

# 基于 MFA 的深圳市生态可持续评价

黄松林<sup>1,2</sup> 吴健生<sup>1,2</sup> 彭建<sup>1,2</sup> 黄秀兰<sup>1</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**为探讨区域生态可持续发展的程度,运用物质流分析方法,对深圳市经济环境系统在 1992-2007 年期间的物质输入与物质输出的规模进行了动态分析,并将物质强度与物质效率与其他区域的相关研究进行了比较。结果表明:深圳是一个资源外部性依赖很强的地区,区域经济系统的物质输入在 2004 年出现拐点,物质输出与物质输入具有高相关性,区域物质消耗调控的关键应当从源头上控制物质投入规模;深圳市正处于城市发展的第 3 个阶段,物质输入强度逐步回落,物质输出强度缓慢上升,城市的发展逐步摆脱对物质的依赖性,但区域生态环境系统的压力依然很大;深圳市资源生产率和环境效率逐渐上升,技术的进步提高了物质的利用效率,区域社会经济系统发展的物质消耗成本和环境污染成本越来越小;深圳市经济系统与生态环境系统的相互作用分为两个阶段,目前区域生态系统正处于由相对可持续发展向绝对可持续发展的转型阶段。

**关键词:**物质流分析;生态;可持续发展;深圳市

## 1 引言

可持续发展这一概念源于对自然资源与生态环境的保护<sup>[1]</sup>,可持续发展问题的核心就是环境与发展、自然与社会、人类需求与生态整体性的相互协调<sup>[2-3]</sup>。对区域的可持续发展进行衡量,不仅仅要考虑到环境的基础作用,也要同时考虑到环境与社会、经济“三位一体”的协调作用。归纳起来,用于区域可持续发展生态评估的模型主要可以分为以下 5 类:①构建一个多层次的指标体系的系统综合评价;②以货币作为测度单位的环境经济综合核算体系;③以能量为测度单位的能量核算体系;④以土地面积为测度单位的生态足迹方法;⑤以物质流为测度单位的物质流核算分析。

表 1 从衡量单位、可比性、关键问题等几个方面对上述 5 种主要的生态可持续性研究模型或方法进行了比较<sup>[4-10]</sup>。与其他

四类评价方法相比而言,物质流方法在表征意义确实不够直观,可持续性阈值问题更是其致命伤,但物质流分析方法具有涵盖研究对象广泛、模型结构简洁灵活、可比性和可预测性强等优点。因此,物质流分析方法成为区域生态可持续性评价重要手段。

本研究将以深圳市环境经济系统为研究对象,采用物质流分析 (Materials Flow Analysis, MFA) 方法,在借鉴“欧盟方法指南”的理论框架下,构建了区域(市域)物质流核算框架,建立了完整的区域(市域)物质流分析评价指标体系,并辅以人口及 GDP 等指标,从空间尺度(与不同区域比较)和时间尺度(1992-2007 年)对深圳市生态可持续性进行动态评价,判断深圳市生态可持续性的发展水平及趋势。

表 1 主要可持续性评价方法比较<sup>[4-10]</sup>

Tab.1 Comparison of main research methods of sustainability assessment

	系统综合评价	绿色 GDP	能值分析	生态足迹	物质流分析
衡量单位	指标(满分 100)	货币	能量	面积	质量
评价对象	社会—经济—环境	经济—环境	经济—环境	经济—环境	经济—环境
数据需求	适中	适中	适中	适中	大
空间尺度	区域	国家/区域	国家/区域	国家/区域	国家/区域/产业
可比性	适中	强	适中	适中	强
可预测性	适中	适中	差	差	强
关键问题	指标与指标权重; 标准值的可持续性含义	物质的 货币化	能值转换率; 可持续性阈值	土地类型的兼业性; 平均生产力的相对性	隐流系数; 可持续性阈值

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(40635028;40801066)。

作者简介:黄松林(1985-),男,苗族,湖南怀化人,硕士研究生,主要研究方向为景观生态与土地利用。E-mail:pkuhsl@qq.com.

通讯作者:吴健生(1965-),湖南人,研究领域为景观生态与 GIS。E-mail:wujs@szpku.edu.cn.

## 2 研究区概况和研究方法

### 2.1 研究区概况

深圳位于广东省沿海,与香港接壤,全市总面积 1952.81 km<sup>2</sup>,2007 年末全市常住人口 861.55 万人。作为我国改革开放的前沿阵地,深圳近年来经济迅猛发展,2007 年末全市 GDP 为 6802 亿元,人均 GDP 为 78946 元,居全国之首。同时,深圳是我国率先实现全市域范围内土地管理二元制向一元制转变的城市,快速城市化特征鲜明;但由于城市快速发展,人口、经济活动在短时间内大量聚集,深圳市的生态退化和环境污染问题不断暴露出来,为提高土地利用效率,推动经济的高速发展,大面积生态用地被用作城市发展用地,原有的各种生态过程随着土地利用类型的改变而消失,生态系统的结构和功能均发生了较大的变化,其生态可持续发展状况受到学者的普遍关注。

目前,学者运用了不同的模型对深圳进行了生态可持续性评价<sup>[11-16]</sup>,但都存在一定局限性,并不能真正反映区域生态的可持续性,而以物质重量来度量可持续发展水平的物质流分析在深圳尚无建树,所以应用物质流分析方法对以快速城市化为特征的深圳市进行区域生态可持续性评价是一次有益的尝试。

### 2.2 研究方法

MFA(Materials Flow Analysis)是研究经济系统与生态系统之间物质流动规律及其量化的一种方法,主要反映输入、输出经济系统的物质流量和物质的存量<sup>[17]</sup>。MFA 基本观点是<sup>[18]</sup>: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资源和废弃物质的数量与质量;前者产生对环境的扰动,引起环境的退化;后者则引起环境的污染。

根据研究对象的行政区域不同,物质流分析的研究通常分为宏观、中观和微观 3 个层次。物质流分析作为一个崭新的研究领域,尽管在宏观的层面上已有较多研究成果涌现出来<sup>[19-29]</sup>,然而在区域物质流方面,却鲜有研究,原因是其难度较大,特别是统计资料的可获取性和准确性方面,以及资料的分析计算方面都存在相当大的问题,成为制约该项研究的关键。目前,有关区域物质流分析的较为系统的研究成果很少,而对于以城市为研究对象的小区

域的物质流分析,只有学者对天津市<sup>[30]</sup>和贵阳市<sup>[31]</sup>的经济环境系统进行了物质流分析,研究方法并不系统,分析并不详尽。

目前在物质流分析中多采用欧盟统计局所提出的物质流账户体系,该体系所推荐的账户中,直接物质投入(Direct Material Input,DMI)和直接物质输出(Direct Material Output,DMO)是表征经济环境系统物质输入输出规模的 2 个核心指标<sup>[32]</sup>,可以从整体规模上判断区域经济系统对生态环境系统的扰动与破坏,进而反映区域生态的可持续性。其中 DMI 主要是指由自然环境系统输入经济系统,并直接参与经济系统运行的物质,主要包括化石燃料、矿物质和生物质等,反映了经济环境系统的资源需求压力;DMO 主要是指经济系统运行过程生产的废弃物的排放、耗散物质和出口物质,反应了经济活动的环境影响与压力;DMI 和 DMO 的差值即区域物质存量的变化,即储存净增量,是区域经济系统福利的物质表现。同时,结合人口和经济指标,可以进一步得到物质强度和效率指标,人均直接物质输入(Intensity of Material Input,IMI)和人均区域过程排放(Intensity of Material Output,IMO)是物质流强度指标,主要用来说明人均资源投入量和废物排放量,反映区域生态系统的人均压力,通过这种压力的趋势变化,判断区域生态的可持续性。资源生产率(Material Productivity,MP)和环境效率(Environment Efficiency,EE)是物质流效率指标,通过经济增长与生态环境扰动关系的比值变化,反映区域生态的可持续性;MP 是单位物质消耗所创造的经济价值,主要与区域的生产力水平有关,另外也受到经济结构的影响;EE 是单位物质排放所创造的价值。作为物质流分析的衍生指标,IMI、IMO、MP 和 EE 等指标有助于分析区域经济系统与区域生态环境系统之间的关系,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,并为实现去物质化和经济、环境的可持续发展奠定理论基础<sup>[33]</sup>。DMI 和 DMO 的核算框架如表 2 所示,其中所有的计算项目均以质量为计算单位。

### 2.3 数据来源

本研究的数据来源分为 3 种:

(1) 深圳市在研究时段(1992-2007 年)相关统计资料,包括深圳统计年鉴、广东统计年鉴、广东工业统计年鉴、广东农村统计年鉴、深圳市环境质量报

告书、深圳市水资源公报等及其他相关统计资料。

(2) 已被学术界认同的研究成果,即已公开发表的不同学者对其他其他区域所作的物质流分析的研究报告、学位论文或学术论文。

(3) 权威机构公布的研究报告及规划文本,主要包括《深圳市矿产资源总体规划(2002-2010)》、《深圳市“九五”期间主要污染物排放总量控制计划》、《深圳市“十五”期间主要污染物排放总量控制计划》、《深圳市水资源调查评价》、《深圳市环境质量全面达标规划》、《深圳市城市总体规划 (1996-2010)》等相关资料。

### 3 结果与分析

#### 3.1 物质流规模分析

##### 3.1.1 DMI 与 DMO 动态分析

DMI 与 DMO 动态分析不包括水,这是因为水规模较大,分别占到各年份 DMI 和 DMO 总量的 90%以上,为了排除因水的输入和输出量的比重过大引起的干扰,首先对固体、气体物质进行数据计算分析,然后再对水的物质流进行数据计算分析,进而可以探究区域经济系统对区域生态环境系统的整体扰动情况。

在不考虑水资源的前提下,深圳市的 DMO 呈波动递增趋势,2007 年达到 1903.35 万 t,是 1992 年 5.5 倍,平均年递增速度为 12.04%。这表明从规模上而言,区域经济系统产生的废弃物逐年增加,对区域生态环境系统的扰动逐步加大,深圳市快速城市化地区的生态效应研究也是目前研究的热点之一。1992-2007 年,可将深圳市 DMI 的变化分为两个阶段,第一阶段是 1992-2004 年,DMI 呈持续上涨的趋势,2004 年达到最大值 19452.19 万 t,是 1992 年的 3.25 倍;第二阶段是 2005-2007 年,DMI 呈下降趋势,2007 年为 15514.92 万 t,较 2004 年下降了 20.24%。这表明,从规模上而言,区域经济系统的发展对生态环境系统的物质消耗从逐年增长向逐步可控转变。从实际情况分析,

2004 年以前随着经济的快速发展,深圳市基础设施建设全面展开,基建项目对石料的需求量很大;拐点出现在 04 年,是因为政府出台了系列政策,控制土地的出让,集约节约利用土地资源,房屋施工面积出现回落,进而 DMI 出现拐点。

##### 3.1.2 水资源输入与输出动态分析

水资源是一种非常重要的自然资源,它是区域

表 2 MFA 指标核算框架

Tab.2 Indicator calculating framework of MFA

计算项目	计算方法	说明
化石燃料	$a_1$	直接开采的煤、石油、天然气
矿物质	$a_2$	直接开采的金属、非金属矿物
生物质	$a_3$	农、林、牧、渔业的生物产品生产量
区域内资源开采	$a=a_1+a_2+a_3$	直接从区域内自然环境开采的物质总量
进口物质	$b$	自其他区域进口的原材料、成品及半成品
废弃物排放	$c_1$	排放到大气、地表及水体中的废弃物使用后就消散在自然环境中的化肥、农药等物质
耗散物质	$c_2$	
区域过程排放	$RPO=c_1+c_2$	经济系统向生态系统排放的物质总量
出口物质	$D$	想其他区域出口的原材料、成品及半成品
DMI	$DMI=a+b$	经济系统从生态系统获取的物质总量
DMO	$DMO=RPO+d$	经济系统输出的物质总量

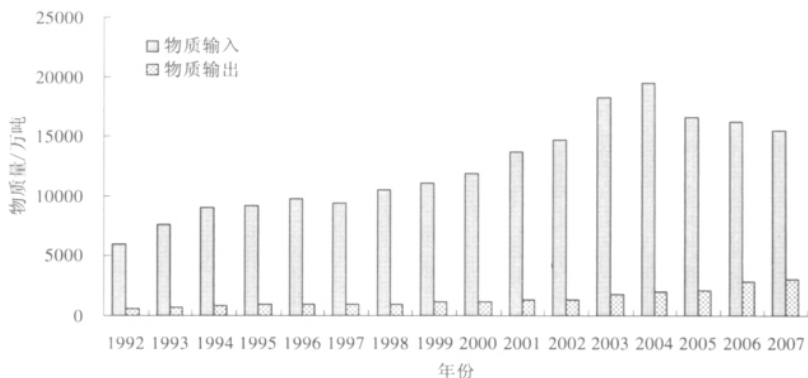


图 1 1992-2007 年深圳市物质输入与输出量

Fig.1 Material inputs and outputs of Shenzhen from 1992 to 2007

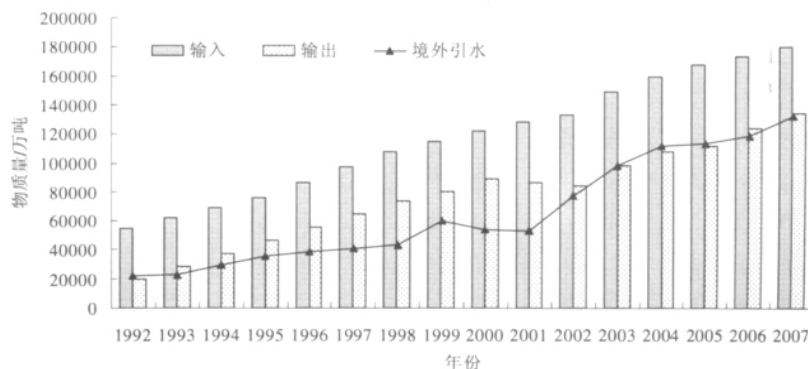


图 2 1992-2007 年深圳市水的输入与输出量

Fig.2 Water inputs and outputs of Shenzhen from 1992 to 2007



生态可持续发展的重要影响因子。但由于水的输入与输出量比其他物质输入与输出量大 2-3 个数量级,因而有必要对水资源的输入与输出单独讨论。

图 2 揭示了 1992-2007 年区域水的输入与输出的变化轨迹。理论上,部分水会存储在产品和生物体内,但水的输入量与输出量应该基本保持平衡。从图中可以看到,水的输入量与输出量数据相差较大,主要的原因在于水的输出量统计方面:一是电厂直流冷却水排放量不计在废水排放量中;二是有部分非重点工业企业的废污水没有被统计。2007 年,深圳市水资源输入量 180085 万 t,其中境外引水 132600 万 t,自给率 26.37%,污水排放 134970 万 t。区域水的输出与输入在规模上均呈现上升趋势,这表明区域对自然生态环境的水资源依赖程度逐步增加。

### 3.1.3 物质输入与输出相关分析

总体而言,DMI 和 DMO 均呈波动递增的趋势,同时二者具有高线性相关性(图 3)。R<sup>2</sup> 为 0.6648,说明物质输出受物质输入的影响明显,区域物质消耗调控的关键应当从源头上控制物质投入规模,不仅可以减轻经济发展造成的生态环境质量退化,还可以减少经济系统向环境排放的废弃物质量。

### 3.2 物质流强度分析

基于 MFA 的区域生态可持续性评价的一大缺陷是其可持续性阈值的确定,通过物质流强度的区域比较,是明确研究区域的物质流代谢的强度及生态可持续性水平的重要途径,通过比较也可发现物质流强度变化的一般规律,本研究对与区域社会经济活动密切相关 DMI 和 RPO (Regional Processed Output, RPO) 分别进行强度分析,并最终确定天津<sup>[30]</sup>、青岛城阳区<sup>[34]</sup>、广东省、江苏省<sup>[35]</sup>、辽宁省<sup>[36]</sup>、安徽省<sup>[37]</sup>、中国<sup>[38]</sup>和德国<sup>[39]</sup>作为研究对比区域。图 4 是 IMI 的区域比较。

从图 4 中可以更清楚的看到,深圳市 IMI 远高于国内其他城市和区域的同期水平,和国外发达国家的水平相当。IMI 指标可以表征区域经济系统对生态环境系统的人均扰动,指标值越大,表明区域经济系统的物质输入的增加速度

快于人口的增加速度,人均物质需求增加,对生态环境压力越大。通过对不同区域的比较,笔者将城市的发展概括为 3 个阶段,第一个阶段,人口聚集,经济初步发展,表现为人口增长速度快于物质投入的增长速度,IMI 逐步降低,进而城市出现配套基础设施不足的问题;第二阶段,城市的人口规模得以控制,经济稳步增长,IMI 逐步增加,表现为物质增长速度快于人口增长速度,城市基础设施逐步完善、人民福利逐步提高;第三阶段,城市稳定发展,城市的发展逐步摆脱对物质的依赖性,技术的进步提高了物质的利用效率,使更少的资源创造更大的经效益,表现为物质的负增长,IMI 逐步回落。区域的发展也有同样的发展规律。

第一阶段是城市的雏形,城市的产生正是人口聚集的结果;大部分城市目前都处于第二个阶段,物质输入的增长速度快于人口的增长速度,IMI 逐步增长。西方发达国家或地区目前大多处于第三阶段,城市功能成熟,经济稳定,并逐步实现物质减量化。深圳是一座快速发展的城市,从 1979 年到 2007 年,不到 30 年的时间跨越了城市发展的 3 个阶段,从人口的快速聚集到经济的快速发展,再到目前的物质减量化。

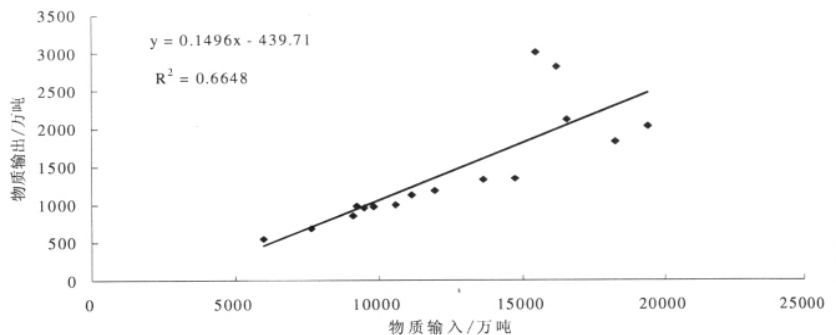


图 3 物质输入与输出的相关分析

Fig.3 Correlation analysis between material imports and outputs

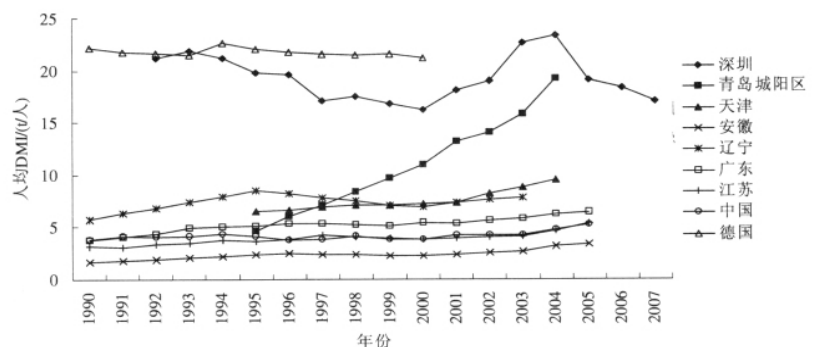


图 4 IMI 的区域对比

Fig.4 Regional comparison of IMI

从图 5 可以看出, 各区域的 IMO 均呈缓慢上升的阶段。IMO 表征区域社会经济系统的经济活动人均排放的废弃物, 指标值增大, 表明区域经济系统在生产过程中排放的废弃物的增长速度快于人口的增长速度, 人均产生的废弃物增加, 进而给区域生态环境系统带来更大的压力, 不利于生态系统的可持续发展。通过对比可以发现, 深圳市的 IMO 在国内属于中等水平, 区域生态环境系统的人均压力较大。

### 3.3 物质流效率分析

物质流效率的区域比较是明确研究区域的物质流代谢的效率及生态可持续性水平的重要途径, 通过比较也可以发现物质流效率变化的一般规律。

从图 6 可以看出, 各区域的资源生产率均呈逐渐上升的阶段, 一方面说明经济增长的速度快于物质消耗的速度, 另一方面也说明单位物质创造的经济效益越来越大, 区域社会经济系统发展的物质消耗成本越来越小, 有利于区域生态系统的可持续发展。2004 年以前, 由于深圳市较为粗放的发展模式, 虽然经济发展很快, 但物质输入量也呈放量增长的趋势, 经济的增长的物质依赖性很强, 资源生产率在全国属于中等水平, 和发达国家的 MP 相比还有很大差距。2004 年以后, 随着物质输入的拐点, 经济的发展逐步进入物质减量化的状态, 在经济继续发展的同时, 物质消耗量得以控制, 资源生产率显著增长, 接近发达国家的 21 世纪初的水平。从现状来看, 深圳市的 MP 高于全国的平均水平, 但和发达国家还有一定差距, 这表明深圳市资源的利用率较高, 但仍有上升空间, 通过提高资源开采技术和产业结构转型可以进一步提高 MP, 实现区域生态环境系统的可持续发展。

资源环境成本, 其指标含义比较明确, 指标值升高, 表明废弃物排放增长的速度小于经济的增长速度, 区域经济系统的资源环境成本就越小, 经济发展对生态环境系统的破坏就越小, 有利于区域生态系统的可持续发展。从图 7 可以看出, 各区域的环境效率均呈逐渐上升的阶段, 深圳市的环境效率在国内属于较高水平, 一方面是因为经济的快速发展, 另一方面是环境管理水平的提高和污染处理技术的进步的结果。

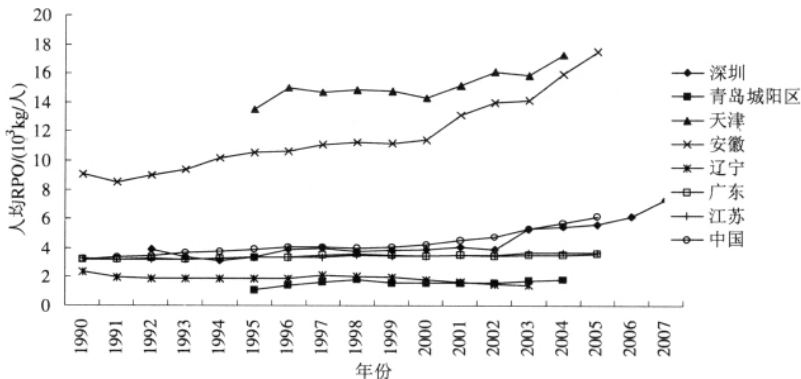


图 5 IMO 的区域对比

Fig.5 Regional comparison of IMO

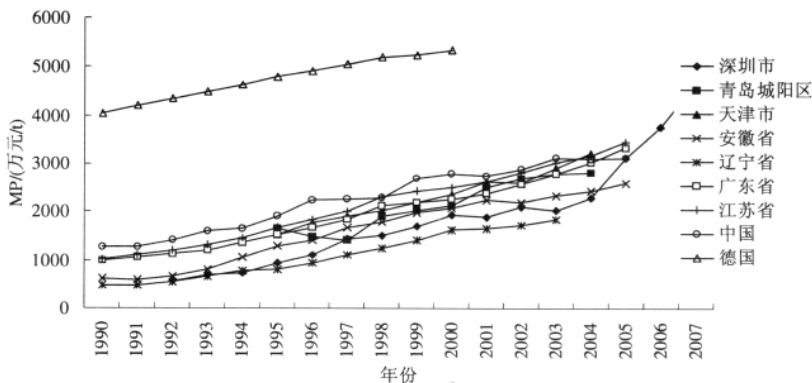


图 6 资源生产率的区域对比

Fig.6 Regional comparison of MP

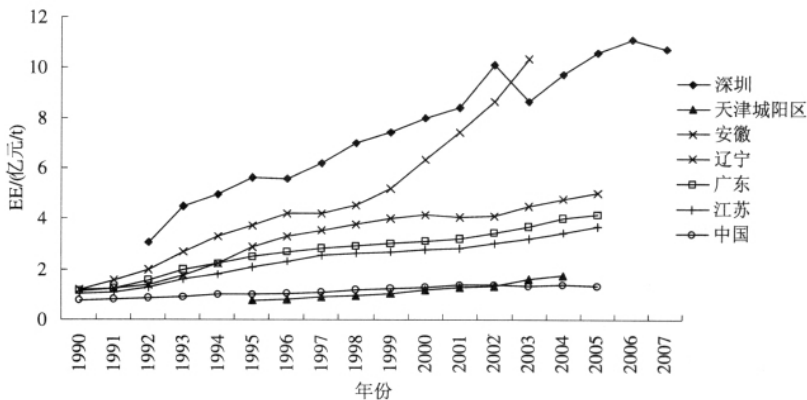


图 7 环境效率的区域对比

Fig.7 Regional comparison of EE

EE 表征区域社会经济系统的

### 3.4 深圳市经济发展、资源消耗和环境影响规律

经济社会发展的价值量(GDP)可以表征区域经济系统的发展状况,直接物质输入量(DMI)和区域过程排放(RPO)可以分别表征区域经济系统对区域生态环境系统在输入端和输出端的扰动及压力情况。若是随着区域经济的不断增长,区域环境负荷和资源消耗也在不断增长,且增长速度超过经济的增长速度,那么区域生态系统属于不可持续发展状态;若是区域环境负荷和资源消耗随着区域经济的不断增长而有较小的增长,那么区域生态系统属于相对可持续发展状态;若是区域环境负荷和资源消耗随着区域经济的不断增长而减小,区域生态系统属于绝对可持续发展状态。

对 DMI、RPO 和 GDP 分别以 1992 年数据值为基准值,其他年份相应指标值与其相比,得到各指标的变化趋势。

通过图 8,可以将深圳市经济系统与生态环境系统的相互作用分为两个阶段。深圳市经济系统与生态环境系统的相互作用分为两个阶段。第一阶段(1992-2004),深圳市 GDP 随着直接物质输入量的增加而呈递增趋势,同时区域过程排放量也整体呈现线性增加的趋势,这说明随着经济增长依赖于物质的投入,物质输入量的增加随之带来的环境负担也线性增加,但直接物质输入量和区域过程排放量的增长速度明显低于 GDP 的增长速度,区域经济的发展对从区域生态系统物质的获取有一定的依赖性,区域生态系统处于相对可持续发展状态。第二阶段(2005-2007),GDP 仍然保持高的增长速度,但直接物质输入量逐渐下降,经济发展的资源消耗成本逐渐降低,通过技术的进步和产业结构的调整,区域经济的发展逐步摆脱对物质的依赖性,但同时区域过程排放却依然保持一定的增长速率。从具体数据上来看,这与近年来的资源利用率的降低和废物排放率的升高有关,表明经济发展的环境污染成本依然很大,区域经济系统对生态环境系统的压力并未完全减小,所以,区域生态系统正处于由相对可持续发展向绝对可持续发展的转型阶段。

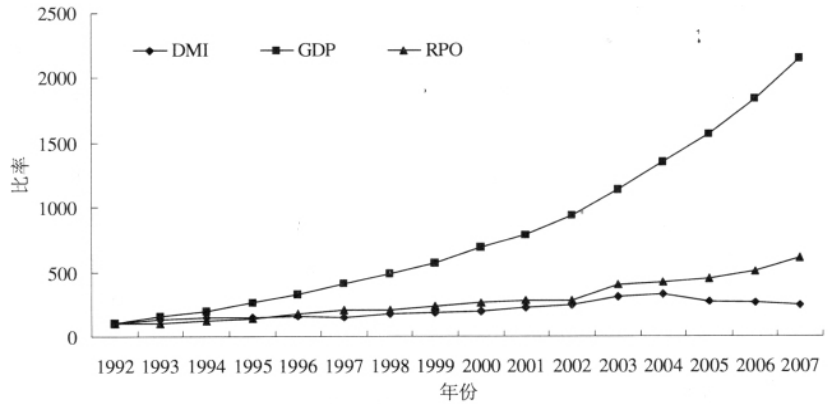


图 8 1992-2007 年深圳市经济发展、资源消耗及环境影响状况

Fig.8 Economic development, resource consumption and environmental impacts of Shenzhen from 1992 to 2007

## 4 结论

对深圳市经济环境系统 1992-2007 年进行 MFA 分析,结果表明:

(1) 区域经济系统的直接物质输入在 2004 年出现拐点,2004 年前,DMI 逐年上升,2004 年后,DMI 有所下降;直接物质输出逐年上升,其对区域生态环境系统的扰动及影响逐年扩大;水资源需求逐年递增,且自给率低;深圳是一个资源外部性依赖很强的地区;DMI 与 DMO 具有高相关性,区域物质消耗调控的关键应当从源头上控制物质投入规模。

(2) 根据人均直接物质输入的变化特征,将城市的发展划分为 3 个阶段。深圳市正处于城市发展的第三个阶段,物质输入强度逐步回落,城市的发展逐步摆脱对物质的依赖性;物质输出强度缓慢上升,在国内属于中等水平,区域生态环境系统的压力依然很大。深圳市资源生产率 and 环境效率逐渐上升,技术的进步提高了物质的利用效率,使更少的资源创造更大的经济效益,单位物质消耗和废物排放的经济效益逐步提高,区域社会经济系统发展的物质消耗成本和环境污染成本越来越小。

(3) 综合 GDP、DMI 和 RPO 的变化特征,将深圳市经济系统与生态环境系统的相互作用分为两个阶段。第一阶段(1992-2004),深圳市 GDP 随着直接物质输入量的增加而呈递增趋势,同时区域过程排放量也整体呈现线性增加的趋势,区域生态系统处于相对可持续发展状态;第二阶段(2005-2007),GDP 仍然保持高的增长速度,但直接物质输入量逐渐下降,区域经济的发展逐步摆脱对物质的依



赖性,但同时区域过程排放却依然保持一定的增长速率,区域经济系统对生态环境系统的压力并未完全减小,区域生态系统正处于由相对可持续发展向绝对可持续发展的转型阶段。

## 参考文献

- [1] Wang Y L, Fu B J. Landscape ecology: The theoretical foundation of sustainable agrolandscape planning and design. *Journal of Environmental Sciences*, 1995, 7(3): 289–296.
- [2] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Sustainability science. *Science*, 2001, 292: 641–642.
- [3] Clark W C, Dickson N M. Sustainability science: The emerging research program. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8059–8061.
- [4] 高敏雪. 绿色 GDP 的认识误区及其辨析. *中国人民大学学报*, 2004(3): 56–62.
- [5] 李双成, 傅小锋, 郑度. 中国经济持续发展水平的能值分析. *自然资源学报*, 2001, 16(4): 297–304.
- [6] 彭建, 刘松, 吕婧. 区域可持续发展生态评估的能值分析研究进展与展望. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(5): 47–51.
- [7] 彭建, 吴健生, 蒋依依, 等. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. *生态学报*, 2006, 26(8): 2716–2722.
- [8] 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.
- [9] 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. *Land Use Policy*, 2004, 21: 199–213.
- [10] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流分析研究进展与展望. *资源科学*, 2006, 28(6): 189–195.
- [11] 宋永昌, 戚仁海, 尤文辉, 等. 生态城市的指标体系与评价方法. *城市环境与城市生态*, 1999, 12(5): 16–19.
- [12] 宋冬梅, 肖笃宁, 申元村. 我国沿海地区生态城市建设评价. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 80–86.
- [13] 谭明华. 深圳环境拐点与绿色 GDP 核算问题研究. *特区经济*, 2008, 11: 21–24.
- [14] 蒋依依, 王仰麟, 李卫锋, 等. 城市生态可持续发展量度方法探讨: 以深圳市为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(4): 612–621.
- [15] 吴健生, 张玉清, 李萍. 基于生态足迹的城市地域可持续发展能力评价: 以深圳为例. *资源科学*, 2008, 30(6): 850–856.
- [16] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用: 以深圳市为例. *生态学报*, 2008, 5: 2220–2231.
- [17] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Lewis: Lewis Publishers, 2004.
- [18] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积概念. 北京: 经济科学出版社, 2003.
- [19] German Federal Statistical Office. *Integrated Environmental and Economic Accounting: Material and Energy Flow Amounts*. Wiesbaden: German Federal Statistical Office, 1995.
- [20] Senbel M, McDaniels T, Dowlatabadi H. The ecological footprint: A non-monetary metric of human consumption applied to North America. *Global Environmental Change*, 2003, 13: 83–100.
- [21] European Commission. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived indicators: A Methodological Guide*. European Communities, Luxembourg, 2001.
- [22] Scasny M, Kovanda J, Hak T. Material flow accounts, balances and derived indicators for the Czech Republic during the 1990s: results and recommendations for methodological improvements. *Ecological Economy*, 2003, 45: 41–57.
- [23] World Resources Institute (WRI). *The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies*. World Resources Institute, Washington D C. 2000.
- [24] Poldy F, Foran B. *Resource Flows: the Material Basis of the Austrian Economy*. <http://www.cse.csiro.au/publications/1999/resourceflows-99-16.pdf>, 1999.
- [25] 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. <http://www.iser.essex.ac.uk/pubs/lworkpaps/pdf/2000-03-1.pdf>.
- [26] 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.
- [27] 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, 25(3): 324–328.
- [28] 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.
- [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] 刘伟, 鞠美庭, 于敬磊, 等. 天津市经济-环境系统的物质流分析. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(6): 8–11.
- [31] 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, 4(12): 1688–1699.
- [32] Eurostat. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide*. Luxembourg: European Communities, 2001.

- [33] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
- [34] Zhou Z F, Sun Y L, Wang J. Preliminary Study on regional material flow analysis of Chengyang District in Qingdao, China. *Ecological Economy*, 2006, 2(1): 89-98.
- [35] 张音波, 夏志新, 陈新庚, 等. 基于物质流分析方法的区域可持续发展动态研究: 以广东省为例. 资源科学, 2007, 29(6): 212-218.
- [36] 徐明, 贾小平, 石磊, 等. 辽宁省经济系统物质代谢的核算分析. 资源科学, 2006, 28(5): 127-133.
- [37] 吴开亚, 林宝国, 等. 1990-2004年安徽省生态足迹动态分析. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(9): 1134-1138.
- [38] 段宁, 柳楷琳, 孙启宏等. 基于MFA的1995-2005年中国物质投入与环境影响研究. 中国人口资源与环境, 2008, 18(6): 105-109.
- [39] Eder P, Narodoslowsky M. What environmental Pressures are a region's industries responsible for? *Ecological Economics*, 1999, 29: 357-374.

## Ecological Sustainability Assessment Based on Material Flow Analysis: A Case Study in Shenzhen City

HUANG Songlin<sup>1,2</sup>, WU Jiansheng<sup>1,2</sup>, PENG Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Xiulan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. Key Laboratory for Earth Surface Processes of Ministry of Education, and College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** To study the relationship between economic development and environmental pressures of the economic system, the material inputs and outputs of the economic system in Shenzhen City during the period from 1992 to 2007 were calculated and analyzed by the material flow analysis (MFA). The material intensity and material efficiency in Shenzhen were compared with other districts using the same indicators. The results showed that Shenzhen relied greatly on outside resources and the material inputs of its economic system changed obviously in 2004. The key point for controlling material consumption was to control the amount of material inputs. Shenzhen is on the third stage of city development, and the material inputs go down slowly and the material outputs rise. Shenzhen is getting ride of the reliance on the outside materials step by step but the eco-environmental system is still under a great pressure. Shenzhen's resource production efficiency and environment efficiency are improving. The improvement of technology increases the efficiency of material use. So the costs of material consumption and environment pollution are becoming lower and lower. The interaction between economic system and eco-environmental system can be divided into two stages. Shenzhen is now experiencing the transformations from relative sustainable development to absolute sustainable development.

**Key words:** MFA; ecology; sustainable development; Shenzhen City

本文引用格式:

黄松林, 吴健生, 彭建, 等. 基于MFA的深圳市生态可持续评价. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1107-1114.