

# 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

黄和平<sup>1</sup>, 毕 军<sup>1,\*</sup>, 李祥妹<sup>1</sup>, 张 炳<sup>1</sup>, 杨 洁<sup>1,2</sup>

(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, 南京大学-江苏省环境保护厅环境管理与政策研究中心, 南京 210093;

2. 苏州科技学院环境科学与工程系, 苏州 215011)

**摘要:**运用物质流分析(MFA)方法,对江苏省常州市武进区生态经济系统中物质输入与输出进行了系统的分析,结果表明:(1)随着社会经济发展和人口增长,武进区物质输入总量及人均物质输入量也在增加,但递增速率均远小于 GDP 增长速率,而物质输出总量及人均物质输出量则呈现递减趋势;(2)在不考虑水的因素情况下,武进区物质输入量保持较快的上升速度,其中固体物质的增长速率远远大于气体物质的增长速率;物质输出量则呈总体下降趋势,其中以气体物质输出量的贡献最大,对环境造成污染的物质以气体特别是以化石燃料燃烧排放的废气和工业废气为主;(3)排除占大部分比例农业用水的上升,工业用水、城镇生活用水和地下水总量及人均利用强度都在减少;同时,总的废水排放量及人均排放量在减少,其中又以生活废水排放量的减少最快,其次是工业废水;(4)单位 GDP 物质输入量的变化处于波动状态,同期的单位 GDP 物质输出量则呈递减趋势,单位 GDP 用水量和单位 GDP 废水排放量则有相同的递减趋势,表征了武进区资源利用效率的稳步提高,区域经济增长和环境压力也在逐步脱钩。上述结果体现了武进区近年来循环经济发展模式的优势,但还存在较多问题,说明武进区在调整物质利用强度和提高资源利用效率方面还需下更大的功夫,并采取相关措施,以期提高实施循环经济战略与建设节约型社会的地位和意义。文章最后结合研究区实际情况就区域环境-经济的协调发展进行了展望,指出了物质流分析方法在应用中的一些缺陷,为今后该领域的进一步研究提供了借鉴。

**关键词:**物质流分析(MFA);生态经济系统;物质输入与输出;武进区;物质消耗强度;物质利用效率

**文章编号:**1000-0933(2006)08-2578-09 **中图分类号:**F291 **文献标识码:**A

## Material flow analysis (MFA) of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou

HUANG He-Ping<sup>1</sup>, BI Jun<sup>1,\*</sup>, LI Xiang-Mei<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1,2</sup> (1. State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Centre for Environmental Management & Policy, Nanjing University-Jiangsu EPD, Nanjing 210093, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2578 ~ 2586.

**Abstract:** The economy and ecological aspects of a social system are coherently linked and can be examined by its material and energy flows. In this study, we used the material flow analysis (MFA) to model the material input and output of Wujin District of Changzhou City, Jiangsu Province. We found that: (1) the total material inputs and the material inputs per capita increased with economic development, while the total material outputs and material outputs per capita decreased consistently; (2) except water,

**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资助项目(BK2003207)

**收稿日期:**2005-09-22;**修订日期:**2006-04-15

**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 supported by Natural Science Foundation of China (No. 40471057) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2003207)

**Received date:** 2005-09-22; **Accepted date:** 2005-09-22

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

the total material inputs continue to increase, and the input of solid materials grows faster than that of gaseous materials, while the total material outputs kept reducing; and the gas outputs counted the largest portion of the output, resulting the primary environmental pollution as fossil fuel burning; (3) agricultural water use continued increasing while industrial and residential water use decreased by per capita. The total wastewater emission and the emission per capita decreased, with a faster decreasing rate of residential wastewater emission followed by industrial wastewater emission; (4) the material inputs per unit GDP varied and the material outputs per unit GDP decreased. We also found a decreasing trend in both water use and wastewater emission per unit GDP. These results suggested that the efficiency of resource use in Wujin District has been accelerating as the economic and environmental changes are tightly coupled. Additionally, we discussed the harmonic development between environment and economy using the Wujin District as an example. Potential limitations of MFA's application were also discussed for future research. Effective measures should be taken to raise the status and significance of practicing circular economy strategies in constructing the environmental balance of an economical system.

**Key words:** material flow analysis (MFA); eco-economic system; material input-output; wujin district; material depleting intensity; material use efficiency

为抑制生态退化和环境污染,实现人与自然和谐共存、持续发展,我国适时提出了发展循环经济(Circular Economy, CE)的战略,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方法(Material Flow Analysis, MFA)<sup>[1]</sup>。物质流分析的基本观点则是基于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。前者产生对生态环境的扰动,引起生态环境的退化;后者则引起环境的污染<sup>[2,3]</sup>(图 1)。

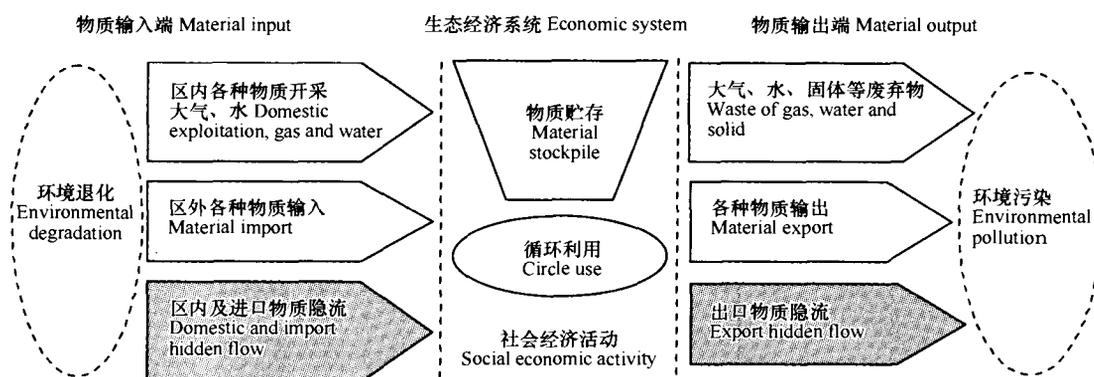


图 1 物质流分析结构示意图

Fig. 1 Structure of material flow analysis

从研究层次上划分,物质流分析包括区域生态经济系统的物质资源平衡分析、产业部门物质资源流动分析和产品生命周期评价 3 个层次<sup>[4]</sup>。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、定位物质利用及其迁移、转化途径<sup>[2]</sup>。

目前在国家尺度上有关物质流分析的研究已多有报道<sup>[3-15]</sup>,而在省级特别是县级行政区域上有关这方面的研究还鲜有报道<sup>[14, 16, 17]</sup>。本文以江苏省常州市武进区为例,运用物质流分析方法,重点从区域层次上对其生态经济系统的物质、资源的输入-输出进行量化分析,以利于诊断导致其资源能源利用转化效率不高的内在机制,探索不同的解决方案,优化决策,并为选择适合于当地的正确的循环经济发展模式,探索县域循环经济发展途径提供理论参考和决策依据。

## 1 研究区概况

常州市武进区地处我国社会经济比较发达,城市化水平相对较高的长江三角洲地区,自 2002 年撤市设区后,全区面积由 1582.4 km<sup>2</sup> 减为 1242.3 km<sup>2</sup>,2004 年底人口基数 96.08 万人,GDP 达 388.77 亿元(1990 年不变价)。近年来,武进区大力开展循环经济试点,坚持以点带面,强力推动全区工业、农业、园区的循环经济工作,为武进区今后发展循环经济打下了坚实的基础<sup>①</sup>。但是,由于长期以来该区经济增长方式仍未从外延式、粗放式的增长方式中根本转变过来,从而导致了一些生态与环境问题,环境容量严重透支、环境质量不容乐观、资源供需矛盾突出等发展“瓶颈”依然凸现。

## 2 资料与方法

### 2.1 物质类型的划分

按照国际上通用的划分方法及有关文献<sup>[4, 18]</sup>,将进入经济系统的自然物质分为:①生物物质,包括第一性和第二性生产者的生产量;②非生物物质,包括各种矿产和建筑材料等,其中气态和液化化石燃料均以其质量计入;③水,指从环境中提取的天然水;④空气,指人类生产和消费活动中所消耗的空气;⑤土壤的搬运,指在经济生产活动中移动的表土量和引起的水土流失量等。而将排出经济系统的物质分为固体废弃物、废水、废气和其他气体物质 3 类(表 1)。

表 1 生态经济系统的输入与输出物质类目及其度量指标

Table 1 Input and output items and measurement indexes in the eco-economic system

类目 Items	物质输入 Material inputs		物质输出 Material outputs	
	指标 Indicators		类目 Items	
国内生物物质输入 Domestic biomass inputs	农、林、牧、渔生物产量 Agricultural, forestry, herd and fish yields		国内固体废弃物输出 Domestic solid waste outputs	工业和生活固体废弃物排放量 Solid wastes of industry and household 农药化肥施用量 pesticide and fertilizer uses
国内非生物物质输入 Domestic non-biomass inputs	化石燃料、金属和工业矿物产量 Fossil fuel, metal and industrial mineral yields 化石燃料燃烧、工业过程及生物呼吸消耗的氧 气量、土壤呼吸耗氧量 Oxygen consumptions in fuel burning, industrial process, biomass breath and soil breath 植物光合作用消耗的二氧化碳量 Carbon dioxide consumptions in plant photosynthesis		废气和其它气体输出 Outputs of waste gas and other gas	化石燃料燃烧和工业废气排放量 Waste gas of fuel burning and industry 生物和土壤呼吸排放的二氧化碳量 Carbon dioxide emissions of biomass and soil breath 植物光合作用排放的氧气的量 Oxygen emissions of plant photosynthesis
国内水输入 Domestic water inputs	供水量或用水量 Water supplies or water uses		国内废水输出 Domestic wastewater outputs	工业和生活废水排放量 Wastewater outputs of industry and household
隐藏流 Hidden flows	国内输入物质的土壤搬运量 Soil removes of domestic material input		隐藏流 Hidden flows	输出物质的土壤搬运量 Soil removes of material output
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

\* 表中各类物质资源的统计数据主要来自当地的统计年鉴、相关部门的年终报表及物质平衡的计算结果

### 2.2 资料收集及数据统计计算

输入端的固体物质分为非生物和生物物质两大部分。非生物物质由化石燃料、金属、非金属和工业矿物的年产量代表,其中化石燃料由原煤、原油和天然气 3 部分组成,金属、非金属和工业矿物由金、银、铜、铝、铅、锌、铁、原盐、硫铁矿和磷矿石等物质组成。生物物质由农作物、经济作物和林木的年产量和天然渔产量组成<sup>[4]</sup>。

水的输入量由农业用水、工业用水、城镇生活用水、地下水等组成,此处地下水是作为其他用水的补充部分单独列出的。

输入的气体主要包括氧气和二氧化碳 2 部分,前者主要消耗于化石燃料燃烧、工业生产、生物呼吸及土壤

① 武进区循环经济规划研究报告,南京大学环境学院-江苏省环境保护厅环境管理与政策研究中心,2005-30-10

呼吸等方面,后者主要消耗于植物的光合作用。由于没有这方面的统计数据,这两部分的气体输入量均由计算得出。工业生产流程耗氧相对较少且不易估算,故予以略去。化石燃料燃烧耗氧量通常采用主要氧化物质( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ )的排放量予以估算。由于只有  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的排放量数据,所以,只能用这 2 种气体的排放量近似地估计耗氧量,其计算方法是,按氧在其分子量中的比例进行推算,如将化石燃料燃烧排放的二氧化碳量乘以 0.73 与二氧化硫排放量的 0.5 倍相加<sup>[4, 15]</sup>。在生物呼吸耗氧的计算过程中,将生物分为人和动物 2 类,后者主要指家畜如牛、马、猪和羊等。人类呼吸消耗的氧气,通过人类消耗的食物量间接估算,即用每人每年平均消耗食物的质量乘以 0.283,再乘以全区的总人口数<sup>[4, 15]</sup>。鉴于县级统计年鉴未予统计城市人口人均食物消耗量,此方面数据缺乏,这里主要参考相邻城市统计年鉴“城镇居民家庭平均每人主要消费品消费量”数据,再由当地统计年鉴“农村居民家庭平均每人主要消费品消费量”一表中所列的与食品相关的各项相加得到。动物呼吸耗氧量的计算方法是,用各类家畜年产量(头数)乘以相应类别每头家畜每年呼吸平均消耗氧气量得到<sup>[4, 15]</sup>。例如,每头牛平均每年的呼吸耗氧量为 970kg,将每年的产牛头数乘以 970kg,便得到当地牛的呼吸耗氧量。按照同样的方法,算出其他家畜的呼吸耗氧量。将各种家畜呼吸耗氧量加和即得到当地的动物呼吸耗氧量。将人口呼吸耗氧量与动物呼吸耗氧量相加,最终得到当地生物呼吸耗氧量的时间序列。土壤呼吸耗氧量主要是参照有关文献的研究成果<sup>[19]</sup>套用相关标准,结合当地的实际情况,主要按农田计算,每公顷农田年均耗氧量为 12.41 万 kg。植物光合作用消耗的二氧化碳量近似地用农、林产品产量乘以 1.47 求得。进口物质资源数量只以质量为单位的各种原材料物质纳入统计范围<sup>[4, 20]</sup>。

输出端固体废弃物部分包括工业固体废弃物、生活垃圾和农药、化肥的流失量。将农药、化肥作为输出部分的组分是因为其很容易转化成污染物随水和空气的运动而流失到环境中去。

废水排放总量包括生活污水和工业废水 2 部分。

废气和其他气体主要由 3 部分组成,分别是工业废气,包括工业二氧化硫、工业烟尘和工业粉尘;二氧化碳,主要由化石燃料燃烧及生物呼吸、土壤呼吸作用产生;氧气,来自于植物光合作用。二氧化硫、工业烟尘和工业粉尘的数据取自当地统计数据,二氧化碳和氧气数据则通过计算得来。

化石燃料燃烧排放的二氧化碳量  $m(\text{CO}_2)$ ,采用下列公式计算<sup>[4, 15]</sup>:

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

式中,  $P_i$  是第  $i$  种化石燃料的消耗量,只考虑煤、石油和天然气 3 种化石燃料,各种燃料的历年消耗量根据当地统计年鉴中的能源生产总量(折合成标准煤 t)及构成百分比,经计算得到。  $F_i$  是第  $i$  种化石燃料的平均有效氧化系数,这里取煤、石油、天然气的平均有效氧化系数分别为 0.982、0.918 和 0.98。  $C_i$  是单位燃料中的含碳量,每 t 标准煤的平均含碳量为 0.85,每 t 标准煤的燃油含碳量为 0.707,每 t 标准煤的燃气含碳量为 0.403<sup>[4, 20]</sup>。生物呼吸中人类呼吸排放的二氧化碳量,利用各年食物消耗总量乘以 0.338 求得,动物和土壤呼吸排放的二氧化碳量按  $n(\text{CO}_2)/n(\text{O}_2)$  的比例为 1,分别由动物和土壤呼吸耗氧量推算。植物光合作用排放的氧气量,按  $n(\text{CO}_2)/n(\text{O}_2)$  的比例为 1,由植物光合作用消耗的二氧化碳量推算<sup>[4, 15]</sup>。出口物质资源数量将以质量为单位的各种原材料物质纳入统计范围。

土壤年流失量或土壤侵蚀模数是根据研究区土地利用/覆盖数据及有关土壤、地形等数据,按照美国通用土壤流失预报方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)推算得出<sup>[21]</sup>:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot P \cdot C$$

式中,  $E$  为特定地块多年平均土壤流失量,  $R$ 、 $K$ 、 $L$ 、 $S$ 、 $P$ 、 $C$  分别为影响土壤流失的降雨径流、土壤可蚀性、坡长、坡度、水土保持措施及植被覆盖因子。

### 3 结果与分析

#### 3.1 物质输入与输出量分析

研究区生态经济系统 2002~2004 年的物质输入与输出见表 2。从表中可以看出,随着社会经济的发展,

物质输入总量在增加,年均递增 7.9%,但远小于 GDP 的增长速率(21.0%);而物质输出总量则呈现递减的趋势,年均递减 10.6%。说明随着生态建设与环境保护的方针的贯彻,本研究区在经济快速增长的过程中,对生态系统的破坏有了减缓的迹象。

表 2 研究区生态经济系统的输入与输出物质统计表

Table 2 Statistic material input and output in the study ecol-economic system

类目 Items	年份 Year		
	2002	2003	2004
人口基数(万人) Population ( $10^4$ people)	92.80	93.79	96.08
GDP(亿元,1990年不变价) GDP ( $10^8$ yuan, price at 1990)	265.60	316.17	388.77
人均 GDP(元/人) GDP per capita (yuan/person)	28621	33710	40463
物质输入总量 Total material input ( $10^4$ t)	77943.20	80849.24	90710.80
其中:生物产量 There into: biomass yield	70.69	66.26	65.60
化石燃料产量 Fossil fuel yield	116.10	192.50	225.46
金属和工业矿物产量 Metal and industrial mineral yield	128.00	376.80	419.60
化石燃料燃烧耗氧量 Oxygen depleting of fuel burning	68.02	114.82	134.95
生物呼吸耗氧量 Oxygen depleting of biology breath	118.45	97.55	96.89
土壤呼吸耗氧量 Oxygen depleting of soil breath	71.26	69.39	60.35
植物光合作用吸收二氧化碳量 Carbon dioxide absorption of plant photosynthesis	91.88	83.10	83.14
水输入总量 Total water input ( $10^4$ t)	77275.00	79845.00	89621.00
其中:农业用水量 There into: agricultural water use	46504.00	46504.00	63614.00
工业用水量 Industrial water use	24968.00	24968.00	22925.00
城镇生活用水量 Household use water	4453.00	7458.00	2687.00
地下水抽取量 Groundwater extraction	1350.00	915.00	395.00
物质输出总量 Total material output ( $10^4$ t)	15443.50	15267.38	12354.46
其中:工业固体废弃物 Thereinto: industrial solid waste	38.86	50.84	53.13
生活固体废弃物 Household solid waste	34.2	34.2	34.2
农药化肥施用量 Pesticide and fertilizer use	2.00	1.00	1.00
化石燃料燃烧和工业废气排放量 Fuel burning and industrial exhaust gas emission	93.18	106.50	131.93
生物呼吸排放二氧化碳量 Carbon dioxide emission of biology breath	109.12	89.88	89.79
土壤呼吸排放二氧化碳量 Carbon dioxide emission of soil breath	160.84	132.01	131.08
植物光合作用释放氧气量 Oxygen release of plant photosynthesis	66.88	60.49	60.51
废水输出总量 Total wastewater output ( $10^4$ t)	14934.62	14788.65	11849.00
其中:工业废水排放量 There into: industrial wastewater output	10409.00	10332.00	8787.00
生活废水排放量 Household wastewater output	4525.62	4456.65	3062.00

为了便于进一步比较分析,下面分别讨论不包括水的物质输入与输出量之间的关系和水输入量与输出量之间的关系。

**3.1.1 不包括水的物质输入与输出总量的关系** 在不考虑水的情况下,经济系统的物质输入总量呈快速增长趋势,即从 2002 年的  $668.20 \times 10^4$  t, 迅速上升到 2004 年的  $1089.80 \times 10^4$  t, 平均每年递增  $210.8 \times 10^4$  t, 年均增长率为 27.7%(图 2)。固体物质输入量的递增速率远远大于气体物质输入量的递增速率,前者从 2002 年的  $198.69 \times 10^4$  t, 迅速上升到 2004 年的  $485.20 \times 10^4$  t, 年递增速率为 56.3%, 后者则从 2002 年的  $349.60 \times 10^4$  t, 小幅上升至 2004 年的  $375.32 \times 10^4$  t, 年递增速率仅为 3.61%(图 3a); 进口物质总量也呈现较快的增长势头, 从 2002 年的  $108.62 \times 10^4$  t 猛增到 2004 年的  $225.46 \times$

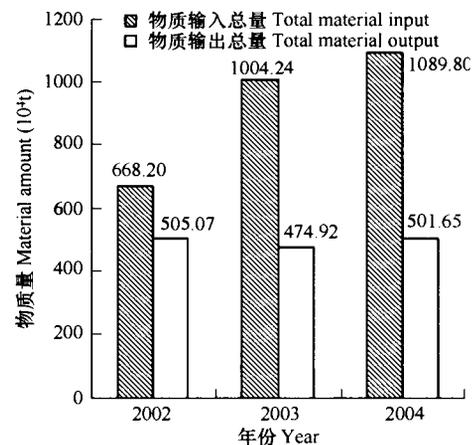


图 2 研究区生态经济系统不包括水的物质输入与输出总量  
Fig. 2 Material input and output amount of the studying ecol-economic system (not involved water)

10<sup>4</sup>t, 年均增长率为 44.1% (图 3a)。从以上情况可以看出, 随着社会经济的发展, 物质输入量在快速增加, 这又集中表现在固体物质的迅猛增加, 进口物质的总量也保持较快增长的势头, 而气体物质的输入量增长缓慢, 说明在社会经济的发展过程中, 对物质的需求量也相应的提高, 而固体物质需求量的迅猛增加则对生态系统造成了直接破坏。

区域经济系统物质输出总量呈总体持平的趋势, 即在  $500.00 \times 10^4$  t 左右波动, 其占物质输入总量的比例则从 2001 年的 78.7% 下降到 2004 年的 46.0% (图 2)。从构成上看, 气体物质输出量占 84.8%, 固体物质输出量占 15.2% (图 3b)。武进区物质输出特征说明这一地区对环境造成污染的物质以气体为主, 其中尤以化石燃料燃烧和工业过程废气的排放量的增加尤为明显, 从 2002 年的  $93.18 \times 10^4$  t 快速上升到 2004 年的  $131.93 \times 10^4$  t, 年递增率为 19.0% (表 2); 而固体废弃物的增加, 也加重了对环境的污染。

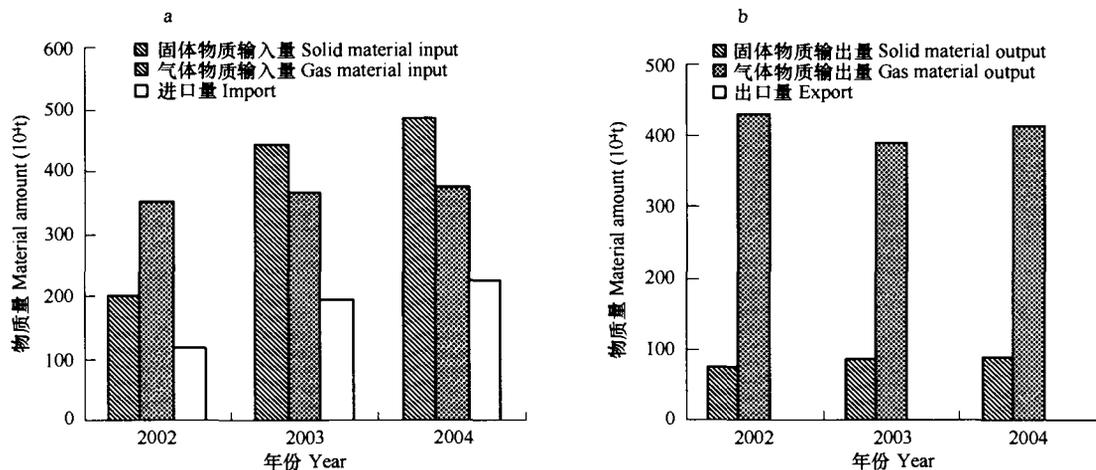


图 3 研究区生态经济系统固体和气体物质输入与输出总量的构成

Fig. 3 Components of material input and output amount in the studying eco-economic system (not involved water)

**3.1.2 用(供)水量与废水排放量分析** 本文按实际所得数据来分析 2003 年和 2004 年用水量及其构成以及废水排放量的变化(图 4)。

从图 4a 可以看出, 2004 年武进区经济系统总用水量比 2003 年增加 12.2%。在用水构成中, 农业用水占大部分比例, 其次是工业用水、城镇生活用水、地下水抽取量。在时间动态上, 农业用水呈上升的趋势, 即 2004 年比 2003 年增加  $17110 \times 10^4$  t, 年递增 36.8%, 其比例从 2003 年的 58.2% 上升到 2004 年的 71.0%; 相反, 工业用水下降了  $2043 \times 10^4$  t, 年递减 4.2%, 其比例相应地从 2003 年的 31.3% 下降到 2004 年的 25.6%; 城镇生活用水量和地下水的抽取量也明显下降。以上情况说明, 在所有用水构成成分中, 占大部分比例的农业用水由于其大幅度的增长, 导致了总的用水量的上升, 而其他用水虽然都不同程度的减少, 但由于其构成份额较小, 仍不足以带动总的用水量的减少。

同时, 2004 年总的废水排放量为  $11849 \times 10^4$  t, 比 2003 年下降 19.9%, 其中工业废水排放量也从 2003 年的  $10332 \times 10^4$  t 下降到 2004 年的  $8787 \times 10^4$  t, 下降幅度为 15.0%, 生活废水排放量则从 2003 年的  $4456.65 \times 10^4$  t 下降到 2004 年的  $3062 \times 10^4$  t, 下降幅度为 31.3% (图 4b)。废水排放量的下降说明了对环境的压力也在减轻, 而其中下降速度较快的是生活废水排放量的减少, 其次是工业废水排放量的减少, 但由于其基数较大, 占有较大的比例(74.15%), 其数量的下降更能带动总的废水排放量的减少, 从而进一步减轻对环境的压力或污染。

### 3.2 物质输入与输出的强度与效率分析

为了衡量经济系统物质输入与输出的强度和效率, 分别计算单位人口和单位国内生产总值(GDP)的物质输入与输出量(图 5), 其中, 国内生产总值按 1990 年的可比价格计算。

人均物质输入量(不包括水)呈显著上升的势头, 即从 2002 年的 7.20 t/人上升到 2003 年和 2004 年的

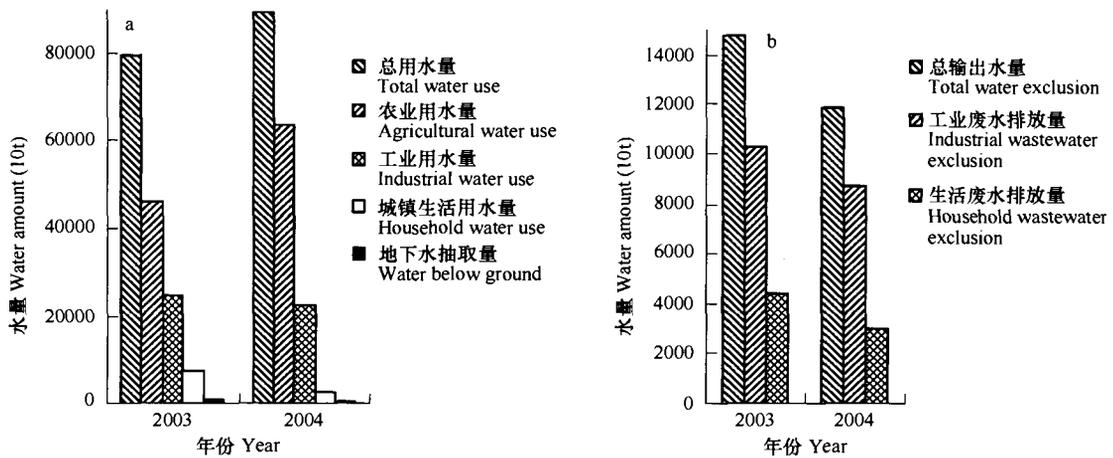


图 4 研究区生态经济系统的输入和输出水量

Fig.4 Water input and output of the studying eco-economic system

10.71 t/人和 11.34 t/人;与物质输入总量(不包括水)的增长趋势比较相似,年平均增长率为 25.5%,明显大于同期人口的年增长率(17.5‰);人均物质输出量则从 2002 年的 5.44 t/人减少到 2003 年的 5.06 t/人,然后又缓慢上升到 2004 年的 5.26 t/人(图 5a),即随着人口的增加和社会经济的发展,物质利用强度明显增加,而物质输出强度基本保持稳定,说明了本研究区经济的发展一方面依赖于资源的大量消耗,另一方面,中间产品及半成品的贮存暂时延缓或减轻了对环境的污染。

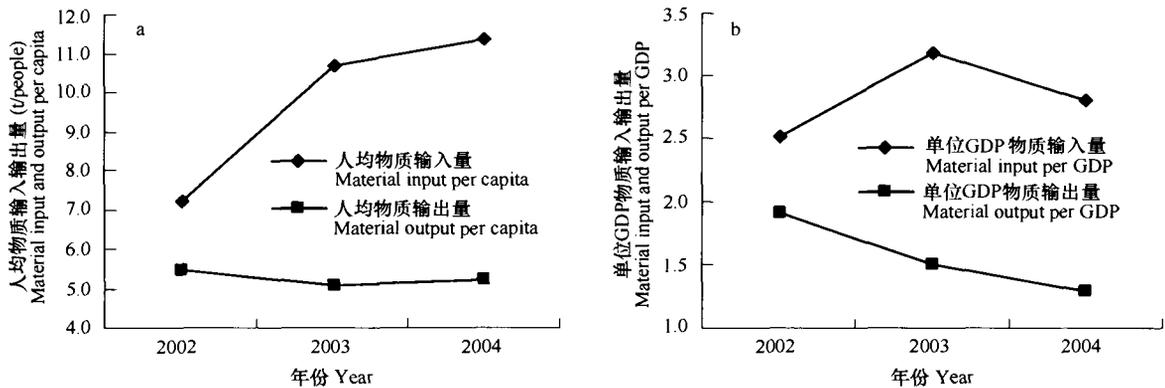


图 5 研究区生态经济系统物质输入与输出的强度和效率

Fig.5 Intensity and efficiency of material input and output in the studying eco-economic system

单位 GDP 的物质输入量(不包括水)呈现出波动状态,即从 2002 年的 2.52 t/万元上升到 2003 年的 3.18 t/万元,之后又下降到 2004 年的 2.80t/万元;同期的单位 GDP 物质输出量(不包括水)则呈快速递减的趋势,从 2002 年的 1.90 t/万元减至 2004 年的 1.30 t/万元,年均递减率为 17.3% (图 5b)。说明废弃物输出的效率得到明显提高,也反映出研究区生态经济系统的资源利用效率在稳步提高。

人均用水量逐年上升,从 2002 年的 832.70 t/人上升至 2004 年的 932.77 t/人,年均递增率为 5.8%;人均废水排放量则呈下降趋势,从 2002 年的 160.93 t/人下降到 2004 年的 123.32 t/人,年均递减率为 12.5% (图 6a)。单位 GDP 用水量和单位 GDP 废水排放量则有相同的递减趋势,其中单位 GDP 用水量从 2002 年的 290.95 t/万元减至 2004 年的 230.52 t/万元,年均递减率为 11.0%;单位 GDP 废水排放量则从 2002 年的 56.23 t/万元减至 2004 年的 30.48 t/万元,年均递减率为 26.4% (图 6b)。说明随着经济的发展人均用水强度增加了,但用水效率在持续上升,而单位 GDP 废水排放量的稳步下降表征了武进区水资源利用效率的稳步提高,区域经济增长

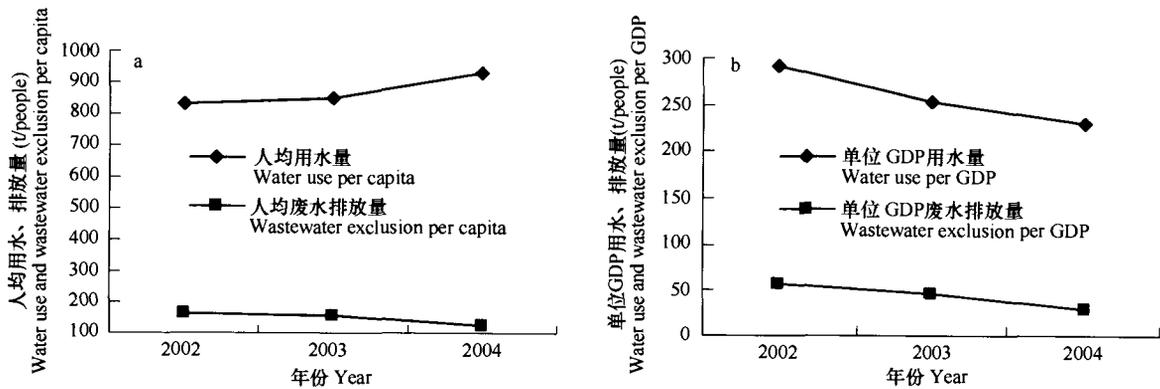


图 6 研究区生态经济系统水输入与输出的强度与效率

Fig.6 Intensity and efficiency of water input and output in the studying eco-economic system

和环境压力也在逐步脱钩。

#### 4 结论

通过上述分析可以得出以下几点结论:

(1)随着社会经济的发展和人口的增长,武进区物质输入总量及人均物质输出量也在增加,但递增速率均远小于 GDP 的增长速率,而物质输出总量及人均物质输出量则呈现递减的趋势;

(2)在不考虑水的因素情况下,武进区的物质输入量保持较快的上升速度,其中固体物质的增长速率远远大于气体物质的增长速率;物质输出量则呈总体下降趋势,其中又以气体物质输出量的贡献最大,对环境造成污染的物质以气体特别是以化石燃料燃烧排放的废气和工业废气为主;

(3)排除占大部分比例农业用水的上升,工业用水、城镇生活用水和地下水总量及人均利用强度都在减少;同时,总的废水排放量及人均排放量在减少,其中又以生活废水排放量的减少最快,其次是工业废水排放量的减少。水利用强度的下降和水利用效率的提高,有利于区域可持续发展,但用水结构需要调整;

(4)单位 GDP 物质输入量的变化处于波动状态,同期的单位 GDP 的物质输出量则呈递减的趋势;单位 GDP 用水量和单位 GDP 废水排放量则有相同的递减趋势。表征了武进区资源利用效率的稳步提高,区域经济增长和环境压力也在逐步脱钩。

#### 5 讨论

通过以上物质流分析可以看出研究区生态经济系统自 2002 年以来物质输入总量及人均物质输入量增长很快,这与区域经济高速增长是分不开的。与此同时,区域内物质输出总量人均物质排放量的变化并不大,甚至还有降低的迹象,即在经济高速发展的同时区域环境压力并没有进一步加大,按照环境库兹涅茨曲线理论,武进区正逐步向区域环境与经济的协调发展的方向发展。

从单位 GDP 物质流分析可以看出,研究区一方面物质的利用效率有了显著的提高,另一方面系统中物质循环利用得到了一定程度的体现,这从另一个方面验证了区域可持续发展战略正在有效实施,区域未来发展潜力巨大,同时区域生态环境恶化的势头已得到一定控制。

农业用水的上升导致了水资源一定程度的紧张。因此,在提倡节约用水的生产与实践过程中,实施节水农业在武进区水资源综合利用中具有较大的前景,如何节约和高效利用导致面源污染的农业用水是需要重点研究的一个方面。

另外,由于本文所牵涉的物质输入输出都是用其重量来计算的,它们之间的品质差异也无法体现出来,如单位质量的重金属对于环境的作用和压力就要远高于同等质量的其他输出物,这也是生态经济系统物质流分析的局限,对于这种单个物质或单质在环境经济系统中的物质流分析(Substance Flow Analysis, SFA)目前也已取得一定进展<sup>[22-24]</sup>。

物质流分析在中国的应用研究刚刚起步,而且主要集中于较大尺度的分析和研究,在这种县级小区域尺度上的应用更是少见报道,因此难免存在许多问题,如统计数据的缺失、隐藏流系数的换算、进出口物质的处理、原料及加工制成品的重复计算等,都会影响到物质流分析的准确性和合理性。随着相关研究的进一步深入,物质流分析方法将会为环境经济学研究提供更为清晰的思路和科学工具。

## References:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Bouman M, Heijings 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.
- [ 3 ] Bi J. Circular Economy: An Industrial Ecology Practice under the New Development Strategy in China. Poster for Gordon Research Conference 2004, Industrial Ecology: Major Technological Transition, Oxford, UK, August 1—6, 2004.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] BI J. Perspectives on Green Buildings: China Experiences, Workshop for NSF Self-Sustaining High-Rise Building Project. Rutgers University, New Brunswick, N J, USA, January 13 ~ 14, 2005.
- [ 6 ] Chen X Q, Qiao L J. A preliminary material input analysis of China. *Population and Environment*, 2001, 23(1): 117 ~ 126.
- [ 7 ] Li G. Material flow analysis of nations based on sustainable development. *China Industry Economy*, 2004, (11): 11 ~ 18.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Xu M, Zhang T Z. Material flow analysis of fossil fuel usage in the Chinese economy. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, 44(9): 1166 ~ 1170.
- [ 10 ] Chen Y, Deng N S. Environmental management approach geared to the 21st century — matter and energy flow analysis. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, 25(3): 1 ~ 5.
- [ 11 ] Xu M, Zhang T Z. Material input analysis of China economic system. *China Environmental Science*, 2005, 25(3): 324 ~ 328.
- [ 12 ] Xia C Y. Review on studies of economic-wide material flow analysis. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 415 ~ 421.
- [ 13 ] Tjahjadi B, Schafer D, Rademacher W, *et al.* Material and energy flow accounting in Germany—data base for applying the national accounting matrix including environmental accounts concept. *Structural Change and Economic Dynamics*, 1999, (10): 73 ~ 97.
- [ 14 ] Huang S L, Hsh W L. Materials flow analysis and energy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63: 61 ~ 74.
- [ 15 ] Schuetz H, Bringezu S. Economy-wide Material Flow Accounting. Wuppertal: Wuppertal Institute, 1998. 1 ~ 31.
- [ 16 ] Duan N. Urban material metabolism and its control. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(5): 75 ~ 77.
- [ 17 ] Xu Y J, Zhang T Z, Shi L, *et al.* Material flow analysis in Guiyang. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2004, 44(12): 1688 ~ 1691, 1699.
- [ 18 ] Chen X Q, Qiao L J. Material flow analysis of Chinese economic-environmental system. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 17 ~ 23.
- [ 19 ] Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the dynamics of soil Respiration in the field of summer corn in Huanghuaihai region in China. *Soil Fertilizer*, 2002, (6): 13 ~ 17.
- [ 20 ] Wang M X Ed. Trend and Influence of the Changes of Chinese Climate and Sea Level III. Global Climate's Changing Warmer. Jinan: Publisher of Shandong Science & Technology, 1996. 1 ~ 480.
- [ 21 ] Huang H P, Yang J, Song B Y, *et al.* Ecosystem health assessment of the hilly and gully area of Loess Plateau in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1048 ~ 1056.
- [ 22 ] Johnson J, Julie J, Marlen B, *et al.* Contemporary Anthropogenic Silver Cycle: A Multilevel Analysis. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(12): 4655 ~ 4665
- [ 23 ] Graedel T E, Beers D V, Bertram M, *et al.* 2004. Multilevel Cycle of Anthropogenic Copper. *Environmental Science & Technology*, 38(4): 1242 ~ 1252
- [ 24 ] Graedel T E, Beers D V, Bertram M, *et al.* 2005. The Multilevel Cycle of Anthropogenic Zinc. *Journal of Industrial Ecology*, 9(3): 67 ~ 90

## 参考文献:

- [ 1 ] 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 ] 陈效速,赵婷婷,郭玉泉,等. 中国经济系统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.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 刘敬智,王青,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.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 陈跃,邓南圣. 面向二十一世纪的环境管理工程——物质与能量流动分析. *重庆环境科学*, 2003, 25(3): 1 ~ 5.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 16 ] 段宁. 城市物质代谢及其调控. *环境科学研究*, 2004, 17(5): 75 ~ 77.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 王立刚,邱建军,李维桐. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究. *土壤肥料*, 2002, (6): 13 ~ 17.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 黄和平,杨勃,宋炳煜,等. 内蒙古黄土丘陵沟壑区生态系统健康评价. *生态学报*, 2005, 25(5): 1048 ~ 1056.