

厦门市生态经济系统物质流分析

魏 婷^{1,2}, 朱晓东^{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, 南京 210093; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘要:运用物质流分析(MFA)方法和 STIRPAT 模型,对 1996~2007 年厦门生态经济系统物质输入与输出进行分析,结果表明:(1)在不考虑水的情况下,物质输入与输出不断增加(年均增长率分别为 11.48%、11.41%),但均小于 GDP 增长速度(15.94%),二者成正比;物质流增长集中表现在对金属、非金属矿物的需求及化石燃料燃烧废气、工业废气的排放。(2)用水量和废水排放量均不断增加,尤以生活污水排放量增长速度较快,加重了区域环境的压力。(3)物质输入与 GDP、物质输出与 GDP 呈良好线性关系。厦门经济发展很大程度上依赖资源消耗。(4)单位 GDP 物质输入与输出均不断减小,表明资源利用率、处置率明显提高,区域逐步走向生态环境与社会经济的协调发展。(5)构建了厦门物质输入驱动机制的 STIRPAT 模型,得出人口数量、富裕程度、技术水平或经济结构每分别发生 1% 的变化,将引起输入量相应发生 0.99%、0.98%、0.17%、0.31% 的变化。提升技术水平和优化经济结构具有较大调控空间,将是厦门物质减量化战略的实施重点。

关键词:物质流分析;生态经济系统;可持续发展;STIRPAT 模型;厦门市

文章编号:1000-0933(2009)07-3800-11 中图分类号:F291 文献标识码:A

Material flow analysis of Xiamen City's eco-economic system

WEI Ting^{1,2}, ZHU Xiao-Dong^{1,*}

1 State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 National Marine Data & Information Service, Tianjin 300171, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3800 ~ 3810.

Abstract: The economic and ecological aspects of a social system are coherently linked and can be examined by evaluating their material and energy flows. The material inputs and outputs of Xiamen City from 1996 to 2007 were analyzed using material flow analysis (MFA) and the STIRPAT model. The results show that, (1) excluding water, material inputs and outputs rose persistently at mean annual rates of 11.48% and 11.41%, respectively, but both were lower than the rate of GDP growth (15.94%). The growth in material inputs was directly proportional to the growth in material outputs. The metal, nonmetallic mineral, and waste gas of fuel burning and industry provided the greatest contribution to material flow. (2) The total water input and output rose, with a faster rising rate of domestic wastewater emission which aggravated regional environmental pressures. (3) The material inputs and outputs were linearly correlated with GDP. The economic development in Xiamen City depended heavily on resource consumption. (4) Both the material inputs and outputs per GDP decreased consistently at mean annual rates of 3.85% and 3.91%, respectively. These results suggest that resource utilization efficiency and pollutant releasing efficiency in Xiamen City have been increasing and that the economic growth was accompanied by a slower growth of environmental impact. (5) Additionally, the STIRPAT model was used to quantify the impact of various driving forces on material inputs, including total population (P), affluence (A), technology (T), and economic structure (ES). The results show that a 1% change in P or A results in a 0.99% or 0.98% change in material input amount respectively, and a 1% change in T or ES results in a 0.17% or 0.31% change respectively.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40576024);国家海洋局 908 专项资助项目(908-02-04-08)

收稿日期:2008-09-09; **修订日期:**2009-04-10

致谢:感谢美国圣地亚哥州立大学 Molly M. Pohl-Costello 博士润色英文摘要。

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

Elevating technology level and optimizing economic structure capable of wide development will be the focus of dematerialization strategy.

Key Words: material flow analysis; eco-economic system; sustainable development; STIRPAT model; Xiamen City

物质流分析(material flow analysis)已成为研究可持续发展促进区域生态经济系统物质减量化(dematerialization)和物质解耦(material decoupling)的重要内容^[1,2]。近年来,区域生态经济系统物质流分析受到学者们的广泛关注,如,黄和平^[3]研究了区域生态经济系统物质流的核算框架,并详细介绍了研究中各项指标数据统计及处理方法;曹静^[4]研究了县域农业生态经济系统物质流核算框架,并选取南北方的典型县域进行对比分析;于术桐^[5]研究了快速工业化县域生态经济系统物质输出和输入的指标框架,并分别对各指标的计算结果进行了分析,定量研究了人类活动对实证地区自然环境的负荷;刘绍民^[6]通过对县域农业生态经济系统物质流、能量流和价值流的计算和分析,研究了县域农业生态经济系统物质流、能量流和价值流的特征。这些研究极大推动了生态经济系统物质流领域的研究进展。然而其分析方法和研究内容还未成熟,很多问题有待进一步解决^[7-9],主要聚焦在以下两点:(1)对物质流各指标计算结果的数值分析较多,对物质流指标间、物质流指标与社会经济指标间关联性分析不足。深入挖掘物质流分析中所蕴含的社会研究价值,是未来研究应注重的方向之一^[10]。(2)在储存量变化不大的情况下,物质输入量很大程度上决定着输出^[10]。因此,物质减量化应从源头减少区域物质输入量,减小生态环境压力。为提供有助于实施物质减量化战略有效、可操作的途径和手段,应深入探索物质输入增长的内在机理,尤其要辨别驱动因素的作用大小、作用方向、调控空间。而目前物质流分析中,驱动机制还处于定性分析阶段,定量化和模型化的物质输入驱动机制分析是物质流研究领域的突破和趋势^[11-13]。以上两点也正是本研究尝试解决的问题。

基于此,本文综合运用MFA与STIRPAT模型,定量分析1996~2007年厦门生态经济系统物质输入、输出情况,从而对研究期间经济发展中“高资源投入,高污染排放”的特征给予识别,真实揭示经济发展和生态环境的关系,反映可持续发展现有程度及未来发展趋势;同时构建厦门物质输入驱动机制的STIRPAT模型,分解人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构等驱动因素对物质输入的影响程度、作用方向和调控空间。旨在为厦门发展循环经济、制定资源利用和减物质化的可持续发展战略提供较为详实可靠的依据。

1 研究方法

1.1 MFA方法

1.1.1 物质类型划分

本研究参考国际通用的划分方法及现有研究成果^[3,7,9],将输入端和输出端物质均划分为4类(表1),其中输入端物质包括水、固体物质、空气和进口物质;输出端物质包括废水、废气、固体废弃物和出口物质。

1.1.2 资料收集与数据统计

原始数据来自1996~2007年的《厦门经济特区年鉴》、《厦门环境质量状况公报》以及相关职能部门的统计数据。对尚未有统计数据的指标,本研究做如下处理。

(1)本地空气物质输入指标中,化石燃料燃烧耗氧量用CO₂和SO₂排放量估算,即按氧在其分子中的质量比例推算,将化石燃料燃烧排放的CO₂乘以0.73与SO₂排放量的0.5倍相加^[14]。工业生产过程耗氧相对较少且不易估算,故予以略去。生物呼吸耗氧量是用生物(包括人和动物,后者主要指家畜如牛、羊、猪等)的数量乘以相应类别生物年均呼吸耗氧量求得^[3,9]。土壤呼吸耗氧量根据输出端土壤呼吸排放的CO₂量推算(氧在CO₂和O₂分子中的物质质量的比为1)。植物光合作用消耗的CO₂量近似用农、林产品产量乘以1.47求得^[15]。

(2)废气物质输出指标中,化石燃料燃烧排放二氧化碳量m(CO₂),采用下列公式计算:

$$m(\text{CO}_2)(\text{折合成碳}) = \sum P_i F_i C_i$$

式中, P_i 是第 i 种化石燃料的消耗量, 本研究暂只考虑原煤、原油和天然气。 F_i 是第 i 种化石燃料的平均有效氧化系数, 本研究取原煤、原油、天然气的平均有效氧化系数分别为 0.982、0.918 和 0.98。 C_i 是单位燃料含碳量, 每 t 标准煤的平均含碳量、燃油含碳量、燃气含碳量分别为 0.85、0.707、0.403^[3]。生物呼吸排放的 CO_2 量, 由输入端生物呼吸耗氧量推算(氧在 CO_2 和 O_2 分子中的物质质量的比为 1)。土壤呼吸 CO_2 排放量的计算过程是, 先计算农田生态系统单位面积的年均碳释放量^[16], 再转换成 CO_2 的释放量, 本研究按照耕地面积计算, CO_2 排放系数为 $24.10\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。植物光合作用排放的氧气量, 由输入端植物光合作用消耗的 CO_2 量推算。

表 1 生态经济系统物质输入输出类目及其度量指标

Table 1 Categories and indicators of input and output materials in the eco-economic system

物质输入 Material inputs		物质输出 Material outputs	
类目 Items	指标 Indicators	类目 Items	指标 Indicators
本地水输入 Domestic water inputs	供水量或用水量 Water supplies or water uses	本地废水输出 Domestic wastewater outputs	工业和生活废水排放量 Wastewater outputs of industry and household
本地固体物质输入 Domestic solid material inputs	(1) 生物物质(农、林、牧、渔、生物产量) Biomass, including agricultural, forestry, herd and fish yields (2) 非生物物质: 化石燃料(原煤、原油和天然气, 按标准煤计算)、金属和非金属矿物(金、银、铜、铝、铅、锌、铁、原盐、硫铁矿和磷矿石) Non-biomass, including fossil fuel (raw coal, crude oil and natural gas, calculated according to standard coal), metal and nonmetallic mineral (gold, silver, copper, aluminium, lead, zinc, iron, crude salt, pyrite, phosphate rock)	本地废气输出 Domestic waste gas outputs	(1) 化石燃料燃烧废气排放量 Waste gas of fuel burning (2) 工业废气(二氧化硫、工业烟粉尘)排放量 Waste gas of industry, including sulfur dioxide, industrial smoke and industrial dust (3) 生物和土壤呼吸排放的二氧化碳量 Carbon dioxide emissions of biomass breath and soil breath (4) 植物光合作用排放的氧气量 Oxygen emissions of plant photosynthesis
本地空气物质输入 Domestic air inputs	(1) 化石燃料燃烧、工业过程、生物、土壤呼吸耗氧量 Oxygen consumptions in fuel burning, industrial process, biomass breath and soil breath (2) 植物光合作用消耗的二氧化碳量 Carbon dioxide consumptions in plant photosynthesis	本地固体废弃物输出 Domestic solid waste outputs	(1) 工业和生活固体废弃物排放量 Solid wastes of industry and household (2) 农药化肥流失量 Pesticide and fertilizer uses
进口物质 Import materials	原材料进口量 Imports of raw material	出口物质 Export materials	原材料出口量 Exports of raw material

(3) 进出口物质由于数据统计(此处的进口、出口是指市域内与市域外的物资交换, 而不是通常意义上的国家与国家之间的进出口贸易。)的缺乏和获取的限制, 一直是物质流计算中的难点^[10]。目前, 关于进出口物质数据具体的统计过程鲜有详细说明^[17]。本研究采取了资料查阅和实地走访调研 2 种方式相结合的方法。首先调查厦门市主要资源的品种、储量及产量, 根据当地资源情况及各种物资的中间消耗量, 反推估算出物资进口量; 再次调查厦门市主要产品的种类、数量及销售情况, 综合调查的当地资源、中间消耗及产品情况, 估算出物资出口量。

在对实证地区实际调查和参考现有研究成果^[18]的基础上, 本研究将厦门市进出口物质类别划分成如下 4 类: 生物量(主要选取农作物、经济作物和林木); 化石燃料(主要选取一次性能源); 金属和非金属矿物(主要选取钢材、铜、铝、石料、原盐、建筑用砂石水泥); 初级原材料(主要选取化工原料、纺织原料、纸浆)。同时, 在对统计结果进行折算过程中, 以体积单位统计的物质需换算为重量单位。本研究根据具体情况设定测算参数如下。生物量中, 原木和锯材的单位为 m^3 , 质量换算系数采用台湾的经验数据^[19], 在无从知道进口树种的情况下, 统一按照“其它林种”对待, 取 1.2m^3 为 1t。金属和非金属矿物中, 各种矿物按照矿物体积乘以各自密度计算得到; 砖的单位为“万块”, 取 $25\text{t}/\text{万块}$ 估算其重量^[20]。

1.2 STIRPAT 模型构建

STIRPAT 模型指定环境影响(I)为人口(P)、富裕(A)和技术(T)等的乘积,建立人文因素与环境影响间的账户恒等式^[21,22]。由于其简单性(融入关键的人文因素,如人口、富裕和技术)、系统性(指定人文驱动因素与环境影响间的数学关系式)、健全性(捕获生态、经济、社会科学的基本规律),自提出以来,以其为基础的应用非常广泛^[23]。STIRPAT 模型见式(1)^[23],实际应用中,模型允许增加其他驱动因素,增加的变量与式(1)指定的乘法形式具有概念的一致性即可:

$$I = aP^bA^cT^de \quad (1)$$

现有研究表明,影响物质输入的主要因素是人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构、政治和经济制度、态度和信仰^[9,24]。考虑到政治和经济制度、态度和信仰很难概念化成乘积的模型形式,故本研究选取人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构作为物质输入驱动指标,构造厦门物质输入驱动机制的 STIRPAT 模型。

STIRPAT 模型是一个多自变量的非线性模型。本研究对其对数化处理后,该模型如下:

$$\ln I = \ln a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + e(\ln S) + \ln f \quad (2)$$

以 $\ln I$ 作为因变量, $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 、 $\ln S$ 作为自变量, $\ln a$ 作为常数项, $\ln f$ 作为误差项,对经处理后的模型进行多元线性拟合。其中 I (环境影响)以物质输入量(不含水)表示; P (人口)以人口数量表示; T (技术水平)用物质输入强度表示,即每产生单位 GDP 所需物质输入量,显然 T 值越小说明技术水平越先进; A (富裕程度)以人均 GDP 表示; S (经济结构优化率)以第一、二产业产值占国内生产总值的比例表示,显然 S 值越小说明经济结构优化率越高。

2 结果与分析

1996~2007 年厦门市生态经济系统物质输入与输出见表 2,其中考虑到经济会受到通货膨胀或紧缩的影响,故 GDP 数据按 2000 年不变价计算。由于水输入与输出量比其他物质质量高出 2~3 个数量级,为避免大的物质流冲淡物质流指标描述物质流动状况的清晰度,本研究将分成不考虑水情况下的物质输入输出与水物质输入输出两种情况进行分析。

2.1 物质输入与输出的趋势分析

1996~2007 年间,厦门物质输入与输出均呈显著递增趋势(图 1)。在不考虑水的情况下,2007 年物质输入与输出量分别达 5965.87 万 t、3010.49 万 t,是 1996 年相应量的 3.21 倍和 3.28 倍。物质输入与输出年均递增率为 11.48%、11.41%,均小于 GDP 年均递增率(15.94%)。2007 年水输入与输出量分别达 28300 万 t、21354 万 t,是 1996 年相应量的 1.89 倍和 1.90 倍。水输入量的年均递增率(5.98%)略小于水输出量(6.01%)。面对日益受损的生态环境,研究期间厦门加强了对产业政策、准入制度和发展战略的研究和制

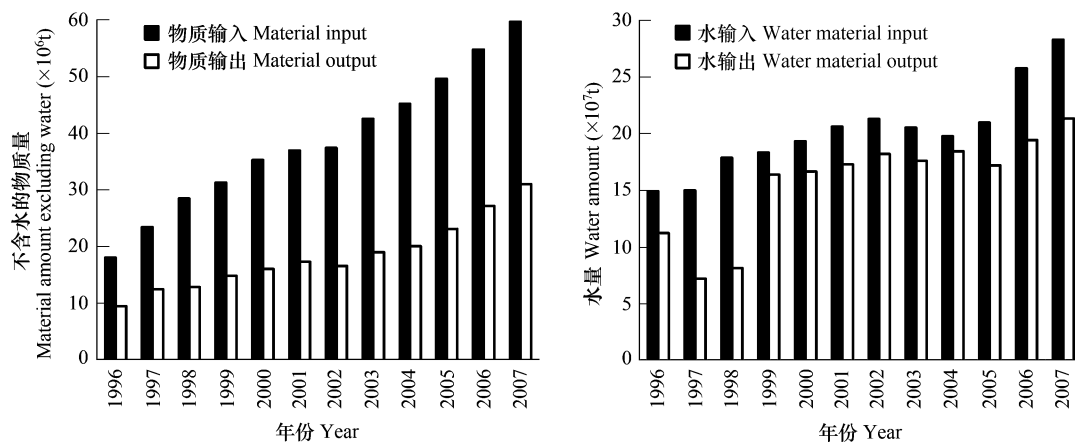


图 1 1996~2007 年厦门生态经济系统物质输入与输出量

Fig. 1 Amount of material inputs and outputs in Xiamen City's eco-economic system from 1996 to 2007

表 2 1996 ~ 2007 年厦门生态系统物质输入与输出统计表 ($\times 10^4 \text{t}$)

Table 2 Statistical material inputs and outputs of Xiamen City's eco-economic system from 1996 to 2007 (×10 ⁴ t)												
年份 Year	A ₁ 物质输入	A ₂ 水输入	A ₃ O ₂ 输入	A ₄ CO ₂ 消耗	A ₅ 金属、 非金属物质	A ₆ 化石燃料	A ₇ 生物物质	A ₈ 进口物质	C ₁ 人口, (万人)	C ₂ GDP, (亿元)	C ₃ 人均 GDP(元·人 ⁻¹)	
1996	16733.83	14929	495.26	214.38	451.61	135.25	300.12	208.21	68.36	278.21	40695.95	
1997	17331.65	14990	705.31	220.32	659.18	163.27	308.32	285.25	69.76	328.84	47137.77	
1998	20729.58	17883	718.15	222.14	1020.45	174.62	310.81	400.41	126.59	378.83	29925.00	
1999	21473.58	18346	811.94	257.84	1115.26	180.31	360.98	401.25	128.99	435.65	33774.68	
2000	22856.59	19331	898.25	265.79	1286.41	222.52	376.31	476.31	131.27	501.87	38232.81	
2001	24323.63	20631	971.30	264.20	1319.35	256.57	379.96	501.25	134.36	563.10	41909.78	
2002	25050.92	21312	923.51	255.01	1400.17	258.64	357.03	544.56	137.16	650.94	47459.03	
2003	24799.20	20548	1038.65	279.92	1558.94	300.54	391.89	681.26	141.76	761.60	53725.65	
2004	24302.29	19784	1097.99	289.81	1603.14	326.26	405.73	795.36	146.77	883.46	60192.19	
2005	25938.91	20979	1258.59	328.33	1681.45	381.52	456.87	853.15	153.22	1024.81	66886.52	
2006	31258.57	25782	1470.62	374.92	1726.38	455.82	524.59	924.24	160.38	1196.98	74632.38	
2007	34265.87	28300	1686.75	427.67	1756.48	499.08	598.74	997.15	167.24	1416.21	84681.30	
年份 Year	B ₁ 物质输出	B ₂ 工业废水 排放量	B ₃ 生活废水 排放	B ₄ 化石 燃料燃烧和 工业废气	B ₅ CO ₂ 排放	B ₆ O ₂ 排放	B ₇ 工业固废	B ₈ 生活垃圾	B ₉ 农药化肥流失	B ₁₀ 出口物质	C ₄ 第一、 二产业产值 占 GDP 比例(%)	
1996	12184.74	3611.45	7628	81.97	653.74	155.85	0.02	26.60	3.98	23.13	57.93	
1997	8465.92	3019.14	4202	98.95	923.96	160.17	0.02	27.35	4.18	30.15	56.16	
1998	9421.98	3277.48	4860	108.83	933.60	161.50	0.02	28.64	7.42	44.49	55.68	
1999	17870.28	3076.00	13309	109.27	1102.31	187.45	0.02	33.24	7.85	45.14	56.58	
2000	18274.90	3044.00	13627	134.86	1185.69	193.23	0.02	35.60	7.52	46.98	57.04	
2001	19029.16	2951.08	14347	155.52	1282.17	192.07	0.02	40.00	7.82	53.48	57.08	
2002	19867.35	2938.32	15272	156.75	1191.33	185.39	0.02	47.10	8.15	68.29	59.27	
2003	19518.31	3542.54	14076	189.15	1371.02	203.50	0.02	51.56	7.83	76.69	60.94	
2004	20462.97	3906.20	14550	197.92	1449.35	210.69	0.02	52.42	7.99	88.38	61.58	
2005	19522.52	3914.78	13300	231.22	1673.93	238.70	0.02	60.85	8.23	94.79	56.95	
2006	22159.10	3978.68	15464	276.25	1985.34	272.57	0.02	71.00	8.59	102.65	55.47	
2007	24455.49	4314.00	17040	302.48	2286.06	310.92	0.01	83.18	9.16	109.68	54.80	

A₁ : Material input; A₂ : Water input; A₃ : Oxygen input; A₄ : Carbon dioxide consumption; A₅ : Metal and nonmetallic mineral; A₆ : Fossil fuel; A₇ : Biomass; A₈ : Import input; B₁ : Material output; B₂ : Industrial wastewater output; B₃ : Household wastewater output; B₄ : Waste gas of fuel burning and industry; B₅ : Carbon dioxide emission; B₆ : Oxygen emission; B₇ : Solid wastes of industry; B₈ : Solid wastes of household; B₉ : Pesticide and fertilizer use; B₁₀ : Export output; C₁ : Population(10⁴) ; people; C₂ : GDP(billion) ; C₃ : GDP per capita(yuan·people⁻¹) ; C₄ : The first and second industries production per GDP

定,实施海湾型生态城市的重大战略、深入开展循环经济、优化产业结构^[25]。因此,区域物质输入与输出虽然有一定程度的增长,但仍小于 GDP 的增长速度,减缓了对生态系统的破坏。

2.2 物质输入与输出的结构分析

在不考虑水的情况下,物质输入构成如图 2 所示。研究期间固体、气体、进口物质输入量分别占总量的 51.26%、33.46%、15.28%。时间动态上,三者均呈波动上升的趋势,固体物质输入量从 1996 年的 886.98 万 t 上升到 2007 年的 2854.30 万 t,年均递增 11.21%;气体物质输入量从 1996 年的 709.64 万 t 波动上升到 2007 年的 2114.42 万 t,年均增长 10.43%;进口物质输入量从 1996 年的 208.21 万 t 迅速上升到 2007 年的 997.15 万 t,年均递增 15.30%。可见,随着社会经济的发展,厦门物质需求量也相应提高,集中表现在对固体物质的大量需求,尤其是对金属、非金属矿物的需求,直接加剧了生态环境的退化;各类物质输入量年均增长率相比,进口物质最大。

在不考虑水的情况下,物质输出构成如图 2 所示。研究期间固体、气体、出口物质输出量分别占总量的 2.94%、93.49%、3.57%。物质输出端以气体为主。另外固体物质输出量仅占其输入量的 2.73%,说明大量的固体物质以产品、半成品和材料等形式被暂时储存在生态经济系统中,参与生产和消费,暂时延缓或减轻了环境污染。从时间动态上分析,各类输出物质年均递增速度排序为,出口物质(15.20%)>气体物质(11.32%)>固体物质(10.56%)。

水输出量构成中,研究期间工业废水排放量呈波动上升趋势,从 1996 年的 3611.45 万 t 下降到 2002 年的 2938.32 万 t,随后缓慢回升到 2007 年的 4314 万 t,年均变化 1.63%;生活污水排放量呈波动上升趋势,从 1996 年的 7628 万 t 下降到 1998 年的 4860 万 t 后,又快速上升到 2007 年的 17040 万 t,年均增长 7.58%。废水排放中以生活污水为主。生活污水是区域水环境压力的主要来源,应作为厦门物质减量化战略的重点内容之一。

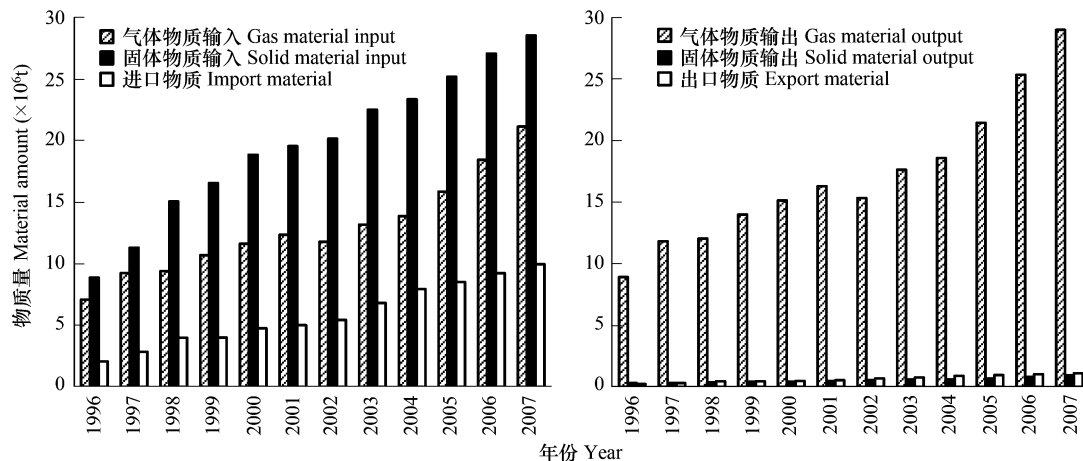


图2 厦门生态经济系统物质输入与输出构成(不含水)

Fig.2 Components of material inputs and outputs in Xiamen City's eco-economic system (excluding water)

2.3 物质输入输出与 GDP 的关联性分析

在不考虑水的情况下,物质输入与 GDP、物质输出与 GDP 线性拟合的 R^2 均大于 0.95 (图 3),表明研究期间厦门物质输入与 GDP、物质输出与 GDP 均呈良好的线性关系。如图 3 拟合的回归方程, GDP 对物质输入与输出的弹性系数均为正且大于 1,说明厦门经济的高速增长很大程度上依赖于同样高速增长的自然资源消耗和环境污染,研究期间厦门经济的发展模式仍是物质基础型。GDP 对物质输入的弹性系数(3.3462)大于输出(1.6988),可知厦门现阶段经济发展对自然资源的依赖程度远大于对环境的污染,即由输入端引起的生态环境的退化趋势远大于由输出端带来的环境污染。厦门生态经济系统还存在着较大的生态隐患,威胁着其生态安全。生态环境潜在的退化趋势较之环境质量现状更应引起决策层的高度关注。

2.4 物质输入与输出的关联性分析

在不考虑水的情况下,对厦门物质输入与输出进行线性拟合, R^2 达 0.9615(图 4),表明研究期间厦门物质输入与输出具有良好的线性相关性。因此,厦门物质减量化战略应从末端治理全面转变为源头控制,通过开发物质资源减量化和节能技术控制进入经济系统的化石燃料、矿产资源和生物资源等物质输入量,不仅减轻经济发展造成的生态环境质量的退化,而且可以减少经济系统向环境排放的废弃物。

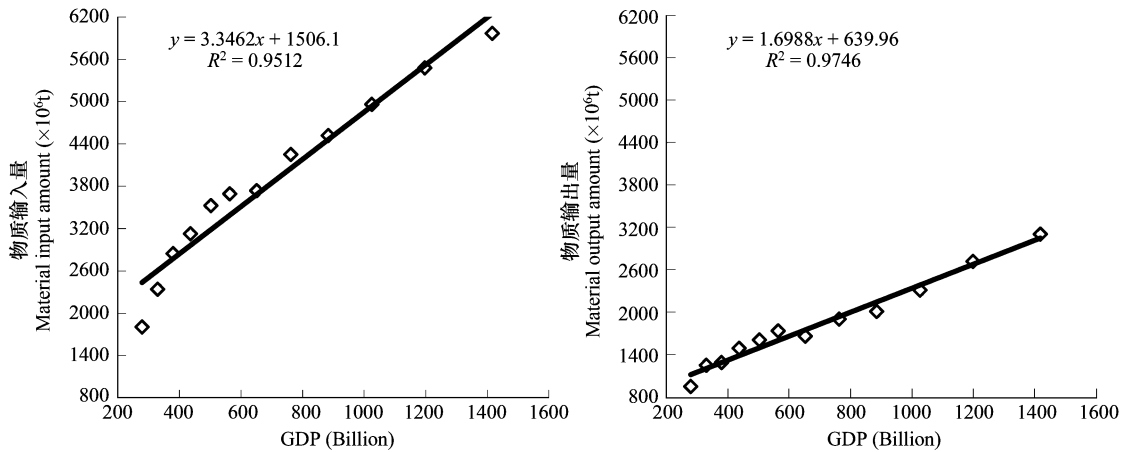


图3 厦门生态经济系统物质输入输出与 GDP 的线性拟合分析(不含水)

Fig. 3 Line fit analysis between material inputs and GDP, outputs and GDP of Xiamen City's eco-economic (excluding water)

在考虑水的情况下,物质输入与输出线性拟合的 R^2 仅为 0.749(图 4),表明这两个时间序列不具有良好线性关系。这可能与水输出量很大程度上不单取决于水输入量,还由各行业不同的用水效率、各单位不同的废水处理率等因素综合作用决定,具体原因有待进一步研究。

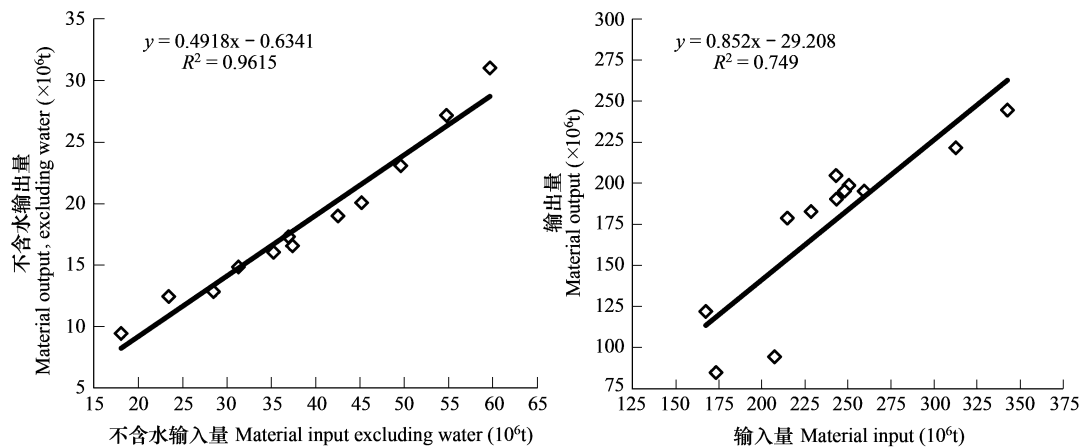


图4 厦门生态经济系统物质输入与输出的线性拟合分析

Fig. 4 Line fit analysis between material inputs and outputs of Xiamen City's eco-economic system

2.5 物质输入(不含水)的驱动机制分析

2.5.1 驱动机制模型构建结果

本研究应用 Eviews 软件,采用最小二乘法对模型(2)进行参数计算。模型拟合优度高达 0.9996,说明所选择的指标能解释 1996~2007 年厦门生态经济系统物质输入的 99.96%,方程拟合较好。本研究回归拟合的厦门物质输入驱动机制的 STIRPAT 模型为:

$$\ln I = 1.16 + 0.99 \ln P + 0.98 \ln A + 0.17 \ln T + 0.31 \ln S \quad (3)$$

2.5.2 驱动因素对物质输入的弹性系数分析

由回归拟合的厦门物质输入驱动机制模型(3)可知,人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构每分别发生1%的变化,将引起物质输入量相应发生0.99%、0.98%、0.17%、0.31%的变化。因此控制人口增长率,减缓经济增长速度,开发物质减量化、资源化技术以及优化经济结构,对厦门减物质化、减轻生态系统破坏十分关键。从驱动因素的重要程度分析,人口数量>富裕程度>经济结构>技术水平。从驱动因素的调控空间分析,厦门已实行计划生育政策且在短期内不易出现人口增长率大幅度下降的趋势,同时人们有追求富裕程度增加的欲望和需求;因此发展政策的着眼点应集中在技术水平的提升和经济结构的优化。

2.5.3 驱动因素对物质输入作用的对比分析

(1) 总体分析

如图5,1996~2007年厦门人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构优化率、物质输入分别增长144.63%、146.99%、-30.27%、-5.7%、230.55%;人口数量和富裕程度的增长对物质输入的上升总体产生正作用,技术水平和经济结构优化率的降低抑制物质输入的增长;物质输入的变化趋势是受各种驱动因素共同作用的净效应。

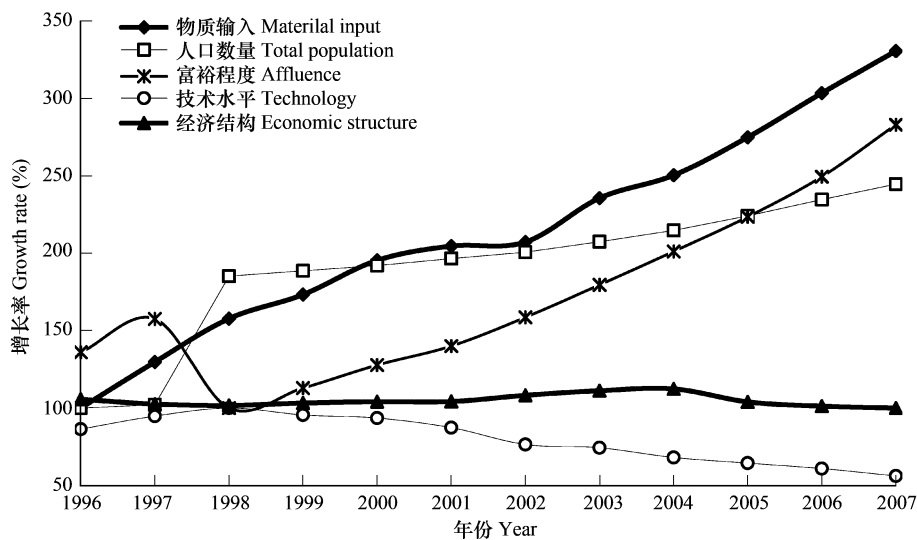


图5 1996~2007年厦门生态经济系统物质输入及其驱动因素的增长指数

Fig. 5 The growth index of material inputs and its driving forces in Xiamen City's eco-economic system from 1996 to 2007

(2) 阶段性分析

第一阶段(1996~1998年),人口数量的较大波动,直接造成物质输入量的上升;人口数量和技术水平对物质输入上升产生正效应,富裕程度和经济结构对物质输入上升产生负效应;人口数量是此阶段主要驱动因素。第二阶段(1998~2004年),富裕程度的大幅度增长对物质输入的上升产生促进作用,同时在人口数量和经济结构的共同促进作用下,抵制了由技术水平带来的对物质输入上升的抑制作用,物质输入量上升;富裕程度是该阶段主要驱动因素。第三阶段(2004~2007年),人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构优化率分别增长29.94%、81.83%、-12%、-12.37%、80.21%;技术水平和经济结构的抑制作用使物质输入增长幅度小于富裕程度,富裕程度的促进作用使物质输入增长幅度大于人口数量,此现象说明物质输入是由所有驱动因素共同作用的净效应;富裕程度是此阶段主要驱动因素。

2.6 物质输入输出的强度与效率分析

2.6.1 物质输入与输出的强度分析

在不考虑水的情况下,人均物质输入与输出量均呈波动上升趋势,且上升趋势相似(图6)。人均物质输入从1997年的 $33.57\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$ 下降到1998年的 $22.47\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$,随后快速上升到2007年的 $35.67\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$;人均物

质输出从 1997 年的 $17.84\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$ 下降到 1998 年的 $10.15\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$, 又上升到 2007 年的 $18.55\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$ 。研究期间厦门物质输入与输出强度均在 1997 年出现大幅度下降, 主要源于 1997 年人口数量的剧增; 物质输入与输出强度年均增长率分别为 2.77%、2.70%, 均低于同期人口年均增长率(8.27%)。

用水量、废水排放量、生活污水排放量和工业废水排放量的强度总体上均呈递减趋势(图 6), 按递减率排序为, 工业废水排放量(6.31%) > 用水量(2.29%) > 废水排放量(2.27%) > 生活污水排放量(0.82%)。

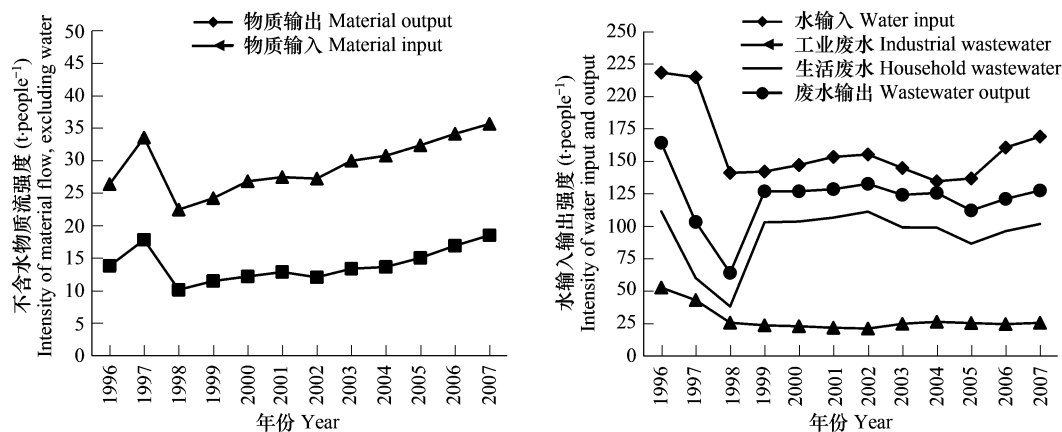


图 6 1996~2007 年厦门生态经济系统物质输入与输出强度

Fig. 6 Intensity of material inputs and outputs in Xiamen City's eco-economic system from 1996 to 2007

2.6.2 物质输入与输出的效率分析

在不考虑水的情况下, 单位 GDP 的物质输入与输出量均呈波动下降趋势(图 7)。单位 GDP 的物质输入量从 1996 年的 $6.49\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 增长到 1998 年的 $7.51\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$, 随后快速下降到 2007 年的 $4.21\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$; 单位 GDP 的物质输出量从 1996 年的 $3.40\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 下降到 2007 年的 $2.19\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。研究期间厦门单位 GDP 的物质输入与输出量年均递减率分别为 3.85%、3.91%。说明随着循环经济的深入开展、物质减量化资源化技术的应用推广, 厦门资源利用效率、废弃物处理效率逐步提高, 区域经济增长与生态环境压力正逐步脱钩。

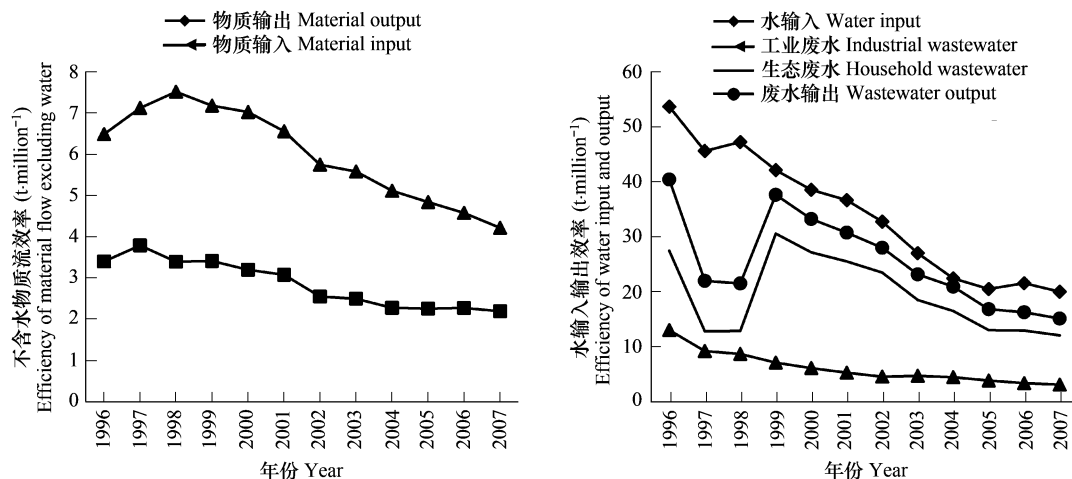


图 7 1996~2007 年厦门生态经济系统物质输入与输出效率

Fig. 7 Efficiency of material inputs and outputs in Xiamen City's eco-economic system from 1996 to 2007

单位 GDP 的用水量、废水排放量、工业废水排放量、生活污水排放量总体上均呈下降趋势(图 7)。尤以单位 GDP 的工业废水排放量下降最快, 从 1996 年的 $12.98\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 下降到 2007 年的 $3.05\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$, 年均递

减 12.35%; 然后依次是单位 GDP 用水量、废水排放量、生活污水排放量, 年均递减率分别为 8.59%、8.57%、7.21%。以上情况表明, 研究期间厦门水资源综合利用效率稳步提高, 突出表现在工业水资源减量化、资源化技术水平的提升。

3 结论与讨论

(1) 1996~2007 年间, 随着社会经济的发展, 厦门物质输入与输出(不含水)、水输入与输出不断增加(年均增长率分别为 11.48%、11.41%、5.98%、6.01%), 集中表现在对水资源、金属、非金属矿物的需求以及废水、化石燃料燃烧废气、工业废气的排放。物质输入与 GDP、物质输出与 GDP 均呈良好的线性关系, 且 GDP 对物质输入的弹性系数(3.35)大于输出(1.70)大于 1。厦门经济的高速增长很大程度上依赖于同样高速增长的资源消耗和环境污染, 尤以资源消耗为主。可知由物质输入端带来的生态环境的退化趋势大于环境污染。厦门生态经济系统还存在着较大的生态隐患, 威胁着其生态安全。生态环境潜在的退化趋势较之环境质量现状更应引起决策层的高度关注。物质减量化战略亟待全面开展并加速实施。

(2) 1996~2007 年间, 水输入与输出强度、单位 GDP 水输入与输出量、单位 GDP 物质输入与输出(不含水)不断减小, 年均递减率分别为 2.29%、2.27%、8.59%、8.57%、3.85%、3.91%。表明厦门资源综合利用效率、废弃物处理效率逐步提高。以上情况说明区域可持续发展战略正在有效实施, 未来发展潜力巨大; 区域经济和生态环境处在相对解耦状态, 厦门正逐步走向生态环境与社会经济的协调发展。

(3) 物质输入与输出具有良好的线性关系, 物质输入对输出的弹性系数为 0.49。表明同环境污染的末端治理相比, 从源头降低物质输入量是协调经济发展和生态环境保护关系、实现可持续发展更为根本的手段。据此, 可以确定出厦门分步实施可持续发展的物质输入量指标, 并根据输入量与输出量之间的统计关系, 估计出物质输出量的大致范围, 从而为决策者制定厦门可持续发展的近、中远期资源与生态环境目标和实施方案提供定量的参考指标。

(4) 引用 STIRPAT 模型分析物质输入驱动机制在本研究中表现出较好的适用性。构建的厦门物质输入驱动机制模型表明, 1996~2007 年间, 人口数量和富裕程度的增长对物质输入的上升总体产生正作用, 技术水平和经济结构优化率的降低抑制物质输入的增长。人口数量、富裕程度、技术水平、经济结构每分别发生 1% 的变化, 将引起物质输入量相应发生 0.99%、0.98%、0.17%、0.31% 的变化。驱动因素重要程度排序为, 人口数量 > 富裕程度 > 经济结构 > 技术水平。驱动因素调控空间排序为, 技术水平、经济结构 > 富裕程度、人口数量。物质减量化发展政策的着眼点应集中在技术水平的提升和经济结构的优化。为避免大的物质输入指标冲淡物质输入驱动机制分析的清晰度, 本研究在物质输入的 STIRPAT 驱动机制分析中没有包括水; 受文章篇幅和研究重点所限, 水物质的驱动机制分析将在今后进一步研究, 从而对实证地区物质流驱动机制展开全面、深入的分析和研究。

(5) 进出口数据薄弱是区域物质流分析的难点, 尽可能地获取准确的进出口数据将有利于物质流分析的完整性与可靠性^[17]。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, 是物质流分析当前面临的重要挑战之一^[26], 同时数据的转换、估算方式也将成为物质流分析的热点研究问题^[10], 这也将作为作者今后深入研究的方向。

References:

- [1] Xu M, Zhang T Z. Material input analysis of China economic system. *China Environmental Science*, 2005, 25(3): 324—328.
- [2] Wu C N, Wei T. The discussion on policy system of circular economy. *Ecological Economy*, 2005, (11): 57—59.
- [3] Huang H P, Bi J, Li X M, Zhang B, Yang J. Material flow analysis(MFA) of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 27(8): 2578—2586.
- [4] Cao J, Wang S H. Analysis on function of two kinds of typical agriculture eco-economic system county level — the differences in the counties south-west of Guizhou and North China. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2004, 27(2): 8—12.
- [5] Yu S T, Huang X J, Tan D. Evolution of material metabolism in ecological-economic system of rapid industrialization county: a case study of Tongzhou City. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1620—1624.
- [6] Liu S M, Wu W L. Analysis on agro-ecologic system at county level(II) — function and efficiency. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003,

- 22(1): 78—81.
- [7] Bouman M, Heijungs R, van der Voet E, van den Bergh J, Huppes G. Material flows and economic models: An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 195—216.
- [8] Hawkins T, Hendrickson C, Higgins C, Matthews H S. A mixed-unit input-output model for environmental life-cycle assessment and material flow analysis. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(3): 1024—1031.
- [9] Zhang Y B, Chen X G, Peng X C, Sang Y H. Material flow analysis(MFA) of the environment and the economy in Guangdong Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 1021—1031.
- [10] Huang H p, Bi J, Zhang B, Li X M, Yang J, Shi L. A critical review of material flow analysis(MFA). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 368—379.
- [11] Duan N, Li Y P, Sun Q H, Shen P, Mao Y R. An analysis for trends of material flow in China's economy system and for reasons causing the trends. *China Environmental Science*, 2008, 28(1): 68—72.
- [12] Ana C, Gonzalez M, Heinz S. The biophysical perspective of a middle income economy: Material flows in Mexico. *Ecological Economics*, 2008, 14(6): 1—11.
- [13] Pablo M J, Klaus H. Material implication of Chile's economic growth: Combining material flow accounting(MFA) and structural decomposition analysis(SDA). *Ecological Economics*, 2008, 65(1): 136—144.
- [14] Schuetz H, Bringezu S. Economy-wide material flow accounting. Wuppertal: Wuppertal Institute, 1998. 1—31.
- [15] Wang M X. Trend and influence of the changes of Chinese climate and sea level III: Global climates changing warmer. Jinan: Publisher of Shandong Science & Technology, 1996. 1—480.
- [16] Fang J Y, Liu G H, Xu H L. The carbon cycle and global significance of land ecological system in China. In: Wang R S, Fang J Y, Feng Z W. Focus Question Study of Modern Ecology. Beijing: Science and Technology Press of China, 1996. 240—250.
- [17] Xu Y J, Zhang T Z, Shi L, Chen J N. Material flow analysis in Guiyang. *J T singhua Univ(Sci & Tech)*, 2004, 44(12): 1688—1691.
- [18] Sun L, Zhou Z F. Research on material metabolism in Chengyang District of Qingdao City based on material flow analysis. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(6): 154—157.
- [19] Lin X X. Preliminary study on material flow system and its establishment in Taiwan. Taiwan: Chung Yuan Christian University, 2001. 26—27.
- [20] Chen P X. Popularizing hollow bricks is the key of generalizing new wall materials. *China Building Materials*, 1995, (4): 36—37.
- [21] Ehrlich P R, Holdren J P. The impact of population growth. *Science*, 1971, 171: 1212—1217.
- [22] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 23(2): 351—365.
- [23] Fan Y, Liu L C, Wu G, Wei Y. Analyzing impact factors of CO₂ emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 2006, 26(4): 377—395.
- [24] Lang D J, Binder C R, Scholz R W, Schleiss K, Stäubli B. Impact factors and regulatory mechanisms for material flow management: Integrating stakeholder and scientific perspectives: The case of bio-waste delivery. *Conservation and Recycling*, 2006, 47(2): 101—132.
- [25] Wei T, Zhu X D, Li Y F. Ecosystem health assessment of Xiamen City: The catastrophe progression method. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6312—6320.
- [26] Peng J, Wang Y L, Wu J S. Progress and prospect of material flow analysis in the ecological assessment of regional sustainable development. *Resources Science*, 2006, 28(6): 189—195.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴长年, 魏婷. 循环经济政策体系初探. *生态经济*, 2005, (11): 57—59.
- [3] 黄和平, 毕军, 李祥妹, 张炳, 杨洁. 区域生态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, 27(8): 2578—2586.
- [4] 曹静, 王书华. 典型县域农业生态经济系统的功能对比研究. *河北农业大学学报*, 2004, 27(2): 8—12.
- [5] 于术桐, 黄贤金, 谭丹. 通州市快速工业化县域生态经济系统物质代谢演变. *生态学杂志*, 2008, 27(9): 1620—1624.
- [6] 刘绍民, 吴文良. 县域农业生态经济系统的分析(II)——功能和效率. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1): 78—81.
- [9] 张音波, 陈新庚, 彭晓春, 桑燕鸿. 广东省环境经济系统的物质流分析. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 1021—1031.
- [10] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. *生态学报*, 2007, 27(1): 368—379.
- [11] 段宁, 李艳萍, 孙启宏, 沈鹏, 毛玉如. 中国经济系统物质流趋势成因分析. *中国环境科学*, 2008, 28(1): 68—72.
- [15] 王明星. 中国气候与海平面变化及其趋势和影响(三): 全球气候变暖. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 1—480.
- [16] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 见: 王如松、方精云、冯宗炜主编. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 240—250.
- [17] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 陈吉宁. 贵阳市物质流分析. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(12): 1688—1691.
- [18] 孙磊, 周震峰. 基于 MFA 的青岛市城阳区物质代谢研究. *环境科学研究*, 2007, 20(6): 154—157.
- [19] 林锡雄. 台湾物质流之建置与应用研究初探. 台湾: 中原大学, 2001. 26—27.
- [20] 陈鹏雄. 普及新型墙体材料重在推广空心砖生产. *中国建材*, 1995, (4): 36—37.
- [25] 魏婷, 朱晓东, 李杨帆. 基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价. *生态学报*, 2008, 28(12): 6312—6320.
- [26] 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.