

基于物质流分析的宁波市经济-环境系统研究

董朝阳, 童亿勤*, 伍磊, 陈丹青

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 运用物质流分析方法对 2005~2011 年宁波市经济系统的物质输入与输出进行分析, 探讨了宁波市经济发展与环境压力的关系, 找出影响环境压力的重要因素. 结果表明, 在 2005~2011 年间, 宁波市的物质输入输出平均增长速度分别为 8.8%和 9.1%, 宁波市经济发展对进口物质的依赖性日趋上升. 结合环境库茨涅茨曲线, 得出宁波市目前还未达到后工业化阶段, 经济发展仍是高消耗、高排放的传统经济增长模式, 对资源和环境产生了很大的压力. 根据 IPAT 模型, 要缓解这种环境压力, 提高科技水平和经济是关键. 因此, 宁波市必须切实转变经济增长方式, 发展循环经济.

关键词: 物质流分析; 循环经济; 宁波市

中图分类号: F124

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 01-0086-06

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是根据质量守恒定律, 在特定的时间和空间范围下对经济环境系统的物质输入和输出进行定量分析的一种方法^[1]. 物质流分析的物质可以是研究系统内的各种物质(如资源、能源、产品、废弃物等), 也可以是某种元素; 其分析的对象可以是某个国家或地区, 也可以是某个行业^[2]; 其分析的内容有物质总量和物质使用强度. 物质流分析源于社会代谢论(Society's Metabolism), 该理论认为人类社会物质生产和消耗过程与生物体代谢过程相似, 由自然资源开采、生产、消费、循环和废弃五个关键环节所构成, 也称之为社会代谢^[3]. 物质流分析方法是通过对经济活动中的物质输入、输出, 真实具体地描述经济发展与环境之间的关系, 以减少资源消耗和环境污染, 这在本质上与循环经济的“3R”(Reduce、Reuse、Recycle)原则是一致的. 因此, 物质流分析中的一些指标可以借鉴作为一个地区循环经济发展程度的评价. 物质流分析普遍应用于一些发达国家, 如美国、日本、德国等. 而国内关于物质流的分析和应用才刚刚兴起, 与国外其他发达国家的差距甚远. 而且国内的研究大

多集中在国家层面上, 区域层面和微观层面的研究都比较欠缺, 研究的广度和深度都不够.

宁波是长江三角洲经济区及长江流域经济区的主要核心城市之一, 具有显著的区位优势. 宁波作为第一批对外开放的沿海城市和计划单列市, 经济发展水平在全国名列前茅. 但是回顾宁波 20 多年来的工业发展, 一直沿用的是粗放型经济增长方式, 这就导致了一些环境和生态问题, 环境质量不容乐观. 通过物质流分析方法研究宁波市自然系统和经济系统的物质输入、输出和流向, 建立 IPAT 模型和环境库兹涅茨曲线分析宁波市的环境压力 and 经济发展之间的关系, 认清宁波在经济发展中付出的资源和环境代价, 并找出造成宁波市资源消耗和环境污染的主要因素, 从而为宁波市开展循环经济、建设资源节约型、环境友好型社会提供重要的理论支持和科学依据.

1 理论方法与数据来源

1.1 理论方法

1.1.1 指标体系与模型构建

物质流分析指标体系是物质流分析方法的核

收稿日期: 2014-01-14.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(71203108); 宁波大学学科建设项目(XKL11D2067).

第一作者: 董朝阳(1989-), 男, 河南南阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 区域经济与城乡发展. E-mail: chaoyang1012@sina.com

*通信作者: 童亿勤(1962-), 男, 浙江宁波人, 副教授, 主要研究方向: 资源环境与可持续发展. E-mail: tongyqnb@163.com

心内容,它是评价一个经济系统资源生产率高低以及是否实现可持续发展的重要手段。结合国内外各种文献资料,将物质流分析指标分为物质输入指标(直接物质输入量 DMI、物质总输入 TMI、物质需求总量 TMR)、物质输出指标(区域内物质输出 DPO、直接物质输出 DMO、物质输出总量 TMO)以及强度和效率指标(物质消耗强度 MCI、物质生产力 MP)^[5]。

IPAT 模型可用来研究经济系统与资源环境之间的关系和规律,该模型最早是由美国斯坦福大学的人口学家 Ehrlich P R 提出,方程如下^[6]:

$$I = A \times P \times T,$$

其中, I 表示环境冲击或环境负荷; A 表示富裕程度; P 表示人口; T 表示技术。

笔者将物质流分析中的输入输出指标和 IPAT 方程的变量结合起来, TMR 作为 I 指标(R_{TMR}), 人均 GDP(R_{GDP})作为 A 指标, 常住人口为 P 指标, T 指标取 R_{TMR} / R_{GDP} 。

1.1.2 物质流分析框架

根据欧盟统计局制定的(EUROSTAT 2001)物质流分析手册,对物质流分析中的物质进行分类,分别从输入、输出两方面进行划分。基于国内外的研究成果,笔者对宁波市物质流分析中参与到经济系统的输入输出端物质分别分为 5 类,其中输入端包括区域内物质开采、进口物质、水、输入端平衡项以及隐藏流;输出端包括区域内物质输出、进口物质、废水、输出端平衡项以及隐藏流。研究框架如图 1 所示。

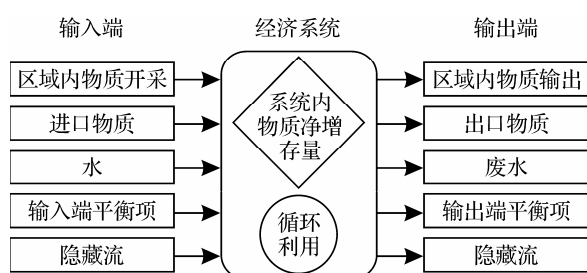


图 1 经济系统物质流分析研究框架^[7]

1.2 数据来源

目前还没有专门的机构为物质流分析建立相关的数据库,对文中涉及到的各种物质的原始数据,主要来源于《宁波市统计年鉴(2006~2012 年)》《宁波市环境状况公报(2005~2011 年)》和《宁波

市水资源公报》及《宁波矿产资源总体规划(2001~2015)》,以及相关部门提供的行业信息以及相关数据。对于部分年份缺失数据采用数学插值法填补。为便于分析,根据相关公式和系数对区域内开采物质和物质输出^[8-12]、进出口物质^[13]、平衡项^[14-18]、隐藏流^[9,19-21]进行核算,单位统一化为 t 表示。

2 结果与分析

从物质的输入和输出来看,水在其中占了绝大部分,比其他物质的输入与输出量大 2~3 个数量级,会影响其他物质的重要程度分析。因此,笔者按照 EUROSTAT 标准,对水的输入输出进行单独分析。宁波市经济-环境系统 2005~2011 年的物质输入与输出量见表 1。

2.1 物质输入与输出分析

2.1.1 区域内直接物质输入与输出量分析

直接物质输入包括区域内开采物质、进口物质和输入端平衡项;直接物质输出包括区域内物质输出、出口物质和输出端平衡项。在不考虑水的情况下,直接物质输入量与直接物质输出量基本上呈递增趋势,且物质的直接输入量大于直接输出量(表 1 和表 2)。2011 年的物质输入量与输出量分别达到 1.971×10^8 t 和 1.841×10^8 t, 分别比 2005 年增长了近 66% 和 69%。从 2005~2011 年区域内开采的物质基本上保持稳定,而进口物质每年都超过了区域内开采的物质,且两者的差值在逐渐扩大,说明随着经济的快速发展,宁波市内的产量已经不能满足经济发展的需要。

对物质输入量和输出量进行回归分析,结果表明二者成线性关系, $R^2 = 0.999$, 方程表示为:

$$y = 0.961x - 471.195.$$

因此,宁波市要发展循环经济应从末端治理全面转变为源头控制,利用科学技术控制物质输入量,减少经济系统向环境排放的废弃物,从而减轻对生态环境的压力。区域内物质输出主要包括工业废气、固体废弃物(工业固废和生活垃圾)、废水中 COD 和氨氮以及耗散物质。为了进一步分析宁波市区域内物质输出变化的主要动力,需对宁波市过程排放的组成成分进行分析。2005~2011 年宁波市经济系统向环境输出的总量起伏不定,前 3 年输出量较少,后几年的输出量保持在 4×10^6 t 以

表 1 宁波市 2005~2011 年经济系统基本情况

指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
常住人口/万人	631.60	671.60	689.50	707.00	719.00	760.57	762.80
GDP/亿元	2 325.80	2 840.80	3 388.34	3 932.05	4 314.00	5 275.93	6 066.08
人均 GDP/元	36 823.94	42 298.99	49 141.99	55 615.98	60 000.00	69 368.11	79 523.86

表 2 宁波市经济系统物质输入与输出统计

指标	输入端(输出端)/万 t						
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
区域内开采物质	2 452.60	2 579.97	2 567.97	2 876.99	2 741.74	2 855.31	3 371.68
进口物质	4 212.70	4 442.88	5 134.61	5 267.14	5 863.03	6 717.97	7 315.57
水输入量	201 600.00	207 900.00	208 200.00	211 200.00	207 500.00	212 600.00	218 800.00
平衡项	5 187.65	5 675.20	6 561.93	6 584.67	7 061.89	7 855.32	9 019.39
区内隐藏流	15 113.60	15 071.76	14 610.14	15 640.15	13 405.46	15 583.49	1 7731.70
进口隐藏流	2 0130.42	21 941.08	26 131.02	26 590.42	29 391.20	33 684.54	3 7136.65
直接物质输入(DMI) ¹⁾	11 852.95	12 698.06	14 264.51	14 728.81	15 666.66	17 428.60	19 706.66
物质需求总量(TMR) ¹⁾	47 096.97	49 710.90	55 005.67	56 959.38	58 463.32	66 696.63	74 575.01
区域内物质输出(DPO)	354.87	338.65	387.15	411.87	446.31	414.94	447.72
出口物质	3 392.91	3 506.29	3 905.13	4 065.36	4 565.50	5 190.48	5 637.38
平衡项	7 166.44	7 900.37	8 983.81	9 010.11	9 664.65	10 744.00	12 324.32
废水输出量	25 150.00	32 574.44	35 911.51	39 424.73	45 055.06	47 983.24	55 579.41
工业废水	11 895.00	15 827.05	17 726.21	17 290.03	17 734.81	18 969.90	19 797.08
生活污水	13 255.00	16 747.39	18 185.31	22 134.70	27 320.25	29 013.34	35 782.33
区内隐藏流	15 113.60	15 071.76	14 610.14	15 640.15	13 405.46	15 583.49	17 731.70
出口隐藏流	13 571.63	14 025.14	15 620.53	16 261.43	18 262.02	20 761.92	22 549.52
直接物质输出(DMO) ²⁾	10 914.22	11 745.31	13 276.09	13 487.34	14 676.46	16 349.42	18 409.42

注: 1)不含水输入, 2)不含水输出.

上, 其中 2009、2011 年的输出量达到最大(图 2). 其中生活垃圾的排放量占了总量的半壁江山, 每年的比例基本达到 50%~60%, 且几乎每年都在小幅度的增长, 这可能与人们生活水平在不断提高有关. 工业固体废弃物占的比例相对来说也较大,

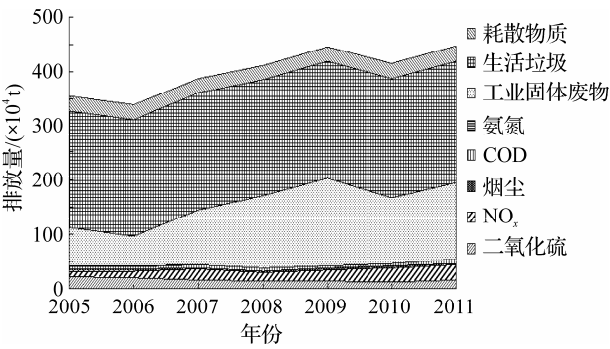


图 2 2005~2011 年宁波市区域内物质输出构成变化

排放量的增加趋势, 2009 年到达最高值 1.193×10^6 t. 烟尘和氨氮类排放量占的比例最小, 还不到 1%, 除 2011 年外, 其排放量逐年减少. 二氧化硫和 COD 的变化趋势和氨氮类一样, 说明前几年宁波市在控制二氧化硫和 COD 的排放上做出很大努力.

2.1.2 区域内直接物质输入输出强度与效率分析

在不考虑水的情况下, 对宁波市直接物质输入输出强度和效率进行分析, 直接物质输入输出强度和效率分别用人均直接物质输入输出量和万元 GDP 直接物质输入输出量表示. 2005~2011 年直接物质输入强度与输出强度变化趋势大体一致, 且直接物质输入强度高于输出强度; 直接物质输入强度从 2005 年的 $18.77 \text{ t} \cdot \text{人}^{-1}$ 增加到 2011 年的 $25.83 \text{ t} \cdot \text{人}^{-1}$, 增长了近 38%; 直接物质输出强度从 2005 年的 $17.28 \text{ t} \cdot \text{人}^{-1}$ 增加到 2011 年的 $24.13 \text{ t} \cdot \text{人}^{-1}$,

增长了近40%(表2)。直接物质输入效率与输出效率均呈现波动下降的趋势,且两者下降趋势非常相似。直接物质输入效率从2005年的 $5.1 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$,下降到2011年的 $3.25 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$,下降近36.3%;直接物质输出效率从2005年的 $4.69 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$,下降到2011年的 $3.03 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$,下降了近35.3%。2005~2011年宁波市直接物质输入输出强度在不断的上升,直接物质输入强度增长率低于直接物质输入输出强度的增长率;直接物质输入输出效率虽然在不断上升,但直接物质输出效率的提高低于直接物质输入效率的提高。这说明虽然资源利用率以及废弃物的输出效率有所提高,但随着人们物质消费能力的不断提高以及粗放的经济增长方式所导致的人均物质输入输出量的持续增加,对宁波市的生态环境施加了巨大的压力。

2.2 水的输入与输出分析

2.2.1 区域内水的输入与输出量分析

水输入量一直呈现上升趋势且保持在 $2 \times 10^9 \text{ t}$ 以上,废水输出量也在持续增加,其中生活污水不仅排放量大,而且其增长趋势比工业废水明显(表2)。工业废水的排放量在小范围的波动下呈增长趋势,生活污水的排放量逐年增加。这是因为随着人口的增长和经济的发展,生活污水也随之增多。2005~2011年,水的输入增长幅度小于水的输出增长幅度。这说明宁波市经济和社会的发展需要输入更多的水来满足其需要,进一步加重了对宁波市水资源的压力。在废水输出中生活污水排放增长幅度较大,其排放量的下降可以更好的带动总的废水排放量的减少。因此,应该对生活污水进行有效的回收利用和继续提倡节约用水,以减少废水排放总量和增加水的供给量。

2.2.2 区域内水的输入输出强度与效率分析

人均水输入输出量、万元GDP水输入输出量分别表示区域内水的输入输出强度和效率。2005~2011年水的输入强度大致呈现下降趋势,但基本保持在 $300 \text{ t} \cdot \text{人}^{-1}$ 左右(表2)。水的输出强度在不断上升,其中生活污水的输出强度明显大于工业废水的输出强度,且两者间差距越来越大(表2)。水的输入效率在2005~2011年间不断提高,从2005年的 $86.68 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$ 下降到2011年的 $36.07 \text{ t} \cdot (\text{万元})^{-1}$ 。其他3个指标也均呈现下降的趋势,但不明显,且

中间有小幅度的波动。虽然用水强度下降和用水效率有所上升,但依然处于较高的水平,并且水的输出强度尤其是生活污水的输出强度在不断上升。这表明了宁波市水资源综合利用效率仍然需要进一步的提高,而且在生活污水的控制上需要作出更大的努力。

2.3 物质生产力分析

物质生产力是指每吨物质创造的GDP。为了方便与其他国家及地区进行对比,将各年GDP单位统一换算为美元(汇率按照相应年份的平均水平计算)。宁波市的物质生产力由2005年的 $60.4 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 上升到2011年的 $126.2 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$,增长了近2.1倍。然而与世界发达国家相比,宁波市的资源利用效率仍然是相当低的。1996年美国、日本、德国以及荷兰物质生产力已经分别达到312.4, 769.8, 367.7, 345.5 $\text{美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。可以看出,宁波市的物质生产力处于很低的水平。2011年宁波市的物质生产力仅相当于1996年美国的40.4%,日本的16.4%,德国的34.3%,荷兰的36.5%^[22]。对比上海2003年物质生产力 $74.3 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 和北京2009年物质生产力 $178.2 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 的数据,宁波和这2个一线城市还是有一定差距,说明宁波市物质生产力在国内还没有达到先进水平。

2.4 环境库兹涅茨曲线分析

用环境库兹涅茨曲线(EKC)来分析宁波市经济发展与环境状况之间的关系。一般来说,它是呈倒“U”型曲线关系。EKC分为相对EKC和绝对EKC,从可持续性观点看,绝对EKC比相对EKC更具现实意义^[23]。因此,笔者采取绝对EKC来分析经济发展和环境之间的关系。从拟合结果看, R^2 分别为0.994和0.991,说明宁波市人均GDP与各总量指标二次曲线拟合较好(图3)。曲线近似倒“U”形的左半段,并处于继续上升的趋势,但尚未达到临界点,说明全市社会发展还未达到后工

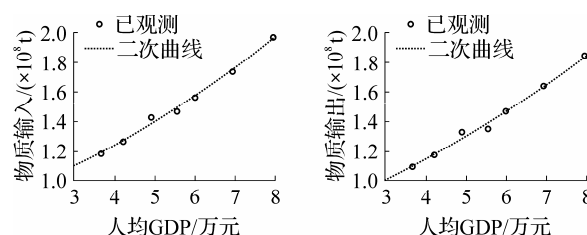


图3 宁波市绝对环境库兹涅茨曲线

业化阶段,环境压力呈现出不断上升的趋势且近期还难以改善。

2.5 环境冲击影响因素分析

根据 IPAT 方程,环境冲击影响可以分解为人口、财富和技术三方面。财富变化率与环境负荷变化率趋势具有相对一致性,当财富变化率较小时,环境负荷变化率也处于较低水平;技术变化率大致表现为与环境负荷变化率反相关;人口变化率从 2008 年开始与环境负荷变化率趋势具有大致的一致性(图 4)。为进一步了解环境冲击与哪个因素更为密切,用 SPSS 软件对其变化率进行偏相关分析。结果显示,环境负荷变化率与财富变化率、技术变化率的偏相关系数均为 0.999,显著性概率 $P=0.001$,说明剔除变量人口增长率的影响后,环境负荷变化率和财富变化率、技术变化率呈现出显著的正相关关系。环境负荷变化率与人口增长率的偏相关系数为 0.997,显著性概率 $P=0.003$,说明人口增长率对环境负荷的影响没有技术和财富的影响大。从偏相关系数比较可看出,影响宁波市环境负荷的关键因素在技术进步和经济的发展。

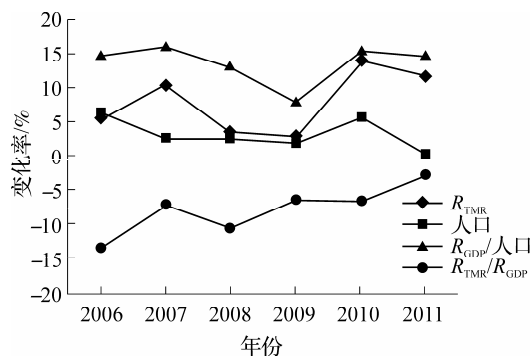


图4 宁波市 2005~2011 年物质流的环境冲击影响分解

3 结论

计算了宁波市 2005 年到 2011 年经济-环境系统物质输入输出的相关指标,并对这些指标进行分析,主要结论如下:

(1) 在不考虑水的情况下,区域直接物质输入输出量在 2005~2011 年都是逐年增加的,年平均增长速度分别为 8.8%和 9.1%,同时物质需求总量也在不断上升。进口物质在直接物质输入中所占比重高于区域内开采物质且差距逐渐拉大,表明宁波市经济的发展对进口物质依赖较大;在区域内

物质输出中固体废弃物尤其是生活垃圾占半壁江山,必须加以有效的治理和控制。2005~2011 年,宁波市直接物质输入输出强度一直处于上升态势,直接物质输入输出效率虽然在不断提高,但依然处于较高的水平且直接物质输出效率的提高低于直接物质输入效率的提高。

(2) 水输入输出量在物质需求总量与输出总量中占的比重都很大,供水量基本保持在 2×10^9 t 以上。2005~2011 年,水的输入增长幅度小于水的输出增长幅度。废水的输出在量和强度上均呈现上升趋势,尤其是生活污水排放的增长趋势特别明显。宁波市经济和社会的快速发展需要更多的供水量,对宁波的水资源造成了一定的压力。

(3) 在物质生产力方面,宁波市无论与国内的一线城市相比还是与一些发达国家相比都有一定的差距。根据环境库茨涅茨曲线,目前曲线图像还处于倒 U 型左半部分的上升位置且尚未达到临界,宁波社会经济发展还未达到后工业化阶段,环境压力还在不断的提高,而且近期还难以改善。通过 IPAT 模型,分析出影响宁波市环境负荷的关键因素在技术进步和经济的发展。

参考文献:

- [1] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis[J]. Waste Management. 2005, 25: 111-113.
- [2] 鲍智弥. 大连市环境-经济系统的物质流分析[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2010.
- [3] 徐明. 中国经济系统物质代谢研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [4] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹——可持续发展的重量与面积观念[M]. 北京: 经济科学出版社, 2003:31-61.
- [5] 刘伟, 鞠美庭, 于敬磊. 区域物质流分析指标体系的研究[C]. 北京: 中国大地出版社, 2006:416-419.
- [6] Ehrlich P R, Holdren J P. The impact of population growth[J]. Science, 1971, 171:1212-1217.
- [7] 毕军, 黄和平. 物质流分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2009:2-16.
- [8] 殷志浩, 葛文然. 提高宁波林业产业层次的思路及对策[J]. 浙江林业科技, 2003, 23(6):25-27.
- [9] 姚星期. 基于物质流核算的浙江省循环经济研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [10] 交通部第二公路勘察设计院. 公路工程石料试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994:121-135.

- [11] 宁波晚报. 居民人均日产垃圾1公斤多[EB/OL]. [2013-10-18]. <http://www.cnnb.com.cn/2006-11-27>.
- [12] 张从. 中国农村面源污染的环境影响及其控制对策[J]. 环境科学动态, 2001(4):10-13.
- [13] 张思锋. 基于 MFA 方法的陕西省物质减量化分析[J]. 资源科学, 2006, 28(4):145-150.
- [14] 马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004:21-43.
- [15] Hinterberger F, Luks F, Schmidt B F. Material flows vs. 'natural capital': What makes an economy sustainable? [J]. Ecological Economics, 1997, 23(1):1-14.
- [16] 陈效述, 赵婷婷. 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, 14:538-547.
- [17] 方精云, 浏国华, 徐篙龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义: 现代生态学的热点问题应用研究[M]. 北京: 中国科技出版社, 1996:66-67.
- [18] 林锡雄. 台湾物质流之建置与应用研究初探[D]. 台湾: 中原大学, 2010.
- [19] 刘钢, 沈雷. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1):9-19.
- [20] Zhou Zhenfeng, Sun Lei. Preliminary research on regional material flow analysis: A case study of Chengyang district in Qingdao[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 2(1):89-98.
- [21] 李晓君. 基于物质流方法对山东省循环经济发展的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2008.
- [22] 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.
- [23] Vehmas J, Luukkanen J, Kaivo-Oja J. Linking analyses and environmental Kuznets curves for aggregated material flows in the EU[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(17):1662-1673.

Analysis on Economy-environment System of Ningbo Based on Material Flow

DONG Chao-yang, TONG Yi-qin*, WU Lei, CHEN Dan-qing

(Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this paper, the author adopts the material flow analysis (MFA) to study the material inputs and outputs of economic system of Ningbo city based on the data collected from 2005 to 2011. The relationship between economic growth and environmental pressure is explored, and the important factors which influence the environmental pressure are taken into consideration in the analysis. The results show that, from 2005 to 2011, material inputs and outputs of Ningbo have been growing at an average annual rate of 8.8% and 9.1% respectively, and that economic development in Ningbo tends to increasingly depend on importation. With reference to the EKC, the author comes to a conclusion that, at present, Ningbo has not reached the stage of post-industrialization yet, and the economy is still growing with the traditional fashion featuring high consumption and high emission, which has imposed the enormous pressure on resources conservation and environment protection. According to the IPAT model, improving science and technology as well as economy is the key to easing the pressure on environment. Therefore, the government of Ningbo should convert the current economic development pattern into the circulating and sustainable economy.

Key words: material flow analysis; circular economy; Ningbo

(责任编辑 章践立)