做出更为翔实的描述。物质投入产出表不但可以用来分析直接物质输入和输出,而且可以用来分析隐藏流的输入和输出。如果把物质投入产出表与现有的资金平衡表(Monetary Input-Output Table, MIOT)结合起来对照分析,有助于深入研究相关法律、经济政策对减少物质、能源消耗以及污染物排放的作用,对政府的决策具有重要的参考意义^[4]。

因此,物质投入产出表的编撰以及利用物质投入产出表进行相关分析,也是未来研究应该注重的方向之一。

(4) 对于中国经济系统,资源投入与污染排放呈同步快速增长的趋势^[28]。“高资源投入,高污染排放”的粗放型线性经济发展模式没有得到根本的改变。如果延续现有发展模式,将给生态环境带来更大灾难,也将使经济发展难以为继。因此,运用物质流分析手段,发展循环经济,转变增长方式,实行源头控制,应用各种资源减量化技术、节能技术和循环利用技术,提高资源利用效率,避免末端治理中大量物质与能源的附加投入,从而大力降低资源投入及污染排放总量,是实现可持续发展的根本途径^[74]。

(5) 生态包袱或隐藏流系数表征了开采单位物质所需动用的自然物质总量,可作为衡量各种不同物质因开采、使用和遗弃对环境造成的影响进行评估的弥补手段,但对其使用和遗弃过程对环境造成的影响进行评价还无能为力^[30]。而且理论上,隐藏流系数与物质资源的特点、生产方式、生产力水平等有关,因此不同国家隐藏流系数不尽相同,同一国家内不同区域之间也不尽相同,同一国家或地区不同时期的隐藏流系数也会有明显的不同。在实际应用中简单套用其他国家或地区的隐藏流系数会带来很大的不确定性^[74],也难以反映研究区本身的物质流原貌。国内在此方面已有初步的探索,有关学者已分别对我国铁矿^[84]和铜矿^[85]资源开发中的生态包袱进行了分析和计算。尽管如此,如何确定各国家和地区不同资源的隐藏流系数还有待于进一步研究。

References:

- [1] Zhu D J, Zhu Y. Eco-Efficiency and Circular Economy. Fudan Journal (Social Sciences), 2005, (2): 60-66.
- [2] <http://news.sina.com.cn/c/2005-10-18/19378045097.shtml>

- [3] Yang J, BI J, Zhou J B, *et al.* Eco-enterprise as model of circular economy : a case study on cement enterprise. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15 (1) : 66 — 70.
- [4] Xia C Y. Review on Studies of Economy-wide Material Flow Analysis. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20 (3) : 415 — 421.
- [5] Paul H, Helmut R. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton London New York Washington, D C : Lewis Publishers, 2004. 1 — 318.
- [6] Duan N. Urban material metabolism and its control. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17 (5) : 75 — 77.
- [7] Li B, Yang C, Lin P. *Ecology*. Beijing : Higher Education Press, 2000.
- [8] Leontief W. *The Structure of the American Economy, 1919-1929*, repr. White Plains, N. Y : International Arts and Sciences Press (now M. E. Sharpe), 1977.
- [9] Leontief W. *Input-Output Economics*. New York : Oxford University Press, 1966.
- [10] Fischer-Kowalski M. Society's metabolism, the intellectual history of materials flow analysis, Part I : 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2 (1) : 61 — 78.
- [11] Ayres R U. *Resources, Environment and Economics : Applications of the Materials/Energy Balance Principle*. New York : John Wiley & Sons Ltd., 1978.
- [12] Ayres R U. Industrial metabolism. In : Ausubel J. *Technology and Environment*. Washington D C : National Academy Press, 1989.
- [13] Stefan A. Industrial metabolism and the linkages between economics, ethics and the environment. *Ecological Economics*, 1998, 24 (2-3) : 311 — 320.
- [14] Steurer A. Stoffstrombilanz Österreich 1988. In : IFF Social Ecology Papers No. 26. Wien : IFF Soziale Ökologie, 1992.
- [15] Environment Agency Japan. *Quality of the environment of Japan 1992*. Tokyo : Environment Agency Japan, 1992.
- [16] Schutz H, Bringezu S. Major material flows in Germany. *Fresenius Environmental Bulletin* 2, 1993.
- [17] Schuetz H, Bringezu S. *Economy-wide Material Flow Accounting*. Wuppertal : Wuppertal Institute, 1998.
- [18] Adriaanse A, Bringezu S, *et al.* *Resources Flows : The Material Base of Industrial Economies*. Washington D C : World Resource Institute, 1997.
- [19] Matthews W, Bringezu S, *et al.* *The Weight of Nations : Material Outflows from Industrial Economies*. Washing D C : World Resource Institute, 2000.
- [20] de Marco O, Lagioia G, *et al.* Materials flow analysis of the Italian economy. *Industrial Ecology*, 2001, 4 (2) : 55 — 70.
- [21] Gravgaard P O. *Material flow accounts and analysis for Denmark*. Luxembourg : Meeting of the Eurostat Task Force on Material Flow Accounting, 2000.
- [22] Muukkonen J. TMR, DMI and material balances, Finland 1980 — 1997. Luxembourg : EUROSTAT Working Paper, No. 2/2000/B/1. 2000.
- [23] Isacsson A, Jonsson K, *et al.* *Material flow accounts DMI and DMC for Sweden 1987 — 1997*. Luxembourg : EUROSTAT Working Paper, No. 2/2000/B/2. 2000.
- [24] Schandl H, Schulz N. Using material flow accounting to operationalise the concept of Society's Metabolism : A preliminary MFA for the United Kingdom for the period of 1937-1997. Colchester : University of Essex, ISER Working Paper No. 2000-3. 2000.
- [25] Milan S, Jan K, Tomas H. Material flow accounts, balances and derived indicators for the Czech Republic during the 1990s : results and recommendations for methodological improvements. *Ecological Economics*, 2003, 45 (1) : 41 — 57.
- [26] Chen X Q, Qiao L J. A preliminary material input analysis of China. *Population and Environment*, 2001, 23 (1) : 117 — 126.
- [27] Chen X Q, Qiao L J. Material flow analysis of Chinese economic-environmental system. *Journal of Natural Resources*, 2000. 15 (1) : 17 — 23.
- [28] Chen X Q, Zhao T T, Guo Y Q, *et al.* Material Input and Output Analysis of Chinese Economy System. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39 (4) : 538 — 547.
- [29] LI G. Material flow analysis of nations based on sustainable development. *China Industrial Economy*, 2004, (11) : 11 — 18.
- [30] Liu J Z, Wang Q, Gu X W, *et al.* Direct material input and dematerialization analysis of Chinese economy. *Resources Science*, 2005, 27 (1) : 46 — 51.
- [31] Xu M, Zhang T Z. Material input analysis of China economic system. *China Environmental Science*, 2005, 5 (3) : 324 — 328.
- [32] Wang Q, Liu J Z, Gu X W, *et al.* Domestic material consumption of Chinese Ecosystem. *Resources Science*, 2005, 27 (5) : 2 — 7.
- [33] EUROSTAT. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators : Methodological Guide*. Luxembourg : EUROSTAT, 2001.
- [34] Bringezu S, ed. *Neue Ansätze der Umweltstatistik*. Berlin : Birkhäuser Verlag, 1995.
- [35] Bringezu S. *Ressourcennutzung in Wirtschaftsraeumen*. Berlin : Springer-Verlag, 2000.
- [36] Bouman M, Heijungs R, van der Voet E, *et al.* Material flows and economic models : An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics*, 2000, 32 (2) : 195 — 216.
- [37] European Commission. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicator : A Methodological Guide*. Printed in Luxembourg, 2001.
- [38] Moldan B S, Billharz R M. *Sustainability Indicators : A Report on the Project on Indicators of Sustainable Development, SCOPE 58*. Chichester, New York : John Wiley & Sons Ltd, 1997.
- [39] OECD. *Towards Sustainable Development : Environmental Indicators*. Paris : OECD, 1998.
- [40] OECD. *Environmental Indicators, Core Set*. Paris : OECD, 1994.
- [41] Chen C J, Fu X F, Ma X W, *et al.* Study on compositive evaluation of sustainable development in China. *China Population, Resources and*

- Environment, 2004, 14 (1): 1—6.
- [42] Ministry of the Environment. Material flow accounting as a measure of the total consumption of natural resources. The Finnish Environment 287. Helsinki: Ministry of the Environment, 1999.
- [43] Zhou G M, Feng D F, Ren Y. Key instruments for circular economy: Material flow analysis and material flow management (In: Senior Workshop on Circular Economy and Materials Flow Analysis). Sino-Japan Cooperation Project, PRCCE/JICA/SJC. Beijing, 2005.
- [44] Gao G K, Zhang N J. Energy demand forecast for China and supply countermeasure. Electric Power Technologic Economics, 2005, 17 (3): 9—14.
- [45] Kleijn R. Adding it all up: The sense and non-sense of Bulk-MFA. Journal of Industrial Ecology, 2001, 4 (2): 7—8.
- [46] Von Weizsaecker E, Lovins A B, *et al.* Factor Four: Doubling Wealth-Halving Resource Use. U K: Earthscan Publications Limited, 1997.
- [47] Schmidt-Bleek F. Das MIPS-Konzept: Weniger Naturverbrauch-mehr Lebensqualitaet durch Faktor 10. Muenchen: Droemersch Verlaganstalt Th. Knaur Nachf, 1998.
- [48] Rob B D, Patricia P K. An empirical analysis of dematerialization: Application to metal policies in The Netherlands. Ecological Economics, 2000, 33 (2): 205—218.
- [49] Marko P H, Louis A J, Ernst W. Analysis of the paper and wood flow in The Netherlands. Resources, Conservation & Recycling, 2000, 30 (1): 29—48.
- [50] Joosten L J, Hekkert M P, Worrell E. Assessment of the plastic flows in The Netherlands using STREAMS. Resources, Conservation & Recycling, 2000, 30 (2): 135—161.
- [51] Sven H. Cycling residues: Potential for increased transportation demands due to recycling of materials in Sweden. Resources, Conservation & Recycling, 1995, 15 (1): 21—31.
- [52] Susanne K, Mireille F, Peter B. Economically extended-MFA: a material flow approach for a better understanding of food production chain. Journal of Clean Production, 2004, 12 (8-10): 877—889.
- [53] Peter M, Tim J. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 1: 1954—1994. Resources, Conservation & Recycling, 2000, 29 (1-2): 131—156.
- [54] Peter M, Tim J. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 2: 1994—2019. Resources, Conservation & Recycling, 2000, 29 (3): 209—230.
- [55] Seiji H, Yuichi M, Akira S, *et al.* Six indicators of material cycles for describing society's metabolism: application to wood resources in Japan. Resources, Conservation & Recycling, 2004, 40 (3): 201—223.
- [56] Xu M, Zhang T Z. Material flow analysis of fossil fuel usage in the Chinese economy. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2004, 44 (9): 1166—1170.
- [57] Consoli F, Boustead I, Fava J, *et al.* Guidelines for life-cycle assessment: "a code of practice". SETAC, Brussels, 1993.
- [58] Udo de Haes H A ed. Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment. SETAC, Brussels, 1996.
- [59] Horvath A, Stokes J. Evaluating Life-cycle Environmental Implications of Water Supply Systems (In: Industrial Ecology for a Sustainable Future (Abstract Book: Oral Sessions). The 3rd International Conference of The International Society for Industrial Ecology, ISIE). Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005.
- [60] Mathijs B, Reinout H, Ester van der Voet, *et al.* Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. Ecological Economics, 2000, 32 (2): 195—216.
- [61] Erwin M. Life cycle evaluation of fishing and of fish transport. In: Industrial Ecology for a Sustainable Future. Abstract Book: Poster Sessions. The 3rd International Conference of The International Society for Industrial Ecology, ISIE. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2005.
- [62] Lenzen M, Munksgaard J. Energy and CO₂ life-cycle analysis of wind turbines — review and applications. Renewable Energy, 2002, 26 (3): 339—362.
- [63] Schleisner L. Life-cycle assessment of a wind farm and related externalities. Renewable Energy, 2000, 20 (3): 279—288.
- [64] Seppala J, Koskela S, Melanen M, *et al.* The Finish metals industry and the environment. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 35 (1-2): 61—76.
- [65] Brentrup F, Kusters J, Kuhlmann H, *et al.* Application of the life — cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers. European Journal of Agronomy, 2001, 14 (3): 221—233.
- [66] Haas G, Wetterich F, Kopke U. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life-cycle assessment. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 83 (1-2): 43—53.
- [67] Finnveden G. Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. Resources, Conservation and Recycling, 1999, 26 (3-4): 173—187.
- [68] Seppala J, Melanen M, Jouttijarvi T, *et al.* Forest industry and the environment: a life-cycle assessment study from Finland. Resources, Conservation and Recycling, 1998, 23 (1-2): 87—105.
- [69] Myer A, Chaffee C. Life-cycle analysis for design of the Sydney Olympic Stadium. Renewable Energy, 1997, 10 (2-3): 169—172.
- [70] Schmidt-Bleek F. Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS Das Mass fuer oekologisches Wirtschaften. Berlin, Basel, Boston: Birkhaeuser Verlag, 1994.

[71] Hinterberger F, Luks F, Schmidt-Bleek F. Material flows vs. "natural capital" What makes an economy sustainable? *Ecological Economics*, 1997, 23 (1): 1—14.

[72] Reijnders L. The factor X debate: Setting targets for eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2 (1): 13—22.

[73] Frohlich M, Hinterberger F, et al. Wie viel wiegt Nachhaltigkeit? Möglichkeiten und Grenzen einer Beachtung qualitativer Aspekte im MIPS-Konzept. Entwurf für ein Wuppertal Paper. Wuppertal Institute, 2000.

[74] Xu Y J, Zhang T Z, Shi L, et al. Material flow analysis in Guiyang. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2004, 44 (12): 1688—1691, 1699.

[75] Huang H P, Bi J, Li X M, et al. Analysis on Material Input-Output of Regional Eco-Economic System: A Case Study of Wujin District of Changzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (8): 2578—2586.

[76] Yu S T, Huang X J. Studies of material metabolism in the regional system — A case study of Nantong City, Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20 (2): 212—221.

[77] Bringezu S, Schutz H. Total material requirement of the European Union, Technical Part. Technical Report No 56. Copenhagen: European Environment Agency, 2001.

[78] Hinterberger F, Luks F, et al. *Ökologische Wirtschaftspolitik Zwischen Ökodiktatur und Umweltkatastrophe*. Berlin, Basel: Birkhauser Verlag, 1996.

[79] Spangenberg J, Bonnoit O. Sustainability indicators — A compass on the road towards sustainability. Wuppertal Paper. No. 81. Wuppertal: Wuppertal Institute, 1998.

[80] Wackernagel M, et al. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[81] Wackernagel M, et al. Ecological footprints of nations how much nature do they use? How much nature do they have? Toronto: International Council for Local Environmental initiatives, 1997.

[82] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29 (3): 375—390.

[83] Stahmer C, Kuhn M, et al. Physical input-output tables for Germany, 1990. Report prepared for DG XI and EUROSTAT Working paper No. 2/1998E/1. Luxemburg: EUROSTAT, 1998.

[84] Wang Q, Ding Y, Gu X W, et al. Ecological rucksacks of iron ore exploitation in China. *Resources Science*, 2005, 27 (1): 2—7.

[85] Ding Y, Wang Q, Gu X W. Material inputs of copper exploitation in China. *Resources Science*, 2005, 27 (5): 27—32.

[86] Johnson J, Julie J, Marlen B, et al. Contemporary Anthropogenic Silver Cycle: A Multilevel Analysis. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (12): 4655—4665.

[87] Graedel T E, Beers D V, Bertram M, et al. Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38 (4): 1242—1252.

[88] Graedel T E, Beers D V, Bertram M, et al. The multilevel cycle of anthropogenic Zinc. *Journal of Industrial Ecological*, 2005, 9 (3): 67—90.

参考文献：

[1] 诸大建, 朱远. 生态效率与循环经济. *复旦大学学报(社会科学版)* 2005, (2): 60~66.

[3] 杨洁, 毕军, 周鲸波, 等. 推进循环经济的工业生态化企业模式研究初探. *中国人口·资源与环境* 2005, 15 (1): 66~70.

[4] 夏传勇. 经济系统物质流分析研究述评. *自然资源学报* 2005, 20 (3): 415~421.

[6] 段宁. 城市物质代谢及其调控. *环境科学研究* 2004, 17 (5): 75~77.

[7] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000. 201~206.

[27] 陈效速, 乔立佳. 中国经济-环境系统的物质流分析. *自然资源学报* 2000, 15 (1): 17~23.

[28] 陈效速, 赵婷婷, 郭玉泉, 等. 中国经济系统的物质输入与输出分析. *北京大学学报(自然科学版)* 2003, 39 (4): 538~547.

[29] 李刚. 基于可持续发展的国家物质流分析. *中国工业经济* 2004, (11): 11~18.

[30] 刘敬智, 王青, 顾晓薇, 等. 中国经济的直接物质投入与物质减量分析. *资源科学* 2005, 27 (1): 46~51.

[31] 徐明, 张天柱. 中国经济系统的物质投入分析. *中国环境科学* 2005, 5 (3): 324~328.

[32] 王青, 刘敬智, 顾晓薇, 等. 中国经济系统的物质消耗分析. *资源科学* 2005, 27 (5): 2~7.

[41] 陈长杰, 傅晓锋, 马晓微, 等. 中国可持续发展综合评价研究. *中国人口·资源与环境* 2004, 14 (1): 1~6.

[43] 周国梅, 冯东方, 任勇. 循环经济的核心调控手段: 物质流分析与物质流管理. 见: 中日合作循环经济与物质流分析高级研讨会. 中日合作计划 PRCEE/JICA/SJC. 北京, 2005. 1. 10~12.

[44] 高广阔, 张能进. 中国能源需求预测及供给对策. *电力技术经济* 2005, 17 (3): 9~14.

[56] 徐明, 张天柱. 中国经济系统中化石燃料的物质流分析. *清华大学学报(自然科学版)* 2004, 44 (9): 1166~1170.

[74] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 等. 贵阳市物质流分析. *清华大学学报(自然科学版)* 2004, 44 (12): 1688~1691, 1699.

[75] 黄和平, 毕军, 李祥妹, 等. 区域经济系统的物质输入与输出分析——以常州市武进区为例. *生态学报* 2006, 26 (8): 2578~2586.

[76] 于术桐, 黄贤金. 区域系统物质代谢研究. *自然资源学报* 2005, 20 (2): 212~221.

[84] 王青, 丁一, 顾晓薇, 等. 中国铁矿资源开发中的生态包袱. *资源科学* 2005, 27 (1): 2~7.

[85] 丁一, 王青, 顾晓薇. 中国铜资源开发利用中的物质投入. *资源科学* 2005, 27 (5): 27~32.