

基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究

汪克亮¹, 孟祥瑞, 杨宝臣², 程云鹤

【摘要】：长期粗放型的工业增长模式给中国生态环境造成巨大压力，已经引起了社会各界的广泛关注。作为一种新型的衡量经济、资源与环境协调度的指标，生态效率可以体现某个经济单元在生产产品或提供服务的同时最大限度的减少自然资源消耗与环境污染排放（环境压力）的一种能力，反映了经济增长、资源节约与环境保护之间的平衡关系。本文选择工业用水总量、工业煤炭消费量、工业COD排放量以及工业SO₂排放量作为环境压力代表性指标纳入DEA分析框架之中，实证测算2006-2012年长江经济带11个省市的5类工业生态效率（IEE）指标值，并考察IEE的地区差异与动态演变特征，采用 σ 收敛与绝对 β 收敛两种收敛分析方法检验IEE的收敛性，建立Tobit面板回归模型分析长江经济带IEE的影响因素。结果表明，长江经济带的IEE整体水平不高，资源节约与污染减排空间巨大；不同地区IEE差异特征明显且不存在明显的收敛趋势；经济发展水平、工业结构、工业能源消费结构、外资利用、政府环境规制力度对长江经济带及其上、中、下游地区的IEE均有一定影响，但影响的力度、方向以及显著性存在差异。

【关键词】：环境压力；工业生态效率；收敛；长江经济带；Tobit回归模型

1 引言

作为中国第一、世界第三大河的长江，干流全长6 300km，横贯中国东中西三大地带，连接东部沿海与广袤的内陆地区，总流域面积达到180万km²，占全国国土面积的19%。依托长江黄金水道打造的长江经济带，覆盖了上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、贵州、四川、重庆、云南9省2市，承载的总人口达到6亿，是目前世界上可开发规模最大、影响范围最广的内河流域经济带。2013年，长江经济带GDP总量为25.95万亿元，占全国的41.2%；在中国城市GDP的排名中，长江经济带内的城市占据50强中的20个席位。经过多年建设，长江经济带现已是中国经济密度最高、发展潜力最大的区域之一，并有望继沿海经济带之后成为中国新的经济支撑带与增长极。2014年3月，李克强总理在政府工作报告中明确提出“要依托黄金水道，建设长江经济带”，正式将长江经济带建设提升至国家战略层次。然而，在取得巨大经济建设成就的同时，长江经济带生态环境也正面临严重威胁。随着工业化与城镇化进程不断推进，沿江地区的火电、钢铁、石化等资源环境密集型工业飞速发展，能源资源与水资源约束进一步加剧，环境质量也在不断下降。长江下游部分城市江段已经出现了严重的污染带，鄱阳湖、太湖等流域水体富营养化趋势日渐严重，已影响到周边城市的生活供水。由于大量排放SO₂、氮氧化物等污染气体，长江经济带的大气环境也在持续恶化，现已形成了以重庆与南昌为中心的两大酸雨区，给各地工业、农业及古建筑造成重大损失。特别是近年来，长江中下游部分区域的灰霾天数已达100天/年以上，个别城市甚至超过200天/年，给人民群众身体健康和生产生活造成严重影响。由于中国正处于工业化、城市化加速推进阶段，实体经济仍将在很长时间内由工业部门来支撑，而工业生产是当前中国资源环境约束趋紧、生态系统严重恶化的主要根源。从某种程度上来说，转变经济发展方式首要就是转变粗放型工业增长模式^[1]。在此背景下，本文基于长江经济带9省2市的工业产值、自然资源消耗与污染排放数据，计算和分析各地区工业生态效率，定量测度各地区工业增长与资源、环境的协调度，对于实现长江经济带工业增长模式转型与区域可持续发展具有重要理论与实践价值。

收稿日期：2014-11-04；**修订日期**：2015-03-22

基金项目：国家自然科学基金项目（71403003，71473001）；国家社会科学基金项目（14BJL105）；教育部人文社会科学研究青年基金项目（13YJC790136）；中国博士后科学基金项目（2014M551787，2015T80643）；安徽省哲学社科规划项目（AHSK11-12D107）；安徽省软科学项目（1402052043，1302053056）。

作者简介：汪克亮，男，安徽枞阳人，博士后，副教授，硕士生导师，主要从事资源经济与环境管理研究。E-mail: kllwang@163.com

1. 安徽理工大学资源与环境经济研究所，安徽 232001

2. 天津大学管理与经济学部，天津 300072

近年来，一种基于“标杆管理（Benchmarking）”与数据包络分析（Data Envelopment Analysis, DEA）的生态环境效率测度方法得到了广泛应用。这种方法的优势主要在于可以内生生成环境效率评价指标的权重，而无需设定生产函数的具体形式，整个评价过程不受人为因素干扰，客观性很强。Zhang等将污染物作为投入要素，并构造多种DEA模型对中国各省份的工业生态效率进行了测算^[2]。涂正革运用DEA模型考察中国各省份的工业环境技术效率，衡量环境、资源与地区工业增长的协调性，并采用计量回归模型分析地区工业环境技术效率差异性的形成原因^[3]。吴军通过基于DEA的Malmquist-Luenberger指数测算了环境约束下中国各省份的工业全要素生产率，并对其收敛特征进行了检验^[4]。王兵等运用方向性距离函数与Malmquist-Luenberger指数计算了环境约束下中国各省份的工业技术效率、全要素生产率指数和环境规制成本，并对其影响因素进行了实证分析^[5]。庞瑞芝等基于DEA方法与SBM方向性距离函数对中国各省份工业部门的新型工业化增长绩效进行了核算，并从区域发展战略与产业结构政策维度考察了新型工业化增长绩效的时空变化规律^[6]。董敏杰等基于SBM模型与Luenberger指标测算了中国各省份的环境全要素生产率，并基于要素投入与污染治理视角对其进行分解^[7]。汪克亮等基于DEA模型与共同前沿理论测算了中国各省份的绿色经济效率，并将绿色经济无效率分解为“技术差距无效率”与“管理无效率”^[8]。Meng等采用非径向DEA模型分别构建了静态与动态环境绩效指数，用于测算中国各省份的工业环境效率^[9]。Wang等采用改进的DEA模型测算了中国各省份的工业能源环境效率与节能减排潜力，并估算了二氧化碳减排的边际成本^[10]。上述文献均表明运用DEA方法测度生态环境效率的可行性与有效性，为本文研究方法的选择提供了导向。

然而，上述研究的不足之处主要有两方面：①多数文献在测算生态环境效率时均是利用DEA模型最终得到一个综合指数，以此来反映资源环境利用水平，而没有在一个共同框架之下单独对某一种资源的利用或污染的排放效率指数进行测算；②已有研究基本上都是将资本、劳动这两种常规生产要素作为投入变量纳入到效率模型之中，这样做虽然能够切实反映实际生产过程的特点，但经济单元资本与劳动生产率的提升都会被看作是资源环境效率改善的一部分，因而效率测度结果并不能反映自然资源节约与环境保护绩效的真实水平，而只是各类资源（包括资本、劳动等）综合利用能力的一种体现。

本文试图弥补上述不足，将工业自然资源消耗与环境污染排放视为“环境压力”，来表征工业生产所付出的环境代价，以长江经济带11省市的工业为研究单元，在DEA理论框架下测算2006-2012年长江经济带各省市工业生态效率，考察其地区差异性与演进特征，采用面板Tobit模型检验地区工业生态效率的敛散性与影响因素，以期为长江经济带制定与实施有针对性的资源环境政策提供决策依据。

2 研究方法

2.1 工业生态效率DEA测算框架

借鉴Picazo等、Camarero等的做法^[11, 12]，本文将工业生态效率定义为工业产值与环境压力的比值，其中“环境压力”定义为经济单元在工业生产过程中的自然资源消耗或环境污染排放。假定有 $k = 1, \dots, K$ 个单元，工业产值为 v ，同时产生了 $n = 1, \dots, N$ 种环境压力 $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ ，则工业产值与环境压力的所有可能组合，称之为“环境压力产生技术（Pressure Generating Technology, PGT）”，即：

$$PGT = \{(v, p) \in R_+^{1+N} | \text{产生工业产值 } v, \text{ 必然伴随环境压力 } p\} \quad (1)$$

则工业生态效率可以定义为：

$$AIEE_k = v_k / \sum_{n=1}^N w_n p_{nk} \quad (2)$$

式中AIEEk 为经济单元k的工业生态效率，公式（2）的分母为环境压力综合指数，将其定义为各种环境压力值的加权平均，其中 w_n 为第n 种环境压力指标的权重。

根据 Korhonen 等、Kuosmanen 等研究成果^[13, 14]，本文利用 DEA 方法来测度地区工业生态效率。在规模报酬不变（CRS）假定下，第 k' 个地区的工业生态效率可以由线性规划计算得到：

$$\begin{aligned} \text{Min } AIEE_{k'} &= \theta_{k'}^* \\ \text{s.t. } v_{k'} &\leq \sum_{k=1}^K z_k v_k; \theta_{k'} p_{nk'} \geq \sum_{k=1}^K z_k p_{nk} \\ z_k &\geq 0; n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (3)$$

式中的 $\theta_{k'}^*$ 即为地区 k' 的整体工业生态效率（AIEE），表明在维持工业产值不变的前提下，各类环境压力同比例减少所能达到的最小值。由于未考虑投入产出松弛，公式（3）中的整体生态效率 $AIEE_{k'} = \theta_{k'}^*$ 仅为径向视角的生态效率。若考虑松弛对效率结果的影响，则可以得到地区 k' 的第 n 类环境压力指标的最优值为：

$$\begin{aligned} EP_{nk'} &= p_{nk'} - [(1 - \theta_{k'}^*) \cdot p_{nk'} + s_{nk'}^p] \\ &= \theta_{k'}^* \cdot p_{nk'} - s_{nk'}^p \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $s_{nk'}^p$ 表示第 n 类环境压力指标的投入松弛。基于公式（4），可以获得地区 k' 的基于每种环境压力指标的工业生态效率，即“Pareto-Koopmans 工业生态效率”为：

$$PIEE_{nk'} = \frac{EP_{nk'}}{p_{nk'}} = \theta_{k'}^* - \frac{s_{nk'}^p}{p_{nk'}} \quad (5)$$

2.2 工业生态效率收敛性分析方法

根据研究需要，本文将使用 σ 收敛与绝对 β 收敛这两种收敛分析方法来检验2006–2012年长江经济带工业生态效率的敛散性特征。

（1）沿袭曾先锋等、袁晓玲等所采用的方法^[15, 16]，本文对于长江经济带工业生态效率的 σ 收敛分析可以用下述方程来表示：

$$\sigma_i = \left\{ N^{-1} \sum_{i=1}^N \left[IEE_i(t) - \left(N^{-1} \sum_{i=1}^N IEE_i(t) \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

式中 $IEE_i(t)$ 为第 i 个地区在 t 时期的工业生态效率； N 为省份的个数。当 $\sigma_{t+1} < \sigma_t$ 时，说明各地区 IEE 的离散系数在缩小，存在 σ 收敛，反之则是发散的。

（2）根据Sala-i-Martin的研究^[17]，得到地区IEE的绝对 β 收敛回归方程：

$$\left[\ln(IEE_{i,T}) - \ln(IEE_{i,0}) \right] / T = \alpha + \beta \ln(IEE_{i,0}) + \varepsilon \quad (7)$$

式中 $IEE_{i,T}$ 和 $IEE_{i,0}$ 分别为基期和 $t=T$ 时期第 i 个地区的工业生态效率指数； $[\ln(IEE_{i,T}) - \ln(IEE_{i,0})] / T$ 表示从第 i 个地区从 $t=0$ 时期到 $t=T$ 时期的年均IEE 增长率； α 为常数项； β 为基期工业生态效率 $\ln(IEE_{i,0})$ 的系数； ε 为随机误差项。若系数 β 为负数，则意味着各地区IEE 的增长率与其初始水平呈反向关系，存在绝对 β 收敛，即IEE 的增长与IEE 的初始值成反比，落后地区存在“追赶”先进地区的趋势；反之则不存在绝对 β 收敛。

2.3 Tobit模型

在测算得到长江经济带各省市的 IEE 之后，将 IEE 定义为因变量，将其他影响因素定义为自变量，建立计量经济模型以分析 IEE 的影响机理，即所谓的“两阶段分析法”^[18]”。由于 IEE 的取值范围在 0-1 之间，是受限制的，属于“受限因变量”。在这种情况下，如果仍然采用普通最小二乘法会带来参数估计量的有偏与不一致。为此，本文采用 Tobit 模型，该模型是对部分连续分布和部分离散分布的因变量提出的一种计量经济模型，可以用于解决受限或截断因变量建模问题，其具体形式为：

$$Y_k = \begin{cases} X_k\beta + \mu_k, & \text{当 } X_k\beta + \mu_k > 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

式中 Y_k 为受限因变量； X_k 为自变量； β 为待估计的参数向量； $\mu_k \sim N(0, \sigma^2), k = 1, 2, \dots$ 。可以证明，当采用极大似然法对Tobit模型进行估计时，得到 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 是原参数的一致估计量^[19]。

3 实证分析

3.1 研究区选择、变量选取与数据来源

基于数据的可得性，本文研究的时间跨度为2006-2012年。将长江经济带划分为上游、中游与下游三大地区。其中上游地区为四川、贵州、重庆与云南4个省市，中游地区包括安徽、江西、湖北与湖南4 个省份，下游地区为上海、江苏、浙江3 个省市。

在构建工业生态效率测度模型时，本文选取4类具有代表性的环境压力指标，分别为工业用水总量、工业煤炭消费总量、工业COD排放总量以及工业SO2排放总量，并将其作为投入变量；以各省市工业总产值作为产出变量，并使用工业品出厂价格总指数将其平减为2005年不变价。

本文实证分析数据来自《中国统计年鉴》^[20]、《中国能源统计年鉴》^[21]与《中国环境统计年鉴》^[22]。描述统计特征如表 1 所示。

表1 样本投入产出变量描述统计特征					
Table 1 Descriptive statistics of sample's input and output variables					
	工业煤炭 消费总量 /万吨标煤	工业用 水总量 /亿m³	工业COD 排放量 /万吨	工业SO₂ 排放量 /万吨	工业 总产值 /亿元
最小值	835.84	18.38	1.30	19.34	666.14
最大值	8 542.90	225.25	37.78	131.20	24 618.90
平均值	3 399.12	75.85	14.29	65.94	5 632.58
标准差	1 655.08	47.66	8.99	23.73	4 729.44

3.2 长江经济带工业生态效率时空差异分析

为了避免由于当期决策单元数目较少出现线性规划无解这一问题,并能实现工业生态效率的横向与纵向比较,本文选择窗口分析法(WindowAnalysis)来构造生产前沿面^[23-25],将窗口宽度定为2,测算得到2006-2012年长江经济带各省市的整体工业生态效率(AIEE)与每种环境压力视角下的工业生态效率(PIEE),分别为工业水生态效率(W-IEE)、工业煤炭生态效率(C-IEE)、工业COD生态效率(COD-IEE)、工业SO₂生态效率(S-IEE)。不同省市、地区、种类的工业生态效率指标的具体测算结果以及其变化趋势、地区差异特征如图1-图6所示。

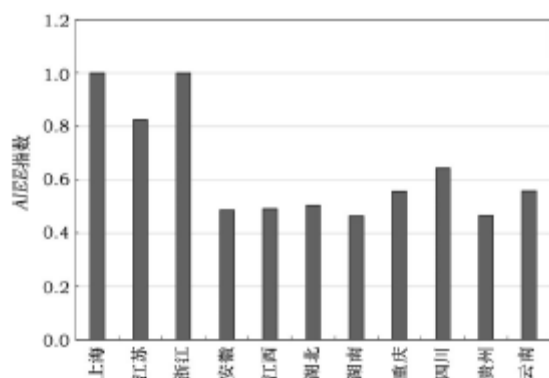


图1 2006-2012年长江经济带各省市AIEE平均值
Figure 1 Average AIEE of each province of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

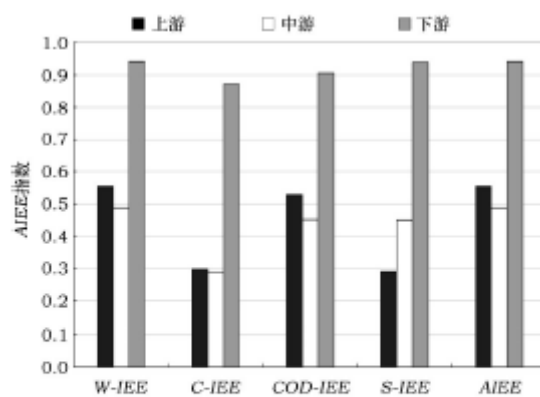


图2 2006-2012年长江经济带不同地区IEE平均值
Figure 2 Average IEE of different sub-regions of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

图1显示,2006-2012年间长江经济带11个省AIEE均值为0.636,表明在维持既定工业产出下,4种环境压力指标均可以在原有基础上减少36.412%,资源节约与污染减排空间巨大,凸显了长江经济带工业增长与资源环境不协调这一事实。图2显示,长江上、中、下游的AIEE均值分别为0.556、0.487和0.942,下游最高,其次为上游,中游最低,地区差异性较强。由图1可知,下游地区的上海、浙江、江苏三省牢牢占据了经济带内AIEE前3名的位置,其中上海与浙江的AIEE值一直为1,江苏的AIEE均值也在80%以上,说明下游地区工业增长与资源环境的协调度较高,主要是由于长江下游位于东部沿海,地理位置优越,是中国对外开放的前沿,容易吸收国外先进的生产技术与管理模式,工业生产过程中的资源消耗与污染排放相对较少,而中上游位于内陆,不具备区位优势,外资吸引力弱,经济基础薄弱,生产技术落后,自主创新能力偏低,环境保护不力,再加上长期地方保护主义盛行导致市场分割,生产要素与先进技术无法有效实现跨区域转移,工业增长所付出的资源环境代价较大。相比于上游,中游AIEE更为低下,主要是由于中游的安徽、江西、湖北、湖南4个省份长期以来一直是中国制造业与能源供应基地,工业结构欠合理,资源环境密集型产业比重过高,工业增长方式粗放,同时这些省份也是东部沿海高耗能、高污染产业转移的首选之地,无疑会加重它们的节能减排与工业环保负担,带来了较低的工业生态效率。从图1得知,2006-2012年间,AIEE平均值最低的省份为中游地区的湖南省,只有0.465。

从单一环境压力指标角度,如图3所示,样本期内W-IEE、C-IEE、COD-IEE、S-IEE等4类工业生态效率的均值分别为0.636、0.451、0.604与0.526,其中W-IEE值与AIEE值相同,也相对最高,这契合了径向DEA模型关于IEE的定义,即各环境压力指标同比例压缩的最小值。由于COD-IEE与W-IEE、C-IEE与S-IEE之间均是密切相关的1),本文测算结果也表明长江经济带煤炭资源利用水平是低于水资源利用水平的。由图4可知,下游的上海与浙江两省市样本期内的每个年份都位于效率前沿之上,其4类环境压力IEE值在11省市中均是最高的,是被“追赶”的对象,而上游的贵州与中游的湖南两省表现相对最差,其中湖南的W-IEE与COD-IEE是最低的,分别为0.465与0.431,而贵州的C-IEE与S-IEE最低,为0.105与0.090,表明这两省工业增长伴随了大量的资源消耗与环境污染,工业增长与资源、环境是极不协调的。由图2可知,除S-IEE外,其它3类IEE

指标基本上都呈现出“中游-上游-下游”逐渐增高的态势，这意味着中游比上游面临更为严峻的资源环境形势，与前文结论基本一致。

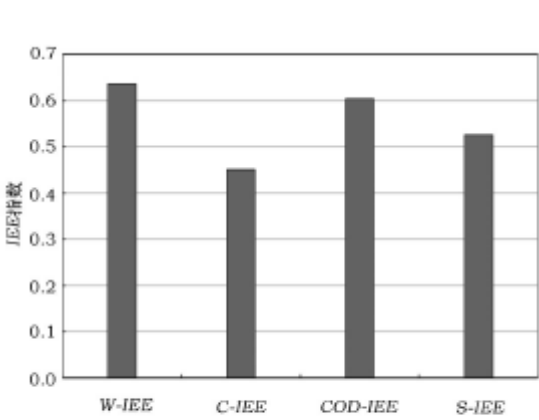


图3 2006-2012年长江经济带 IEE 平均值
Figure 3 Average IEE of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

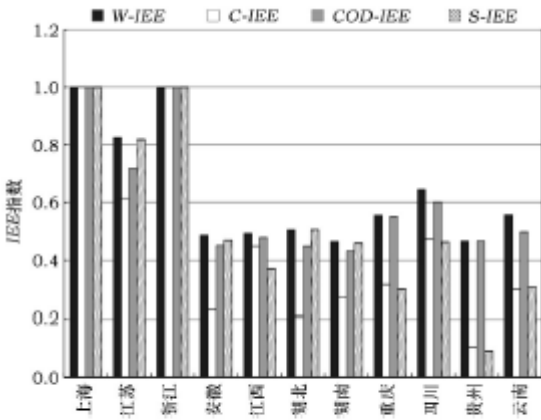


图4 2006-2012年长江经济带各省市各IEE平均值
Figure 4 Average IEE of each province of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

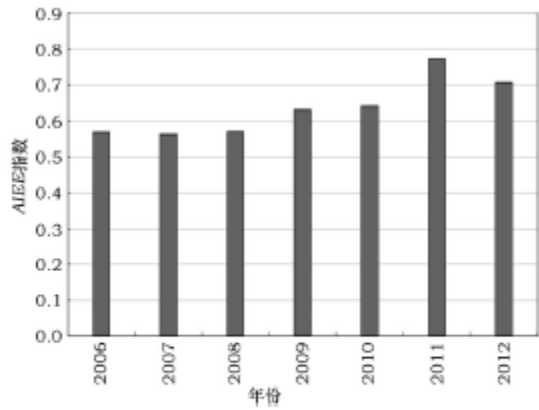


图5 2006-2012年长江经济带AIEE的变化趋势
Figure 5 Tendency of AIEE of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

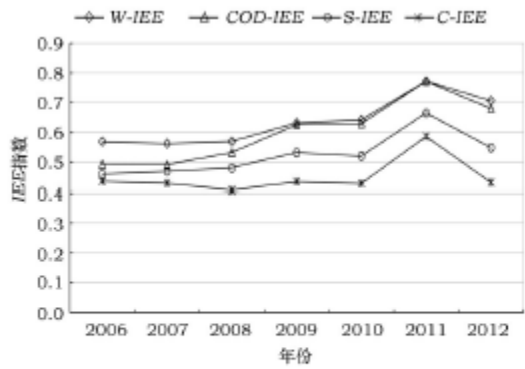


图6 2006-2012年长江经济带各IEE的变化趋势
Figure 6 Tendency of each IEE of Yangtze River Economic Zone from 2006 to 2012

从动态变化趋势来看，如图5所示，样本期内长江经济带AIEE波动较为频繁，但整体上依然是上升的，从2006年的0.569波动上升至2012年的0.707，在2011年的升幅最大，但在2012年又出现明显回落，这种较为频繁的波动特征预示了AIEE未来演变趋势的不确定性，说明长江经济带的资源环境保护形势不容乐观，相关政策力度需进一步加强。再来看其它IEE 指标，根据图6可知，4类环境压力IEE指标的变化轨迹与AIEE 基本类似，在2011年效率都明显提升，而在2012年均显著下降。在4类IEE中，煤炭工业生态效率C-IEE 整体上是下降的，从2006年的0.436下降到2012年的0.432，而其它3类IEE 指数都在上升。长期以来，煤炭一直占据了我国工业能源消耗的绝大部分比例，同时燃煤也是中国环境问题产生的主要根源。鉴于长江经济带C-IEE 整体水平较低且出现下降态势这一事实，建议相关决策部门在制定政策时应进一步向提升工业煤炭利用水平方面倾斜，这对于改善工业生态效率至关重要。

最后，再从不同地域层面考察各 IEE 指标的演变趋势。由表 2 可知，2006-2012 年间长江上、中、下游的 AIEE 都在提升，升幅分别为 50.646%、32.649%与 3.366%，中上游 IEE 增幅远大于下游，这一方面是由于下游一直接近效率前沿面，提升空间有限所致，另一方面也表明近年来长江中上游资源节约与环境保护工作是富有成效的。如前所述，三大地区 W-IEE 的变化轨迹与 AIEE 是保持一致的。长江中游与下游的 C-IEE 的升幅分别为 14.056%和 4.767%，而上游的 C-IEE 是下降的，降幅达到 25.490%，因此工业煤炭利用水平的提高是下一阶段长江上游各省市环保工作的重心所在。考察期内，长江经济带三大地区的 COD-IEE 整体上都处于上升通道，上、中、下游的 COD-IEE 的提升幅度分别为 40.625%、80.757%与 14.423%，在 4 类环境压力 IEE 中的增幅是最大的，表明近年来长江沿岸水资源保护工作成效显著，长江水质状况在不断改善。

表 2 2006-2012 年长江经济带上中下游工业生态效率的动态变化趋势

Table 2 Tendency of IEE of Yangtze River Economic Zone 's three sub-regions from 2006 to 2012									
AIEE	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
下游		0.921	0.931	0.930	0.963	0.949	0.944	0.952	0.942
中游		0.387	0.394	0.411	0.490	0.501	0.645	0.583	0.487
上游		0.487	0.453	0.456	0.525	0.551	0.771	0.646	0.556
W-IEE	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
下游		0.921	0.931	0.930	0.963	0.949	0.944	0.952	0.942
中游		0.387	0.394	0.411	0.490	0.501	0.645	0.583	0.487
上游		0.487	0.453	0.456	0.525	0.551	0.771	0.646	0.556
C-IEE	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
下游		0.860	0.830	0.843	0.890	0.890	0.887	0.901	0.872
中游		0.249	0.248	0.252	0.301	0.276	0.410	0.284	0.289
上游		0.306	0.312	0.237	0.228	0.236	0.538	0.228	0.298
COD-IEE	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
下游		0.832	0.826	0.878	0.963	0.949	0.944	0.952	0.906
中游		0.317	0.319	0.364	0.476	0.469	0.645	0.573	0.452
上游		0.416	0.413	0.442	0.525	0.551	0.771	0.585	0.529
S-IEE	年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均
下游		0.921	0.931	0.930	0.963	0.935	0.944	0.951	0.939
中游		0.357	0.369	0.388	0.460	0.459	0.610	0.513	0.451
上游		0.220	0.223	0.238	0.281	0.272	0.511	0.284	0.290

三大地区的 S-IEE 整体也趋于上升态势，升幅分别达到 29.091%、43.698%与 3.257%。结果再次表明，长江经济带工业水资源利用效率是优于煤炭的，与前文静态分析结果一致。

3.3 长江经济带工业生态效率的收敛性检验

由前文分析可知，长江经济带工业生态效率的地区差异特征非常明显，那么这种地域差异性的演化趋势如何？不同地区各省市的工业生态效率能否最终达到一致呢？为了回答这个问题，本文对长江经济带2006-2012年间工业生态效率的敛散特征进行分析。根据公式（6）可以计算得到2006- 2012年间长江经济带整体及其上中下游地区AIEE 与C-IEE的 σ 收敛结果1）如图7所示。

由图 7 所知，无论是 AIEE 还是 C-IEE 在样本期内都不存在明显的收敛态势， σ 值在 2011 年出现最大值，这意味着各省市之间的 IEE 差距并没有缩小。同时也发现不同地区的敛散特征有所差异。根据 σ 值大小，长江下游 3 省市间的 IEE 差距是最大的，这主要是由于江苏的 IEE 显著低于上海与浙江（均为 1）所致；中游各省份间的 AIEE 差距相对最小，但 σ 值呈现波

动上升趋势，意味着中游各省市间 AIEE 差距在逐渐扩大；上游各省市间的 AIEE 差距位于下游与中游之间，但最近两年 σ 值上升态势明显，各省市间的 AIEE 差距存在扩大态势。C-IEE 在不同地区范围内的敛散特征与 AIEE 相近，也都没有出现显著的收敛特征。整体而言，无论是长江经济带整体还是上中下游三大地区，AIEE 与 C-IEE 都未呈现较为明显的收敛特征，各省市间 IEE 差距有可能会继续扩大。

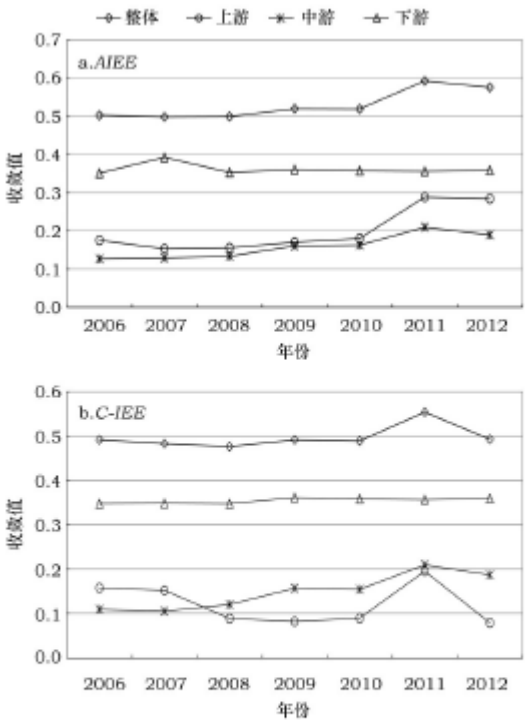


图7 2006–2012年长江经济带及其三大地区AIEE与C-IEE的 σ 收敛结果

Figure 7 σ convergence result of AIEE and C-IEE of Yangtze River Economic Zone and its three sub-regions from 2006 to 2012

绝对 β 收敛分析主要用来考察各省市 IEE 是否向相同的稳定值趋同，也就是研究 IEE 较低的省市是否存在对较高省市的“追赶”效应。从表3的检验结果来看，5类 IEE 方程回归系数虽然均为负，但是都没有通过5%水平下的显著性检验，这意味着5类 IEE 指数都没有出现明显的绝对 β 收敛趋势，落后省市对先进省市的“追赶”效应较弱，各省市 IEE 之间的差距有继续被拉大的危险，这与 σ 收敛分析结论一致。

表3 长江经济带5类工业生态效率指数的绝对 β 收敛检验结果

Table 3 Absolute β convergence results of 5 kinds of IEE of Yangtze River Economic Zone

	AIEE	W-IEE	C-IEE	COD-IEE	S-IEE
常数项	-0.018 (0.534)	-0.018 (0.534)	-0.028 (0.239)	-0.036 (0.423)	0.010 (0.640)
β 系数	-0.082* (0.057)	-0.082* (0.057)	-0.029 (0.118)	-0.105* (0.053)	-0.023 (0.176)
R^2	0.346	0.346	0.249	0.356	0.193

注：“***”、“**”、“*”分别代表1%、5%与10%的显著性水平，括号内为 p 值。

从政策角度来看，两类收敛检验均表明长江经济带目前正在实行的资源环境政策并没有明显缩小落后省市与先进省市 IEE 间的差距。为了改善这种局面，必须要加强经济带内省市间的技术交流合作与经济融合，消除地方保护主义与市场分割，让下游先进的生产技术与管理模式能够顺利向中上游转移扩散，同时中央政府也应加大对中上游资源环境领域的人力、资金与技术方面的投入，制定政策时应进一步向中上游倾斜，以防止各省市间 IEE 差距继续被拉大。

3.4 长江经济带工业生态效率的影响因素分析

在实证测算长江经济带各省市IEE基础上，本文将采用两阶段分析法，以省际AIEE指数为因变量，效率影响因素为自变量建立面板计量经济模型考察工业生态效率的影响因素及其作用机制。由于IEE值处于0和1之间，属于受限因变量，因此本文选择Tobit面板计量回归模型进行分析。根据经验分析与已有研究成果，本文选择5种影响因素：经济发展水平、工业结构、工业能源消费结构、外资利用水平与政府环境规制力度。各变量的定义、单位与影响系数的预期符号如表4说明，计量回归所涉及到的变量数据来源于历年《中国统计年鉴》[20]、《中国能源统计年鉴》[21]、《中国对外经济统计年鉴》^[26]以及国家统计局环保专题数据^[27]，相关变量数据均以2005年不变价格进行了调整，以此保持各变量统计口径一致性。

表4 各影响因素的定义、单位以及预期符号

Table 4 Definition, unit and expected symbol of each influencing factor

影响因素	变量简称	定义及单位	预期符号
经济发展水平	GDP	地区生产总值比地区总人口/(万元/人)	正
工业结构	INDUS	重工业产值比地区工业生产总值/%	负
工业能源消费结构	IECS	地区工业煤炭消费总量比地区工业能源消费总量/%	负
外资利用水平	FDI	地区实际利用外商直接投资比地区生产总值/%	未知
环境规制力度	ER	地区工业污染治理投资比地区生产总值/%	正

本文建立的长江经济带各省市整体工业生态效率（AIEE）与其各影响因素的 Tobit 面板计量经济模型的具体表达如下：

$$AIEE_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 INDUS_{it} + \beta_3 IECS_{it} + \beta_4 FDI_{it} + \beta_5 ER_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中AIEE_{it} 分别为长江经济带整体以及长江上、中、下游地区第i 个省市第t 年的整体工业生态效率指数；β_j（j = 1, 2, ..., 5）为待估计的参数；ε_{it} 为随机干扰项。借助Eviews软件，通过极大似然估计方法得出Tobit模型的回归结果如表4所示。

根据表5给出的Tobit回归结果可知：

- （1）经济发展对长江经济带整体及其上、中、下游地区的AIEE有显著促进作用，四个方程的回归系数在5%的检验水平下均很好地通过了显著性检验，这表明地区经济发展与人均收入水平的提高对AIEE 改善有积极作用。从经验上来看，较高的人均收入水平也与当地的员工素质、生产水平以及技术条件也高度正相关，这些条件的具备为提升长江经济带AIEE 提供了资金、人才与技术等方面的有力保证。
- （2）无论是长江经济带整体还是三大地区，工业结构对 AIEE 提升都有明显抑制作用。四个方程系数均为负，并在 5%的检验水平都通过了显著性检验，表明重工业比重的提升抑制了长江经济带 AIEE 的提高，这是由于重工业的资源消耗与环境污染远高于轻工业的缘故。因此，重型化的工业结构必然会带来巨大的资源环境压力，从而导致工业生态效率下降。
- （3）工业能源消费结构对长江经济带整体及三大地区的AIEE影响均显著为负，意味着工业煤炭消费比重的增加对于改善

AIEE是不利的，这与理论预期结果保持一致。中国的资源禀赋特点是“富煤、少油、贫气”，长期以来煤炭一直是中国工业能源消费中最主要的组成部分，这种状况在未来相当长时期内将无法改变。作为一种典型的低质、低效能源，过度利用煤炭不仅导致资源大量浪费，同时也对生态环境质量造成严重破坏。

（4）外资利用水平对长江经济带工业生态效率的影响机制较为复杂。从表5可以看出，外资利用对长江上游和中游AIEE 的影响在5%检验水平下不显著，只对下游地区的AIEE有显著改善作用。这表明外资引入对长江经济带AIEE 的影响存在不确定性，正向效应不明显，在一定程度上支持了“污染避难所”假说。近些年来，长江中上游一些省份为了追求经济增长，过分注重引进外资的数量，忽视了质量，没有合理设置外资进入门槛，导致“污染转移”，这一事实也支持了本文的回归结果。

表 5 长江经济带工业生态效率影响因素的 Tobit 回归结果

Table 5 Tobit regression result of influencing factors of Yangtze River				
Economic Zone's AIEE				
变量	整体	上游	中游	下游
常数项	1.845*** (0.000)	1.907*** (0.000)	1.425*** (0.000)	1.532*** (0.000)
lnGDP	1.736*** (0.008)	1.136*** (0.000)	1.902*** (0.009)	1.071*** (0.000)
INDUS	-1.098*** (0.000)	-0.654** (0.037)	-1.658*** (0.000)	-0.403** (0.042)
IECS	-0.091*** (0.000)	-0.197*** (0.000)	-0.215** (0.036)	-0.063** (0.017)
FDI				0.329** (0.025)
ER	-0.232** (0.027)	0.113** (0.034)		-0.176*** (0.009)
R ²	0.741	0.697	0.724	0.732
F	48.032***	44.409***	42.704***	50.310***

注：“***”、“**”分别代表1%、5%显著性水平,括号内为p值。

（5）政府环境规制对长江经济带AIEE的影响也具有不确定性，回归系数符号有正有负。由表5可知，加大环境规制力度并不利于改善长江经济带AIEE，回归系数在5%水平下显著，下游也出现类似的回归结果，只对上游AIEE 有促进作用，与理论预期是矛盾的。究其原因，一方面，加大环境规制力度会倒逼企业更新生产设备与工艺，采用更加环保的方式进行生产，促进了AIEE的提高；另一方面，由于本文选择各省市工业污染治理投资占地区GDP比重作为环境规制代理变量，而往往AIEE越低的地区，污染治理投资力度也就越大，从而使得AIEE 与环境规制力度出现反向变化关系，但这种关系仅体现在数量上，而非理论上。本文回归结果是上述两方面因素共同作用所致。如果能找到更为合理的环境规制代理变量，相信应该会得到与理论分析相一致的结果。

4 结论与启示

本文在DEA理论框架下，将工业生产中的自然资源消耗与污染排放视为“环境压力”，并将其作为投入指标，运用窗口分析方法测算了2006-2012年间11个省市的5类工业生态效率，考察各类IEE 的地区差异性与演变特征，采用 σ 收敛与绝对 β 收敛分析方法检验了IEE 的收敛性，最后通过运用Tobit模型分析检验AIEE的影响因素。研究结论显示：

（1）2006-2012年间长江经济带的AIEE 均值为0.636，在稳定既定工业产值的前提下，还可以在减少近35%以上的资源消耗与污染排放。

(2) 长江上中下游地区的IEE 也存在较大差异, 下游最高, 其次为上游, 中游表现最差, 其中上海与浙江的5类生态效率指标都处于11个省市中的最优位次。

(3) 从时间变化趋势来看, 样本期内长江经济带及其上中下游地区的5类IEE 指数都出现了不同程度的上升, 但波动性较强, 上升趋势没有延续性。

(4) σ 收敛与绝对 β 收敛检验均发现, 长江经济带IEE 没有出现明显的收敛态势, 不同省市间的IEE差距存在进一步扩大的可能性。

(5) 根据Tobit模型的回归结果, 发现经济发展水平、工业结构、工业能源消费结构、外资利用水平以及政府环境规制力度对长江经济带及其上、中、下游三大地区的AIEE均有一定的影响, 但是不同因素影响的显著性、方向以及程度存在差异性。

本文结论蕴含了丰富的政策启示:

(1) 要改变传统依靠资源消耗与污染排放的粗放型工业增长方式, 摒弃GDP竞标赛模式, 不断提升长江经济带内各省市的经济增长质量。新一轮长江经济带的开发建设必须要坚持改革创新, 不能再走重化工、港口建设以及岸线资源利用的老路, 而应将重点放在经济结构的转型升级方面, 发展创新型经济, 同时加强生态系统修复与综合治理, 建立起严格的水资源与生态环境保护制度, 加大环境规制力度, 有效控制工业能源消费与污染排放总量, 实现工业增长与环境保护之间的最佳平衡。

(2) 要打破行政区域局限, 破除地区保护主义与条块分割, 促进长江经济带内各省市之间的产业与经济融合, 明确各省市功能定位, 对长江经济带发展实施统一管理, 促进产品、要素资源自由流动, 使得下游先进的生产技术与管理经验能向中上游扩散转移, 形成沿海省市与内陆省市之间相互支撑、良性互动的新局面。

(3) 要优化长江经济带特别是中上游各省市的工业结构与能源结构, 发展高新技术产业与服务业, 降低重工业比重, 淘汰落后产能, 改变传统资源环境密集型的生产方式, 走新型工业化道路, 加大非煤能源消费比重, 大力发展水电、风能、太阳能等可再生能源, 进一步提高资源效率, 尤其是工业煤炭利用效率。

(4) 在引进外资时须要设置资源环境“红线”, 避免成为发达国家的“污染避难所”, 中上游地区在承接下游产业时, 要做到统筹兼顾, 防止污染迁移。

[参考文献] (References) :

[1] 庞瑞芝, 李鹏. 中国新型工业化增长绩效的区域差异及动态演进[J]. 经济研究, 2011, (11): 36-48.

[2] Zhang B, Bi J, Fan Z, et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach[J]. Ecological Economics, 2008, 68 (3): 306-316.

[3] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008, 2 (3): 93-105.

[4] 吴军. 环境约束下中国地区工业全要素生产率增长及收敛分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2009, (11): 17-27.

[5] 王兵, 王丽. 环境约束下中国区域工业技术效率与生产率及其影响因素实证研究[J]. 南方经济, 2010, (11): 3-19.

-
- [6] 庞瑞芝, 李鹏, 路永刚. 转型期间我国新型工业化增长绩效及其影响因素研究-基于“新型工业化”生产力视角[J]. 中国工业经济, 2011, (4): 64-73.
- [7] 董敏杰, 李钢, 梁泳梅. 中国工业环境全要素生产率的来源分解-基于要素投入与污染治理的分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2012, (2): 3-20.
- [8] 汪克亮, 杨力, 程云鹤. 异质性生产技术下中国区域绿色经济效率研究[J]. 财经研究, 2013, 39 (4): 57-67.
- [9] Meng F Y, Fan L W, Zhou P, et al. Measuring environmental performance in China' s industrial sector with non-radial DEA[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58 (5-6): 1047-1056.
- [10] Wang K, Wei Y M. China' s regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs[J]. Applied Energy, 2014, 130: 617-631.
- [11] Picazo-Tadeo A J, Reig-Martinez E, Gomez-Limon J A. Assessing farming eco-efficiency: A data envelopment analysis approach[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92 (4): 1154-1164.
- [12] Camarero M, Castillo J, Picazo-Tadeo A J, et al. Eco-efficiency and convergence in OECD countries[J]. Environmental Resource Economics, 2013, 55 (1): 87-106.
- [13] Korhonen P J, Luptacik M. Eco-efficiency analysis of powerplants: An extension of data envelopment analysis[J]. European Journal of operational Research, 2004, 154 (3): 437-446.
- [14] Kuosmanen T, Kortelainen M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9 (4): 59-72.
- [15] 曾先锋, 李国平. 我国各地区的农业生产率与收敛: 1980-2005[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25 (5): 81-92.
- [16] 袁晓玲, 张宝山, 杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国工业经济, 2009, (2): 76-86.
- [17] Sala-I-Martin X. The classical approach to convergence analysis[J]. The Economic Journal, 1996, 106 (437): 1019-1036.
- [18] Coelli T J, Rao D S, Battese G E. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [19] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [20] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2013.
- [21] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2013.

[22] 国家统计局. 中国环境统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2013.

[23] Avkiran N K. Decomposing technical efficiency and window analysis[J]. Studies in Economics and Finance, 2004, 22 (1) : 61-91.

[24] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. 中国工业经济, 2010, (1): 45-54.

[25] 王亚华, 吴凡, 王争. 交通行业生产率变动的Bootstrap-Malmquist指数分析(1980-2005) [J]. 经济学季刊, 2008, 7 (3) : 891-913.

[26] 国家统计局. 中国对外经济统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2013.

[27] 国家统计局. 全国年度统计公报[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/ndtjgb/>.