

基于物质流分析和数据包络分析的区域生态效率评价 ——以江苏省为例

张 炳¹, 黄和平², 毕 军^{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. 江西财经大学资源与环境管理学院, 南昌 330013)

摘要: 区域生态效率 (eco-efficiency) 评价是考量区域可持续发展的重要内容。基于物质流分析 (material flow analysis, MFA) 构建区域生态效率评价指标体系, 并将污染物排放作为一种非期望输入引入到数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 模型中, 以江苏省 (1990 ~ 2005 年) 为例进行生态效率分析评价。结果表明, 江苏省的区域生态效率在 1990 ~ 2005 年期间呈现逐步上升的趋势。但是, 同期的总物质投入 (total material input, TMI)、物质需求总量 (total material requirement, TMR) 和污染物排放量也呈上升趋势。因此, 江苏省社会经济发展和环境影响总体上呈现“弱脱钩 (weak de-link)”。

关键词: 生态效率; 物质流分析; 数据包络分析

文章编号: 1000-0933(2009)05-2473-08 中图分类号: Q149, Q988, X32 文献标识码: A

Material flow analysis and data envelopment analysis based regional eco-efficiency analysis: case study of Jiangsu Province

ZHANG Bing¹, HUANG He-Ping², BI Jun^{1,*}

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

2 College of Resource and Environment Management, Jiangxi University of Finance Economics, Nanchang 330013, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2473 ~ 2480.

Abstract: Eco-efficiency is an instrument for sustainability analysis, which takes into account both economic and environmental performance. This study aims to develop appropriate indicators for the economic and environmental dimensions of the eco-efficiency analysis, and the method for aggregating them, to illustrate possibilities for measuring regional eco-efficiency.

A starting point is to produce indicators for the environmental and economic dimensions of regional development and to use them for measuring regional eco-efficiency. Based on material flow analysis (MFA), basic and broader definitions were applied for regional eco-efficiency analysis. In the physical economy, we input material and energy, and produce products (or value), while the wastes and emissions (or for other undesirable outputs) are unavoidable. Thus, there are two essential classes of environmental impacts: resources consumption and pollution discharge. Waste water, waste gas, and solid waste and carbon dioxide were chosen as pollution discharge indicators and direct material input and total material requirement were chosen as resource consumption indicators for narrow and broad regional eco-efficiency analysis, respectively. On the other hand, the economic indicator used was the gross domestic product (GDP) of research site. Subsequently, two data envelopment analysis models were applied to aggregate eco-efficiency indicators, by taking various undesirable outputs (pollution discharge) as inputs.

Using the real data of Jiangsu Provinces (from 1990 to 2005), an empirical study was employed to illustrate the changes of regional eco-efficiency. The results showed that the eco-efficiency of Jiangsu Province increased from 1990 to

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目 (2006BAC02A15); 国家社科基金重大资助项目 (06&ZD026)

收稿日期: 2008-01-06; 修订日期: 2008-06-11

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

2005, and the years 2003, 2004 and 2005 were relatively eco-efficient compared to other years. However, Total Material Input (TMI), Total Material Requirement (TMR) and pollution discharge also increased simultaneously. Thus, economic development and environmental impact represented weak de-linking.

Key Words: eco-efficiency; material flow analysis (MFA); data envelopment analysis (DEA)

自 1992 年联合国环境发展与大会以来,可持续发展已经被世界各国广泛接受,并成为各国的发展战略。然而尽管可持续发展指出了奋斗目标,却没有指明实现可持续发展的途径。另一方面,资源的低效率开采和使用被认为是造成环境污染的主要原因,因此,优化资源能源利用,提高生态效率(eco-efficiency)成为可持续发展的重要切入点^[1,2]。

生态效率这一概念由 Schaltegger 和 Sturm 在 1990 年首次提出^[1],其后在世界企业可持续发展理事会(WBSCD)的积极发展下渐趋成熟。其含义是指通过提供能满足人类需要和提高生活质量的竞争性定价商品与服务,同时使整个生命周期的生态影响与资源强度逐渐降低到一个至少与地球可承载能力一致的水平^[2]。生态效率的核心思想是强调以较少资源投入和较低污染排放创造较高质量的产品^[3]。根据生态效率定义,一些学者和研究机构提出了一系列生态效率的评价指标和方法^[4,5]。起初,研究大都集中在产品和企业层面,然而,Hur 等以及 Seppälä 等认为政府也可以应用生态效率概念来审视国家或区域在长期发展中的竞争优势^[6,7],并且一些国家和地区开展了区域层面生态效率的研究^[4,8~11]。其中最具代表性的就是芬兰 Kymenlaakso 的 ECOREG 项目,Seppälä 等探讨了 Kymenlaakso 生态效率评价的经济指标和环境指标^[7],Mickwitz 等则对该项目中社会指标的建立过程进行了详细的分析,建立了 8 类社会发展指标,包括安全、教育、人口变化等。但社会发展指标仅作为参考,不参与环境指标和经济指标的综合^[12]。李丁等人则基于物质流核算和数据包络分析对国内 19 个主要城市的物质投入效率进行了实证研究^[9]。邱寿丰和诸大建设计了我国的生态效率评价指标^[10]。张妍和杨志峰通过城市物质代谢速率来衡量区域生态效率^[13]。此外,还有部分学者对生态效率的某一方面进行了评价^[14~16]。

然而,目前区域生态效率评价指标的确定尚没有统一的方法,特别在处理多种环境影响时较难统一,往往需要对各类环境影响因子赋以权重,常用的赋权方法无法避免确定权重时的主观因素^[5,17],而数据包络分析则能很好地减少确定权重时的主观因素^[18]。为此,本文将基于物质流分析构建区域生态效率评价指标体系,并将污染物排放作为一种非期望输入引入到 DEA 模型中,以江苏省(1990~2005 年)为例进行生态效率评价和分析。

1 基于 MFA 的区域生态效率指标

1.1 系统边界

区域经济活动一方面消耗自然资源,同时产出产品和废弃物。输入区域社会经济系统的物质一部分是由本区域自然环境中开采出的各种原材料,包括化石燃料、矿物质、生物物质等。由于水资源的量较大,所以单独列为一类^[9]。此外区域经济活动消耗的物质还有一部分是从区域外输入的,包括各种原材料、半成品和成品。同时,社会经济活动还会带来部分所动用的而未被使用的物质质量,这些被动用的物质质量没有进入代谢过程,却是必须的“投入”。如为了开采铁矿石,必须掘进巷道或剥离表土和覆岩,这些物质并没有进入代谢过程,被代谢主体所消费,所以称其为隐藏流或生态包袱(eco-rucksack)^[19]。输入社会经济系统的物质一部分成为该系统内部的净储存,如建筑物;一部分经过消费,成为返回自然环境中的废弃物;还有一部分物质通过系统边界出口到其他地区(见图 1)。因此,区域经济活动产生的环境影响(environmental impacts, EI)包括自然资源的消耗(如:矿产资源,水等)和污染物的排放(如:二氧化硫,二氧化碳等)。区域生态效率的计算公式可以表示如下:

$$EF(\text{生态效率}) = \frac{\text{Value}(\text{产品和服务价值})}{EI(\text{环境影响})}$$

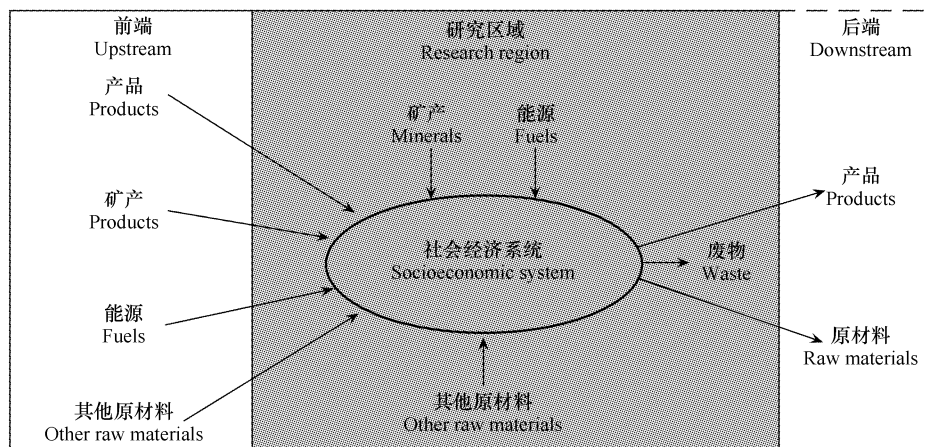


图1 区域生态效率评价的系统边界

Fig. 1 Boundaries of regional eco-efficiency analysis

根据上述分析区域生态效率又可分为狭义生态效率评价和广义生态效率评价^[7]。狭义的区域生态效率是指发生在区域内的经济活动产生的经济价值和环境影响比值,这也是传统理解的生态效率评价。而广义上的区域生态效率还包括外部物质输入部分带来对区域外的间接环境影响,如进口化石燃料生产开采产生的环境影响(生态包袱)^[7]。生态包袱可以从输入端更加全面地揭示人类经济活动对自然资源的消耗和对生态环境的冲击,同样在生态效率评价引入输入生态包袱,使得生态效率的评价更加全面,本文将对两种定义的生态效率均进行评价。

1.2 生态效率指标

环境影响目前尚无一个综合指标,并且各种环境影响不能简单相加^[5]。生命周期分析(LCA)为产品的环境影响提供了有效的核算方法。在区域生态效率层面,物质流分析可以用来确定和核算区域的环境影响指标^[12]。物质流分析通过一定时空范围内关于特定系统的物质流动和贮存的系统性分析或评价^[20],描述的人类从自然界获取资源,进入人类生产和消费的经济活动,并产生废弃物质,以及废弃物质的再使用和资源化再生利用的过程中关于物质的实物流向和流量^[21]。物质流分析一系列指标可以用来核算区域经济系统的环境影响^[22]。根据狭义生态效率评价的系统边界,区域资源消耗(物质投入)包括直接物质投入(DMI)和区域内开采的资源的隐藏流量两部分,可以用物质流核算中物质总投入(TMI)来衡量的是经济发展中生产和消耗所需要的物质投入总量^[7]。相应地,广义生态效率评价中的资源消耗除了TMI外,还应该包括进口物质投入对其他国家或区域环境造成影响的部分(隐藏流或生态包袱),这两部分加起来即物质需求总量(total material requirement, TMR),它衡量的是一个经济发展所需要的总的物质基础^[7]。在废弃物产出方面,狭义和广义生态效率评价的指标是一致的,但是物质流分析指标中没有一个综合指标,需要对区域内加工产出(DPO)中的污染物产出部分进行分离出来,用于生态效率评价,各种污染物排放所产生的环境影响并不是重量的直接相加,所以本文采用DPO的下一级指标。

在经济指标方面,国内生产总值(GDP,可比价)常用来衡量区域生态效率评价中的经济产出,即一定时期内,一个国家或地区的经济中所生产出的全部最终产品和劳务的价值^[7]。综上所述,区域生态效率的评价指标体系如下:

2 基于DEA的生态效率评价

数据包络分析是著名运筹学家Charnes和Cooper等在“相对效率评价”概念基础上发展起来的一种评价具有相同类型投入和产出的若干决策单元(decision making units, DMU)相对效率的一种有效方法^[23,24]。

设有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元有 m 种输入和 s 种输出,假设 X_{ij} 表示第 j 个DMU的第 i 种投入量, y_{rj} 表示第 j 个DMU的第 r 种产出量, v_i 和 u_r 分别表示各投入及产出的权值,如果用向量 X_j 和 Y_j 分别表示各

DMU 的投入与产出, V 和 U 分别为权值向量, 则: $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$, $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{rj})^T$, $V = (V_1, V_2, \dots, v_m)^T$, $U = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$, 其中 $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; $r = 1, 2, \dots, s$ 。定义第 j 个 DMU 的效率评价指数为:

$$h_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}$$

表 1 基于物质流分析的生态效率评价指标体系

Table 1 Eco-efficiency indicators based on MFA

生态效率 Eco-efficiency	狭义 Narrow	广义 Broad	具体指标 Indicators
产品和服务价值 Value of products and serves	国内生产总值 GDP	国内生产总值 GDP	—
环境影响 资源消耗 Resources consumption	物质总投入 TMI	物质需求总量 TMR	—
Environmental Impact 污染排放 Pollution Emission	区域内加工产出 DPO	区域内加工产出 DPO	废水 Wastewater 废气 Waste gas 固废 Solid waste 二氧化碳 CO ₂ ①

评价第 j_0 个 DMU 效率的数学模型为:

$$\begin{aligned} \max \quad & \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0}} \\ \text{s. t.} \quad & \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \\ & v \geq 0, u \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

目前, DEA 方法在许多领域都有应用, 但在生态效率评价中则还需要解决污染物排放作为一种非期望输出如何引入到模型中的问题。这是由于在评价一般生产效率时, 通常是输出越大越好, 但生产排放的污染物却恰恰相反。污染物作为决策单元的输出, 从生态效率的角度, 它是一种不希望看到的输出, 企业或区域应尽量减少这些输出。

为此, 本文将输出分为期望输出 $(1, 2, \dots, k)$ 和非期望输出 $(k+1, k+2, \dots, s)$ 两个部分, 输出 Y 可以表示为 $y = \begin{pmatrix} Y^g \\ Y^b \end{pmatrix}$, 其中 Y^g 为 $k \times n$ 矩阵, 代表期望输出 (“good”), Y^b 为 $(s-k) \times n$ 矩阵代表非期望输出 (“bad”)。本文分别将污染物排放作为非期望输出和输入两个角度来考虑。

如果将污染物作为输入指标, 定义第 j 个 DMU 的效率评价指数为:

$$\begin{aligned} \max \quad & \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0} + \sum_{r=k+1}^s u_r y_{rj_0}} \\ \text{s. t.} \quad & \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \sum_{r=k+1}^s u_r y_{rj}} \leq 1 \\ & j = 1, 2, \dots, n, u, v \geq 0 \end{aligned}$$

①由于二氧化碳的污染物特性和核算口径与其它废气不一样, 因此二氧化碳作为单独指标在本研究中

$$i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, s$$

同样,通过相应的转换最后可以得到基于投入的 CCR^① 模型,即 Model-I:

$$\begin{aligned} \min & [\theta - \varepsilon E^T(s^b + s^g + s^-)] \\ \text{s. t.} \quad & X_{j_0} \cdot \theta = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot X_j + s^- \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j^g - s^g = Y_{j_0}^g \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j^b - s^b = Y_{j_0}^b \\ & \lambda, s^-, s^g, s^b \geq 0, \\ & \varepsilon > 0; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

在模型 I, 当最优解 $\theta^* = 1, s^{-*} = 0, s^{g*} = 0, s^{b*} = 0$ 时,称决策单元 j_0 为 DEA 有效; $\rho^* < 1$, 或 $s^{-*} \neq 0, s^{g*} \neq 0, s^{b*} \neq 0$ 时,则称决策单元 j_0 为非 DEA 有效。若 $\theta^* = 1$, 且 $s^{-*} \neq 0$ 或 $s^{g*} \neq 0$ 或 $s^{b*} \neq 0$, 则判定决策单元 j_0 为弱 DEA 有效。

如果将污染物排放作为非期望输出,在 Tone 的 SBM(slacks-based measure)超效率模型的基础上^[25],引入非期望输出,定义第 j 个 DMU 的效率评价指数,即 Model-II 为:

$$\begin{aligned} \rho^* = \min & \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i0}^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s} \left(\sum_{r=1}^{s-k} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^k \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \\ \text{s. t.} \quad & X_{j_0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j + s^- \\ & Y_{j_0}^g = \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j^g - s^g \\ & Y_{j_0}^b = \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j^b + s^b \\ & L \leq e\lambda \leq U; \lambda, s^-, s^g, s^b \geq 0; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中, L 和 U 是对规模收益的一个约束,可以根据不同的模型需求选择不同的 L 和 U 。同样,在模型 II, 当最优解 $\rho^* = 1, s^{-*} = 0, s^{g*} = 0, s^{b*} = 0$ 时,称决策单元 j_0 为 DEA 有效; $\rho^* < 1, s^{-*} \neq 0, s^{g*} \neq 0, s^{b*} \neq 0$ 时,则称决策单元 j_0 为非 DEA 有效。若 $\rho^* = 1$, 且 $s^{-*} \neq 0$ 或 $s^{g*} \neq 0$ 或 $s^{b*} \neq 0$, 则判定决策单元 j_0 为弱 DEA 有效。

3 江苏省生态效率评价

3.1 数据收集

本文需要的 GDP 数据可以从统计年鉴上获取。资源消耗和污染排放方面,本论文根据欧盟准则中的物质流分析的数据来源及核算方法^[26],并结合本研究的实际情况加以完善和适当的增减,对江苏省省级区域尺度进行环境-经济系统的物质流指标的核算及分析,进而构建了 1990~2005 年区域环境-经济系统的物质流帐户(material flow accounts, MFA)体系^[27]。

物质总需求量(TMR)由总物质投入(TMI)和进口隐藏流两部分组成。TMI 又可以分为区域内开采量(如化石燃料、矿物质、生物物质等)、进口物质和区域内隐藏流 3 部分。其中(1)化石燃料数据主要来自当地统计年鉴及能源统计年鉴,在两者有出入的情况下,以政府公布的统计年鉴为准。矿物质数据来自当地统计年

① 该模型由 Charnes, Cooper 和 Rhodes 在 1978 提出,故称 CCR 模型

鉴和国土资源部的矿业统计年鉴。所有的区域内生物物质的核算都是来自农业收获统计、森林工业统计、渔业统计及狩猎统计。另外,畜牧生物的输入则可从饲料统计中获得或通过土地利用或牲畜的营养平衡来估算。(2)所有进口物质来自贸易统计年鉴。这些物质包括成品、半成品及原材料。(3)区域内隐藏流根据已知的生态包袱系数进行测算,其中化石燃料、矿物质的生态包袱根据未来资源研究所(WRI)1997年的研究成果进行测算^[28];生物物质的隐藏流未来资源研究所(WRI)没有测算,这里主要根据国内的研究成果测算,核算了粮食、棉花、油料、木材、蔬菜等的隐藏流^[29,30]。进口隐藏流同样根据进口物质和生态包袱系数进行测算。另外,空气的输入主要包括区域内各种物质主要是化石燃料燃烧所消耗的氧气,生物呼吸耗氧及排除的二氧化碳本文未予考虑。

在污染物输出方面,废水、废气和固体废弃物数据主要来自当地历年统计年鉴和环境统计,二氧化碳的排放数据主要通过化石燃料燃烧产生二氧化碳的系数进行测算,生物新陈代谢排放的二氧化碳本文未予考虑。

表 2 江苏省输入输出指标描述

Table 2 Summary of input and output indicators in Jiangsu Province

指标 Indicator	变量 Variable	样本量 Obs	平均值 Mean	标准差 Std. Dev.	最小值 Min	最大值 Max
输入 Inputs	总物质投入 TMI	16	14876.4	896.7	13592.1	17227.1
	物质需求总量 TMR	16	16960.8	2374.7	14477.1	22176.1
非期望输出 Undesirable Outputs	废水 Wastewater	16	3613.1	694.2	2949.6	5194.0
	废气 Waste gas	16	2.00	0.31	1.54	2.87
	固废 Solid waste	16	1.64	1.15	0.66	4.42
	二氧化碳 CO ₂	16	278.0	89.8	164.1	496.8
	国内生产总值 GDP	16	4529.3	2491.9	1417.0	9670.0

3.2 模型结果

利用上述数据,采用模型 I 和 II 对江苏省 1990 ~ 2005 年的区域经济系统生态效率进行评价,评价结果见表 3。模型 I 和 II 的评价结果一致,有效的单元相同。无论广义的区域生态效率评价还是狭义的区域生态效率评价,江苏省的区域生态效率在 1990 ~ 2005 年期间呈现逐步上升的趋势,其中 2003、2004、2005 年为生态效率相对有效,其余年份为生态效率相对无效率。基于投入的 CCR 模型 I 中,决策单元通过减少投入(包括资源消耗和废弃物排放)提高生态效率,而模型 II 则只是减少资源消耗投入来提高生态效率,因此,模型 I 的生态效率值要高于模型 II^[31]。

3.3 结果分析

从表 3 种可以看到,江苏省随着经济发展,资源能源的使用效率在逐步提高,污染物的排放强度在逐步降低,相应的生态效率也在逐步提高。但是,生态效率的提高仅仅是可持续发展评价的一个方面。可持续发展要求经济和社会发展不能超越资源与环境的承载能力,因此,在考虑的同时,还必须考虑总量问题,因为即使在效率提高的时候,资源消耗和污染物排放也会上升,甚至超出资源与环境的承载能力。图 2 给出了生态效率和物质消耗及废水排放的趋势。在生态效率提高的同时,江苏省的物质消耗量(TMI 和 TMR)和废水排放量依然处于呈上升趋势。因此,江苏省社会经济发展和环境影响总体上呈现“弱脱钩(weak de-link)”^[32]的关系($\nabla GDP > 0, \nabla TMI > 0$ or $\nabla TMR > 0, \nabla Eco$

表 3 江苏省生态效率评价结果

Table 3 Results of eco-efficiency analysis in Jiangsu Province

年份 Years	生态效率(狭义) Eco-efficiency Score (narrow)		生态效率(广义) Eco-efficiency Score (broad)	
	Model- I	Model- II	Model- I	Model- II
1990	0.4060	0.1243	0.2768	0.1618
1991	0.4247	0.1333	0.3019	0.1734
1992	0.4935	0.1663	0.3913	0.2161
1993	0.5106	0.1980	0.4552	0.2569
1994	0.5211	0.2379	0.5091	0.3085
1995	0.5792	0.2737	0.5822	0.3552
1996	0.6274	0.3198	0.6480	0.4125
1997	0.7064	0.3747	0.7338	0.4803
1998	0.7763	0.4365	0.7980	0.5554
1999	0.9142	0.5475	0.9331	0.6590
2000	0.9648	0.5983	0.9767	0.7187
2001	0.9370	0.6979	0.9684	0.8095
2002	0.9877	0.8073	0.9852	0.8803
2003	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2004	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2005	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

efficiency > 0)。

改革开放以来,江苏省经历了乡镇企业的异军突起,到主动接受国际产业转移,打造国际制造业基地,并正主动融入全球化经济,提高国际竞争力。与此同时,在环境保护也由“只要金山银山,不要绿水青山”到“既要金山银山,又要绿水青山”转变,可持续发展成为江苏省新世纪的发展战略。但是,生态效率的提高尚无法抵消快速工业化带来的环境影响,江苏省的物质消耗量(TMI 和 TMR)和废水排放量依然处于呈上升趋势。因此,江苏省必须调整产业结构,改变经济增长模式,进一步提高生态效率,使得生态效率提高的速度超过经济增长速度,实现“弱脱钩”向“强脱钩”($\nabla GDP > 0, \nabla TMI < 0$ or $\nabla TMR < 0, \nabla \text{Eco-efficiency} > 0$) 转变。

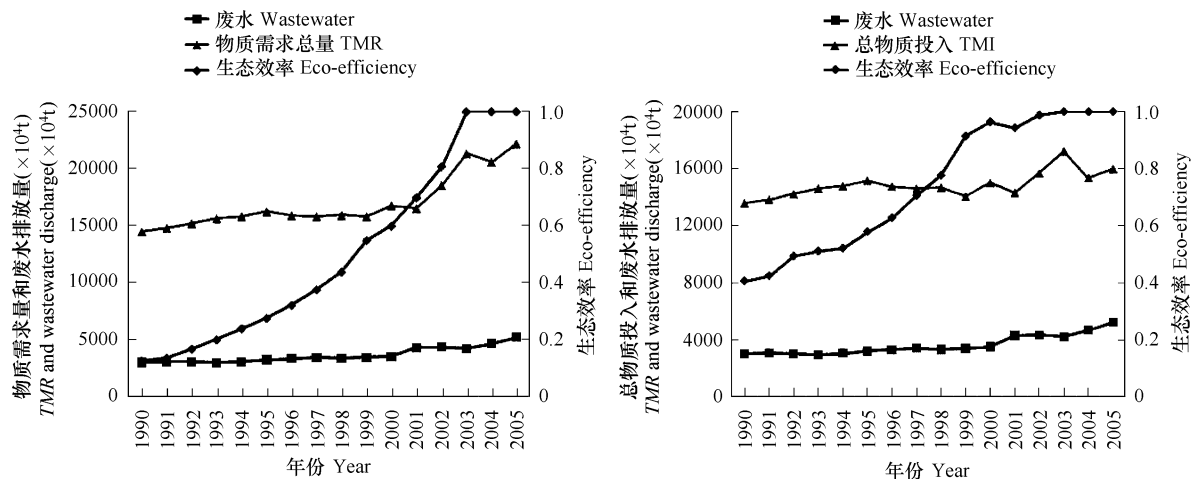


图2 江苏省1990~2005年生态效率、物质消耗及废水排放情况

Fig. 2 Eco-efficiency, material use and wastewater discharge in Jiangsu Province from 1990 to 2005

4 结论

区域生态效率评价是考量区域可持续发展的重要内容。本文在现有生态效率评价方法的基础上,构建了基于MFA的生态效率评价指标,并将污染物排放量数据作为一种非期望输入引入到数据包络分析模型中,将该模型用于江苏省的区域生态效率的评价。物质流分析为区域生态效率的评价提供了系统边界的界定和指标选择的有力工具和方法。另外一方面,DEA提供了一个根据输入、输出数据对同类型研究对象进行相对效率与利用效益方面的评价方法。该方法直接对生态效率评价指标的原始数据进行分析,不需要对指标进行规范化处理及事先确定指标的权重,避免了主观因素的影响,简化了计算过程。另外,由于本文只有一个省份的数据,因此本论文的结果无法区分生态效率提高中技术进步和技术效率作用,进一步收集全国各省的面板数据,将有助于了解各区域生态效率的演变过程。

References:

- [1] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische Rationalität (German/in English: Environmental Rationality). Die Unternehmung, 1990, 4: 117—131.
- [2] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Eco-Efficiency: The Business Link to Sustainable Development. Cambridge: MIT Press, 1997.
- [3] Yue Q Q, Su J Q. Eco-efficiency: foreign practice and our measure. Studies in Science of Science. 2004, 22(2): 170—173.
- [4] Basque Government, The environment in the Basque country. Environmental Framework Programme Series, No. 21. Bilbao, Spain: Sociedad P ublica de Gestion Ambiental (IHOBE), 2003.
- [5] Lü B, Yang J X. Review of methodology and application of eco-efficiency. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3898—3906.
- [6] Hur T, Kim I, Yamamoto R. Measurement of green productivity and its improvements. Journal of Cleaner Production, 2004, 21: 673—683.
- [7] Seppälä J, Melanen M, Mäenpää I, Koskela S, Tenhunen J, Hiltunen M R. How Can the Eco-efficiency of a Region be Measured and Monitored? Journal of Industrial Ecology, 2005, 9 (4): 117—130.
- [8] Zhang B, Bi J, Fan Z Y. Eco-efficiency evaluation of industrial system in China: a data envelopment analysis approach. Ecological Economics, 2008, 68(1-2): 306—316.
- [9] Li D, Wang Y L, Fu Y, Niu W Y. The efficiency analysis of material flow account for the 19 cities' of China. Resource Science, 2007, 29(6):

- 177—182.
- [10] Qiu S F, Zhu D J. Eco-efficiency indicators for China and their applications. *Scientific Management Research*, 2007, 25(1): 20—24.
- [11] Hoh H, Scoer K, Seibel S. Eco-Efficiency Indicators in German Environmental-Economic Accounting. Federal Statistical Office, Germany, 2001.
- [12] Mickwitz P, Melanen M, Rosenström U, Seppälä J. Regional eco-efficiency indicators: a participatory approach. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14 (18): 1603—1611.
- [13] Zhang Y, Yang Z F. Eco-efficiency of urban material metabolism: a case study of Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3124—3131.
- [14] Li Z, Ju M T, Liu W, Shao C F. Dynamic measurement of ecological footprint of energy resources and its economic efficiency in last ten years, China. *Resource Science*, 2007, 29(6): 54—60.
- [15] Zhang Y B, Xia Z X, Chen X G, Peng X C. Dynamics of regional sustainable development based on material flow analysis: A case study in Guangdong Province. *Resource Science*, 2007, 29(6): 212—217.
- [16] Gu X W, Wang Q, Wang J, Zhang B, Ding Y, Li G J. National ecological pressure and ecological efficiency. *Resource Science*, 2007, 29(1): 142—146.
- [17] Kuosmanen T, Kortelainen M. Measuring Eco-efficiency of Production with Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9 (4): 59—72.
- [18] Dyckhoff H, Allen K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA). *European Journal of Operational Research*, 2001, 132: 312—325.
- [19] Schuetz H, Bringezu S. Economy-wide Material Flow Accounting. Wuppertal: Wuppertal Institute, 1998.
- [20] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers: London, 2004.
- [21] Ren Y, Zhou G M. The development models and policies of circular economy in China. Beijing: China Environmental Science Press, 2009, 68.
- [22] Zhu D J, Qiu S F. Eco-efficiency as the appropriate measurement of circular economy. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16 (5): 1—6.
- [23] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2: 429—444.
- [24] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Short communication: Measuring efficiency of decision making units. *European Journal Operational Research*, 1979, 3 (4): 339.
- [25] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130: 498—509.
- [26] EUROSTAT, Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide. Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2001.
- [27] Huang H P. Dynamic regional material flows and its embedded relationship with economic system. Doctoral dissertation of Nanjing University, Nanjing, 2007.
- [28] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, Moriguchi Y, Rodenburg E, Rogich D, Schutz H. Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies. World Resources Institute, Washington, D. C., 1997.
- [29] Hong C L, Wei Y Z, Huang J F, Wan R Y, Yang X E. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment. *Journal of Zhejiang University*, 2003, 29 (6): 627—633.
- [30] Li B K. The timber volume calculation of illegal & excessive logging with timber weight or method of univalent conversion. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(1): 7—8.
- [31] Korhonen P J, Luptacik M. Eco-efficiency analysis of power plants: an extension of data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2004, 154: 437—446.
- [32] Vehmas J, Luukkanen J, Kaivo-oja J. Material flows and economic growth: linking analyses and environmental Kuznets curves for the EU-15 member countries in 1980—2000, Finland Futures Research Centre. http://www.tukkk.fi/tutu/Julkaisut/pdf/Tutu%208_2003.pdf, 2003.

参考文献:

- [3] 岳媛媛, 苏敬勤. 生态效率: 国外的实践与我国的对策. *科学学研究*, 2004, 22 (2): 170—173.
- [5] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用. *生态学报*, 2006, 26 (11): 3898—3906.
- [9] 李丁, 汪云林, 付允, 牛文元. 基于物质流核算的数据包络分析——国内 19 个主要城市的实证研究. *资源科学*, 2007, 29(6): 177—182.
- [10] 邱寿丰, 诸大建. 我国生态效率指标设计及其应用. *科学管理研究*, 2007, 25(1): 20—24.
- [13] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. *生态学报*, 2007, 27(8): 3124—3131.
- [14] 李智, 鞠美庭, 刘伟, 邵超峰. 中国 1996—2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析. *资源科学*, 2007, 29(6): 54—60.
- [15] 张音波, 夏志新, 陈新庚, 彭晓春. 基于物质流分析方法的区域可持续发展动态研究. *资源科学*, 2007, 29(6): 212—217.
- [16] 顾晓薇, 王青, 王军, 张波, 丁一, 李广军. 国家生态压力与生态利用效率研究. *资源科学*, 2007, 29(1): 142—146.
- [21] 任勇, 周国梅. 中国循环经济发展的模式与政策. 北京: 中国环境科学出版社, 2009, 68.
- [22] 诸大建, 邱寿丰. 生态效率是循环经济的合适测度. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(5): 1—6.
- [27] 黄和平. 区域物质流动动态变化与经济系统的耦合关系研究. 南京大学博士论文, 南京, 2007.
- [29] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 全润屹, 杨肖娥. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29(6): 627—633.
- [30] 李炳凯. 用木材重量或单价换算法测算盗伐、滥伐林木材积. *林业调查规划*, 2006, 31(1): 7—8.