

安徽省铜陵市生态效率变化及其驱动因素*

王义琛¹ 王远^{1**} 朱晓东¹ 吴小庆¹ 王珂¹ 任克秀² 陆根法¹

(¹ 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; ² 铜陵市环境保护科学研究所, 安徽铜陵 244000)

摘要 首次应用物质流分析(material flow analysis, MFA)方法构建了三层面区域生态效率评价指标体系,其指标分别为:区域直接生态效率(regional direct eco-efficiency, RDE)、区域总体生态效率(regional total eco-efficiency, RTE)、整体生态效率(holistic eco-efficiency, HE),采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法评价了铜陵市1990—2008年间的区域生态效率.本文同时引入莫氏生产力指数(Malmquist productivity index, MPI)研究了相邻年份区域生态效率变化,并找出其生态效率变化的驱动因素.结果表明:1)铜陵市区域直接生态效率虽得到了不断提升,但相对区域总体生态效率和区域整体生态效率而言,其相对生态效率均值不高,80%左右年份的相对生态效率在0.8以下;2)铜陵市直接生态效率的持续增长与铜陵市多年来不断加大资源利用和环境保护技术投入密切相关.为进一步提高直接生态效率,铜陵市既可以通过扩大原材料进口、减少本地采掘实现,又可以通过提高资源生产率、增加环保基础设施投入实现.

关键词 物质流分析 数据包络分析 莫氏生产率指数 生态效率 铜陵

文章编号 1001-9332(2011)02-0460-07 **中图分类号** X196 **文献标识码** A

Eco-efficiency change and its driving factors in Tongling City of Anhui Province. WANG Yi-chen¹, WANG Yuan¹, ZHU Xiao-dong¹, WU Xiao-qing¹, WANG Ke¹, REN Ke-xiu², LU Gen-fa¹ (¹State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; ²Tongling Institute of Environmental Protection Science, Tongling 244000, Anhui, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(2): 460-466.

Abstract: This paper first applied material flow analysis (MFA) to construct three levels of regional eco-efficiency indicators, *i. e.*, regional direct eco-efficiency (RDE), regional total eco-efficiency (RTE), and holistic eco-efficiency (HE), and adopted the newly developed data envelopment analysis (DEA) to evaluate the eco-efficiency of Tongling City during the period of 1990-2008. We also applied Malmquist productivity index (MPI) to explore the eco-efficiency change between two following years and its driving factors. The main results were summarized as 1) though the RDE of Tongling City in 1990-2008 kept an increasing trend, its mean eco-efficiency was not high (close to 0.8 in 80% of the years), being lower than that of the RTE and HE, and 2) the RDE change was closely relevant to the improvement in resource management and the technical input in environmental protection in recent years. In order to further improve the RDE of the City, it would be necessary to raise its eco-efficiency via expanding raw material input, reducing domestic extraction, promoting resources productivity, and taking more measures on environmental protection facilities construction.

Key words: material flow analysis; data envelopment analysis; Malmquist productivity index; eco-efficiency; Tongling.

生态效率的概念及其表达式最早由 Schaltegger 和 Burritt^[1] 在 1990 年提出,他们认为,作为“效率”

的一个新分支,“生态效率”能更多地考虑人类活动对环境的影响.目前公认的生态效率定义由世界可持续发展工商理事会(WBCSD)提出,即生态效率要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的估计承载

* 国家自然科学基金项目(40701063)和安徽省科技重点项目(07020304097)资助.

** 通讯作者. E-mail: ywang@nju.edu.cn

2010-06-07 收稿,2010-10-27 接受.

能力一致的水平来实现^[2]。目前对于生态效率的定义大多能体现生产方式对资源或环境的影响及对资源利用最大化和环境影响最小化的追求,但生态效率是基于产业层面提出的概念^[2-5],在区域层面的研究尚处于探索阶段,且由于研究问题的角度不同,应用不同的方法定义生态效率均会受到基础方法本身的限制。近年来,我国虽已有学者将能值分析^[6-7]、生态足迹^[8-9]、生态系统健康评价^[10]、物质流分析^[11]等应用到区域生态效率评价研究中,丰富了生态效率评价理论和方法,但生态效率计算方法尚未达成共识,且研究内容多为单纯的生态效率评价。李名升和佟连军^[12]认为,对生态效率驱动因素的研究与调控比单纯的生态效率评价更有现实意义。

基于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)和莫氏生产力指数(Malmquist productivity index, MPI)的全要素生产力研究正受到愈来愈多学者的关注^[13-14],但综合这两种方法研究资源、环境对社会经济发展影响的文章尚不多见。杨俊和邵汉华^[15]运用我国1998—2007年工业省级面板数据将考虑环境因素的Malmquist-Luenberger生产力指数研究结果与不考虑环境因素、传统的Malmquist生产力指数研究结果进行比较,遴选出了推动我国工业经济向“又好又快”方向增长的省份。基于此,本文对我国典型的资源型城市安徽省铜陵市进行了实证分析,评价了19年间铜陵市生态效率的变化情况,找出了技术变化因素这一生态效率变化的驱动因素,并为铜陵市如何进一步提高生态效率,实现可持续发展提供了参考建议。

1 研究方法

1.1 物质流分析

物质流分析(material flow analysis, MFA)是Ayres和Kneese于1968根据质量守恒定律,将经济学与热力学相联系,建立发展起来的研究方法^[16]。物质流分析是在一定时空范围内对特定系统的物质流动和贮存进行的系统性分析或评价,它将物质流动来源(源)、路径、中间过程及最终去向(汇)联系在一起。物质流分析是追踪和衡量资源在系统内外流动和利用状况的方法,反映了自然资源在流经经济系统开采、加工、生产、使用和作为废弃物处置回到环境中的流向和通量^[17-18]。目前,物质流分析多采用2001年欧盟统计局(EUROSTAT)出版的《欧盟导则》^[19]作为物质流指标账户构建的蓝本。

1.2 数据包络分析

数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)是以“相对效率”概念为基础,根据多指标投入和多指标产出对相同类型的决策单元进行相对有效性或效益评价的一种系统分析方法^[20]。采用数据包络分析(DEA)计算生态效率时,以输入端指标值最小化和输出端指标值最大化的情形作为相对有效的基准,使用数学规划模型求取各个决策单元与有效决策单元相比得出的相对生态效率。其优点在于采用统计学方法自动赋权,可以有效地减小主观赋权方法带来的主观性影响。

数据包络分析(DEA)假设某系统中有 n 个决策单元 $DMU_j(j=1, 2, \dots, n)$,每个决策单元有 s 种输入、 m 种输出,则某决策单元的输入向量为 $X=(X_1, X_2, \dots, X_s)$,输出向量为 $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$,于是,可以用 (X, Y) 来表示决策单元的生产活动。其中,假设规模效益不变,则面向投入(产出不变情况下追求投入最小化)的CCR模型可表示为^[20]:

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & s. t. \sum_{j=1}^n X_{ij} \lambda_j + S^+ = \theta X_0 \quad (r=1, 2, \dots, s) \\ & \sum_{j=1}^n Y_{ij} \lambda_j - S^- = Y_0 \quad (i=1, 2, \dots, m); \\ & j=1, 2, \dots, n) \\ & \lambda, S^+, S^- \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: λ_j 为权重变量; S^+ 和 S^- 分别为输入和输出的松弛变量; θ 为评价单元的效率值; λ_j, S^+, S^- 为模型中待计算参数。

根据CCR模型定义:当第 j 个评价单元 DMU_j 的 $\theta=1$ 并且 $S^+=S^-=0$ 时,称此单元 DMU_j 达到DEA有效,其形成的有效前沿面为规模收益不变,且DMU为规模且技术有效;若 $\theta<1$ 或者 $S^+ \neq 0$ 或 $S^- \neq 0$,则认为DEA无效,或者是技术无效,或者是规模无效。

1.3 莫氏生产力指数与技术变化指数

1982年,Caves等^[21]在Shephard(1970)的距离函数基础上,把Malmquist的理论应用于生产力的衡量上,首度提出MPI。MPI是衡量两期之间产出面效率变动的方式。

假设 (X_t, Y_t) 和 (X_{t+1}, Y_{t+1}) 分别表示时期 $t, t+1$ 的投入产出向量,则以 t 时期技术为参照,时期 t 的投入产出向量的产出距离函数用 $D_0^t(X_t, Y_t)$ 来表示;用 $D_0^t(X_{t+1}, Y_{t+1})$ 表示以 t 时期技术为参照,时期 $t+1$ 的投入产出向量的产出距离函数。

第 t 时期的 MPI 为:

$$M'_0(X_{t+1}, Y_{t+1}, X_t, Y_t) = \frac{D'_0(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D'_0(X_t, Y_t)} \quad (2)$$

第 $t + 1$ 时期的 MPI 为:

$$M'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1}, X_t, Y_t) = \frac{D'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D'_0(X_t, Y_t)} \quad (3)$$

Färe 等^[22]对 Caves 等的理论进行修正,采用式(4)所示的几何平均数表示,避免了时期选择不同造成的结果偏误.重新定义的 MPI 又称为全要素生产率(total factor productivity, TFP),其公式如下:

$$M'_{TEP}(X_{t+1}, Y_{t+1}, X_t, Y_t) = \left[\frac{D'_0(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)}{D'_0(X_t, Y_t | CRS)} \times \frac{D'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)}{D'^{t+1}(X_t, Y_t | CRS)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

如果 $M'_{TEP} > 1$,表示 t 到 $t + 1$ 时期的生产效率增加;如果 $M'_{TEP} < 1$,表示 t 到 $t + 1$ 时期的生产效率减少.计算 MPI,需要计算 4 种混合的距离函数: $D'_0(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)$, $D'_0(X_t, Y_t | CRS)$, $D'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)$, $D'^{t+1}(X_t, Y_t | CRS)$.通过 4 个 DEA 模型可以得到上述 4 个距离函数.

衡量多个时期的全要素生产率(TFP)变化主要

有两种来源:效率变化与技术变化.相应的 MPI 可以进一步分解为效率变化指数(efficiency change, EC)和技术变化指数(technical change, TC)两部分.将 MPI 变换形式可以得到式(5).

$$M'_{TEP}(X_{t+1}, Y_{t+1}, X_t, Y_t) = \left[\frac{D'_0(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)}{D'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)} \times \frac{D'_0(X_t, Y_t | CRS)}{D'^{t+1}(X_t, Y_t | CRS)} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{D'^{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1} | CRS)}{D'_0(X_t, Y_t | CRS)} \right] = TC(X_{t+1}, Y_{t+1}, X_t, Y_t | CRS) \cdot EC(CRS) \quad (5)$$

其中,TC 代表技术变化.若 $TC > 1$,表示技术进步; $TC < 1$,表示技术退步.同样,若 $EC > 1$,代表效率提高; $EC < 1$,则代表效率下降.

2 结果与分析

2.1 生态效率评价指标体系的构建

根据欧盟导则,物质流分析的主要功能之一就是能够与经济统计指标相结合,应用于生态效率研究^[23].首先,根据《欧盟导则》^[19]构建铜陵市物质输入、输出账户(表 1),进行物质流分析^[24];之后,基于吴小庆等^[11]与李名升和佟连军^[12]的研究成果,

表 1 安徽省铜陵市物质输入、输出账户

Table 1 Account of material input and output of Tongling City in Anhui Province

I 物质输入账户 Material input account	0 物质输出账户 Material output account
I-1 区域内采掘 Domestic exploitation	0-1 区域内加工排放 Domestic processing output
I-1-1 生物物质 Biological material	0-1-1 消耗性物质 Consumption products
粮食、棉花、油料、甜菜、木材、淡水产品 Rice, cotton, oil crop, beet, wood, fresh water products	化肥、农药、塑料薄膜 Chemical fertilizer, pesticide, plastic membrane
I-1-2 化石燃料 Fossil fuel	0-1-2 大气污染物 Emissions to air
原煤 Raw coal	二氧化硫、烟尘、粉尘 Sulfur dioxide, smoke, dust
I-1-3 金属矿物与工业矿物 Metal ores and industrial minerals	0-1-3 固体污染物 Solid waste
铁原矿、铁成品矿、铜精矿含铜量、金、硫铁矿 Iron ore, final iron ore, copper concentrate, gold, pyrite	固体废弃物 Solid waste
I-1-4 建筑材料 Construction minerals	0-1-4 水污染物 Emissions to water
水泥 Cement	化学需氧量、氨氮、总氮、六价铬、镉、铅、砷、氰化物、石油类、悬浮物 Chemistry oxygen demand, ammonia nitrogen, total nitrogen, hexavalent chromium, cadmium, lead, arsenic, cyanide, petroleum, suspended matter
I-2 区域内隐藏流 Domestic hidden flow	
在区内采掘过程中产生的未被使用的物质 Materials extracted from the domestic environment but not actually used by the economy	
I-3 区域外进口 Import	0-3 出口到区域外 Export
I-3-1 进口农产品合计 Import primary products	0-3-1 出口能源合计 Export energy
I-3-2 进口能源合计 Import energy	0-3-2 出口矿产合计 Export minerals
I-3-3 进口矿产合计 Import minerals	0-3-3 出口成品半成品合计 Export semi-products and final products
I-3-4 进口成品和半成品 Import semi-products and final products	
I-4 区域外进口的隐藏流 Hidden flow in import	0-4 出口到区域外的隐藏流 Hidden flow in export
在区外采掘过程中产生的未被使用的物质 Materials extracted from the environment but not actually used by the economy and related to import	在区内加工过程中产生的未被使用的物质 Materials extracted from the environment but not actually used by the domestic processing and related to export

表 2 数据包络分析三层面区域生态效率核算指标

Table 2 Data envelopment analysis indicators for eco-efficiency analysis on three levels

项目 Item	区域直接生态效率 Regional direct eco-efficiency	区域总体生态效率 Regional total eco-efficiency	整体生态效率 Holistic eco-efficiency
输出端 Output X_j	地区生产总值 GDP	地区生产总值 GDP	地区生产总值 GDP
输入端 Input Y_j	直接物质输入 DMI	区域物质总输入 TMI(DMI+DHF)	总物质需求 TMR
	区内加工排放 DPO	区内总排放 TDO	区内总排放+进口隐藏流 TDO+IHF

GDP: Gross domestic product; DMI: Direct material input; TMI: Total material input; DHF: Domestic hidden flow; TMR: Total material requirement; DPO: Domestic processing output; TDO: Total domestic output; IHF: Import hidden flow. 下同 The same below.

采用将非期望输出作为输入端处理的方法^[25-27],将环境压力指标作为输入项构建区域直接生态效率(regional direct eco-efficiency, RDE)、区域总生态效率(regional total eco-efficiency, RTE)和整体生态效率(holistic eco-efficiency, HE)三层面的生态效率核算指标,如表 2。

2.2 铜陵市生态效率评价

本文集成物质流分析方法(MFA)、数据包络分析方法(DEA)与莫氏生产力指数(MPI)及其分解指标分析方法,对铜陵市 19 年间的相对生态效率、相邻年份的生态效率变化及相邻年份的技术变化进行了研究,找出了相对生态效率有效年及技术变化显著年。

2.2.1 铜陵市生态效率变化情况 基于表 1 进行核算得到的 1990—2008 年铜陵市物质流分析数据为基础,依据表 2 所示的三层面区域生态效率核算指标,运用考虑非期望产出因素的数据包络分析方法,评价得到 1990—2008 年铜陵市区域生态效率的相对效率值,评价结果见表 3。

由表 3 可知,1990—2008 年,铜陵市三层面区域生态效率变化趋势各有不同。1990—2008 年,铜陵市区域直接生态效率总体呈逐年上升趋势,根据上升幅度不同,可分为 3 个阶段。1990—1995 年为第 1 阶段,区域直接生态效率值从最低值(0.27)稳步上升,在 1994 年达到最大值后有所下降,1995 年区域直接生态效率值为 0.36,此阶段增幅为 31.9%。1995—1999 年为第 2 阶段,此阶段区域直接生态效率增长迅速,1999 年已达到 0.73,此阶段增幅达 103%。1999—2008 年为第 3 阶段,区域直接生态效率值上升幅度较小,2007 年之前基本稳定在 0.73~0.85 区间,2007 年上升到 1,2008 年继续保持 1,2007 年与 2008 年铜陵市实现了区域直接生态效率相对有效,为 19 年间区域直接生态效率相对有效年。铜陵市区域总生态效率在 1990—2008 年间总体上升,但上升幅度小于区域直接生态效率,且在

2002—2004 年间出现了明显下降,值得注意的是,区域总生态效率达到相对有效的年份仅为 2007 年,2007 年为铜陵市区域总生态效率相对有效年。不同于区域直接生态效率和总生态效率的变化趋势,铜陵市整体生态效率在 1990—2008 年间一直保持在 0.6 以上的水平,且可以明显分为两个阶段:1990—1999 年为第 1 阶段,生态效率总体上升,1999 年达到最大,实现整体生态效率相对有效,1999 年为铜陵市整体生态效率相对有效年;1999—2008 年为第 2 阶段,生态效率总体下降,2004 年达到谷底,仅 0.70。铜陵市三层面的区域生态效率变化呈现的差异表明,区域直接生态效率虽然得到了不断提升,但相对区域总生态效率和区域整体生态效率而言,其相对生态效率均值并不高,80%左右的年份相对生态效率在 0.8 以下。上述结果说明,铜陵市虽然实现了持续的经济增长,但也付出了较为严重的资源代价,面临较为严峻的环境压力。

表 3 1990—2008 年铜陵市区域生态效率

Table 3 Regional eco-efficiency of Tongling City from 1990 to 2008

年份 Year	区域直接 生态效率 RDE	区域总体 生态效率 RTE	整体生态 效率 HE
1990	0.27	0.49	0.62
1991	0.30	0.51	0.66
1992	0.33	0.53	0.69
1993	0.35	0.51	0.67
1994	0.39	0.58	0.76
1995	0.36	0.56	0.67
1996	0.39	0.61	0.68
1997	0.47	0.71	0.83
1998	0.59	0.71	0.91
1999	0.73	0.81	1.00
2000	0.78	0.83	0.91
2001	0.78	0.78	0.81
2002	0.81	0.80	0.87
2003	0.76	0.73	0.77
2004	0.74	0.70	0.70
2005	0.77	0.84	0.72
2006	0.85	0.92	0.78
2007	1.00	1.00	0.84
2008	1.00	0.90	0.79

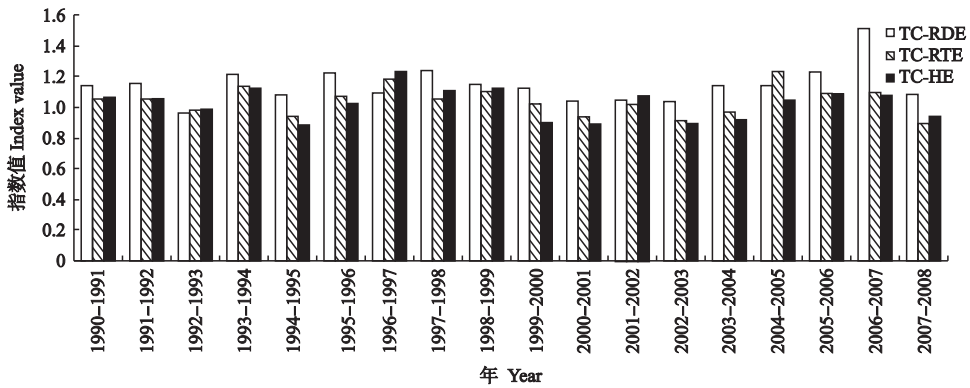


图1 铜陵市三层面区域技术变化指数

Fig. 1 Regional technical change index on three levels in Tongling City.

TC-RDE: 区域直接生态效率技术变化指数 Technical change index of regional direct eco-efficiency; TC-RTE: 区域总体生态效率技术变化指数 Technical change index of regional total eco-efficiency; TC-HE: 区域整体生态效率技术变化指数 Technical change index of regional holistic eco-efficiency.

2.2.2 铜陵市生态效率变化的驱动因素 为了进一步探寻铜陵市 19 年间生态效率变化的驱动因素, 本文进一步引入莫氏生产力指数表征铜陵市相邻年份区域三层面生态效率变化, 同时使用莫氏生产力指数的分解指数, 即效率变化指数 (EC) 和技术变化指数 (TC) 表征效率变化因素和技术变化因素对铜陵市相邻年份区域三层面生态效率变化的影响, 并采用数据包络分析计算基于莫氏生产率指数的铜陵市相邻年份区域三层面生态效率变化. 计算结果发现, 1990—2008 年间铜陵市相邻年份区域三层面生态效率变化受到效率变化指数的影响不显著 (效率变化指数在每个相邻年份的数值都为 1.00), 但受到技术变化指数的影响非常显著, 莫氏生产力指数的大小与技术变化指数的大小相等, 由此得出结论: 铜陵市相邻年份三层面区域生态效率变化的驱动因素为技术变化. 1990—2008 年铜陵市相邻年份区域生态效率技术变化指数见图 1.

如图 1 所示, 区域直接生态效率的技术变化指数 (TC-RDE) 除 1992—1993 年小于 1 外, 其余年份均大于 1, 表明 1990—2008 年铜陵市技术发展较为活跃. 直接生态效率的技术变化趋势可以分为 4 个阶段: 1990—1998 年为第 1 阶段, 技术变化波动较大, 趋势不显著; 1998~2002 年为第 2 阶段, 技术变化呈现下降趋势, 但未降至 1 以下; 2002—2007 年为第 3 阶段, 技术变化呈现显著的技术进步趋势, 尤其是 2006—2007 年, 技术变化指标值达到 1.51 的高水平; 2007—2008 年为第 4 阶段, 技术变化指标值下降至 1.08. 区域直接生态效率的技术变化趋势在一定程度上反映了铜陵市 19 年来在资源利用、环

境保护方面技术投入的变化, 分析结果表明, 19 年来铜陵市在持续提高资源利用率、改善生态环境的工作中投入了大量技术因素, 其技术投入在 2006—2007 年间最为显著.

与区域直接生态效率的技术变化指数不同, 区域总生态效率的技术变化指数 (TC-RTE) 和区域整体生态效率的技术变化指数呈现出较大波动. 其中, 区域总体生态效率的技术变化指数出现了 6 个技术倒退年份, 而区域整体生态效率的技术变化指数出现了 7 个技术倒退年份. 原因不仅与这两个指标衡量了隐藏流对环境的影响相关, 更与输入物质到铜陵市其他区域的资源、环境管理状况有关. 分析区域总生态效率的技术变化指数能够为铜陵市制定资源开采过程中的资源保护、环境管理的相关政策提供参考, 分析整体生态效率的技术变化指数能够从更宏观的角度联系铜陵市及其进口依赖区域.

3 讨 论

本文基于物质流分析构建生态效率核算指标, 采用考虑非期望产出因素的数据包络分析方法计算得到 1990—2008 年铜陵市三层面区域生态效率的相对效率值. 结果显示, 1990—2008 年间, 铜陵市区域直接生态效率逐年提高, 2007 年与 2008 年为铜陵市区域直接生态效率相对有效年. 但 80% 左右的年份相对生态效率在 0.8 以下, 表明铜陵市虽然实现了持续的经济增长, 但也付出了较为严重的资源代价, 面临较为严峻的环境压力. 莫氏生产力指数计算结果显示, 1990—2008 年间铜陵市相邻年份三层面生态效率变化的驱动因素为技术变化因素, 影响

铜陵市相邻年份直接生态效率变化的技术变化指标仅 1992—1993 年小于 1, 说明铜陵市 19 年间, 仅在 1992—1993 年出现了技术倒退, 其余年份均处于技术进步状态, 这与 19 年间铜陵市三层面相对生态效率分析得出的铜陵市区域直接生态效率的变化趋势相符合。表明铜陵市直接生态效率的持续增长与铜陵市多年来不断加大资源利用和环境保护的技术投入息息相关。综合铜陵市三层面区域生态效率变化情况与驱动因素进行分析可知, 铜陵市需要进一步提高直接生态效率, 既可以通过扩大原材料进口、减少本地采掘实现, 又可以通过提高资源生产率、增加环保基础设施投入实现。

我国资源型城市众多, 集成物质流分析、数据包络分析与莫氏生产力指数及其分解指标的分析方法, 能够实现较为综合的分析角度, 尤其是引入莫氏生产力指数分析方法能够更为便捷地分析相邻年份区域生态效率的变化情况以及效率变化指数表征的效率变化因素和技术变化指数表征的技术变化因素在相邻年份生态效率变化中的影响。虽然区域层面的物质流分析受到当地统计情况的限制, 但是, 物质流分析在体现区域宏观发展趋势方面的优势为计算生态效率提供了客观有效的研究基础, 同时, 数据包络分析具有相对客观性, 莫氏指数及其分解指标具有明确代表性, 因此这一综合的生态效率分析方法能够更有成效地帮助研究区域制定相应的可持续发展战略, 尤其有益于分析技术改革模式、统筹产业结构升级, 具有值得深入探讨的意义。

参考文献

- [1] Schaltegger S, Burritt R. Contemporary Environmental Accounting: Issues, Concepts and Practice. Singapore: Greenleaf Publications, 2000
- [2] Lehtinen M. Eco-efficiency: Creating more value with less impact. Geneva: WBCSD, 2000
- [3] Moll S, Gee D. Making sustainability accountable: Eco-efficiency, resource productivity and innovation. Proceedings of a Workshop on the Fifth Anniversary of the European Environment Agency (EEA). Copenhagen, 1998
- [4] Saling P, Kicherer A, Dittrich-Krämer B, et al. Eco-efficiency analysis by BASF: The method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, **7**: 1–15
- [5] United Nations Conference on Trade and Development. Integrating Environmental and Financial Performance at the Enterprise level: A Methodology for Standardizing Eco-efficiency Indicators. New York: United Nations Publication, 2003
- [6] Lan S-F (蓝盛芳), Qin P (钦 佩). Emergy analysis of ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2001, **12**(1): 129–131 (in Chinese)
- [7] Kong H-M (孔红梅), Zhao J-Z (赵景柱), Ji L-Z (姬兰柱), et al. Assessment method of ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2002, **13**(4): 486–490 (in Chinese)
- [8] Li G-J (李广军), Wang Q (王 青), Gu X-W (顾晓薇). Application of ecological footprint in Chinese cities' development. *Journal of Northeastern University (Natural Science) (东北大学学报·自然科学版)*, 2007, **28**(10): 1485–1488 (in Chinese)
- [9] Zhang Y (张 妍), Yang Z-F (杨志峰). Emergy analysis of urban material metabolism and evaluation of eco-efficiency in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报)*, 2007, **27**(11): 1892–1899 (in Chinese)
- [10] Zhu D-J (诸大建), Qiu S-F (邱寿丰). Eco-efficiency as the appropriate measurement of circular economy. *China Population, Resources and Environment (中国人口·资源与环境)*, 2006, **16**(5): 1–6 (in Chinese)
- [11] Wu X-Q (吴小庆), Wang Y (王 远), Liu N (刘 宁), et al. Regional eco-efficiency evaluation of Jiangsu Province based on MFA. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境)*, 2009, **18**(10): 890–895 (in Chinese)
- [12] Li M-S (李名升), Tong L-J (佟连军). Eco-efficiency of Jilin Province based on energy and material flow. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2009, **29**(11): 6239–6247 (in Chinese)
- [13] Yu J (于 洁), Liu R-S (刘润生), Cao Y (曹燕), et al. An Empirical analysis of the contribution rate of scientific and technological progress in China based on DEA-Malmquist index in 1979–2004. *Soft Science (软科学)*, 2009, **23**(2): 1–6 (in Chinese)
- [14] Xu X-Q (徐小钦), Huang X (黄 馨), Liang P-Y (梁彭勇). Evaluate of science and technology innovation efficiency of a region based on DEA and Malmquist exponent approach. *Application of Statistics and Management (数理统计与管理)*, 2009, **28**(6): 974–985 (in Chinese)
- [15] Yang J (杨 俊), Shao H-H (邵汉华). Empirical study on China's industrial growth under the binding of environment. *Journal of Quantitative & Technical Economics (数量经济技术经济研究)*, 2009, **26**(9): 64–78 (in Chinese)
- [16] Moriguchi Y. Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. *Journal of*

- Material Cycles and Waste Management*, 2007, **9**: 112–120
- [17] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, *et al.* Resource Flows – The Material Basis of Industrial Economies. World Resources Institute Report. Washington DC: World Resources Institute, 1997
- [18] Layke C, Matthews E, Amann C, *et al.* The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies. Washington DC: World Resources Institute, 2000
- [19] EUROSTAT. Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: Methodological Guide. Luxembourg: EUROSTAT, 2001
- [20] Wei Q-L (魏权龄). Data Envelopment Analysis. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)
- [21] Caves DW, Christensen LR, Diewert WE. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output and productivity. *Econometrica*, 1982, **50**: 1393–1414
- [22] Färe R, Grosskopf S, Lovell CAK. Production Frontiers. London: Cambridge University Press, 1994
- [23] Moldan B, Billharz S, Matravers R. Sustainability Indicators: A Report on the Project on Indicators of Sustainable Development. Chichester and New York: John Wiley & Sons, 1997
- [24] Wang Y (王远), Wu X-Q (吴小庆), Zhang B (张蓓), *et al.* Applying material flow analysis to explore the sustainability of material use in resource-based cities: Evidence from Tongling City// Ge C-Z (葛察忠), Zhang S-Q (张世秋), Ma Z (马中), eds. Progress on Environmental Economics (Volume I). Beijing: China Environmental Science Press, 2009: 148–156 (in Chinese)
- [25] Reinhard S, Loveall CA, Thijssen GJ. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables: Estimated with SFA and DEA. *European Journal of Operational Research*, 2000, **121**: 287–303
- [26] Hailu A, Veeman TS. Non-parametric productivity analysis with undesirable outputs: An application to the Canadian pulp and paper industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 2001, **83**: 605–616
- [27] Wang B (王波), Zhang Q (张群), Wang F (王飞). Using DEA to evaluate firm productive efficiency with environmental performance. *Control and Decision* (控制与决策), 2002, **17**(1): 24–28 (in Chinese)

作者简介 王义琛,女,1986年,硕士研究生.主要从事环境规划与管理研究,发表论文3篇. E-mail: axhmyc@126.com

责任编辑 肖红
