

文章编号: 1007-7588(2006)06-0189-07

区域可持续发展生态评估的物质流 分析研究进展与展望

彭建^{1,2}, 王仰麟², 吴健生^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院数字城市与城市景观研究中心, 深圳 518055;

2. 北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要:可持续发展的生态评估是当前国际生态经济学与可持续发展研究的前沿问题之一, 物质流分析通过度量人与自然之间的物质交换及其环境影响, 定量评估人类社会经济系统的生态持续性, 是一个重要的研究方向。本文在简述物质流分析及其发展历程的基础上, 分析了该方法应用于区域可持续发展生态评估的基本原理。重点综述了国内外物质流分析相关研究进展, 认为对比于国外的蓬勃发展, 该方法在我国尚未获得普遍应用, 尚处于起步阶段。同时, 国内已有的研究也主要以实证分析为主, 理论探讨相对薄弱; 实证研究又以经济系统物质流分析为主, 但多侧重国家尺度, 少区域物质流分析; 而产业部门物质流分析则相对较少, 且偏重能源矿产采掘业, 对其他物质生产部门的关注较少。研究同时指出, 可持续性阈值、物质使用环境影响的度量、不同物质重量的可加和性、隐流系数的计算、系统内部物质流分析、数据获取与应用范围限制等理论与技术问题将是区域可持续发展生态评估物质流分析下一步的研究重点。

关键词:物质流分析; 生态评估; 区域可持续发展; 研究进展与展望

定量评估人类活动对自然生态系统持续性与支撑能力的影响, 是当前生态经济学与可持续发展研究的热点与前沿领域^[1]。而物质使用是人类社会维持与发展的基本前提, 并将其与自然环境有机的联系在了一起。社会物质代谢通过测度人与自然之间的物质交换, 探讨二者间相互关系的协调问题, 是可持续发展问题的实质^[2]。但长时期以来, 有关人类社会物质流及其环境影响的量化问题, 并未受到人们足够的重视^[3]。直至20世纪90年代初, 德国的Wuppertal气候、环境与能源研究所(Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy)提出生态包袱(Eco-nucksack, 也称为隐性物质流, 简称隐流)这一概念来度量资源开采过程中产生的废弃物, 才使人们清醒的认识到了人类活动物质流对自然环境的巨大影响。在生态包袱的基础上, 逐渐形成了物质流分析这一重要工具, 系统地用于资源环境与社会经济相互作用的研究^[4,5]。本文将根据国内外物质流分析的最新进展, 系统分析其应用于区域可持续发展生态评估中的不足之处, 以期推动该研究的

进一步深入。

1 物质流分析及其发展历程

1.1 物质流分析

物质流核算与分析(Material Flow Accounting and Analysis, MFA, 简称物质流分析或物质流核算), 是定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具^[6], 由早期的社会代谢、工业代谢研究发展而来, 具体指用物理单位(通常用t)对物质从采掘、生产、转换、消费、循环使用直到最终处置进行的结算, 所分析的物质包括元素、原材料、基本材料、产品、制成品、废弃物和向空气、水的排放物等^[7]。从研究的层次来看, 一般可将MFA划分为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, 其中, 经济系统和产业部门的物质流分析对于区域可持续发展研究具有重要意义。而从研究采用的模型来看, 物质流分析主要包括静态分析与动态分析两种类型, 前者用于判别自然环境退化和人类环境污染的来源, 预测物质投入量、技术水平与管理

收稿日期: 2006-03-29; 修订日期: 2006-05-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号: 40635028); 国家自然科学基金项目(编号: 40471002)。

作者简介: 彭建(1976~), 男, 四川成都人, 博士生, 主要从事景观生态与土地利用的学习与研究。

E-mail: jianpeng@hotmail.com

政策等要素变化可能的环境影响,后者则在此基础上更进一步预测系统当前贮存物质转变为废物排放时可能的环境影响^[8,9]。

物质流分析从实物的质量出发,通过社会经济系统的物质输入、输出与贮存等物质流分析指标,定量分析人类社会经济系统与自然环境之间的物质交换,测度人类物质使用对自然生态环境的影响。因此,物质流分析可以揭示物质在特定区域内的流动特征和转化效率,从而找出环境压力的直接来源,作为评价该区域发展的可持续性指标^[9]。

1.2 物质流分析发展历程

物质流分析起源于欧洲,其基本思想的发轫可以追溯到100多年之前,第一个国家尺度物质流分析尝试发表于1969年^[9],但物质流分析真正受到关注则是在20世纪90年代,1992年奥地利、日本率先提出了国家级的整体MFA报告,引起了学界和公众对MFA方法的重视。而1996年欧洲委员会成立“一致性行动(Concerted Action)”的“协调帐户(ConAccount)计划”(www.conaccount.net),和2001年欧盟统计局(EuroStat)公布MFA指标的指导性原则文件,对于全球MFA的深入研究具有重大历史意义^[10]。除欧盟外,世界资源研究所(World Resources Institute, WRI)是世界上研究MFA的第二大机构^[10],从1997年开始,WRI着手对美国、日本、奥地利、德国、荷兰等国经济系统的物质流动状况进行了全面的分析,分别给出了各国经济系统的物质输入总量^[11]、输出总量^[12]及相关评价指标。

从研究的内容来看,物质流分析具有明显的阶段性:早期的物质流分析侧重于维持经济系统运行所需的原材料供给的充裕度^[13];1972年“增长的极限”使研究的重点扩展到排放物对人和生态系统的影响^[9];目前的研究则侧重于国家或产业经济系统的物质通量^[7]。

2 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展

2.1 物质流分析应用于区域可持续发展生态评估的基本原理

物质流分析应用于区域可持续发展生态评估,所依据的基本原理是:人类活动所产生的环境影响在很大程度上取决于输入、输出经济系统的物质数量与质量,前者导致环境退化,后者则引起环境污染^[9]。一般而言,物质投入量越大,自然资源的消耗

越快,产生的废弃物也越多,从而直接导致生态环境的恶化,使经济的发展走向弱可持续性或不可持续性^[6];保障经济发展的可持续性就是尽量减少自然资源消耗和污染物排放,即实现物质减量,以减轻生态系统的压力^[4]。因此,物质流分析是衡量经济系统可持续发展的重要内容^[3,5,15~18],一般采用经济系统的物质输入量作为环境压力和可持续发展程度的示踪指标,用以定量确定特定区域在不同阶段的可持续发展目标^[14,19,20],进而提出相应的减少环境压力的解决方案,为实现可持续发展目标提供科学依据^[9,20]。

根据欧盟框架,物质流分析一般将物质划分为直接物质输入与隐流,和国内物质与国外物质,在此基础上核算各种物质流,通过直接物质输入量(Direct material input, DMI)、物质投入总量(Total material input, TMI)、物质需求总量(Total material requirement, TMR)、直接物质消耗量(Direct material consumption, DMC)、物质消耗总量(Total material consumption, TMC)、国内过程产出(Domestic processed output, DPO)、物质输出总量(Total material output, TMO)、物质贸易差额(Physical trade balance, PTB)、贮存净增量(Net addition to stock, NAS)等物质流分析指标的纵向、横向比较,揭示所研究系统物质使用的宏观组成和利用效率及其变化情况,度量经济系统运行的资源环境影响。其中,物质需求总量是区域内部的物质需求量与进口的物质需求量之和,包括国内物质提取过程中产生的隐流和进口物质的隐流,表征了区域经济系统动用整个自然界的物质总量,是度量区域可持续发展程度的重要指标。一般认为,物质需求总量越小,输出到环境中的废物就越少,对自然环境的影响也越少,区域发展的可持续性则越强^[3,9]。

此外,物质需求总量指标与人口、GDP等社会经济统计指标整合而成的物质消耗强度(Intensity of material consumption, IMC)、物质生产力(Material productivity, MP)等指标,也常用于区域可持续发展评价。其中,物质消耗强度=物质需求总量/总人口,表征经济系统的人均资源消耗量,其值越大,经济系统越背离可持续发展的目标;物质生产力=国内生产总值/物质需求总量,即单位物质消耗所创造的经济价值,表征物质流动的强度及效率,其值越大,经济系统越趋近可持续发展的目标^[3,20,21]。

2.2 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展

目前, 国外物质流分析的相关研究主要围绕国家尺度上的经济系统展开。奥地利^[10~12, 22]、日本^[11, 12, 23]、德国^[11, 12, 24, 25]、荷兰^[11, 12]、美国^[11, 12]、澳大利亚^[26]、英国^[27~29]、芬兰^[30~32]、瑞典^[33, 34]、丹麦^[1]、意大利^[35, 36]、波兰^[37]、捷克^[38]等西方国家, 以及巴西、委内瑞拉、玻利维亚、哥伦比亚等南美国家^[10]先后完成了国家层面的物质流分析, 欧盟这样的国家联合体也完成了物质流分析^[39~42]。综合而言, 国外学者的物质流分析, 主要通过相关物质流分析指标的计算及其历史时期的动态变化和不同国家之间的比较研究, 定量描述区域经济系统与自然环境之间的物质交换, 并常将这些指标与 GDP 等经济指标相结合, 分析区域资源利用效率, 预测经济发展的物质需求, 探讨提高资源利用效率以实现物质减量的对策措施。

相对于国外研究的蓬勃发展, 物质流分析于 2000 年才由陈效速等^[20]最早引入我国, 目前尚未获得普遍应用, 尚处于起步阶段。综合近年来发表的相关文献, 国内物质流分析表现出以下几方面的特征:

(1) 多实证研究, 理论分析相对薄弱。现有的物质流分析多属实证研究, 往往根据欧盟的研究框架, 估算出研究系统(经济系统或产业系统)不同年份的物质输入、输出等物质流指标, 并对比相关研究结果来度量资源消耗强度与利用效率及其变化特征。另一方面, 针对国内相关社会经济与生态环境统计调查口径的差异, 对欧盟物质流分析研究框架在我国的适用性分析, 以及相应的模型修正, 尚无人涉足。仅王奇等根据质量守恒定律建立了一个封闭系统的物质流总量模型, 系统地剖析了人类经济系统中的各个基本物质变量对自然资源索取量与废物排放量的影响机理, 提出了实现可持续发展的基本途径^[43]; 刘滨等则以物质流分析方法为依据, 系统构建了我国的循环经济指标体系^[44];

(2) 实证研究以经济系统物质流分析为主, 但多侧重国家尺度, 少区域物质流分析。陈效速等初步估算了 1989 年~1996 年间我国经济系统的物质需

求总量、物质消耗强度和物质生产力, 研究表明, 我国经济系统运行主要依靠国内资源消耗, 物质资源投入超量, 资源利用效率低下, 生态环境压力较大^[20, 21]; 陈效速等还对 1985 年~1997 年我国经济系统的物质输入与输出进行了研究, 指出我国的物质输出量由物质输入量决定, 资源利用效率则有显著提高^[9]; 李刚对 1995 年~2002 年中国经济系统的物质输入和输出研究, 也表明经济系统的物质需求总量和物质输出总量巨大, 物质生产力低下, 而技术水平是影响我国物质需求总量变化的关键因素, 出口能源中的煤炭存在巨大隐藏流则是导致生态贸易赤字的主要原因^[44]; 刘敬智等对 1990 年~2002 年中国经济系统的直接物质投入与物质减量趋势的分析, 也表明我国经济发展主要依赖自身资源的支撑, 并且, 1993 年以来我国经济实现了一定程度的物质减量^[9]; 徐明等对中国经济系统 1990 年~2002 年的直接物质投入与消耗进行了分析, 结果表明, 1995 年~1999 年是其中发展最好的一个阶段, 初步实现了自然资源的可持续发展^[18]; 王青等计算了 1990 年~2002 年中国经济发展中的国内物质消耗, 研究表明, 我国国内物质消耗量年均增长 3.3%, 而物质使用效率年均增长 6.2%, 经济发展实现了一定程度的相对物质减量, 但仍处于资源消耗型增长阶段, 物质消耗总量增长势头较强, 实现绝对减量十分不易^[45]。相对于国家物质流分析, 区域物质流分析尚未普遍开展, 仅徐一剑等以贵阳市为例做了初步尝试, 分析了贵阳市 2000 年物质流全景及 1978 年~2002 年资源投入、1996 年~2002 年污染排放的总量、结构、强度与人均规模的变化, 研究结果表明, 贵阳市现有的经济发展表现出强烈的“高资源投入, 高污染排放”的线性经济特征^[7];

(3) 产业部门物质流分析相对较少, 且偏重能源矿产采掘业, 其他物质生产部门关注较少。徐明等计算了 1990 年~2000 年中国经济系统所使用化石燃料的物质需求总量, 指出我国使用的化石燃料总量远高于发达国家, 是严重制约经济发展的瓶颈^[5]; 孙鹏等计算了我国 1978 年~2003 年的能源消耗总量, 发现并没有随 GDP 的增长而同比增长, 二者之间实现了一定程度的相对脱钩, 并且经济发展的增长效应导致增加的能源消耗量是能源消耗强度降低的减量效应所减少的能源消耗量的近两倍^[46]; 王青等计算了我国 1991 年~2000 年铁矿资源开发的生态包袱, 结果表明, 全国铁矿石非生物性生态包袱有

1) Graygaard P. O. 2000. Material flow accounts and analysis for Denmark. Paper presented at the 26-27 June 2000 meeting of the Eurostat Task Force on Material Flow Accounting.

较明显的下降趋势,但在重点铁矿山原矿略有上升^[47];丁一等计算了1999年~2002年我国铜资源开发的物质投入与生态包袱,结果表明,单位重量粗铜的物质总投入、非生物固态物质和水的投入都呈下降趋势,粗铜进口造成了生态压力输出,2002年我国粗铜的物质投入则与世界平均水平基本相等^[48];相对于能源矿产资源开发产业物质流分析的集中关注,国内学者较少分析其他产业部门的物质投入与生态包袱,仅陈效速等对北京地区水泥生产和使用过程的物能代谢及其环境影响进行了研究,研究结果表明,1949年~2002年北京地区水泥行业的物能代谢及其环境影响均呈迅速增长趋势,2001年水泥运输过程中的能源消耗与该年本地水泥生产过程中的能源消耗大致相同,而在水泥生产过程中,砂石开采对环境的影响最为显著^[49];此外,刘敬智等还运用生态包袱概念和算法计算了中国1990年~2002年国际贸易附带的环境负担转嫁,研究结果表明,我国进出口贸易附带了生态包袱的净输出^[50]。

3 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究展望

探讨自然经济系统中的物质流动规律,是可持续发展理论研究的基础^[43]。物质流分析应用数理统计方法,定量描述了研究系统与外部环境之间的物质交换,为在任意尺度的区域内跟踪与社会经济系统运行相关的生物物理流提供了一个合适的工具,并可将所有物质流与社会经济数据、指标联系起来^[51],从而准确度量人类经济活动的环境压力。同时,MFA以实物的重量为单位,利用经济系统的物质流转路径和强度作为可持续发展水平的判据,既避免了环境和资源价值币值化过程中的主观性和随意性^[14,52],又弥补了传统货币评价方法不易进行可持续性的时空对比的缺陷,使可持续性度量建立在自然科学分析的基础上^[3,20]。因此,MFA为可持续发展研究提供了一种新颖而简洁的思维方式与研究手段^[29]。

尽管受到学术界的广泛关注,近年来在可持续发展研究领域发展迅速^[3],区域可持续发展生态评估的物质流分析尚有一些理论与技术问题需要突破,主要包括以下几方面的内容:

(1)可持续性阈值问题。物质流分析面临的最大挑战,就是难以提出“可持续性临界值”,也就无从

判定系统是否可持续,而只能基于不同空间单元的横向比较与不同时期的纵向比较,判断系统可持续性程度的高低与升降,这也是物质流分析相比于生态足迹等生态持续性评估方法难以推广应用的重要缺陷所在;

(2)物质使用环境影响的度量问题。区域生态持续性不仅要求自然资源的可持续供给,还需要将物质使用过程中对生态环境的扰动与污染维持在自然环境可承受的范围之内。但现有的物质流分析往往过于注重物质输入、输出量的分析和资源使用效率的评价,而对物质使用的环境影响探讨不多,尚无直接的度量指标,仅依靠物质使用的生态包袱的变化来指示所研究系统经济活动对自然环境的影响,从而判定系统持续性的高低变化。因此,物质流分析还有待进一步构建或整和相关反映系统物质输入生态干扰和物质输出环境污染的定量指标,以综合反映物质流动对系统可持续性的影响;

(3)不同物质重量的可加和性问题。物质流分析是基于“弱可持续性”标准的,即只要资源存量减少获得的收入能够形成其他资源存量的增长,就不违背可持续发展要求,而不论该资源是否已经枯竭。根据这种资源的相互替代性,物质流分析对不同类型物质重量直接进行加和,但如此一来却忽视了物质之间的重要差别^[14],尤其不能直观反映不同物质间迥异的环境影响^[6],从而弱化了物质流与生态环境质量之间的联系^[3],极不利于MFA在区域可持续发展生态评估中的应用。而事实上,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,而非充分条件,确定应该减少的物质流是更为关键的问题^[3,53]。因此,有待于对不同物质区别对待,基于不同物质环境影响程度的差异构建一个通用的折算系数,从而将不同物质的重量转换为标准重量,以精确度量系统物质流对环境的压力;

(4)隐流系数的计算问题。隐流虽未进入到社会经济生产和消费活动的边界之内,但对自然环境产生了不利的影响^[44],成为自然环境的生态包袱。因此,对隐流的计算是物质流分析的关键,是其与传统物质输入、输出分析的区别所在,也是MFA应用于区域可持续发展的重要理论基础。但是,已有的研究一般缺乏对所研究系统各类物质隐流的实测数据,往往采用德国Wuppertal研究所、欧盟生态经济研究所等提供的全球平均隐流比率^[4],再乘以资源投入量计算出隐流。而理论上,隐流系数与资源的

特点、生产方式、生产力水平等密切相关^[7], 即使同一地区不同时期的隐流系数也有可能存在较大差异, 因此, 套用全球平均的隐流系数, 难以精确核算物质流状况, 带有很大的不确定性。并且, 隐流系数仅仅提供了物质生产过程中对环境造成的影响评价, 难以指示物质使用和遗弃过程中的环境影响^[6], 还有待进一步改进;

(5) 系统内部物质流分析问题。现有的物质流分析难以深入经济系统或产业系统内部对各种物质流进行分析, 从而只能对系统整体的持续性水平作出评判, 而难以度量系统内部不同物质流对持续性的影响, 难以有效提出区域可持续发展的可操作性途径。而投入产出分析和物质流分析结合而成的物质投入产出表(Physical input ~ output table, PIOT), 能对系统与外界之间, 以及系统内部的物质流动做出更为翔实的描述^[3, 14, 54, 55], 能度量经济活动中的直接、间接物质投入与隐流, 是环境经济综合帐户建立的基础性工作^[56], 有利于建立可持续发展的宏观调控机制^[14], 对政府的决策具有重要的参考意义^[3]。因此, PIOT 将是物质流分析方法的重要发展趋势;

(6) 数据获取与应用范围限制问题。由于物质流分析统计物质成分的数量相当庞大, 研究结果的有效性往往受统计数据的制约。相当数量的物质成分由于缺乏统计数据, 而只能采用替代数据, 或无法纳入核算体系, 因此, 已有的研究只能是对系统物质流状况的近似估计, 而非精确核算。也正是囿于数据获取的限制, 尤其是物质进出口数据的可获得性差, MFA 在区域尺度上难以普遍推广^[3, 7], 而仅被认为是国家尺度可持续发展定量研究的可行和有效手段^[14]。区域层次物质流分析的缺乏, 同时也导致目前只能对同一尺度不同地区区间的物质流进行研究, 难以对不同层次系统之间的物质流进行比较研究^[51]。因此, 建立完备的监测系统和资料库以使测算结果更加准确科学^[14], 是物质流分析当前面临的重要挑战之一。

参考文献 (References):

[1] 张志强, 孙成权, 程国栋, 等. 可持续发展研究: 进展与趋向 [J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 589 ~ 595. [ZHANG Zhi-qiang, SUN Cheng-quan, CHENG Guo-dong, et al. Progress and trends of sustainable development research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(6): 589 ~ 595.]

[2] 王如松, 林顺坤, 欧阳志云. 海南生态省建设的理论与实践 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 2 ~ 6. [WANG Ru-song, LIN Shun-kun, OUYANG Zhi-yun. *The Theory and Application of*

the Construction of Ecological Province in Hainan [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2004. 2 ~ 6.]

[3] 夏传勇. 经济系统物质流分析研究述评 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 415 ~ 421. [XIA Chuan-yong. Review on studies of economy-wide material flow analysis [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 415 ~ 421.]

[4] 陈跃, 邓南圣. 面向二十一世纪的环境管理工具——物质与能量流动分析 [J]. 重庆环境科学, 2003, 25(3): 1 ~ 5. [CHEN Yue, DENG Nan-sheng. Environmental management approach geared to the 21st century—Matter and energy flow analysis [J]. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, 25(3): 1 ~ 5.]

[5] 徐明, 张天柱. 中国经济系统中化石燃料的物质流分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9): 1 166 ~ 1 170. [XU Ming, ZHANG Tian-zhu. Material flow analysis of fossil fuel usage in the Chinese economy [J]. *J Tsinghua Univ (Sci &Tech)*, 2004, 44(9): 1166 ~ 1170.]

[6] 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 [J]. 资源科学, 2005, 27(1): 46 ~ 51. [LIU Jing-zhi, WANG Qing, GU Xiao-wei, et al. Direct material input and dematerialization analysis of Chinese economy [J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 46 ~ 51.]

[7] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 等. 贵阳市物质流分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1 688 ~ 1 691. [XU Yi-jian, ZHANG Tian-zhu, SHI Lei, et al. Material flow analysis in Guiyang [J]. *J Tsinghua Univ (Sci &Tech)*, 2004, 44(12): 1 688 ~ 1 691.]

[8] Bouman M., Heijungs R., vander Voet E., et al. Material flows and economic models: An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models [J]. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 195 ~ 216.

[9] 陈效述, 赵婷婷, 郭玉泉, 等. 中国经济系统的物质输入与输出分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4): 538 ~ 547. [CHEN Xiao-shu, ZHAO Ting-ting, GUO Yu-quan, et al. Material input and output of Chinese economy system [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(4): 538 ~ 547.]

[10] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹——可持续发展的重量及面积观念 [M]. 北京: 经济科学出版社, 2003. 31 ~ 61. [Tao Zai-pu. *Eco-rucksack and eco-footprint* [M]. Beijing: Economic Science Press, 2003. 31 ~ 61.]

[11] Adrianse A., Bringezu S., Hammond A., et al. Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies [M]. Washington DC: World Resources Institute, 1997.

[12] Mathews E., Amann C., Bringezu S., et al. The Weight of Nations: Material Outflows From Industrial Economies [M]. Washington DC: World Resources Institute, 2000.

[13] Cleveland C. J., Ruth M. Indicators of dematerialization and the materials intensity of use [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 2: 15 ~ 50.

[14] 李刚. 基于可持续发展的国家物质流分析 [J]. 中国工业经济, 2004, (11): 11 ~ 18. [LI Gang. Material flow analysis of nations based on sustainable development [J]. *China Industrial Economy*, 2004, (11): 11 ~ 18.]

[15] Andreas P. Decoupling Economic Development and Freight for Reducing Its Negative Impacts [M]. Wuppertal Papers No. 79.

- Wuppertal, 1997.
- [16] Heinz S., Walter H., Harahl P. Delinking of economic growth and material turnover [J]. *Innovation*, 1999, 12: 31~45.
- [17] Peter B. Dematerialization and Capital Maintenance: Two Sides of the Sustainability Coin [M]. Wuppertal Papers No. 120, Wuppertal, 2002.
- [18] 徐明, 张天柱. 中国经济系统的物质投入分析 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(3): 324~328. [XU Ming, ZHANG Tian-zhu. Material input analysis of China economic system [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(3): 324~328.]
- [19] Hinterberger F., Luks F., Schmidt-Bleek F. Material flows vs. 'natural capital' What makes an economy sustainable? [J]. *Ecological Economics*, 1997, 23: 1~14.
- [20] 陈效速, 乔立佳. 中国经济—环境系统的物质流分析 [J]. *自然资源学报*, 2000, 15(1): 17~23. [CHEN Xiao-qiu, QIAO Li-jia. Material flow analysis of economic-environment system in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 17~23.]
- [21] Chen X., Qiao L. A preliminary material input analysis of China [J]. *Population and Environment*, 2001, 23: 117~126.
- [22] Krausmann F., Haberl H., Erb K. H., et al. Resource flows and land use in Austria 1950~2000: using the MEFA framework to monitor society-nature interaction for sustainability [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21: 215~230.
- [23] Environmental Agency Japan. Quality of the Environment in Japan 1992 [EB/OL]. <http://www.env.go.jp/en/wpaper/1992/index.html>, 2006-05-27.
- [24] Schutz H., Bringezu S. Major material flows in Germany [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 1993, 2(8): 443~448.
- [25] Schutz H. Technical Details of National Material Flow Accounting (Inputside) for Germany [M]. Wuppertal Institute, Wuppertal, 1999.
- [26] Poldy F., Foran B. Resource Flows: The Material Basis of the Australian Economy [EB/OL]. <http://www.cse.csiro.au/publications/1999/resourceflows-99-16.pdf>, 2006-05-27.
- [27] Schandl H., Schulz N. Using material flow accounting to operationalize the concept of Society's Metabolism: A Preliminary MFA for the United Kingdom for the Period of 1937~1997 [EB/OL]. <http://www.iser.essex.ac.uk/pubs/workpaps/pdf/2000-03-01.pdf>, 2000.
- [28] Bringezu S., Schutz H. Total Material Resource Flows of the United Kingdom [M]. Wuppertal Institute, Wuppertal, 2001.
- [29] Sheerin C. UK Material flow accounting [J]. *Economic Trends*, 2002, 583: 53~61.
- [30] Muukkonen J. TMR, DMI and Material Balances, Finland 1980-1997 [M]. Luxembourg: EUROSTAT Working Paper, No. 2/2000/B/1., 2000.
- [31] Hoffen J., Luukkanen J., Kaivo-oja J. Decomposition analysis of Finnish material flows; 1960~1996 [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4: 105~126.
- [32] Maenpaa I., Juutinen A. Materials flows in Finland: Resource use in a small open economy [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 5: 33~48.
- [33] Isacson A., Jonson K., Linder I., et al. Material Flow Accounts, DMI and DMC for Sweden 1987~1997 [M]. Luxembourg: EUROSTAT Working Paper, No. 2/2000/B/2., 2000.
- [34] Palm V., Jonsson K. Material flow accounting in Sweden: Material use for national consumption and for export [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 7: 81~92.
- [35] Femia A. A Material Flow Account for Italy, 1988 [M]. Luxembourg: Eurostat Working Paper, No. 2/2000/B/8, 2000.
- [36] De Marco O., Lagiola G., Mazzacane E. P. Materials flow analysis of the Italian economy [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 4: 55~70.
- [37] Schutz H., Welfens M. J., Stodulski W. Sustainable Development by Dematerialization in Production and Consumption- Strategy for the New Environmental Policy in Poland [M]. Wuppertal Papers No. 103, Wuppertal, 2000.
- [38] Scansny M., Kovanda J., Hak T. Material flow accounts balances and derived indicators the Czech Republic during the 1990s: Results and recommendations for methodological improvements [J]. *Ecological Economics*, 2003, 45: 41~57.
- [39] Bringezu S., Schutz H. Material Use Indicators for the European Union 1980~1997, Economy-Wide Material Flow Accounts and Balances and Derived Indicators of Resource Use [EB/OL]. <http://www.belspo.be/platfomi/sl/Library/Material%20use%20Bringezu.PDF>, 2006-05-27.
- [40] Bringezu S., Schutz H., Moll S. Towards Sustainable Resource Management in the European Union [M]. Wuppertal Papers No. 121, Wuppertal, 2002.
- [41] Eurostat. Material Use in the European Union 1980~2000: Indicators and Analysis [M]. Luxembourg: Office for official Publications of the European Communities, 2002.
- [42] Steurer A. Material flow accounts for the European Union [J]. *Journal of the Chinese Institute of Environmental Engineering*, 2003, 13(4): 201~210.
- [43] 王奇, 叶文虎. 人与环境系统的物质流模型研究 [J]. *生态经济*, 2002, (11): 28~30. [WANG Qi, YE Wen-hu. A study on a material flow model for the system of man and environment [J]. *Ecological Economics*, 2002, (11): 28~30.]
- [44] 刘滨, 王苏亮, 吴宗鑫. 试论以物质流分析方法为基础建立我国循环经济指标体系 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(4): 32~36. [LIU Bin, WANG Su-liang, WU Zong-xin. Exploration on founding the index system of circular economy of China on the basis of material flow analysis [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2005, 15(4): 32~36.]
- [45] 王青, 刘敬智, 顾晓薇, 等. 中国经济系统的物质消耗分析 [J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 2~7. [WANG Qing, LIU Jing-zhi, GU Xiao-wei, et al. Domestic material consumption of Chinese economic system [J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 2~7.]
- [46] 孙鹏, 顾晓薇, 刘敬智, 等. 中国能源消费的分解分析 [J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 15~19. [SUN Peng, GU Xiao-wei, LIU Jing-zhi, et al. Decomposition analysis of Chinese energy consumption [J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 15~19.]
- [47] 王青, 丁一, 顾晓薇, 等. 中国铁矿资源开发中的生态包袱 [J]. *资源科学*, 2005, 27(1): 2~7. [WANG Qing, DING Yi, GU Xiao-wei, et al. Ecological rucksacks of iron ore exploitation in China [J]. *Resources Science*, 2005, 27(1): 2~7.]
- [48] 丁一, 王青, 顾晓薇. 中国铜资源开发利用中的物质投入 [J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 27~32. [DING Yi, WANG Qing, GU Xiaowei. Material inputs of copper exploitation in China [J].

- Resources Science*, 2005, 27(5): 27~32.]
- [49] 陈效述, 郭玉泉, 崔素平, 等. 北京地区水泥行业的物能代谢及其环境影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 40~46. [CHEN Xiao-qiu, GUO Yu-quan, CUI Su-ping, et al. Material-energy metabolism and environmental implications of cement industry in Beijing [J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 40~46.]
- [50] 刘敬智, 王青, 顾晓薇, 等. 中国实物国际贸易及其附带的环境负担转嫁分析[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 8~14. [LIU Jing-zhi, WANG Qing, GU Xiao-wei, et al. Analysis of Chinese international physical trade and associated environmental burden [J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 8~14.]
- [51] Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., et al. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21: 199~213.
- [52] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 297~304. [LI Shuang-cheng, FU Xiao-feng, ZHENG Du. Energy analysis for evaluation sustainability of Chinese economy [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(4): 297~304.]
- [53] Reijnders L. The factor X debate: Setting targets for eco-efficiency [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2: 13~22.
- [54] Stahmer C., Kuhn M., Braun N. Physical Input-Output Tables for Germany, 1990 [M]. Luxemburg: EUROSTAT Working Paper No. 2/1998/B/1, 1998.
- [55] Stefan G., Klaus H. Alternative approaches of physical input-output analysis to estimate primary material inputs of production and consumption activities [J]. *Economic Systems Research*, 2004, 16: 301~310.
- [56] 龙爱华, 张志强, 苏志勇. 生态足迹评介及国际研究前沿[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 971~981. [Long Ai-hua, Zhang Zhi-qiang, Su Zhi-yong. Review of progress in research on ecological footprint [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(6): 971~981.]

Progress and Prospect of Material Flow Analysis in the Ecological Assessment of Regional Sustainable Development

PENG Jian^{1,2}, WANG Yang-lin², WU Jian-sheng^{1,2}

(1. Center of Digital City and Urban Landscape, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Ecological assessment of sustainable development is one of the thematic issues of international ecological economy and sustainable development. Material flow analysis (MFA) can assess the ecological sustainability of human-ecological-economic systems through measuring material flows between human and the nature. In this paper, on the basis of the analysis of MFA and its development through the world, we analyzed the basis principles of MFA in the application of ecological assessment of regional sustainable development. Through the analysis of research progress on MFA in the ecological assessment of regional sustainable development at home and abroad, it is concluded that MFA researches in China are still in the primary stage. The characteristics of MFA researches in China can be summarized as: 1) Attentions were paid more to case studies, and less to theoretical researches; 2) Case studies often focused on MFA analysis of economic system, instead of industrial department; 3) In case studies of MFA analysis of economic system, it was national scale not regional scale that were usually related; and 4) In case studies of MFA analysis of industrial department, the department of mining and energy industry was focused. Furthermore, the following six prime issues can be summarized for applying MFA on ecological assessment of regional sustainable development, that is, the threshold of sustainability, the measurement of environmental impact of material utilization, the addition of the weight of different materials, the calculation of hidden flow coefficient, the analysis of material flow within the system, and the limitation in data collection.

Key words: Material flow analysis; Ecological assessment; Regional sustainable development; Research progress