

长江经济带生态效率测度及分析¹

曹俊文，李湘德

(江西财经大学 统计学院，江西 南昌 330013)

【摘要】：基于 PCA-DEA 组合模型，对长江经济带 11 省市 2005-2015 年的生态效率进行评价，并测算生态效率收敛性以及对其影响因素进行分析。实证结果显示：长江经济带平均生态效率处于中等水平，下游水平高于整体平均水平；各省市之间追赶效应较弱，生态效率水平没有趋同，差距可能扩大；经济发展水平、外商投资、环境污染治理投资、技术进步与生态效率是正相关关系，而产业结构、地区就业人口总数与生态效率是负相关关系；促进产业结构的转型有利于生态效率的提升。

【关键词】：PCA-DEA 组合模型；长江经济带；生态效率；收敛性；Tobit 模型

【中图分类号】：F062.2 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1671-4407 (2018) 08-174-06

1、引言

长江经济带作为我国人口聚集密度较大的区域之一，得益于地理位置的优势，经济发展迅速。同时，工业化和城镇化的推进以及资源消耗型企业的增多，造成了自然资源约束加剧。长江经济带空气质量和水环境质量面临着逐渐恶化的趋势。在上海、杭州和南京三个城市构成的三角形区域，PM_{2.5} 浓度趋于增加，且有向其他区域扩展的趋势。2011-2013 年，全国每年有超过五分之二的废水排放量集中在长江经济带，每年的 COD 排放量占全国的三分之一以上，其中主要集中在长江经济带中下游省市。长江干流的省会城市几乎全部存在水资源严重污染的情况，其中还包括杭州、南通、黄石等较大城市。为了实现经济增长、资源充分利用、环境质量提升，必须坚持绿色发展、生态优先，实现经济、资源、环境三者的健康协调发展。提高长江经济带的生态效率对于实现区域可持续发展具有重要意义与价值。

2、文献综述

生态效率的概念是在 1990 年由德国学者 Schaltegger & Sturm^[1]提出来的，他们认为生态效率可以更加直观地显示出经济活动对环境的影响，可以兼顾两者的统一。世界可持续发展工商委员会（WBCSD）在 1992 年对生态效率的概念进行了扩展，即提升人们的生活质量，提供满足人类需要的竞价性商品和服务；提高资源利用效率，减少资源使用量，使资源消耗量在地球可以承载的水平上^[2]。1998 年，经济发展合作组织（OECD）扩大了生态效率的定义，生态效率是投入与产出的比值，以更少的资源实现更大价值的产出^[3]。

目前常用的生态效率评价方法主要有三种：单一比值法、指标体系法和模型法。单一比值法是一种简单有效的方法，但是具有明显的缺点，它必须将所有类型的环境影响都换算成一类具有相同特征的值，这样就会使得到的结果不是最优的比值；指标体系法是通过确定权重来表达研究对象之间的关系，通过加权让不同的指标都以数值的形式展现，但是这个过程往往会受到研究者的主观因素的影响，使得结果产生偏差；模型法中的数据包络分析模型是基于相对效率概念的非参数统计方法，可以对

¹【基金项目】：国家社会科学基金项目“我国 30 省区市碳足迹及省区间碳转移核算研究”（13BTJ024）

【作者简介】：曹俊文（1962-），男，江西九江人，博士，教授，研究方向为资源环境统计。E-mail: cjh6207@163.com

多个决策单元的技术效率进行评价,因而被国内外学者广泛采用。利用 DEA 对生态效率评价常用的模型有以下四种:超效率 DEA 模型、三阶段 DEA 模型、网络 DEA 模型和 PCA-DEA 组合模型,每种模型都有各自的优势。超效率 DEA 模型以传统 DEA 为基础,可以对有效的决策单元效率值进行进一步的比较分析,多用来处理决策单元的期望产出与非期望产生的问题;三阶段 DEA 模型是 DEA 和 SFA 相结合的方法,可以有效地消除外部因素和统计噪声的影响,使得决策单元的效率值更准确;网络 DEA 模型对并行结构系统中的过程进行分解,将分解的各个阶段单独作为一个投入产出体系进行分析;PCA-DEA 模型是主成分分析与 DEA 相结合的方法,通过降维的方式减少投入产出指标的数量,可以减少指标的关联性,保证评价结果更为准确。

目前我国对于生态效率的研究主要集中在对行业产业生态效率和区域生态效率方面。李南洁等^[4]对三峡库区的农业生态环境效率进行时间维度和空间维度分析,并通过影子价格分析了减少农业面源污染的难易程度。程晓娟等^[5]对中国煤炭行业的生态效率进行测度,并提出指导建议。付丽娜等^[6]对长株潭“3+5”城市群 2005-2010 年的生态效率进行测算,通过计算得出超效率值和 Malmquist 指数,对比 8 个城市的生态效率并考察了影响因素。汪克亮等^[7]对长江经济带工业生态效率及环境压力下工业生态效率进行测算,得到不同地区的 5 种指标的变化趋势,并进行收敛性和影响因素分析。杨文举和龙睿贇^[8]确定工业增加值及环境压力指标,通过面板数据计算了中国各省份的工业生态效率及前沿构成,并通过趋同分析确定省市之间是否存在追赶效应。邓明亮和吴传清^[9]基于 PCA-DEA 的组合模型评价了长江经济带 11 省市的生态效益,并对长江经济带生态效率进行收敛性检验。邓波等^[10]运用 DEA 模型建立了投入产出指标体系,用三阶段 DEA 方法对我国 2008 年区域生态效率进行研究,通过对各决策单元效率值和规模报酬进行对比并得出结论。张健等^[11]运用两阶段网络 DEA 模型对我国不同省份的生态效率进行评价,对划分的三大区域的生态效率进行分析。孙欣等^[12]通过构建长江经济带评价指标体系,计算 2003-2013 年各省的生态效率 Malmquist 指数,并测算了生态效率差异性及收敛性,反映了生态效率有协调发展的特征。刘钊和邓明亮^[13]运用 PCA-SE-DEA 模型对长江经济带的科技创新效率进行测算,通过收敛性检验区域之间存在的差异及动态演变规律,并考察了科技创新效率的影响因素。

本文以长江经济带为研究对象,对各省市 2005-2015 年的生态效率进行评价,采用 α 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,最后用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。

3、研究方法

3.1 数据包络分析 (DEA)

数据包络分析 (DEA) 是由美国著名运筹学家 Charnes 等^[14]在 1978 年提出的。在 DEA 中,若指标之间的相关性较大,会导致效率相对性的不突出。因此,本文构建的 PCA-DEA 组合模型,是在 PCA 的基础上,把大量具有相关性的原始变量线性组合成少量互不相关的综合指标,同时消除了原始变量中的信息重叠。在某些情况下,用锥性来描述生产可能集可能缺乏准确性,而 BCC 模型不考虑生产可能集满足锥性的情况,被应用于处理不同规模报酬情况下决策单元的相对效率值。本文将运用 BCC 模型来求解长江经济带各省市的生态效率。方程如下:

$$\begin{cases} \min[\theta - \varepsilon(\sum_{j=1}^m S_j^- + \sum_{r=1}^s S_r^+)] \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} + S_j^- = \theta x_{ij} \\ \sum_{j=1}^m \lambda_i x_{ir} - S_r^+ = y_{ir} \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \lambda_i \geq 0, S_j^- \geq 0, S_r^+ \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示决策单元， n 为决策单元的个数； j ($j=1, 2, \dots, m$) 表示输入变量， m 为输入变量的个数； r ($r=1, 2, \dots, s$) 表示输出变量， s 表示输出变量的个数； x_{ij} 为第 i 个决策单元的第 j 个投入要素， y_{ir} 为第 i 个决策单元的第 r 个产出要素； λ_i 表示投入产出指标权重； θ 为决策单元 DMU 的有效值； S^+ 和 S^- 表示松弛变量。若 $\theta=1$ ，且 $S^+=S^-=0$ ，则表示 DMU 为 DEA 有效；若 $\theta=1$ ，且 $S^+ \neq 0$ ，或 $S^- \neq 0$ ，则表示 DMU 为弱 DEA 有效；若 $\theta < 1$ ，则表示 DMU 为非 DEA 有效。

本文以 2005–2015 年中国 30 个省份（不包括西藏及港澳台地区）作为决策单元（decision making units, DMU），在整体的基础之上，对长江经济带的生态效率进行分析，可以更加直观地展示生态效率的动态演变。本文将资源消耗和环境污染作为投入指标，将各省份的国内生产总值作为产出变量，构建生态效率评价综合指标体系（表 1）。本文数据来源于相关年份的《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》以及各省份的《统计年鉴》。

表 1 生态效率评价综合指标体系

指标	类别	具体指标构成
投入指标	资源消耗	固定资本投入总量 (X_1)
		就业人口总数 (X_2)
		水资源消耗总量 (X_3)
		能源消耗总量 (X_4)
		土地利用总量 (X_5)
	环境污染	废气排放总量 (X_6)
		废水排放量 (X_7)
		化学需氧量排放量 (X_8)
		固体污染物排放量 (X_9)
产出指标	地区国内生产总值	地区 GDP

3.2 收敛性分析

本文运用 σ 收敛和绝对 β 收敛来检验各省份生态效率的收敛性， σ 收敛用于反映各省份生态效率的收敛情况，绝对 β 收敛用于检验生态效率增长速率是否出现追赶效应，各区域的生态效率是否趋同，是否达到一个稳定值。 σ 收敛的方程如下：

$$\sigma_t = \left\{ N^{-1} \sum_{i=1}^n \left[EE_i(t) - \left(N^{-1} \sum_{i=1}^n EE_i(t) \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中： N 为省份的数目， $EE_i(t)$ 是第 i 个地区在第 t 年的生态效率。若 σ 随着时间的推移而变小，则说明生态效率离散系数在降低，存在 σ 收敛；若 σ 随着时间的推移而变大，则说明生态效率离散系数在增高，存在 σ 发散。

根据 Sala-i-Martin^[16]的研究，可以用以下方程来表示年平均生态效率增长速率和基期生态效率的关系：

$$\frac{\ln(EE_{i,T}) - \ln(EE_{i,0})}{T} = \alpha + \beta \ln(EE_{i,0}) + \varepsilon \quad (3)$$

式中： $EE_{i,0}$ 和 $EE_{i,T}$ 分别表示第 i 个地区在基期和 T 时期的生态效率； $[\ln(EE_{i,T})-\ln(EE_{i,0})]/T$ 表示第 i 个地区从基期到第 T 期的年平均生态效率的增长速率； α 表示常数项； β 为基期生态效率 $\ln(EE_{i,0})$ 的系数； ε 表示随机误差。

若系数 $\beta < 0$ ，则表示各省份的生态效率初始值越大，生态效率增长率越小。生态效率初始值越小，生态效率增长率越大，两者成反比关系，即存在绝对 β 收敛，区域生态效率随时间推移逐步趋同；反之，若 $\beta > 0$ ，则不存在绝对 β 收敛，区域生态效率没有随时间的推移而达到趋同。

3.3 Tobit 模型

本文将计算出的长江经济带各省市生态效率定义为因变量，将其他可能存在的影响因素定义为自变量，建立回归模型，并通过计算得出的自变量的系数来分析影响因素的对生态效率的影响，即“二阶段分析法”。由于通过 DEA 得到的生态效率值属于受限的因变量，所以采用 Tobit 回归，具体模型如下：

$$Y_{it} = \begin{cases} \beta X_{it} + \mu_{it}, & \beta X_{it} + \mu_{it} > 0 \\ 0, & \beta X_{it} + \mu_{it} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中：下标 i 表示省市； t 表示年份； $\mu_{it} \sim N(0, \sigma^2)$ ； Y_{it} 为因变量； X_{it} 为自变量； β 为回归参数。

本文基于前文分析的结果，建立以长江经济带各省市生态效率为因变量，影响因素为自变量的 Tobit 面板计量模型，用以解决受限因变量的问题和考察影响因素对生态效率所产生的影响程度。本文选取地区经济发展水平（GDP）、产业结构（INDUS）、就业人口数量（POPUP）、外商投资（FORIN）、环境污染治理投资（EPIN）和技术进步（TEP）这六大影响因素，变量定义如表 2 所示。

表 2 长江经济带生态效率影响因素指标体系

影响因素	变量标签	变量含义
经济发展水平	GDP	地区生产总值
产业结构	INDUS	工业产值在 GDP 中所占比重
就业人口数量	POPUP	地区就业人口总数
外商投资	FORIN	港澳台商和外商投资总额
环境污染治理投资	EPIN	地区环境污染治理投资总额
技术进步	TEP	地区专利授权量

4、实证分析

4.1 松江经济带生态效率测度

本文基于 SPSS24.0 统计分析软件对各省市的投入指标进行主成分分析，所得结果如表 3 所示。

表 3 未旋转的因子载荷矩阵、特征值及累计贡献率

项目	成分	
	F ₁	F ₂
固定资本投入总量 (X ₁)	0.928	-0.182
就业人口总数 (X ₂)	0.904	-0.239
水资源消耗总量 (X ₃)	0.631	-0.452
能源消耗总量 (X ₄)	0.909	0.237
土地利用总量 (X ₅)	0.962	-0.001
废气排放总量 (X ₆)	0.749	0.625
废水排放量 (X ₇)	0.819	-0.406
化学需氧量排放量 (X ₈)	0.915	-0.105
固体污染物排放量 (X ₉)	0.504	0.825
特征值	6.151	1.597
贡献率/%	68.348	17.749
累计贡献率/%	68.348	86.097

通过计算得到长江经济带各省市投入指标的主成分得分，为使数据平滑，满足 DEA 模型数据的输入、输出要求，并且消除主成分得分存在负值的情况，运用极大值标准模型对数据进行无量纲处理，并得到新的投入产出指标和数据，计算公式如下：

$$F'_{ij} = \frac{0.1 + 0.9(F_{ij} - \min F_{ij})}{\max F_{ij} - \min F_{ij}} \tag{5}$$

式中：F_{ij}和F'_{ij}分别为处理前和处理后的值，maxF_{ij}表示每项指标中的最大值，minF_{ij}表示每项指标中的最小值。处理后的数据的取值范围是[0.1，1]，并且不会改变原本指标间的相关性。以 2015 年为例，在得到处理后的投入产出数据值之后，本文将运用 BCC 模型和 deap2.1 软件对长江经济带的生态效率进行求解，结果如表 4 所示。

表 4 2015 年中国 30 省份的生态效率

省份	PCA-DEA 组合模型			
	综合效率	纯技术效率	规模效率	规模收益变动情况
北京	1.000	1.000	1.000	—
天津	0.700	0.890	0.787	irs
河北	0.350	0.379	0.925	irs
山西	0.226	0.372	0.606	irs
内蒙古	0.313	0.436	0.719	irs
辽宁	0.417	0.428	0.974	irs
吉林	0.436	0.761	0.572	irs
黑龙江	0.349	0.741	0.470	irs
上海*	0.961	0.952	0.974	irs
江苏*	0.891	0.940	0.948	drs

浙江*	0.830	0.831	0.998	drs
安徽*	0.426	0.702	0.607	irs
福建	0.658	0.856	0.769	irs
江西*	0.417	0.727	0.573	irs
山东	0.626	0.707	0.886	drs
河南	0.480	0.555	0.865	irs
湖北*	0.560	0.766	0.731	irs
湖南*	0.544	0.788	0.691	irs
广东	1.000	1.000	1.000	—
广西	0.446	0.837	0.534	irs
海南	0.524	1.000	0.524	irs
重庆*	0.539	0.821	0.656	irs
四川*	0.503	0.670	0.751	irs
贵州*	0.356	0.683	0.522	irs
云南*	0.366	0.658	0.556	irs
陕西	0.445	0.634	0.702	irs
甘肃	0.298	0.736	0.404	irs
青海	0.333	0.741	0.450	irs
宁夏	0.336	0.801	0.419	irs
新疆	0.267	0.744	0.359	irs

注：综合效率=纯技术效率×规模效率；irs、—、drs 分别表不规模收益递增、不变、递减；上角标*表示的是长江经济带 11 省市的生态效率。

根据上述理论和方法，得到长江经济带 2005-2015 年的生态效率，结果如表 5 所示。长江经济带生态效率在上、中、下游具有显著差异，长江经济带下游平均生态效率最高，达到了 0.779，而中游和上游的平均生态效率分别为 0.484、0.411，生态效率分布不均衡。在长江经济带 11 省市之中，生态效率差异明显，其中上海的平均生态效率最高，均值为 0.970，浙江和江苏两省紧随其后，分别为 0.863、0.852，这三个省市的生态效率水平较高是因为资源利用率高，地区生产总值遥遥领先，这也和它们所处的地理位置和经济发展水平有很大关系；而贵州的生态效率最低，均值为 0.309，这是因为贵州地处内陆，山区较多，经济发展水平较低；江苏、湖北、湖南、重庆、贵州生态效率总体呈上升趋势，而云南的生态效率有所下降，其他省市的生态效率波动不大，基本维持平衡状态。

表 5 2005-2015 长江经济带 11 省市的生态效率

地区	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	均值
上海	0.997	0.985	0.970	0.943	0.972	0.954	1.000	0.974	0.957	0.952	0.961	0.970
江苏	0.794	0.781	0.796	0.820	0.833	0.860	0.888	0.907	0.902	0.895	0.891	0.852
浙江	0.868	0.859	0.851	0.849	0.847	0.880	0.894	0.886	0.876	0.858	0.830	0.863
安徽	0.440	0.422	0.414	0.407	0.413	0.430	0.452	0.451	0.454	0.443	0.426	0.432
下游平均	0.775	0.762	0.758	0.755	0.766	0.781	0.809	0.805	0.797	0.787	0.777	0.779
江西	0.405	0.405	0.404	0.407	0.403	0.419	0.444	0.443	0.437	0.435	0.417	0.420
湖北	0.491	0.480	0.503	0.506	0.527	0.535	0.551	0.561	0.558	0.568	0.560	0.531

湖南	0.445	0.442	0.447	0.468	0.472	0.498	0.536	0.550	0.549	0.561	0.544	0.501
中游 平均	0.447	0.442	0.451	0.460	0.467	0.484	0.510	0.518	0.515	0.521	0.507	0.484
重庆	0.478	0.462	0.445	0.452	0.464	0.463	0.514	0.521	0.517	0.537	0.539	0.490
四川	0.424	0.425	0.429	0.444	0.451	0.454	0.502	0.517	0.521	0.515	0.503	0.471
贵州	0.295	0.288	0.286	0.290	0.281	0.288	0.317	0.321	0.327	0.350	0.356	0.309
云南	0.416	0.397	0.385	0.380	0.377	0.378	0.355	0.326	0.366	0.376	0.366	0.375
上游 平均	0.403	0.393	0.386	0.392	0.393	0.396	0.422	0.421	0.433	0.445	0.441	0.411
区域 平均	0.550	0.541	0.539	0.542	0.549	0.560	0.587	0.587	0.588	0.590	0.581	0.565

注：在测算全国的生态效率之后，将长江经济带的生态效率提取出来单独成表。

4.2 松江经济带生态效率的收敛性分析

根据各省市生态效率测算的结果来看，省际之间的生态效率存在较为明显的差异，需要对生态效率动态演变情况进行深入分析，从而判断生态效率能否达到趋同。

本文对长江经济带整体和上、中、下游生态效率进行收敛性分析，根据式（2）可以得到长江经济带整体和上、中、下游生态效率的σ收敛值，如表6和图1所示。2005-2008年，σ收敛值有所降低，长江经济带各省市生态效率离散系数减小，省市之间的差异缩小；2008-2011年，σ收敛值变大，长江经济带各省市生态效率离散系数增大，省市之间的生态水平差异化明显；2011-2014年，σ收敛值再次减小，长江经济带省市之间的生态效率差异缩小；但在2014-2015年，生态效率差异有所扩大。在上、中、下游的结果中，下游的σ收敛值最大，安徽的生态效率低于其余三个省市；中游的σ收敛值最低，省市之间的差异较小；上游的σ收敛值略高于中游，也呈现缓缓上升的趋势；上、中、下游生态效率的σ收敛值都呈上升趋势，各省市之间生态效率的差距会有一定程度上的扩大。总而言之，长江经济带生态效率的σ收敛值没有呈现明显的收敛趋势，省市之间生态效率的差异有可能会扩大。

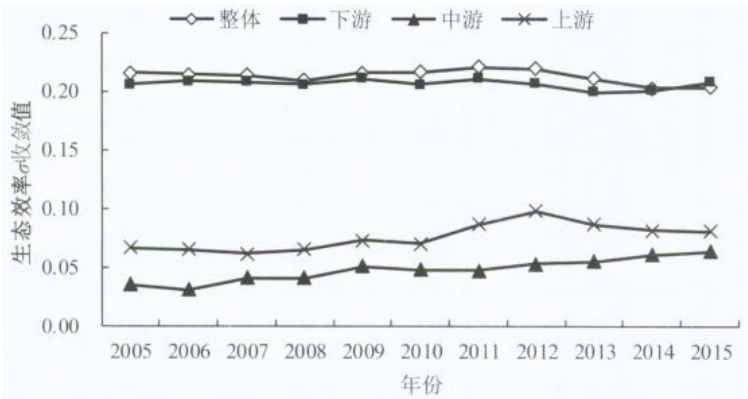


图1 2005-2015年长江经济带生态效率σ收敛结果图

表6 2005-2015 长江经济带生态效率σ收敛值

地区	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
----	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

整体	0.216	0.215	0.214	0.210	0.216	0.217	0.221	0.220	0.211	0.203	0.204
下游	0.206	0.209	0.208	0.206	0.211	0.206	0.211	0.207	0.200	0.201	0.208
中游	0.035	0.031	0.041	0.041	0.051	0.048	0.047	0.053	0.055	0.061	0.064
上游	0.067	0.065	0.062	0.065	0.073	0.070	0.087	0.098	0.087	0.082	0.081

绝对 β 收敛用于检测长江经济带 11 省市中生态效率落后的省市是否对生态效率较高的省市存在追赶效应，从而判断生态效率水平是否趋同。根据本文前面的分析结果，利用式（3）进行求解，绝对 β 收敛的回归结果如表 7 所示。参数 β 的值约为-0.10976，在 95%的置信水平上没有通过 t 检验，这表明生态效率低的省市对生态效率高的省市的追赶效应较弱，各省市生态效率有可能会拉开差距，这与 σ 收敛结果一致。

表 7 2005-2015 年长江经济带生态效率绝对 β 收敛回归结果

参数	系数	标准误	t 统计量	P 值	95%的置信区间	
α	-0.00810	0.06993	-0.11582	0.91033	0.16630	0.15010
β	-0.10976	0.09266	-1.18461	0.26651	-0.31937	0.09984

4.3 长江经济带生态效率影响因素分析

本文基于前文分析的结果，建立 Tobit 面板计量模型，Tobit 模型回归方程如下：

$$EE_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 INDUS_{it} + \beta_3 \ln POPU_{it} + \beta_4 FORIN_{it} + \beta_5 EPIN_{it} + \beta_6 TEP_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中： EE_{it} 是长江经济带中第 i 个省市第 t 年的生态效率， β_j （j=1, 2, ..., 6）是变量的系数， ε_{it} 是随机误差项。本文利用 Stata 软件，运用极大似然法得出 Tobit 模型的回归结果如表 8 所示。

表 8 2005-2015 年长江经济带生态效率影响因素 Tobit 回归结果

参数	系数	标准误	t	$P> t $	95%的置信区间	
lnGDP	0.18114	0.02068	8.76	0.000	0.14017	0.22210
INDUS	-0.01151	0.00208	5.54	0.000	-0.01563	-0.00739
lnPOPU	-0.25275	0.02177	-11.61	0.000	-0.29589	-0.20962
FORIN	0.00013	0.00002	5.56	0.000	0.00008	0.00017
EPIN	0.00065	0.00011	-5.96	0.000	0.00043	0.00086
TEP	8.94E-07	3.20E-07	2.79	0.006	2.60e_07	1.53e_06
常数项	0.40646	0.216618	1.88	0.063	-0.02262	0.83554

根据表 8 的结果，除常数项外，其余参数均通过了置信水平为 95%的显著性检验。经济发展水平和生态效率呈正相关关系，说明提高地区生产总值与提高生态效率是可以同时实现的，两者不冲突。产业结构对生态效率有负效应，即工业产值所占 GDP

的比重和生态效率呈负相关关系，主要是工业产值比重的增加会导致资源消耗的增加和污染物产量的增力口，从而降低了生态效率。就业人口数量对生态效率存在负效应，地区就业人口越多，则对经济活动的影响就越大，因而对生态效率有抑制作用。外商投资的增加在一定程度上可以影响生态效率的增加，影响程度不是很明显。环境污染治理投资对生态效率有提升作用，原因可能是环境治理提高了资源利用率，降低了污染物的排放量，进而提高了生态效率。技术进步对于生态效率有正效应，不过影响程度比较低，可能是专利并不能马上就应用到经济活动之中，转化为实用的技术需要一定的时间。

5、结论与建议

本文运用 PCA-DEA 组合模型测算了 2005-2015 长江经济带 11 省市及上、中、下游地区的生态效率，并用收敛和绝对收敛方法来检验生态效率的敛散性，最后通过 Tobit 模型对生态效率的影响因素进行考察。研究结论如下：（1）2005-2015 长江经济带生态效率平均值为 0.565，下游地区生态效率均值最高，其次是中游地区，上游地区生态效率效率最低。（2）从时间变化趋势来看，长江经济带及其上、中、下游地区的生态效率呈现波动性变化，各省市之间的差异比较明显，生态效率较低省市对生态效率较高省市的追赶效应比较弱，省际之间的差距可能会继续扩大。（3）经济发展水平、外商投资、环境污染治理投资、技术进步这几个方面和生态效率是正相关关系，而产业结构、地区就业人口总数这两方面和生态效率是负相关关系。

根据上述结论，为实现长江经济带各省市生态效率的提高，提出如下政策建议：（1）应改变传统的产业结构，实现经济结构的转型；坚持改革创新，摒弃粗放型的经济增长方式；发展无污染的绿色环保型经济，同时加强生态系统保护，综合治理环境污染问题；建立起水资源保护与生态环境保护制度，督促企业更新生产设备，控制污染物的排放量。（2）出台政策加大对绿色新能源企业的扶持力度，逐步用绿色新能源代替化石能源，从源头上减少化石能源的使用，降低污染物的排放。（3）打破地域概念，加大各省市之间的经济合作与交流，生态效率较高的省市可以把先进的技术和经验传授给其他省市，以生态优先、绿色发展为目标，实现各省市协同发展；建立生态补偿制度，通过资金补偿、对口协作、产业转移、人才培养、共建园区等方式建立横向补偿关系，制定补偿标准，推动区域之间资源与经济的协调发展。（4）在引进外资的时候，避免污染严重的投资，要做到统筹兼顾，在保护生态环境的前提下，引进外资，避免污染转移。（5）重点针对长江经济带中、上游地区，加大环境污染治理投资，实现节能减排，并大量发展和应用新型技术，促进技术的进步，促进地区经济发展，实现生态效率的提高，降低各省市之间的差距。

[参考文献]:

[1]Schaltegger S, Sturm A.Okologische rationalitat: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von okologieorientierten managementinstrumenten[J].Die Untemehmung, 1990, 44 (4) : 273-290.

[2]WBCSD .Eco-efficient leadership for improved economic and environmental performance[R].Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 1996 .

[3]OECD. Eco-efficiency[R]. Paris : Organization for Economic Cooperation and Development, 1998 .

[4]李南洁, 肖新成, 曹国勇, 等. 面源污染下三峡库区农业生态环境效率及影子价格测算[J]. 农业工程学报, 2017 (11) : 203-210.

[5]程晓娟, 韩庆兰, 全春光. 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]付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 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.

-
- [7]汪克亮, 孟祥瑞, 杨宝臣, 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.
- [8]杨文举, 龙睿赞. 中国地区工业的生态效率测度及趋同分析: 2003-2010 年[J]. 经济与管理, 2013 (7) : 12-18.
- [9]邓明亮, 吴传清. 基于 PCA-DEA 组合模型的长江经济带生态效率研究[J]. 经济研究, 2016 (5) : 58-66.
- [10]邓波, 张学军, 郭军华. 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.
- [11]张健, 杨佳伟, 崔海洋. 基于网络 DEA 模型的我国区域生态效率评价研究[J]. 软科学, 2016 (8) : 15-19.
- [12]孙欣, 赵鑫, 宋马林. 长江经济带生态效率评价及收敛性分析[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2016 (5) : 1-10.
- [13]刘钊, 邓明亮. 基于改进超效率 DEA 模型的长江经济带科技创新效率研究[J]. 科技进步与对策, 2017 (23) : 48-53.
- [14]Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operation Research, 1978, 2 (6) : 429-444.
- [15]Sala-i-Martin X X. The classical approach to convergence analysis[J], Economic Journal, 1996, 106 (437) : 1019-1036.