

文章编号:2095-6134(2015)04-0520-08

# 基于 PCA-DEA 模型的中国省际生态效率研究\*

王 敏, 张晓平<sup>†</sup>

(中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

(2014 年 8 月 3 日收稿; 2015 年 3 月 5 日收修改稿)

Wang M, Zhang X P. Regional eco-efficiency evaluation of China based on PCA-DEA model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015,32(4):520-527.

**摘 要** 利用 PCA-DEA 模型对中国 2004—2012 年 30 个省市区的生态效率进行综合测评. 结果表明:1)2 种模型得出中国总体生态效率综合平均值分别为 0.760 和 0.581,相对效率较低;自 2011 年以来有显著提升,且规模效率逐渐向技术效率转变;2)省际生态效率差异明显,但有缩小的趋势;3)东部地区的生态效率最高,但内部差异也最大,整体上东中西部地区内部差异有扩大趋势;4)省区“投入—产出”模式的划分,有助于因地制宜采取不同的政策导向,逐步提高区域社会经济发展的生态效率.

**关键词** 生态效率; PCA-DEA 模型; 区域差异

**中图分类号**:F124; F205      **文献标志码**:A      **doi**:10.7523/j.issn.2095-6134.2015.04.014

## Regional eco-efficiency evaluation of China based on PCA-DEA model

WANG Min, ZHANG Xiaoping

(College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to evaluate eco-efficiency of every province in China from 2004 to 2012, PCA-DEA model was applied. We found that the average of Chinese relative eco-efficiency was low and had no significant change mainly due to technical inefficiency, but the scale efficiency had shifted to technical efficiency since 2011. Although the eco-efficiency disparities between different provinces were obvious, the disparities had decreasing tendency. In contrast, regional disparity of eco-efficiency in the east region tends to expand. Accordingly, policy incentives are suggested to improve the regional eco-efficiency.

**Key words** eco-efficiency; PCA-DEA model; regional variation

可持续发展已成为世界各国未来发展目标,生态效率(eco-efficiency)则成为在不同层次上落实该目标的一个重要切入点<sup>[1]</sup>. 1990 年 Schaltegger 和 Sturm<sup>[2]</sup>首次提出生态效率的概念,即增加的价值与增加的环境影响的比值. 生态效率概念是通过世界可持续发展工商业联合会(WBCSD)在 1992 年出版的著作——《改变航向:一个关于发展与环境的全球商业观点》<sup>[3]</sup>被广泛

\* 中国科学院 STS 计划项目(KFJ-EW-ST5-003, KFJ-EW-ST5-089)资助  
<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: zhangxp@ucas.ac.cn

地认识和接受。1998 年,世界经济合作与发展组织(OECD)将这个概念扩大到政府、工业企业以及其他组织<sup>[4]</sup>。当前,生态效率的实质是损耗最少的资源,减少环境污染,以获得更多的输出。

生态效率包括环境效率(EE)和资源效率(RE)。比率(the rate approach)和前沿面(the frontier approach)的方法经常用于生态效率的估算<sup>[5]</sup>。具体的计算是以经济价值与环境影响比值的方式为主,例如单位经济输出的环境变化或者单位成本的环境改善等<sup>[6]</sup>。目前普遍接受的计算公式是由 WBCSD 提出的:生态效率 = 产品或服务的价值/环境影响<sup>[7]</sup>。然而,一个指标无法反映出生态效率<sup>[8]</sup>。Mickwitz 等<sup>[9]</sup>提出对生态效率的估计应该从多维的综合指标出发,但问题在于如何给予指标恰当的权重,并避免主观因素影响加权过程。为了解决这个问题,很多学者采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法研究区域中要素的多投入和多产出。例如杨斌<sup>[10]</sup>通过 DEA 分析方法对 2000—2006 年中国区域生态效率进行研究分析;张炳等<sup>[11]</sup>将物质流分析和数据包络分析相结合,测度江苏省的生态效率;周景博和陈妍<sup>[12]</sup>在 DEA 模型基础上评价中国各省市的环境效率水平;程晓娟等<sup>[13]</sup>运用 DEA 方法对中国煤炭产业生态效率进行了分析。

但是 DEA 方法受测量误差的限制,即统计噪声(测量误差)的影响<sup>[14]</sup>。此外,DEA 模型的决策单元数量通常意义上是投入和产出变量个数之和的 2 倍以上。若样本量不够大,且变量间存在较强相关性,压缩变量会造成系统信息不被客观反映。鉴于此,主成分分析方法(principal component analysis, PCA)可从 2 个方面弥补上述缺点:一是能够提取众多指标中的重要信息;二是能够减少模型对真实数据在测量上造成的误差,因此在指标筛选上得以广泛运用<sup>[15]</sup>。

综上,将 PCA 和 DEA 分析方法相结合可以取长补短,国外基于 PCA-DEA 模型的研究和应用领域比较广<sup>[16-17]</sup>。但就国内而言,将 PCA-DEA 模型应用于测评生态效率的定量研究还不是很多。此外,基于近年数据的研究成果较少,不利于决策分析和指导。鉴于此,本文尝试运用 PCA-DEA 模型对 2004—2012 年中国省际生态效率进

行静态和动态、整体和局部测评,以期发现中国生态效率现状,为区域发展提供可参考的建议。

## 1 研究方法

### 1.1 主成分分析法(PCA)

1933 年 Hotelling<sup>[18]</sup>将主成分分析法(PCA)推广到随机变量的应用。它是基于差异性原理,为减少丢失的信息,通过原始变量的线性组合形成新的变量,选取变差总信息中比例较大且独立的主成分来分析事物的一种方法。该方法确定的权重不受主观因素的影响,经 PCA 分析后,按照得分高低得到综合性评价,结果具有客观性和准确性,在综合评价中广泛运用<sup>[13-15]</sup>。

### 1.2 数据包络分析(DEA)

数据包络分析是 1978 年运筹学家 Charnes 等<sup>[19]</sup>在“相对效率评价”基础上发展起来的一种新的系统分析方法。DEA 以相对效率概念为基础,把众多的决策单元(DMU)看成评价群体,借助投入-产出比率对 DMU 的相对有效性进行评价。从本质上讲它是一个系统的“投入-产出”运行效率的评价模型,处于效率前沿面上的 DMU 效率值为 1。

目前最具有代表性的是 CCR-DEA 模型和 BCC-DEA 模型。BCC-DEA 模型基于 DMU 生产规模可变,将前者中的综合技术效率分解为纯技术效率和规模效率<sup>[20]</sup>,可判断造成 DMU 无效的源头。此外,BCC-DEA 模型可分为投入导向型和产出导向型。区域间生态效率的评价是期望消耗最少的生态资源获得最大的经济效益。投入导向型是指在产出不变的情况下尽可能减少资源投入以提高效率<sup>[13]</sup>。因此本文采用投入导向型的 BCC-DEA 模型,具体模型<sup>[21]</sup>如下:

假设有  $n$  个 DMU,每个 DMU 都有  $m$  种投入(表示对“资源”的消耗)以及  $s$  种产出(资源消耗的成果), $X_{ij}$ 和  $Y_{rj}$ 分别表示第  $j$  个决策单元 DMU 的第  $i$  种投入和第  $r$  种产出, $\lambda_j$ 为  $n$  个 DMU 的投入-产出指标权重, $\sum_{i=1}^n X_{ij}\lambda_j$ 和  $\sum_{i=1}^n Y_{rj}\lambda_j$ 为加权后的 DMU 的投入量和产出量:

$$\begin{cases} \min [\theta - \varepsilon (\sum_{i=1}^n S_i^- + \sum_{i=1}^n S_i^+)] \\ \sum_{i=1}^n X_{ij} \lambda_j + S_i^- = \theta X_{ij}, i \in (1, 2, \cdots, m) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n Y_{rj} \lambda_j - S_i^+ = y_{rj}, r \in (1, 2, \cdots, s) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \theta, \lambda_j, S_i^-, S_i^+ \geq 0, j = 1, 2, \cdots, n \end{cases}$$

假设  $\theta^*, \lambda^*, S^{*+}, S^{*-}$  为模型的最优解,则利用 DEA 判断决策单元有效法则:1)若  $\theta^* = 1$  且  $S^{*+} \neq 0$  或  $S^{*-} \neq 0$ ,代表 DMU 至少为弱 DEA 有效;2)若  $\theta^* = 1$  且  $S^{*+} = S^{*-} = 0$ ,代表 DMU 为 DEA 有效;3)若  $\theta^* < 1$  或  $S^{*+} \neq 0, S^{*-} \neq 0$ ,代表相应的 DMU 为 DEA 无效.

### 1.3 基于主成分分析的数据包络组合评价(PCA-DEA 模型)

在 DEA 中,若投入指标具有较强的相关性,将会导致决策单元在有效生产前沿面上比较集中,并且产生多个有效决策单元,效率的“相对性”不突出,导致决策意义的丧失.鉴于此,本文在建立省际生态效率综合评价体系后,在 PCA 模型基础上减少变量相关性,提取主成分,形成综合投入-产出指标,并代入 DEA 模型中进行决策单元相对有效性的比较和评价,具体流程如下(图 1).

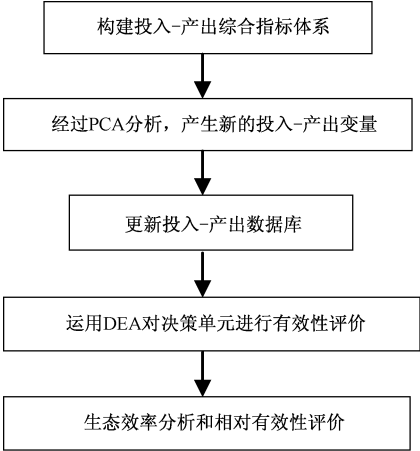


图 1 基于 PCA-DEA 模型省际生态效率评价流程图  
Fig.1 Evaluation process of PCA-DEA

## 2 中国省际生态效率评价指标

### 2.1 研究指标

本文选取中国 2004—2012 年 30 个省市区(西藏除外)作为 DMU.由于生态效率包括资源效率和环境效率,具体体现在资源消耗和环境污染程度上;同时借鉴诸大建和邱寿丰<sup>[22]</sup>、杨斌<sup>[10]</sup>、陈晓娟等<sup>[13]</sup>构建的生态效率综合指标体系,将资源消耗和环境污染作为投入指标,把地区的经济水平作为产出指标,构建中国省际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《中国环境统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及中国环境统计公报等.

表 1 中国省际生态效率评价综合指标体系  
Table 1 Comprehensive index system of regional eco-efficiency evaluation

指标	类别	具体指标构成	内容
投入指标	环境污染	废水排放	废水排放量( $X_1$ )、化学需氧量( $X_2$ )
		废气排放	SO <sub>2</sub> 排放量( $X_3$ )、烟尘排放量( $X_4$ )
		固废排放	工业固体废物产生量( $X_5$ )
	资源消耗	能源消耗	能源消耗总量( $X_6$ )
		水资源消耗	用水总量( $X_7$ )
		土地资源消耗	城市建成区面积( $X_8$ )
产出指标	经济发展水平	经济发展总量	地区 GDP( $Y$ )

### 2.2 数据处理

首先对中国省市区 9 年投入和产出指标的平均水平进行 Pearson 相关性检验,发现除  $X_4$ (烟尘排放量)和  $X_5$ (工业固体废物产生量)外,其余变量都有较强的相关性.按照特征根大于 1 的原则,提取出 2 个主成分(贡献率达 85.351%).利用旋

转后的主成分系数向量乘以对应指标标准化的数据,得到中国省际生态效率 9 年间投入指标 2 个主成分得分.为使数据平滑,并满足 DEA 模型的输入输出数据不为负数,将主成分得分进行极大值标准化处理,得到的 2 个输入指标和 1 个输出指标,即为 DEA 模型最终的投入-产出指标.

3 实证结果分析

3.1 PCA-DEA 模型和 DEA 模型的实证对比

在 PCA 分析过程中发现,第 1 主成分以资源

消耗为主,第 2 主成分则为环境损耗. 为直观比较 DEA 模型和 PCA-DEA 模型输出结果的差异性,本文将 8 个投入 1 个产出和 PCA 筛选后得到的 2 个投入 1 个产出分别代入 BBC-DEA 模型中,得到 2004—2012 年中国总体生态效率评价结果(表 2).

表 2 2004—2012 年 DEA 和 PCA-DEA 模型下中国总体生态效率的比较

年份	DEA 模型			PCA-DEA		
	TE	PTE	SE	TE	PTE	SE
2004	0.760	0.806	0.943	0.581	0.664	0.888
2005	0.769	0.824	0.932	0.557	0.659	0.862
2006	0.774	0.827	0.935	0.556	0.656	0.864
2007	0.777	0.829	0.935	0.544	0.653	0.852
2008	0.782	0.837	0.933	0.549	0.659	0.853
2009	0.762	0.827	0.920	0.500	0.655	0.779
2010	0.766	0.838	0.913	0.528	0.648	0.838
2011	0.737	0.829	0.892	0.669	1.000	0.669
2012	0.844	0.889	0.942	0.781	0.816	0.955
综合平均值	0.760	0.806	0.943	0.581	0.664	0.888
标准差	0.029	0.023	0.016	0.087	0.120	0.079

从表 2 可见,2004—2012 年中国整体生态效率变化不大. 2 个模型的输出结果都表明规模效率对生态效率贡献最大,各效率随时间具有波动性,呈微弱的增长趋势. 但不同的是,由于 PCA-DEA 模型评价 DMU 的要求更加严格,PCA-DEA 模型得出各年省际生态效率都低于 DEA 模型. 从年际生态效率的标准差看,PCA-DEA 模型输出结果在时间序列上表现出更大的差异性. 一方面,其综合效率的标准差为 0.087,而 DEA 模型的综合效率标准差只有 0.029. 另一方面,在分解综合效率时,PCA-DEA 模型中纯技术效率和规模效率的区分度较大,规模效率对综合效率的影响更加明显直观.

为进一步比较 2 个模型,本文对达到生态效

率前沿面的地区数量做了对比(表 3). PCA-DEA 得出处于前沿面的地区数量远远少于 DEA 模型. 2004—2010 年 PCA-DEA 模型中只有北京的生态效率达到最优,2012 年增至 5 个. 在 DEA 模型分析中,北京、天津、上海每年都处于生态效率前沿面上. 从最优省际生态效率的年际变化过程看,PCA-DEA 模型中,每年处于最优生态效率的地区非常有限. DEA 模型看似更能反映省际生态效率的变化,但评价省际生态效率的实质是为了寻找决策单元的相对差异,差异越大越有利于决策分析.

由此可见,PCA-DEA 模型的输出结果相对精确,有利于综合效率的分解,满足决策者的决策需求.

表 3 2004—2012 年处于生态效率前沿面的省市区数目比较

年份	PCA-DEA 模型		DEA 模型	
	数量	地区	数量	地区
2004	1	北京	7	北京/天津/上海/浙江/福建/广东/海南
2005	1	北京	8	北京/天津/内蒙古/上海/山东/河南/广东/海南
2006	1	北京	6	北京/天津/内蒙古/上海/广东/海南
2007	1	北京	7	北京/天津/内蒙古/黑龙江/上海/广东/海南
2008	1	北京	4	北京/天津/内蒙古/上海
2009	1	北京	4	北京/天津/内蒙古/上海
2010	1	北京	3	北京/天津/上海
2011	2	北京/广东	3	北京/天津/上海
2012	5	北京/山西/江苏/浙江/广东	12	北京/天津/山西/内蒙古/上海/江苏/浙江/福建/山东/湖南/广东/陕西

3.2 基于 PCA-DEA 模型的中国省际生态效率分析

结合表 2 和表 3,2004—2012 年中国整体生态效率平均水平在 0.58 左右,生态效率不高.2011 年前中国整体生态效率在 0.5 左右,2012 年却达到 0.7 左右,这时期处于生态前沿面的省市数量也最多.此外,总体上生态规模效率大于纯技术效率,这说明生态效率无效主要源于技术效率不高,但纯技术效率也在逐年提高,2011 年纯技术效率达到最优,各地区逐渐重视先进技术对

区域生态效率的促进作用.

表 4 中,各省市区之间的生态效率差异明显.生态效率年均值中北京最高,其次是天津、广东、上海、浙江、山东、江苏等地区,生态效率最低的是广西,平均值为 0.355.2009 年各省市区年均生态效率方差达到 0.049,相比于其他年份地区间的生态效率差异最大.但是各省市区的生态效率差异有缩小的趋势,2012 年总体方差(0.028)小于 2004 年总体方差(0.033).

表 4 2004—2012 年中国省际生态效率评价结果

Table 4 Evaluation results of regional eco-efficiency of China from 2004 to 2012

地区	年 份									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	年均
北京	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
天津	0.885	0.860	0.893	0.864	0.897	0.824	0.886	0.799	0.979	0.876
河北	0.549	0.537	0.521	0.510	0.530	0.544	0.485	0.775	0.699	0.572
山西	0.425	0.421	0.411	0.410	0.426	0.367	0.404	0.557	1.000	0.491
内蒙古	0.429	0.414	0.424	0.432	0.455	0.460	0.441	0.621	0.699	0.486
辽宁	0.516	0.483	0.475	0.467	0.493	0.519	0.479	0.746	0.709	0.543
吉林	0.512	0.489	0.487	0.496	0.495	0.434	0.469	0.555	0.686	0.514
黑龙江	0.463	0.447	0.438	0.423	0.422	0.366	0.378	0.586	0.462	0.443
上海	0.907	0.869	0.845	0.823	0.827	0.857	0.767	0.919	0.875	0.854
江苏	0.700	0.664	0.661	0.652	0.658	0.744	0.653	0.978	1.000	0.746
浙江	0.826	0.798	0.789	0.761	0.748	0.791	0.715	0.956	1.000	0.820
安徽	0.518	0.484	0.472	0.468	0.463	0.438	0.446	0.638	0.676	0.511
福建	0.724	0.630	0.619	0.612	0.607	0.607	0.583	0.730	0.940	0.672
江西	0.477	0.464	0.448	0.424	0.433	0.397	0.432	0.568	0.692	0.482
山东	0.715	0.709	0.711	0.693	0.712	0.801	0.636	0.956	0.999	0.770
河南	0.551	0.546	0.540	0.539	0.559	0.576	0.501	0.803	0.826	0.605
湖北	0.447	0.439	0.446	0.453	0.456	0.468	0.449	0.709	0.663	0.503
湖南	0.413	0.390	0.395	0.394	0.405	0.429	0.413	0.710	0.768	0.480
广东	0.895	0.845	0.847	0.787	0.749	0.852	0.716	1.000	1.000	0.855
广西	0.307	0.283	0.291	0.286	0.287	0.262	0.285	0.568	0.623	0.355
海南	0.739	0.716	0.709	0.678	0.673	0.294	0.674	0.539	0.971	0.666
重庆	0.507	0.476	0.472	0.469	0.476	0.434	0.497	0.605	0.582	0.502
四川	0.423	0.425	0.441	0.449	0.458	0.469	0.434	0.729	0.684	0.501
贵州	0.378	0.388	0.385	0.380	0.388	0.268	0.373	0.415	0.592	0.396
云南	0.554	0.533	0.517	0.500	0.508	0.411	0.467	0.503	0.661	0.517
陕西	0.551	0.526	0.537	0.527	0.549	0.530	0.570	0.585	0.806	0.576
甘肃	0.473	0.457	0.469	0.462	0.460	0.291	0.419	0.401	0.586	0.446
青海	0.693	0.642	0.649	0.629	0.626	0.201	0.593	0.344	0.824	0.578
宁夏	0.473	0.416	0.427	0.418	0.419	0.164	0.406	0.343	0.501	0.396
新疆	0.385	0.373	0.348	0.306	0.285	0.195	0.259	0.442	0.944	0.393
方差	0.033	0.031	0.032	0.029	0.029	0.049	0.028	0.038	0.029	0.028
东部均值	0.769	0.737	0.734	0.713	0.718	0.712	0.690	0.854	0.925	0.761
中部均值	0.476	0.460	0.455	0.451	0.457	0.434	0.437	0.641	0.722	0.504
西部均值	0.470	0.448	0.451	0.442	0.446	0.335	0.431	0.505	0.682	0.468
整体均值	0.581	0.557	0.556	0.544	0.549	0.500	0.528	0.669	0.782	0.585

表 4 不仅体现省际生态效率的差异,同时也反映 2004—2012 年东中西部地区生态效率水平



差异. 一方面, 生态效率较高的省市区多集中于东部地区. 生态效率年均排名最靠前的 10 个省市区中, 有 9 个位于东部地区; 排名后 3 位的省市区全部位于西部地区. 另一方面, 只有东部地区的生态效率高于全国平均水平. 由此看出, 东部地区的生态效率水平高于中西部地区.

经时间序列数据分析(图 2), 东部地区生态效率远高于中西部地区, 2009 年以后呈不同形式的增长趋势. 此外, 东部地区生态效率的内部差异较大, 中部最小, 整体上有扩大趋势. 生态效率内部差异在 2009 年形成小波峰后, 东部地区内部差异有下降趋势, 而中部地区恰好相反, 2010 年以后明显上升; 西部地区内部相对稳定.

地方经济和资源环境消耗的增长速度不同. 例如 2008 年工业固废产生量的最大值是最小值的 89.86 倍, 到 2012 年扩大到 124.53 倍. 碳排放等环境污染从能源富集区域和重化工基地分布区域向经济发达区域和产业结构不完整的欠发达区域进行转移<sup>[23]</sup>. 随着地区经济发展水平、产业结

构层级、能源消耗、资源利用率、生态补偿<sup>[24]</sup>等差异拉大, 生态效率区域差异整体上有扩大趋势.

东中西部地区的生态效率整体方差依次为 0.019, 0.002 和 0.006, 东部地区生态效率内部差异最大, 而中部地区内部差异最小. 在东部地区中, 技术效率达到最优的省市区数量最多. 地区间的技术效率差异明显, 这加大了东部地区出现极化现象的可能. 但这种现象自 2009 年开始缩小, 由于东部地区内部技术水平高, 周边带动效应较强, 并抓住机遇调整产业结构, 将高污染高耗能的产业转移出去, 生态效率极化程度逐渐减弱; 中部地区地理位置特殊, 近些年来承接东部转移产业, 正处于产业结构的调整、重组阶段, 生态效率内部差异大; 而西部地区产业结构转型缓慢, 绝大部分省市仍以石油、煤炭、冶金加工等资源依赖型重工业为主, 资源利用率较低, 投入-产出效率相差不大, 而且中西部地区往往更注重规模效应对生态效率的拉动作用.

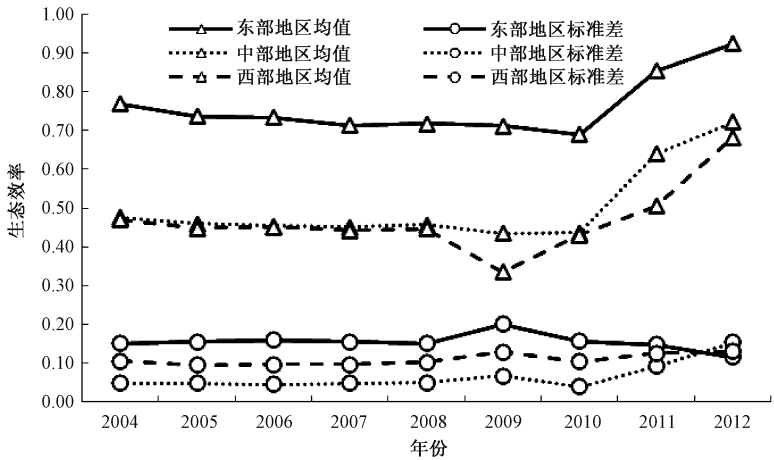


图 2 3 大经济带生态效率年际变化

Fig. 2 Inter-annual variations in eco-efficiency in three major economic regions of China

3.3 省际生态效率相对有效性评价

由 DEA 模型的经济含义可知, 处于生产前沿面的 DMU 是 DEA 有效, 即投入和产出达到最优. 对省际生态效率前沿面的分析发现, 北京一直都保持在前沿面上, 2011 年后全国处于生产前沿面的地区数量有明显的增加趋势.

由于 PCA-DEA 计算的是相对效率, 如果决策单元评价值为 1 就有效, 否则无效. 但无效 DMU 之间的优劣性无法简单从评价值的大小排序进行对比分析. 为了克服以上缺陷, 本文对

DMU 的相对有效性评价提出以下改进: 首先对 30 个 DMU 进行第 1 次评价, 剔除有效的 DMU, 对其余无效的 DMU 进行第 2 次评价, 然后再剔除有效的 DMU, 进行第 3 次评价. 如此反复进行, 当最后剩余的 DMU 均无效时停止. 经 12 次评价后, 最终可分成 13 个等级. 其中, 第 1 次筛选后生态效率有效的 DMU 称为 1 级有效, 第 2 次筛选后有效的 DMU 称为 2 级有效……依次类推, 最终得到 PCA-DEA 分级有效评价结果. 为了能在空间上清楚地反映地区经济和生态效益的协调模

式,本文在此基础上根据每级省际地区在投入和产出结构的相似性划分出 5 种“效率-产出”类型,即高效率高产出地区、中效率高产出地区、中效率中产出地区、低效率中产出地区和低效率低产出地区(图 3)。

生态效率等级划分结果和区域类型表明:

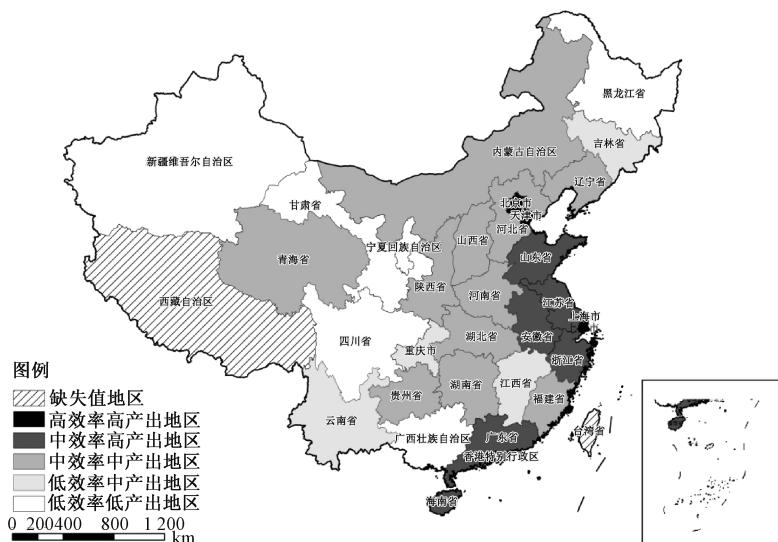


图 3 中国省际“效率-产出”类型划分

Fig. 3 Classification of “efficiency-output” type in China

2) 中效率高产出地区:主要集中在东部. 安徽省作为中部地区经济水平并不突出,但是其资源投入和环境损耗相对于某些东部省份比较合理,成本相对较低. 这一类地区的特点是对资源环境的依赖程度较大,但技术水平较高,在资源利用和环境治理等方面有优势,且区域经济产出较高.

3) 中效率中产出地区:这些省份的生态效率在投入和产出结构上具有相似性,经济发展程度相差不是很大. 除福建和青海外都属于中部地区,呈明显的片状分布. 青海相比于重庆、吉林等中部经济水平较高地区优先达到前沿面,凭借的是资源的稀缺性,在该区域设立很多自然保护区,相对消耗较少,环境破坏较小.

4) 低效率中产出地区:包括吉林、重庆、江西和云南,这类地区由于技术和管理水平的限制,生态效率和经济产出都不高,在空间上以点状散落分布.

5) 低效率低产出地区:最后 2 级生态效率有效地区——黑龙江、新疆、甘肃、四川、广西和宁夏高度依赖资源,利用效率不高,且创造的 GDP 和全国其他地区经济水平相比比较靠后,造成资源

1) 高效率高产出地区:北京、天津、上海. 3 者的共同特征是单位面积上具有较高的 GDP 产出,发达的科技水平导致资源投入小,环境污染小;同时 3 者作为直辖市,拥有先天的政策优势,其生态效率的投入-产出相对于其他地区而言较为合理.

的浪费. 虽然四川省的 GDP 在全国范围内并不低,但其资源环境的投入产出比例却不协调.

## 4 结论

本文运用投入导向型的 PCA-DEA 模型,对中国 2004—2012 年 30 个省市生态效率分别进行静态和动态比较,并分析中国生态效率的区域差异以及差异变化趋势. 本文的主要结论及建议为:

1) 2004—2012 年中国整体生态效率相对偏低,主要源于技术无效. 但 2011 年以后生态效率显著提升,改善趋势明显,各地区由注重规模效益转向注重技术效率的提高.

2) 中国省际生态效率差异明显,各省市区的生态效率差异有缩小的趋势. 由于技术水平的支撑,东部地区的生态效率高于中西部地区. 此外,东部地区生态效率内部差异大于中西部地区,3 大地区的生态效率内部差异有扩大趋势.

3) 根据地区经济和生态效益的协调模式,全国可划分成 5 种“投入-产出”类型. 区域的可持续发展应根据不同的类型给予不同的政策导向,

以便更有效地促进地区内部的经济和生态良性发展。

4) 在评价方法的选择上, PCA-DEA 模型实现了 PCA 模型和 DEA 模型的优势互补, 对省市生态效率的评价标准较高, 突出了效率的“相对性”, 有利于综合效率的分解, 适用于地区之间相对生态效率的比较研究。

参考文献

[ 1 ] 吕彬, 杨建新. 生态效率方法研究进展与应用[J]. 生态学, 2006, 26(11): 3 890-3 906.

[ 2 ] Schaltegger S, Sturm A. Kologische rationalitat [ R ] // Die Unternehmung. 1990: 273-290.

[ 3 ] Schmidheiny S. Changing course: a global business perspective on development and the environment[M]. MA: MIT Press, 1992: 108-110.

[ 4 ] Greening L A, Davis W B, Schipper L. Decomposition of aggregate carbon intensity for the manufacturing sector: comparison of declining trends from 10 OECD countries for the period 1971 - 1991[J]. Energy Economics, 1998, 20(1): 5-12.

[ 5 ] Huang J H, Yang X G, Cheng G, et al. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67(3): 228-238.

[ 6 ] Huppes G, Ishikawa M. Eco-efficiency and its terminology [J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 43-46.

[ 7 ] World Business Council for Sustainable Development. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance[R]. WBCSD, 2000: 2-30.

[ 8 ] Kuosmanen T. Measurement and analysis of eco-efficiency: an economist's perspective[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 15-18.

[ 9 ] Mickwitz P, Melanen M, Rosenström U, et al. Regional eco-efficiency indicators: a participatory approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(18): 1 603-1 611.

[ 10 ] 杨斌. 2000—2006 年中国区域生态效率研究: 基于 DEA 方法的实证分析[J]. 经济地理, 2009, 29(7): 1 197-1 202.

[ 11 ] 张炳, 黄和平, 毕军. 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, 29(5): 2 473 - 2 480.

[ 12 ] 周景博, 陈妍. 中国区域环境效率分析 [J]. 统计与决策, 2008, 14: 44-46.

[ 13 ] 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, 35(6): 1 292-1 299.

[ 14 ] Põldaru R, Roots J. A PCA-DEA approach to measure the quality of life in Estonian counties [J]. Socio-Economic Planning Science, 2014, 48(1): 65-73.

[ 15 ] 林海明. 对主成分分析法运用中十个问题的解析[J]. 统计与决策, 2007, 16: 16-18.

[ 16 ] Azadeh A, Amalnick M S. An integrated DEA PCA numerical taxonomy approach for energy efficiency assessment and consumption optimization in energy intensive manufacturing sectors [J]. Energy Policy, 2007, 35(7): 3 792-3 806.

[ 17 ] Adler N, Yazhemsky E. Improving discrimination in data envelopment analysis: PCA-DEA or variable reduction[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 202(1): 273-284.

[ 18 ] Pearson K, Mag P. On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J]. Philosophical Magazine, 1901(2): 559-572.

[ 19 ] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E L. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.

[ 20 ] Kleine A. A general model framework for DEA[J]. Omega, 2004, 32(1): 17-23.

[ 21 ] Cook W D, Seiford L M. Data envelopment analysis (DEA): thirty years on [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(1): 1-17.

[ 22 ] 诸大建, 邱寿丰. 作为我国循环经济测度的生态效率指标及其实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 1-5.

[ 23 ] 石敏俊, 王妍, 张卓颖, 等. 中国各省区碳足迹与碳排放空间转移[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1 327-1 338.

[ 24 ] 刘春腊, 刘卫东. 中国生态补偿的省域差异及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(7): 1 091-1 104.