

doi:10.3969/j.issn.1672-626x.2016.05.008

基于 PCA-DEA 组合模型的长江经济带生态效率研究

邓明亮¹, 吴传清^{1,2}

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 2. 长江大学 长江经济带发展研究院, 湖北 荆州 434100)

摘要:本文基于 PCA-DEA 的组合模型评价长江经济带 11 省市生态效益, 并对长江经济带生态效率的影响因素进行分析。研究结果显示: 长江经济带 11 省市平均生态效率低于全国平均水平且存在地区差异, 并表现出扩大的趋势; 产业结构、外商投资水平、地区就业人口总数对生态效率的提高有反向作用, 高技术产业主营业务收入、城镇化率、能源投资、能源消费总量、地区生产总值对生态效率的提高有着正向作用。因此, 应坚持生态优先、绿色发展的总体战略定位, 坚持改革创新, 将重点放在经济结构的转型升级方面, 促进上中下游协同发展, 重点提升上游省市生态效率。

关键词:PCA-DEA 组合模型; 长江经济带; 生态效率

中图分类号:F062.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-626X(2016)05-0058-09

一、引言

长江经济带横贯我国东、中、西三大经济地带, 沿线 11 个省市人口和经济总量超过全国 40%, 对塑造区域协调发展新格局具有举足轻重的战略地位。2016 年 3 月 17 日公布的国家“十三五”规划纲要强调, 坚持“生态优先、绿色发展”战略定位, 将“修复长江生态环境”置于首位, 推动长江经济带建设成为“生态文明建设的先行示范带、创新驱动带、协调发展带”; 2016 年 3 月 25 日中央政治局会议审议了《长江经济带发展规划纲要》, 进一步强调“长江经济带发展的战略定位必须坚持生态优先、绿色发展, 共抓大保护, 不搞大开发。……在改革创新和发展新动能上做‘加法’, 在淘汰落后过剩产能上做‘减法’, 走出一条绿色低碳循环发展的道路”。回溯历史, 长江经济带 11 省市生态效率呈现出哪些变

化规律? 影响 11 省市生态效率的因素主要有哪些? 探讨上述问题对促进长江经济带产业转型升级发展和沿江绿色生态廊道建设具有重要的实践指导意义。

二、相关文献综述

“生态效率”概念由西方学者 Schaltegger 和 Sturm^[1] 首倡, 国内学者尹科等^[2] 曾从学术史视角对国内外生态效率核算方法及其应用研究成果文献进行初步总结。国内学术界对于生态效率研究的文献大体可分为以下五类:

一是行业生态效率研究。谢琨结合钢铁行业的特点和环境状况运用层次分析法对钢铁企业生态效率水平进行测度;^[3] 吴小庆等在层次分析法应用的基础上引入 DEA 模型对无锡市农业生态效率进行测评;^[4] 程晓娟等则采用 PCA-DEA 的组合模型对我国煤炭产业的生态效率进行评价;^[5] 潘丹等^[6] 和张子

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (15ZDA020)

作者简介: 邓明亮(1994-), 男, 湖北长阳人, 武汉大学经济与管理学院国家经济学基础人才培养基地学生, 武汉大学区域经济研究中心《长江经济带发展研究报告》项目研究助理, 主要从事经济学研究; 吴传清(1967-), 男, 湖北石首人, 武汉大学教授, 博士生导师, 武汉大学区域经济研究中心主任, 长江大学长江经济带发展研究院执行院长, 主要从事区域经济学研究。

龙等^[7]利用SBM模型农业生态效率进行研究;程翠云等基于机会成本的经济核算方法对我国2003—2010年农业生态效率进行测评,并利用回归模型对影响因素进行分析。^[8]

二是产业园区生态效率研究。张炳等将污染物排放作为一种非期望输出引入DEA模型,对杭州湾精细化工业园区企业生态效率进行分析;^[9]吴小庆等则运用TOPSIS方法对苏州高新区、生态工业园和无锡新区生态工业示范园区的生态效率进行综合评价;^[10]刘巍等基于DEA模型,综合运用非期望产出作投入法、非期望产出去倒数法、方向距离函数法和基于松弛测度的SBM四种不同模型,对我国24家综合类国家生态工业示范园区生态效率进行测算;^[11]芮俊伟等根据生态足迹核算方法对昆山高新区生态效率进行分析;^[12]孙玉峰等基于能值分析法构建矿区循环经济系统生态效率的评价指标,并对山东某矿区生态效率进行分析;^[13]刘晶茹等则通过园区复合生态效率评价指标体系对郑州经济技术开发区生态效率指标进行分析。^[14]

三是城市生态效率研究。黄和平等对江西省生态效率进行长期研究,2008年基于物质流分析构建区域生态效率评价指标体系,并对江苏生态效率进行测算;^[15]2010年利用改进的资源环境绩效指数完成对江西省资源环境强度与绩效的系统分析;^[16]2015年基于生态效率度量模型和循环经济发展模式的判别模型,对江西省2000—2010年循环经济发展模式变化轨迹进行分析;^[17]陈黎明等则运用混合方向性距离函数模型(HDDF)实现对2011年“两横三纵”城市化战略格局中62个城市生态效率的测算分析。^[18]

四是省域生态效率研究。陈傲采用PCA分析方法对我国2007年各省市生态效率进行测评;^[19]在DEA模型的拓展方面,王宏志等^[20]利用超效率DEA模型、邓波等^[21]采用三阶段DEA模型对2008年各省域生态效率进行分析;游和远等则运用CCR-1模型对我国31省市土地利用生态效率进行研究;^[22]潘兴侠等采用熵值赋权的灰色综合评价法对我国省域生态效率的优劣做出评价;^[23]崔玮等建立Malmquist指数模型完成对1999—2010年全国28省市碳排放约束条件下城市非农用地动态效率值的测评;^[24]黄建欢等则运用空间杜宾模型对中国省域金融发展影响区域绿色发展各机理的相对重要

性及其空间溢出效应进行研究;^[25]成金华等^[26]和关伟等^[27]在对中国各省域生态效率进行计算的基础上,运用空间计量模型完成对中国省域生态效率的演化分析,对生态效率空间溢出效应及其影响因素进行检验。

五是经济地带生态效率研究。王恩旭等运用超效率DEA模型对东、中、西、东北4大经济地带生态效率的时空分布进行分析,并对生态效率的变化趋势进行收敛检验;^[28]张雪梅基于改进DEA模型完成对西部地区2000—2010年生态效率的测度,并利用Malmquist指数进行动态分析。^[29]

关于长江经济带生态效率的研究,付丽娜等运用DEA模型、Malmquist-DEA模型、Tobit模型对长株潭“3+5”城市群2005—2010年生态效率进行分析和对比;^[30]汪克亮等在对长江经济带11省市5类工业生态效率标准值进行测算的基础上对工业生态效率的地区差异、动态演变特征、收敛性和影响因素进行考察;^[31]何宜庆等则利用熵权法对长江经济带11个省市2001—2013年生态效率同金融集聚、经济增长三者之间耦合度进行实证研究。^{[32][33]}

在城市和区域生态效率的测度分析研究中,以全国31省市或特定区域为最主要的研究对象,以长江经济带11省市为对象的生态效率测度和研究尚不多见。本文对我国31省市2004—2014年间的生态效率进行测度评价。在生态效率的测算的基础上,为了更详尽、细致地分析和呈现长江经济带11省市生态效率的动态演变与影响因素,本文集中对11省市测算结果的时空差异和动态演变特征进行分析,采用 σ 收敛和绝对 β 收敛两种收敛分析方法检验生态效率的敛散性;最后采用Tobit面板回归模型对长江经济带生态效率的影响因素进行分析。

三、研究方法

(一)PCA-DEA组合模型

由于主成分分析法(PCA)能够提取分析指标中相关性较强的公共因子,通过降维解决数据包络法(DEA)中指标强相关性带来的问题,本文采用PCA-DEA组合模型对长江经济带11省市生态效率进行研究。

在主成分分析的运用中,本文选取的投入指标包括资源消耗和环境污染两类,资源消耗选取资本投入(x_1)、人力资本投入(x_2)、水资源投入(x_3)、电力资源投入(x_4)、土地资源投入(x_5)、煤炭消费量(x_6)、

表1 变量名称、变量含义和数据来源

分项指标	具体变量	变量含义	数据来源	
投入指标	资源消耗	资本投入(x ₁)	地区全社会固定资本投入总量	《中国统计年鉴》
		人力资本投入(x ₂)	地区就业人口总数	《中国统计年鉴》
		水资源投入(x ₃)	地区水资源消费总量	《中国统计年鉴》
		电力资源投入(x ₄)	地区电力消费总量	《中国统计年鉴》
		土地资源投入(x ₅)	土地利用总量	《中国统计年鉴》
	环境污染	碳排放量(x ₆)	地区碳排放总量	本文作者测算
		废气排放量(x ₇)	地区二氧化硫、氮氧化物、烟(粉)尘排放总量	《中国统计年鉴》
		废水排放量(x ₈)	地区废水排放总量	《中国统计年鉴》
		固体污染物排放量(x ₉)	地区固体污染物排放总量	《中国统计年鉴》
产出指标	国民生产总值(GDP)	地区国民生产总值	《中国统计年鉴》	

石油消费量(x₇)、天然气消费量(x₈)；环境污染选取碳排放量(x₉)、废气排放量(x₁₀)、废水排放量(x₁₁)、固体污染物排放量(x₁₂)。生产效率的产出指标主要反映经济体所提供产品和服务的经济价值,本文选取各省市生产总值作为生态效率评价的产出指标。生态效率的测度指标变量名、变量含义和数据来源如表1所示。

其中碳排放量(x₉)表示以工业行业的碳排放量,估算方程如式(1)所示:

$$E_r = \delta_c E_c + \delta_p E_p + \delta_g E_g \quad (1)$$

式(1)中,E_r为碳排放量,E_c、E_p、E_g表示煤炭、石油、天然气消费量,δ_c、δ_p、δ_g表示煤炭、石油、天然气碳排放转换系数,本文以各类能源的碳排放系数平均值进行碳排放计算(见表2)。

表2 煤炭、石油、天然气碳排放系数

来源	煤炭碳排放系数 t(C)/t	石油碳排放系数 t(C)/t	天然气碳排放系数 t(C)/t
DOE/EIA	0.702	0.478	0.389
IEEJ	0.756	0.586	0.449
SSACCP	0.726	0.583	0.409
Average	0.728	0.549	0.416

资料来源:整理自王恩旭,等.基于超效率DEA模型的中国省际生态效率时空差异研究[J].管理学报,2011,(3):443-450。

在数据包络分析法(DEA)的运用中,本文将选择投入导向型的BCC模型对长江经济带11省市的生态效率进行评价,即在产出不变的基础上尽可能地减少资源投入量以提高生产效率。

假设有n个DUM,每个DUM都有m种投入和s种产出,x_{ij}表示第j个决策单元DUM_j的第i种投入,y_{rj}表示第r种产出,λ_j表示n个DUM的投入产出指标权重,∑_{j=1}ⁿx_{ij}λ_j为加权处理后DMU的投入量,

∑_{j=1}^my_{rj}λ_j为加权处理后DMU的产出量,如式(2)所示:

$$\begin{cases} \min[\theta - \varepsilon(\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+)] \\ \sum_{j=1}^n x_{ij}\lambda_j + S_i^- = \theta x_{ij}, i \in (1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n x_{rj}\lambda_j - S_r^+ = y_{rj}, r \in (1, 2, \dots, s) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \theta, \lambda_j, S_i^-, S_r^+ \geq 0 \\ j=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

式中θ表示相对效率,S_i⁻和S_r⁺表示松弛变量,ε表示非阿基米德无穷小,通常取ε=0.000001。假设式(2)有最优解θ*,S_i^{-*},S_i⁺,λ*,那么:

(1)若有θ*=1,且S_i^{-*}=S_i⁺=0,则表示DMU为DEA有效;

(2)若有θ*=1,且S_i^{-*}≠0,或S_i⁺≠0,或S_i^{-*}≠0和S_i⁺≠0,则表示DMU为弱DEA有效;

(3)若有θ* < 1,且S_i^{-*}≠0,S_r⁺≠0,则表示DMU为非DEA有效,而且θ*值越大,则DMU的相对效率就越高。

通过PCA-DEA组合模型,一方面可以保留各投入产出指标信息完整的基础上降低指标间的关联水平;另一方面,能够发挥DEA模型在评价决策单元相对有效性过程中的优势,从而保证测算分析结果的精确性和科学性,最终达到精确测度长江经济带11省市生态效率的目标。

(二)生态效率收敛性检验模型

本文采用σ收敛和绝对β收敛两种收敛分析方法检验生态效率的收敛性。

本文将通过以下方程完成对长江经济带 11 省市生态效率的收敛检验,如式(3)所示:

$$\sigma = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^n \left[EE_i(t) - \left(N^{-1} \sum_{k=1}^n EE_k(t) \right) \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式(3)中, $EE_i(t)$ 为第 i 个地区在 t 时期的生态效率, N 为省市的个数,本文中 $N=11$ 。当 $\sigma_{t+1} < \sigma_t$ 时,各省市生态效率离散系数在缩小,存在 σ 收敛;当 $\sigma_{t+1} > \sigma_t$ 时,各省市生态效率离散系数在扩大,存在 σ 发散。

本文中长江经济带 11 省市生态效率的绝对 β 收敛回归模型如式(4)所示:

$$\frac{\ln(EE_{i,T}) - \ln(EE_{i,0})}{T} = \alpha + \beta \ln(EE_{i,0}) + \varepsilon \quad (4)$$

式(4)中, $EE_{i,T}$ 表示为 $t=T$ 时期的生态效率, $EE_{i,0}$ 表示基期第 i 个省/市的生态效率, $\frac{\ln(EE_{i,T}) - \ln(EE_{i,0})}{T}$ 表示第 i 个省/市在 $t=T$ 时期以前生态效率的平均增长速度, α 为常数项, β 为系数, ε 为误差项。

若存在 $\beta < 0$, 则存在绝对 β 收敛,各地区生态效率增长率与其初始水平呈反向关系,即生态效率的增长与初始值成反比,后进区域表现出对先进区域的“追赶”趋势;若系数 $\beta > 0$, 则各地区不存在 β 收敛,即后进区域的“追赶”效应不明显。

(三)Tobit 模型

在完成长江经济带 11 省市生产效率测算的基础上,本文将生态效率(EE)定义为响应变量,将其其他影响因素定义为控制变量,采用两阶段分析法构建实证模型来研究生态效率(EE)的影响因素。因为 $EE \in [1, 2]$, 为“受限因变量”,若仍然使用普通最小二乘法会导致回归参数估计值有偏和不一致。本文采用 Tobit 模型来解决受限或截断因变量的建模问题。其具体形式如式(5)所示:

$$Y_k = \begin{cases} \beta X_k + \mu_k, & \beta X_k + \mu_k > 0 \\ 0, & \beta X_k + \mu_k < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, Y_k 为受限因变量, X_k 为控制变量, β 为参数集, $\mu_k \sim N(0, \sigma^2)$, $k=1, 2, \dots$ 。

根据现有研究,本文选取 7 种影响因素进行分析,如表 3 所示。

四、实证分析

(一)长江经济带生态效率的动态分析

本文首先通过 Spss22.0 统计分析软件完成投入指标的主成分分析。在因子分析之前,本文采用 KMO 检验和 Bartlett 检验对各样本数据进行公共因子分析的适宜度进行考察。以 2014 年数据分析为例,生态效率投入指标 KMO 和 Bartlett 检验的结果如表 4 所示, KMO 值为 0.780, 可见生态效率投入指标之间的相关性较大; Bartlett 球形检验值 P 为 0.000, 可见原假设在 0.001 的显著性水平上被拒绝,即否定生态效率投入指标间无显著相关性的假设。综合 KMO 和 Bartlett 检验的结果可以证明,本文选取的生态效率投入指标变量之间具有强相关性,能够进行因子分析。

表 4 生态效率投入指标 KMO 和 Bartlett 检验

取样足够的 KMO 度量		0.780
	近似卡方	345.868
Bartlett 的球形度检验	df	36
	sig	.000

根据累计贡献率 $\geq 80\%$, 特征值 ≥ 1 的原则,本文提取了两个主成分,如表 5 所示,本文选取的两个主成分累计贡献率达到 83.634%, 能够代表初始投入指标的大部分信息。根据因子载荷矩阵中各变量得分,最终本文得到两个主成分得分,作为 DEA 分析模型的投入指标。

表 3 长江经济带生态效率的影响因素指标

变量名	标签	变量含义	数据来源
经济发展水平	GDP	地区生产总值	《中国统计年鉴》
产业结构	INDUS	工业产值比地区生产总值	本文作者测算
人口数量	POPU	地区就业人口总数	《中国统计年鉴》
城镇化率	URBAN	地区城镇化率	《中国统计年鉴》
外商投资	FORIN	外商投资总额	《中国统计年鉴》
能源投资	ENIN	地区能源工业投资总额	《中国统计年鉴》
能源消费总量	TEC	地区能源消费总量(折合成标准煤)	《中国能源统计年鉴》
高技术产业主营业务收入	TPB	地区高技术产业每年主营业务收入	《中国高技术产业统计年鉴》

表5 初始因子载荷矩阵、特征值和累计贡献率

成分	成分	
	F ₁	F ₂
x ₁	0.739	0.551
x ₂	0.968	0.163
x ₃	0.945	0.046
x ₄	0.827	0.497
x ₅	-0.440	0.325
x ₆	0.266	0.905
x ₇	0.277	0.929
x ₈	0.954	0.223
x ₉	-0.033	0.893
特征值	60.166	23.468
贡献率(%)	47.914	35.720
累计贡献率(%)	47.914	83.634

为使数据平滑,并满足 DEA 模型的输入、输出数据要求,在通过主成分分析法(PCA)得到综合变量指标的基础上,本文得到一个包括 1 个产出指标和 2 个投入指标的 DEA 模型。同时,本文将运用极大值标准模型对数据进行无量纲处理,来解决主成分分析过程中公共因子可能为负的问题,计算方法如式(6)所示:

$$F'_{ij} = \frac{0.1 + 0.9(F_{ij} - \min F_{ij})}{\max F_{ij} - \min F_{ij}} \quad (6)$$

式(6)中, F_{ij} 表示处理前的值, F'_{ij} 表示处理后的值, $\max F_{ij}$ 表示最大值, $\min F_{ij}$ 表示最小值。完成数据的变换后,结果数据全部属于区间[0.1, 1]内。

在得到无量纲处理后的投入产出数据后,本文通过 DEAP2.1 对 31 省市生态效率进行数据包络分析。为显示主成分分析(PCA)在生态效率测算中的作用,本文同时将主成分分析使用前后的生态效率同时进行测算,测算结果如表 6 所示。通过纯 DEA 模型测算生态效率的结果中,有更多的省市呈现出有效率,而对原始数据利用主成分分析法进行降维处理后,计算结果得到有效改善。

采用相同的方法,本文可得到我国 31 省市 2004—2014 年生态效率的测度结果,如表 7 所示。全国范围内,北京、山东、广东 3 省市生态效率长期保持在 1 的水平,处于全国前列;长江经济带中,上海、江苏、浙江 3 省市生态效率最高,重庆和贵州生态效率呈现出上升的态势,而四川的生态效率有所下降。2004—2014 年,其他省市生态效率波动幅度小,基本维持平衡状态。但长江经济带 11 省市之间生态效率差异较大,上海、江苏、浙江等地生态效率

较高,而安徽、江西、贵州、云南等地生态效率较低,如 2014 年江苏生态效率值为 1,而贵州仅为 0.528,经济带 11 省市间的差异明显。从平均生态效率来看,长江经济带 11 省市平均生态效率略低于全国 31 省市平均生态效率。

表6 2014年31省市生态效率

省市	纯 DEA 模型			PCA-DEA 组合模型				
	Crs	Vrs	Sca	Crs	Vrs	Sca		
北京	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.000	-
天津	1.000	1.000	1.000	-	0.837	1.000	0.837	irs
河北	1.000	1.000	1.000	-	0.855	0.869	0.984	irs
山西	0.807	0.807	1.000	-	0.630	0.721	0.874	irs
内蒙古	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.000	-
辽宁	0.780	0.894	0.872	drs	0.795	0.860	0.924	irs
吉林	0.949	0.984	0.964	irs	0.684	0.873	0.784	irs
黑龙江	0.875	0.876	0.999	drs	0.719	0.895	0.804	irs
上海	1.000	1.000	1.000	-	0.888	0.932	0.952	irs
江苏	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.000	-
浙江	1.000	1.000	1.000	-	0.902	0.931	0.969	irs
安徽	0.770	0.817	0.942	drs	0.692	0.809	0.856	irs
福建	0.935	0.988	0.947	drs	0.811	0.909	0.892	irs
江西	0.861	0.881	0.977	drs	0.660	0.813	0.811	irs
山东	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.000	-
河南	1.000	1.000	1.000	-	0.817	0.877	0.932	irs
湖北	0.856	0.951	0.900	drs	0.781	0.858	0.910	irs
湖南	0.967	1.000	1.000	drs	0.850	0.937	0.907	irs
广东	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.000	-
广西	0.747	0.795	0.939	drs	0.665	0.814	0.817	irs
海南	0.971	1.000	0.971	irs	0.465	1.000	0.817	irs
重庆	0.861	0.863	0.998	drs	0.661	0.822	0.804	irs
四川	0.835	0.923	0.905	drs	0.835	0.923	0.905	irs
贵州	0.828	0.958	0.864	irs	0.528	0.744	0.709	irs
云南	0.853	0.853	1.000	-	0.624	0.806	0.775	irs
西藏	1.000	1.000	1.000	-	0.595	1.000	0.595	irs
陕西	0.960	0.966	0.994	irs	0.741	0.886	0.836	irs
甘肃	0.740	0.822	0.900	irs	0.504	0.793	0.635	irs
青海	0.854	1.000	0.854	irs	0.487	0.904	0.539	irs
宁夏	0.753	1.000	0.753	irs	0.376	0.817	0.461	irs
新疆	0.705	0.708	0.996	irs	0.585	0.759	0.771	irs

注:(1)crs 表示综合效率,vrs 表示纯技术效率,sca 表示规模效率,crs=vrs·sca;irs、-、drs 分别表示规模收益递增、不变、递减;(2)表中用黑体标出的是长江经济带 11 省市测度结果。

(二)长江经济带生态效率的敛散性检验

长江经济带 11 省市生态效率地区差异明显,但仍需对数据做进一步分析,才能明确这种地区差异的演化趋势,预测各省市生态效率能否趋同。为达到这一目标,本文对长江经济带 11 省市 2004—

2014年生态效率的动态演变进行细致分析。

本文首先对长江经济带11省市生态效率进行了 σ 收敛分析。根据式(3)可以计算出长江经济带11省市2004—2014年生态效率的 σ 收敛结果,如图1所示。2008年长江经济带11省市生态效率 σ 收敛值达到顶峰,2010—2012三年间 σ 收敛值保持基本稳定,2013年后,收敛值有所提升。由此可见,2005—2008年间,长江经济带11省市生态效率差距不断扩大,地区之间的生态效率水平差异化明

显;2008—2013年长江经济带11省市生态效率地区差异呈现出波动缩小的态势;在2013年后,长江经济带11省市生态效率地区差异再次表现出扩大的趋势。

绝对 β 收敛分析的作用在于检验长江经济带11省市生态效率是否趋同,即生态效率低的省市是否对生态效率高的省市实施“追赶”。本文对长江经济带11省市生态效率的绝对 β 收敛检验结果如表8所示。从检验结果来看,回归系数为负,这意味着

表7 2004—2014年31省市生态效率测度结果

年份 省市	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	mean
北京	0.810	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.983
天津	0.660	0.895	0.902	0.910	1.000	0.908	0.987	1.000	0.935	0.984	0.837	0.911
河北	1.000	0.949	0.845	0.922	0.723	0.916	1.000	1.000	0.806	0.789	0.855	0.891
山西	0.584	1.000	1.000	1.000	0.953	1.000	1.000	1.000	0.720	0.794	0.630	0.880
内蒙古	1.000	0.616	0.680	0.638	0.580	0.713	0.731	0.769	1.000	1.000	1.000	0.793
辽宁	0.715	0.850	0.833	0.807	0.727	0.899	0.880	0.934	0.916	0.941	0.795	0.845
吉林	0.596	0.713	0.706	0.668	0.657	0.668	0.667	0.728	0.766	0.786	0.684	0.694
黑龙江	0.799	0.618	0.612	0.582	0.544	0.505	0.505	0.556	0.722	0.751	0.719	0.628
上海	0.875	0.993	0.972	0.965	0.945	0.934	0.952	0.914	0.872	0.897	0.888	0.928
江苏	1.000	0.764	0.755	0.774	0.849	0.806	0.858	0.766	0.940	0.966	1.000	0.862
浙江	0.956	0.845	0.965	1.000	1.000	1.000	1.000	0.906	0.842	0.861	0.902	0.934
安徽	0.697	0.692	0.591	0.577	0.524	0.541	0.539	0.588	0.642	0.656	0.692	0.613
福建	0.790	0.692	0.677	0.665	0.634	0.605	0.621	0.682	0.729	0.756	0.811	0.697
江西	0.654	0.658	0.604	0.539	0.495	0.529	0.530	0.584	0.624	0.624	0.660	0.591
山东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河南	0.796	0.799	0.781	0.772	0.665	0.713	0.695	0.733	0.734	0.733	0.817	0.749
湖北	0.731	0.639	0.623	0.628	0.600	0.594	0.599	0.654	0.738	0.757	0.781	0.668
湖南	0.731	0.611	0.584	0.626	0.637	0.618	0.620	0.669	0.723	0.741	0.850	0.674
广东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
广西	0.597	0.498	0.471	0.471	0.500	0.451	0.453	0.545	0.563	0.607	0.665	0.529
海南	0.466	0.678	0.616	0.623	0.792	0.568	0.613	0.668	0.527	0.547	0.465	0.597
重庆	0.582	0.591	0.574	0.575	0.558	0.604	0.675	0.709	0.722	0.706	0.661	0.632
四川	0.829	0.650	0.643	0.650	0.566	0.601	0.636	0.698	0.788	0.762	0.835	0.696
贵州	0.470	0.635	0.661	0.641	0.600	0.633	0.648	0.602	0.610	0.642	0.528	0.606
云南	0.686	0.642	0.627	0.594	0.555	0.568	0.572	0.602	0.594	0.622	0.624	0.608
西藏	0.516	0.355	0.363	0.339	0.428	0.407	0.436	0.522	0.513	0.507	0.595	0.453
陕西	0.576	0.767	0.715	0.698	0.650	0.723	0.767	0.778	0.843	0.837	0.741	0.736
甘肃	0.410	0.453	0.546	0.535	0.515	0.385	0.499	0.571	0.628	0.621	0.504	0.515
青海	0.411	0.465	0.490	0.503	0.554	0.416	0.538	0.704	0.521	0.543	0.487	0.512
宁夏	0.326	0.407	0.438	0.491	0.519	0.363	0.537	0.561	0.511	0.525	0.376	0.459
新疆	0.847	0.419	0.414	0.399	0.627	0.380	0.400	0.341	0.635	0.631	0.585	0.516
Mean1	0.713	0.706	0.700	0.697	0.690	0.679	0.708	0.735	0.747	0.761	0.741	0.716
Mean2	0.746	0.702	0.691	0.688	0.666	0.675	0.694	0.699	0.736	0.749	0.766	0.710

注:(1)表中用黑体标出的是长江经济带11省市生态效率;(2)Mean1表示我国31省市生态效率平均值;Mean2表示长江经济带11省市生态效率平均值;mean表示我国31省市2004—2014年间生态效率平均值。

落后省市存在对先进省市的“追赶”效应,但回归系数未通过5%的显著性检验,可见落后省市对先进省市的“追赶”效应较弱,各省市间生态效率存在继续被拉大的危险,这与σ检验分析的结果相一致。

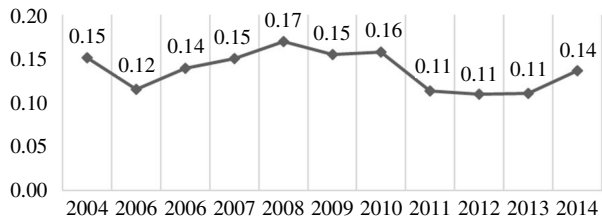


图1 长江经济带11省市2004—2014年生态效率σ收敛结果

表8 长江经济带11省市2004—2014年生态效率β收敛检验结果

EE	Coef.	Std. Err.	t	p	[95% Conf. Interval]
β	-.0004231	.000917	-0.46	0.654	-.0024664 .0016202
α	.0026966	.0020398	1.32	0.216	-.0018483 .0072415

(三)长江经济带生态效率的影响因素分析

基于对长江经济带11省市生态效率的测算,本文将建立包括以各省生态效率为响应变量、影响因素为控制变量的面板实证模型,通过两阶段分析法来考察生态效率的影响因素及其影响机制。本文将借助于Tobit面板计量回归模型进行回归,解决生态效率受限因变量的问题。借鉴现有研究成果,本文选取高技术产业主营业务收入水平(TBP)、工业结构(INDUS)、就业人口数量(POPu)、城镇化率(URBAN)、外商投资(FORIN)、能源投资(ENIN)、能源消费总量(ENIN)、经济发展水平(GDP)作为影响因素。

本文所用Tobit面板模型如式(7)所示:

$$EE_{it} = \beta_0 + \beta_1 INDUSSQ_{it} + \beta_2 TEC_{it} + \beta_3 URBAN_{it} + \beta_4 \ln TPB_{it} + \beta_5 FORINSQR_{it} + \beta_6 ENIN_{it} + \beta_7 INDUS_{it} + \beta_8 \ln GDP_{it} + \beta_9 \ln POPU_{it} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式(7)中 EE_{it} 为长江经济带中第*i*年第*t*年的生态效率, $\beta_j(j=1,2,\dots,11)$ 为参数, ε_{it} 为误差项。基于极大似然方法原理,本文通过计量软件Stata12.0得出Tobit模型回归结果如表9所示。

回归结果中除常数项外,都在5%的检验水平中通过了显著性检验。首先高技术产业主营业务收入水平与生态效率呈正相关关系,可见高技术产业的发展水平对生态效率的提高有推动作用,这一回归结果也佐证了长江经济带调整促进科技创新发展的重要性。工业结构,即第二产业在国民生产总值中所占的比重与生态效率呈负相关关系,表明第二产业比重的提升抑制了生态效率的提升,这主要是因为第二产业的资源消耗与环境污染远高于第一和第三产业。城镇化水平与生态效率的呈现出正相关关系,可见提高城镇化率,促进城镇化发展与提高生态效率并不矛盾。同时,能源消费总量和地区生产总值与生态效率呈正相关关系,可见提高地区经济发展水平与提高生态效率之间并不矛盾。地区就业人口总数与生态效率呈负相关关系,可见地区就业人口总数对地区生态效率有负效用,地区就业人口总数越多,地区人类经济活动的影响就越大,因此也会降低生态效率。在引进外资的过程中可能只注重经济增长,过分追求引进外资的数量而忽视了外商投资的质量,因此外商投资导致了“污染转移”,最终影响到地区生态效率的提高。

五、结论与建议

综合上述研究,可得出如下结论:(1)2004—2014年间长江经济带生态效率均值为0.710,略低于全国平均水平(0.716);(2)长江经济带11省市生态效率波动变化,并在2013年后呈现出发散趋势,省市间生态效率差异明显,长江上游省市生态效率较

表9 长江经济带11省市2004—2014年生态效率影响因素回归结果

ee	Coef.	Std. Err.	t	P>t	[95% Conf.Interval]
lntpb	0.0309257	0.0057943	5.34	0.000	0.0195259 0.0423254
indus	-0.1068501	0.0457124	-2.34	0.020	-0.1967848 -0.0169154
urban	0.0059184	0.0005493	10.77	0.000	0.0048377 0.0069991
forinsqr	-3.20e-09	1.46e-09	-2.19	0.029	-6.07e-09 -3.26e-10
emin	0.0000679	0.0000162	4.20	0.000	0.0000361 0.0000997
tec	8.17e-06	1.14e-06	7.14	0.000	5.92e-06 0.0000104
lngdp	0.0613922	0.024417	2.51	0.012	0.013354 0.1094304
lnpopu	-0.0986564	0.0307655	-3.21	0.001	-0.1591846 -0.0381283
_cons	0.1734762	0.0936933	1.85	0.065	-0.0108565 0.3578089

低,长江经济带 11 省市生态效率“追赶”效应较弱,地区生态效率差距缩小的可能性较小;(3) 产业结构、外商投资水平、地区就业人口总数对生态效率的提高有反向作用,而高技术产业主营业务收入、城镇化率、能源投资、能源消费总量、地区生产总值对生态效率的提高有着正向作用。

基于上述研究结论,提出如下政策建议:(1)采取措施重点提高长江经济带上游省市生态效率;(2)坚持改革创新,重点推动经济结构转型升级,促进产业结构调整,加快创新型经济发展,提高长江经济带 11 省市生态效率水平;(3)打破行政区域局限,推进长江上中下游协同发展,建立跨区域生态保护联动机制、补偿机制,落实好生态优先、绿色发展的战略定位,缩小长江经济带 11 省市地区生态效率差距;(4)在引进外资的过程中,既要注重经济增长,更关注外商投资的质量,对于污染严重的投资,不予承接,在保障地方生态环境的基础上积极引进外资,增加外商投资数量,承接产业转移,促进当地经济发展。

本文研究工作有待进一步深化拓展:在指标选取上,可进一步考察生态效率测度指标、影响因素指标是否还存在遗漏;在研究方法上,可尝试采用熵权法等其他方法,选出更为科学的生态效率测度方法;在分析过程中,可进一步考察综合生态效率的组成部分,即纯技术效率和规模效率地区差异和动态变化的情况。

参考文献:

[1] Schaltegger, Sturm. Okologische Rationalitat: Ansatzpunkte Zur Ausgestaltung Von Okologieorientierten Management Istrumenten [J]. Die Untemehmung, 1990, (4): 273-290.
 [2] 尹科,等.国内外生态效率核算方法及其应用研究述评[J].生态学报, 2012, (11): 3595-3605.
 [3] 谢琨.钢铁企业生态效率指标构建研究[A].中国会计学会环境会计专业委员会.中国会计学会环境会计专业委员会 2011 学术年会论文集[C].北京:北京大学出版社, 2012.
 [4] 吴小庆,等.基于 AHP 和 DEA 模型的农业生态效率评价——以无锡市为例[J].长江流域资源与环境, 2012, (6): 714-719.
 [5] 程晓娟,等.基于 PCA-DEA 组合模型的中国煤炭产业生态效率研究[J].资源科学, 2013, (6): 1292-1299.
 [6] 潘丹,等.中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析[J].生态学报, 2013, (12): 3837-3845.

[7] 张子龙,等.陇东黄土高原农业生态效率的时空演变分析——以庆阳市为例[J].地理科学, 2014, (4): 472-478.
 [8] 程翠云,等.我国农业生态效率的时空差异[J].生态学报, 2014, (1): 142-148.
 [9] 张炳,等.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[J].生态学报, 2009, (5): 2473-2480.
 [10] 吴小庆,等.基于生态效率理论和 TOPSIS 法的工业园区循环经济发展评价 [J]. 生态学杂志, 2008, (12): 2203-2208.
 [11] 刘巍,等.基于 DEA 的中国综合类生态工业园生态效率评价方法研究[J].中国人口、资源与环境, 2012, (S1): 93-97.
 [12] 芮俊伟,等.生态工业园区生态效率评估方法研究及应用 [J].生态与农村环境学报, 2013, (4): 466-470.
 [13] 孙玉峰,等.基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析[J].生态学报, 2014, (3): 710-717.
 [14] 刘晶茹,等.生态产业园的复合生态效率及评价指标体系 [J].生态学报, 2014, (1): 136-141.
 [15] 张炳,等.基于 DEA 的企业生态效率评价:以杭州湾精细化工园区企业为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (4): 159-166.
 [16] 黄和平,等.基于生态效率的资源环境绩效动态评估——以江西省为例[J].资源科学, 2010, (5): 924-931.
 [17] 黄和平.基于生态效率的江西省循环经济发展模式[J].生态学报, 2015, (9): 2894-2901.
 [18] 陈黎明,等.“两横三纵”城市化地区的经济效率、环境效率和生态效率——基于混合方向性距离函数和合图法的实证分析[J].中国软科学, 2015, (2): 96-109.
 [19] 陈傲.中国区域生态效率评价及影响因素实证分析——以 2000-2006 年省际数据为例[J].中国管理科学, 2008, (S1): 566-570.
 [20] 王宏志,等.基于超效率 DEA 的中国区域生态效率评价 [J].环境保护与循环经济, 2010, (6): 64-67.
 [21] 邓波,等.基于三阶段 DEA 模型的区域生态效率研究[J].中国软科学, 2011, (1): 92-99.
 [22] 游和远,等.基于数据包络分析的土地利用生态效率评价 [J].农业工程学报, 2011, (3): 309-315.
 [23] 潘兴侠,等.区域生态效率评价及其空间计量分析[J].长江流域资源与环境, 2013, (5): 640-647.
 [24] 崔玮,等.基于碳排放约束的城市非农用地生态效率及影响因素分析[J].中国人口、资源与环境, 2013, (7): 63-69.
 [25] 黄建欢,等.金融发展影响区域绿色发展的机理——基于生态效率和空间计量的研究[J].地理研究, 2014, (3): 532-545.
 [26] 成金华,等.中国生态效率的区域差异及动态演化研究[J].中国人口、资源与环境, 2014, (1): 47-54.
 [27] 关伟,等.中国能源生态效率的空间格局与空间效应[J].

- 地理学报,2015,(6):980-992.
- [28] 王恩旭,等.基于超效率DEA模型的中国省际生态效率时空差异研究[J].管理学报,2011,(3):443-450.
- [29] 张雪梅.西部地区生态效率测度及动态分析——基于2000—2010年省际数据[J].经济理论与经济管理,2013,(2):78-85.
- [30] 付丽娜,等.基于超效率DEA模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J].中国人口.资源与环境,2013,(4):169-175.
- [31] 汪克亮,等.基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究[J].资源科学,2015,(7):1491-1501.
- [32] 何宜庆,等.长江经济带金融集聚、经济增长与生态效率耦合协调实证分析[J].金融与经济,2015,(9):13-19.
- [33] 何宜庆,等.长江经济带生态效率提升的空间计量分析——基于金融集聚和产业结构优化的视角[J].生态经济,2016,(1):22-26.

(责任编辑:彭晶晶)

The Ecological Efficiency of the Yangtze River Economic Belt Based on PCA and DEA Modeling

DENG Ming-liang¹, WU Chuan-qing^{1,2}

(1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China; 2. Development Institute of the Yangtze River Economic Belt, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434100, China)

Abstract: In this paper, Yangtze River economic belt 11 provinces' eco-efficiency are analyzed based on the combination of PCA-DEA evaluation model; σ convergence method and absolute β convergence method are used to test the eco-efficiency's convergence; Tobit regression model is used to analyze those factors which affect the eco-efficiency of Yangtze River Economic Belt. The results show: the average eco-efficiency of the Yangtze River economic belt's 11 provinces is lower than the national average; there are regional differences in the Yangtze River economic belt 11 provinces' eco-efficiency, and there is a tendency to expand; the industrial structure, the level of foreign investment, the total number of employed population have reverse effects to eco-efficiency; high-tech industry's main business income, urbanization rate, energy investments, the total energy consumption and GDP ecological efficiency have a positive effect. Therefore, the Yangtze River economic belt 11 provinces should insist on putting ecological at the priority position, insist on the way of green development, insist on reform and innovation, focusing on the transformation and upgrading of economic structure, promoting the coordinated development of the whole Yangtze River Economic Belt, focusing on enhancing the eco-efficiency of the upstream provinces.

Key words: PCA-DEA modeling; Yangtze River economic belt; ecological efficiency