

文章编号: 1000-5862(2019)05-0518-08

基于 3 阶段 DEA 的中国区域低碳经济发展绩效评价研究

柳 键¹ 涂 建^{1,2} 程会兵³

(1. 江西财经大学信息管理学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西服装学院商学院, 江西 南昌 330201; 3. 暨南大学管理学院, 广东 广州 510632)

摘要: 从经济效率角度, 该文将二氧化碳排放作为非期望产出, 利用线性数据转换函数法转换为越大越好的期望产出, 运用 3 阶段 DEA 方法评价中国省市区域的低碳经济发展绩效, 结果表明: 在剔除环境和随机因素后, 各省市低碳经济发展平均技术效率和纯技术效率被低估, 而平均规模效率被高估; 低碳经济发展整体水平不高, 但 2010—2014 年低碳经济发展绩效呈上升趋势. 研究发现: 区域差异明显, 呈现出“东 > 西 > 中”的格局, 与传统的经济格局存在一定出入.

关键词: 低碳经济发展绩效; 3 阶段 DEA 模型; 评价

中图分类号: F 061.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.05.14

0 引言

日益严峻的气候环境给人类的生存和发展带来巨大的威胁. 减少温室气体排放, 发展低碳经济, 已得到全世界的关注. 中国共产党的十九大报告强调: 加快生态文明体制改革, 建设美丽中国, 并提出推进绿色发展, 建立健全绿色低碳循环发展的经济体系. 低碳经济作为一种低能耗、低污染、经济环境相协调的经济发展模式受到越来越多人的关注, 因此如何对低碳经济发展绩效进行合理评价, 进而寻求低碳经济发展效率提升的现实途径; 以及低碳经济发展受哪些外在环境变量的影响, 成为低碳经济研究的热点. 低碳经济发展绩效是衡量低碳经济发展的关键指标, 能准确揭示全要素投入与经济增长和二氧化碳排放的关系.

围绕低碳经济发展绩效国内外学者做了大量研究工作. 在理论方面, T. Fujino 等^[1]基于技术的情景分析方法计算到 2050 年日本二氧化碳排放量减少 70%. N. Lutsey 等^[2]基于 LCS 情景发展模型对美国现有低碳排放政策进行定量评估以及效果测算. K. Shimada 等^[3]制定了低碳区域社会经济发展模型. 贾林娟^[4]从低碳经济内涵出发, 阐述低碳经

济发展影响因素及路径设计. 在实证方面, Guo Jian-hua^[5]先设计了包括经济、社会和环境技术在内的评价指标体系, 再利用指数增量和时间熵权加权来改进传统的静态 TOPSIS 方法, 以评估区域低碳经济竞争力并分析其空间差异. Zhou Peng 等^[6]利用 Malmquist 全要素生产率指数对 1997—2004 年 18 个 OECD 国家的二氧化碳绩效进行比较, 结果表明全要素碳排放绩效的整个国家在整个时期内提高了 24%. 周泽炯等^[7]运用非期望产出的 Super-SBM 模型对中原 15 个经济地区的低碳经济发展进行实证分析, 并利用 Malmquist 全要素生产率指数分析动态变化, 结果表明整体绩效不高; 低碳技术落后和发展规模不大是制约低碳经济发展的主要因素. 谢志祥等^[8]采用 DEA-Malmquist 模型对中国 31 个省市地区的低碳经济发展绩效进行评价, 并借助 Tobit 模型分析影响低碳经济发展的因素. 吴战勇等^[9-11]分别利用数据包络法 DEA 对河南省、内蒙古自治区和四川省的低碳经济发展效率进行评价, 并根据不同区域的情况, 从产业结构、低碳技术、能源消耗等方面提出政策建议.

通过相关文献梳理发现对低碳经济发展绩效的研究是深入且有效的, 为本文研究的展开提供重要的启示. 然而, 现有文献存在如下不足: (i) 现有实证

收稿日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(71261006)和江西省社会科学规划(15GL12)资助项目.

作者简介: 柳 键(1964-), 男, 湖南浏阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事物流与供应链管理、博弈论等研究. E-mail: liujian3816@263.net

研究较多采用传统 DEA 方法,未能剔除外部环境和随机误差的影响,不能客观反映生产单元的决策与管理水平;(ii)非期望产出指标处理方法存在缺陷,现有研究将非期望产出指标作为投入指标,这造成指标过于经济化的倾向不能反映真实生产过程;(iii)尽管国内关于低碳经济发展绩效评价做了大量工作,但是在省域层面的研究较少。鉴于此,本文试图克服以往研究的不足,运用3阶段DEA方法和线性数据转换函数法对中国2011—2015年31个省市地区的低碳经济发展绩效进行评价,剔除环境变量和随机误差的影响,以期客观准确测算我国各地区低碳经济发展绩效值,为政府决策发展低碳经济提供科学的依据。

1 研究方法

H. O. Fried 指出传统 DEA 模型没有考虑环境因素和随机噪声对决策单元效率评价的影响,因此,2002年H. O. Fried 提出了一种能够更好地评价决策单元的效率的3阶段DEA模型,使得计算的结果更加真实地反映决策单元的内部管理水平。其过程包括3个阶段,关键在于第2阶段如何剔除环境因素和随机噪声。

第1阶段为传统的DEA模型。1978年由运筹学家A. Charnes等首先提出了数据包络分析(Data Envelopment analysis,简称DEA模型)的方法,用于评价相同部门间的相对有效性。他们的第1个模型被命名为CCR模型。后来R. D. Banker等针对规模报酬可变的的情况提出DEA-BCC模型。

在第1阶段中使用原始投入产出数据进行初始效率评价。本文将DEA模型分为投入导向和产出导向的,根据具体的分析目的,可以选择不同的导向。一般而言,运用3阶段DEA模型的文献大多数都选择投入导向的BCC(规模报酬可变)模型。模型可表示为

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta - \varepsilon(\hat{e}^T S^- + e^T S^+) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0, \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0, \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \\ \lambda_j, S^-, S^+ \geq 0, \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $j(=1, 2, \dots, n)$ 表示决策单元, X, Y 分别是投

入、产出向量。DEA模型本质上是一个线性规划问题。若 $\theta = 1$, 则决策单元DEA有效;若 $\theta < 1$, 则决策单元非DEA有效。BCC模型计算出来的效率值为综合技术效率(T_E),可以进一步分解为纯技术效率(P_{TE})和规模效率(S_E), $T_E = P_{TE} S_E$ 。

第2阶段为相似SFA回归模型。H. O. Fried(2002)认为,在第1阶段中传统DEA计算的决策单元的绩效受到环境因素和统计噪声的影响,不能客观地反映决策单元的真正管理效率,所以,在第2阶段中,主要关注松弛变量,并认为这种松弛变量可以反映初始的低效率,由环境因素、管理无效率和统计噪声构成。第2阶段的主要目标是将第1阶段的松弛变量分解成以上3种效应,要实现这个目标,只有借助于SFA回归,在SFA回归中,第1阶段的松弛变量对环境变量和混合误差项进行回归。

根据H. O. Fried等的想法,可以构造如下类似SFA回归函数(以投入导向为例):

$S_{ni} = f(Z_i; \beta_n) + \nu_{ni} + \mu_{ni}, i = 1, 2, \dots, n, n = 1, 2, \dots, N$, 其中 S_{ni} 是第 i 个决策单元第 n 项投入的松弛值; Z_i 是环境变量, β_n 是环境变量的系数; $\nu_{ni} + \mu_{ni}$ 是混合误差项, ν_{ni} 表示随机干扰, μ_{ni} 表示管理无效率,这里 $\nu \sim N(0, \sigma_\nu^2)$ 是随机误差项,其表示随机干扰因素对投入松弛变量的影响; μ 是管理无效率,它表示管理因素对投入松弛变量的影响,假设其服从在零点截断的正态分布,即 $\mu \sim N^+(0, \sigma_\mu^2)$, 且 ν 和 μ 独立,令 $\gamma = \sigma_\mu^2 / (\sigma_\mu^2 + \sigma_\nu^2)$, 不难发现 $0 \leq \gamma \leq 1$, 若 γ 趋近于1, 则管理因素的影响比较大;若 γ 趋近于0, 则随机干扰的影响比较大。

SFA回归的目的是剔除环境因素和随机因素对效率测度的影响,以便将所有决策单元调整于相同的外部环境中。调整公式如下:

$X_{ni}^A = X_{ni} + (\max(f(Z_i; \hat{\beta}_n)) - f(Z_i; \hat{\beta}_n)) + (\max(\nu_{ni}) - \nu_{ni}), i = 1, 2, \dots, n, n = 1, 2, \dots, N$, 其中 X_{ni}^A 是调整后的投入; X_{ni} 是调整前的投入; $(\max(f(Z_i; \hat{\beta}_n)) - f(Z_i; \hat{\beta}_n))$ 是对外部环境因素进行调整; $(\max(\nu_{ni}) - \nu_{ni})$ 是将所有决策单元置于相同运气水平下。

第3阶段为调整后的DEA模型。将第2阶段调整过的投入数据代替原始的投入数据,产出数据不变,再利用DEA-BCC模型重新计算各省市地区低碳经济发展的相对效率值,此时的效率已经剔除环境因素和随机因素的影响,是相对真实准确的。

2 变量选取与数据来源

2.1 投入产出变量与数据来源

本文选取中国 31 个省市地区 2011—2015 年的数据为研究对象,对我国低碳经济发展绩效进行评价与分析.原始数据来源于《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》.

查阅有关文献,选取资本存量、人力资本、能源消耗量作为投入指标,GDP 为期望产出指标,二氧化碳排放量为非期望产出指标.资本存量计算方法采用单豪杰^[12]提出的永续盘存法来估计各个省市的资本投入量.人力资本的投入以各地区年末从业人数来计算.能源消耗的投入采用能源终端消费总量.各地区 GDP 根据平减指数转换为 2010 年价格.二氧化碳排放量依据 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在二氧化碳排放计算指南中的计算公式和二氧化碳排放系数缺省值,计算各地区化石能源消费和工业生产过程中的二氧化碳排放量.鉴于二氧化碳排放量为非期望产出,本文采用线性数据转换函数来处理.

设决策单元 DMU_i 在第 j 年排放的二氧化碳总量为 F_{ij} ,记作

$$F_{ij} = (F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{in})^T > 0, i = 1, 2, \dots, n.$$

假设 $\varepsilon = \max_{2010 \leq j \leq 2014} \{F_{ij}\} + C$, 其中 C 为任意大于 0 的常数,文中取 $C = 100$. 则非期望产出可以转化成 $F_{ij}^* = -F_{ij} + \varepsilon$, 从上述数据易知 $F_{ij}^* \geq 0$, 且该值越大越好,即 F_{ij}^* 为期望产出.此时,可以运用传统 DEA 方法计算生产的效率值.

2.2 环境变量与数据来源

环境变量选取是对低碳经济发展绩效有影响但又不在于主观可控范围内的因素.考虑到低碳经济发展的特点,结合本文研究的重点,选择城镇化水平、产业结构、技术支持强度 3 个因素作为外部环境变量.所用数据主要来源于《中国统计年鉴》及各省市统计年鉴.

(i) 城镇化水平.地区的城镇化水平对该地区的经济发展方式、能源消耗会产出重要影响,进而影响着该地区的低碳经济发展.城镇化水平高意味着该地区人们生活水平普遍较高、区域经济发展较好,人们受教育程度可能较高、低碳意识理念较强.这些对低碳经济发展绩效改善有利;城镇化水平高会大大增加生态环境的压力,同时会消耗更多能源和资源,因此城镇化水平对低碳经济绩效改善不利.因此,本文选择城镇人口占常住人口的比例表示城镇化水平;

(ii) 产业结构.产业结构由于近年来信息技术产业的高速发展,经济出现了“服务化”趋势,第 3 产业占 GDP 比例越来越大,且第 2 产业是影响地区二氧化碳排放水平的重要因素^[13],传统的产业结构无法衡量低碳经济发展方式下的产业结构转型.因此,本文采用第 3 产业产值与第 2 产业产值之比来衡量产业结构对低碳经济发展绩效的影响;

(iii) 技术投入.低碳技术是低碳经济的重要组成部分.从长期来看,依托技术进步带来的能源效率提升及能源结构的转变能够有效降低碳排放^[14].因此,本文采用 R&D 经费支出占 GDP 的比例来衡量政府对技术的支持.

3 实证结果与分析

3.1 第 1 阶段传统 DEA 的实证结果

本文将样本期间所有的投入产出数据作为当期的参照技术集,一方面,可以增加数据集构造更加光滑的前沿面,另一方面,在共同前沿面下求解的效率值有利于对低碳经济发展绩效的变化趋势进行分析.运用 DEAP2.1 对我国 2010—2014 年 30 个省市地区的低碳经济发展绩效进行初步测算.测算结果如表 1 所示.

由表 1 可知,在不考虑外在环境因素和随机噪声的影响下,低碳经济发展绩效整体水平较低,多数省市地区的低碳经济发展绩效没有达到最优.从省份来看,北京、上海、海南、青海 4 个地区的低碳经济发展绩效连续 5 年 DEA 达到有效,平均综合技术效率值最低的是山西(其值为 0.4).2010—2014 年的中国低碳经济发展的综合技术效率值依次为 0.67、0.65、0.65、0.63、0.60,平均综合技术效率值为 0.640,这表明 5 年间低碳经济发展的平均技术效率水平只达到生产前沿面的 64%,仍有进一步提升空间和发展潜力.纯技术效率值依次为 0.70、0.69、0.70、0.68、0.66,其平均值为 0.686,这说明中国低碳经济发展过程中技术效率没有得到充分地发挥.规模效率值依次为 0.96、0.95、0.93、0.92、0.91,规模效率的平均值为 0.934,这说明我国在低碳经济发展过程中资源配置较为合理.而且每年的平均规模效率值都远高于纯技术效率的平均值,这表明我国低碳经济发展的无效率主要来源于纯技术效率,纯技术效率相对较低是我国大部分省市地区低碳经济发展绩效提升的主要障碍.

我国幅员辽阔,自然条件复杂,省市地区经济发

展面临的外部环境差异较大. 若不考虑外部环境和统计噪声的影响, 则得到的结果就无法客观地反映实际情况. 因此有必要通过随机前沿方法(SFA) 去除环境和随机干扰对低碳经济发展绩效的影响.

表 1 2010—2014 年中国低碳经济发展绩效得分

单元	2010			2011			2012			2013			2014		
	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E
北京	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
天津	0.98	0.98	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
河北	0.44	0.44	0.98	0.43	0.47	0.92	0.41	0.46	0.88	0.40	0.48	0.85	0.38	0.44	0.87
山西	0.46	0.50	0.91	0.41	0.48	0.87	0.38	0.43	0.88	0.40	0.45	0.90	0.37	0.42	0.89
内蒙古	0.66	0.69	0.95	0.67	0.71	0.95	0.67	0.71	0.95	0.70	0.70	1.00	0.65	0.66	0.98
辽宁	0.53	0.57	0.93	0.55	0.62	0.88	0.57	0.67	0.86	0.63	0.73	0.87	0.61	0.69	0.88
吉林	0.53	0.55	0.97	0.55	0.57	0.97	0.58	0.60	0.97	0.57	0.59	0.96	0.55	0.58	0.96
黑龙江	0.53	0.53	0.99	0.52	0.53	0.98	0.48	0.49	0.98	0.44	0.47	0.95	0.49	0.52	0.94
上海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏	0.70	1.00	0.70	0.68	1.00	0.68	0.75	1.00	0.75	0.73	1.00	0.73	0.74	1.00	0.74
浙江	0.82	0.91	0.90	0.76	0.92	0.83	0.75	0.91	0.82	0.64	0.86	0.75	0.63	0.85	0.74
安徽	0.58	0.59	1.00	0.57	0.57	1.00	0.58	0.61	0.95	0.53	0.53	1.00	0.49	0.49	1.00
福建	0.70	0.71	0.98	0.65	0.68	0.96	0.69	0.73	0.94	0.61	0.65	0.93	0.56	0.61	0.92
江西	0.68	0.68	1.00	0.72	0.72	1.00	0.68	0.72	0.95	0.63	0.63	1.00	0.18	0.20	0.88
山东	0.59	0.72	0.82	0.54	0.71	0.76	0.53	0.71	0.75	0.51	0.73	0.70	0.49	0.72	0.68
河南	0.51	0.55	0.92	0.49	0.54	0.91	0.50	0.59	0.85	0.47	0.60	0.79	0.45	0.58	0.77
湖北	0.54	0.54	1.00	0.51	0.52	0.98	0.51	0.56	0.92	0.51	0.58	0.88	0.48	0.56	0.86
湖南	0.58	0.58	1.00	0.53	0.54	0.98	0.54	0.59	0.92	0.54	0.61	0.88	0.51	0.59	0.86
广东	0.98	1.00	0.98	0.92	1.00	0.92	0.91	1.00	0.91	0.87	1.00	0.87	0.79	1.00	0.79
广西	0.58	0.59	0.99	0.54	0.54	1.00	0.56	0.56	0.99	0.49	0.49	1.00	0.49	0.49	1.00
海南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
重庆	0.49	0.49	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50	0.51	0.99	0.51	0.51	0.99	0.52	0.53	0.98
四川	0.48	0.48	1.00	0.47	0.49	0.97	0.47	0.52	0.92	0.45	0.50	0.89	0.42	0.50	0.84
贵州	0.57	0.60	0.96	0.50	0.53	0.94	0.46	0.49	0.94	0.44	0.47	0.93	0.41	0.44	0.95
云南	0.49	0.50	0.99	0.49	0.49	0.98	0.47	0.47	0.98	0.44	0.45	0.97	0.41	0.43	0.96
陕西	0.54	0.54	1.00	0.51	0.52	1.00	0.56	0.56	0.99	0.49	0.49	1.00	0.46	0.49	0.96
甘肃	0.55	0.57	0.98	0.52	0.54	0.97	0.48	0.50	0.96	0.46	0.48	0.96	0.43	0.45	0.95
青海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
宁夏	0.97	1.00	0.97	0.94	0.97	0.97	0.93	0.96	0.97	0.92	0.96	0.97	0.90	0.94	0.95
新疆	0.59	0.61	0.98	0.54	0.56	0.96	0.53	0.55	0.96	0.53	0.55	0.95	0.52	0.55	0.95
平均值	0.67	0.70	0.96	0.65	0.69	0.95	0.65	0.70	0.93	0.63	0.68	0.92	0.60	0.66	0.91

3.2 第 2 阶段 SFA 的回归结果

在第 2 阶段中, 利用随机前沿分析方法(SFA) 分离出环境因素、统计噪声与内部管理无效率的影响程度, 调整 2010—2014 年各省市地区原始投入值, 使各省份处于一致的生产管理环境, 在平等客观的条件下衡量各地区低碳经济发展绩效.

将第 1 阶段的 DEA 模型计算出的 2010—2014 年资本存量、人力资本、能源消耗总量的松弛值作为被解释变量, 以城镇化水平、产业结构、技术投入为解释变量, 利用 Frontier4. 1 软件对第 1 阶段得到的投入松弛值进行最大似然法回归分析. 计算结果见表 2. 从表 2 可看出, 大多数都通过 T 检验, γ 值分别

为 0. 871、0. 955 和 0. 933, 且通过 1% 显著性水平检验. 这表明 3 种投入中管理因素的影响占据主导地位. 投入松弛是指通过改善管理水平可能减少投入量, 因此进一步考察各环境因素对投入松弛变量的系数. 由于环境变量是对各投入松弛变量的回归, 所以当回归系数为负时, 增加环境变量值有利于减少投入松弛量, 即有利于低碳经济发展绩效的提高; 反之, 则会降低低碳经济发展的绩效.

从表 1 可以看出, 城镇化水平对人力资本和能源消耗量松弛值均为负向影响, 对资本存量松弛值为正向影响, 其中对资本存量、人力资本和能源消耗量的影响都达到 5% 的显著水平. 这说明城镇化水平越高有利于减少人力资本和能源消耗量的投入冗

余,有利于提高地区低碳经济发展绩效,属于有利的运营管理环境。但地方城镇化水平越高反而增加了

资本存量的投入冗余,降低了效率。这表明在城市化发展中资金使用分配上不合理。

表 2 2010—2014 年 SFA 回归结果

	资本存量松弛值		人力资本松弛值		能源消耗量松弛值	
	系数值	T 检验值	系数值	T 检验值	系数值	T 检验值
常数项	-1 134.287	-2.014**	544.917	2.117**	-0.121	-3.84***
城镇化水平	31.867	2.299**	-15.208	-2.389**	-0.001	-1.84**
产业结构	-5.513	-1.688*	0.297	4.03***	0.000	0.100
技术投入	-217.228	-1.024	101.139	2.197**	-0.042	-3.69***
σ^2	3 827 707.000	2 195 137.800***	224 494.670	216 332.070***	2.823	3.884***
γ	0.871	54.240***	0.955	168.228***	0.933	48.960***
log 值	-1 233.820		-955.863		-127.808	
LR 单边误差	122.963***		225.344***		175.912***	

注:***、**和* 分别代表通过显著性水平为 1%、5% 和 10% 的检验。

产业结构与资本存量松弛值的回归系数为负值,与人力资本松弛值的回归系数为正值,且对资本存量的系数通过了 10% 的显著性检验,对人力资本的系数通过了 1% 的显著性检验。这表明产业结构升级能够减少资金消耗,有利于低碳经济发展,但需要投入大量的人力,而且它与能源消耗量松弛值回归系数不显著,这可以看出产业结构调整在能源消耗量上还没有发挥期望的作用。因此,一方面应加快产业结构转型,降低第 2 产业占 GDP 的比例,减少化石能源消耗;另一方面更应该注意的是大力发展服务业,提高制造业技术效率,使之有效地促进低碳经济发展绩效的增长。

此外,技术投入与人力资本松弛值在 5% 的显著性水平下正相关,与能源消耗量松弛值在 1% 的显著性水平下负相关,这说明提高技术投入能够减少能源消耗,但是需要投入大量的人力。因此各省份在科技投入中既要保持科研经费的稳定增长又要实现科研经费的有效配置,让科研投入发挥其应有的作用。

基于以上分析可知,各环境因素对低碳经济发展投入松弛量未形成同一方向的制约作用,而且影响程度都不同。在外部环境较好的地区会出现较好的效率,而外部环境较差的地区会出现较差的效率。因此,必须调整原投入变量,使所有地区处于相同的外部环境下分析。

3.3 第 3 阶段调整后的 DEA 实证结果

由调整后的投入变量和原始的产出变量,利用 DEAP2.1 再次进行 BCC 模型分析,得出 2010—2014 年中国各省市地区低碳经济发展绩效,结果如表 3 所示。此时的效率已经剔除环境因素和随机因素的影响,是相对真实准确的。

为了证实调整后的第 3 阶段 DEA 模型所测出的各个效率值更具客观性,并且更能说明各省市地区的低碳经济发展状况,将第 1 阶段及第 3 阶段得出的效率值与各省市的人均 GDP 进行 Spearman 等级相关分析,结果如表 4 所示。很明显,经过调整后的投入数据和原始产出数据计算出的综合技术效率值、纯技术效率值和规模效率值与其人均 GDP 相关度均有明显提高。这表明第 3 阶段的测度结果比第 1 阶段更能真实地反映各省市地区的管理效率状况,进一步说明第 2 阶段所进行的环境因素和随机误差的调整是有必要的。应用 3 阶段 DEA 模型比传统 DEA 方法对低碳经济发展绩效进行测度更为合理和精确。

进一步,对比第 1 阶段的结果,5 年内的综合技术效率依次为 0.71、0.86、0.89、0.89、0.88,大部分地区的综合技术效率提高了,平均综合技术效率为 0.846,上升幅度为 20.6%,连续 5 年达到 DEA 有效的省份由 4 个上升到 5 个,这表明广东在分离环境因素和随机误差的相同环境下低碳经济发展是高效的。纯技术效率依次为 0.74、0.91、0.93、0.94、0.94,平均纯技术效率值为 0.892,上升幅度为 20.6%。规模效率依次为 0.92、0.91、0.93、0.90、0.93,平均规模效率值为 0.918,下降幅度为 1.6%。可见,调整环境因素和随机误差影响后,低碳经济发展效率提高的主要因素是纯技术效率水平的提高。从地区来看,大部分地区的纯技术效率经过调整后有了很大的提高,均接近最大值 1.0,这表明之前较低的纯技术效率确实是由于较差的外部环境造成的,而不是技术管理水平的落后。虽然内蒙古、新疆、广西等地区的规模效率在第 3 阶段出现较小幅度上升,但是他们实际的规模效率并不高,主要是有利的地理位置和环境政策。

表 3 调整后的 2010—2014 年中国低碳经济发展绩效得分

单元	2010			2011			2012			2013			2014		
	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E
北京	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
天津	0.82	0.83	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
河北	0.49	0.53	0.93	0.62	0.79	0.78	0.61	0.74	0.82	0.58	0.73	0.79	0.54	0.76	0.71
山西	0.49	0.60	0.82	0.52	0.80	0.65	0.56	0.81	0.69	0.55	0.83	0.67	0.51	0.82	0.62
内蒙古	0.69	0.75	0.93	0.89	1.00	0.89	0.91	1.00	0.91	0.81	1.00	0.81	0.76	1.00	0.76
辽宁	0.64	0.71	0.91	0.87	1.00	0.87	0.93	1.00	0.93	0.92	1.00	0.92	0.84	1.00	0.84
吉林	0.58	0.61	0.95	0.82	0.88	0.93	0.97	1.00	0.97	0.93	0.99	0.94	0.93	1.00	0.93
黑龙江	0.58	0.59	0.98	0.76	0.83	0.92	0.77	0.85	0.91	0.77	0.87	0.89	0.75	0.86	0.86
上海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏	0.83	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
浙江	0.91	0.92	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
安徽	0.63	0.63	0.99	0.95	0.99	0.96	0.99	1.00	0.99	0.98	1.00	0.98	0.98	1.00	0.98
福建	0.78	0.78	1.00	0.95	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江西	0.75	0.75	1.00	0.98	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.86	0.87	0.98
山东	0.66	0.75	0.87	0.85	0.94	0.91	0.88	0.94	0.94	0.88	0.94	0.94	0.87	0.93	0.94
河南	0.58	0.59	0.99	0.76	0.87	0.87	0.80	0.91	0.88	0.86	0.96	0.90	0.83	0.99	0.84
湖北	0.60	0.61	0.99	0.78	0.81	0.96	0.85	0.87	0.98	0.90	0.92	0.98	0.88	0.92	0.95
湖南	0.62	0.63	0.99	0.83	0.84	0.98	0.92	0.93	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99
广东	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
广西	0.60	0.65	0.92	0.83	0.84	1.00	0.90	0.91	0.99	0.88	0.88	0.99	0.89	0.89	1.00
海南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
重庆	0.58	0.59	0.99	0.83	0.86	0.96	0.89	0.90	0.99	0.91	0.92	0.99	0.95	0.96	0.99
四川	0.53	0.53	0.99	0.77	0.78	0.98	0.79	0.80	0.99	0.80	0.82	0.98	0.81	0.83	0.98
贵州	0.61	0.66	0.92	0.72	0.80	0.91	0.80	0.85	0.95	0.80	0.87	0.92	0.80	0.86	0.93
云南	0.54	0.56	0.96	0.75	0.80	0.94	0.80	0.84	0.96	0.80	0.85	0.94	0.81	0.85	0.95
陕西	0.59	0.61	0.98	0.77	0.82	0.94	0.85	0.92	0.92	0.83	0.92	0.91	0.81	0.93	0.87
甘肃	0.63	0.66	0.96	0.84	0.88	0.96	0.89	0.91	0.97	0.90	0.93	0.97	0.89	0.92	0.96
青海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
宁夏	0.93	0.97	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	0.98
新疆	0.72	0.75	0.95	0.70	0.75	0.93	0.75	0.79	0.95	0.71	0.79	0.90	0.82	0.91	0.90
平均值	0.71	0.74	0.92	0.86	0.91	0.91	0.89	0.93	0.93	0.89	0.94	0.90	0.88	0.95	0.93

表 4 各省市低碳经济效率值与人均国内生产总值(GDP)的 Spearman 等级相关系数

	综合技术效率		纯技术效率		规模效率	
	T_{E_1}	T_{E_3}	P_{TE_1}	P_{TE_3}	S_{E_1}	S_{E_3}
人均 GDP	0.470*** (0.000)	0.541*** (0.000)	0.568*** (0.000)	0.627*** (0.000)	0.160 (0.058)	0.247*** (0.000)

注:***表示在置信度为 1% 下相关性是显著的. 括号内是检验的 P 值.

3.4 我国低碳经济绩效总体与区域差异分析

第 3 阶段调整后的效率结果剔除了环境因素和随机误差的影响,更贴近样本实际发展情况,本文以下分析将以第 3 阶段结果为依据,对各省市区低碳经济发展绩效进一步分析.

1) 总体分析. 由第 3 阶段结果可知,全国整体低碳经济发展平均绩效值在 2010—2014 年间有明显上升,年平均综合技术效率值为 0.846,这表明全

国平均技术效率水平与生产前沿面相差 15.4%,低碳经济发展存在较大空间. 样本期内,中国整体的低碳经济发展规模效率较高,接近最优前沿面,并远高于纯技术效率,这表明造成中国低碳经济发展绩效低下的原因主要体现在纯技术效率方面. 相比之下,5 年间全国平均纯技术效率水平与生产前沿面相差 10.8%,这表明仍有较大的提升空间,因此,合理配置低碳经济发展资源,充分、有效地利用投入要素是提升低碳经济发展绩效的重要途径.

2) 区域分析. 各区域由于地区经济发展程度、自然资源、政策制度等存在差异, 低碳经济发展绩效也表现出明显的区域差异性. 本文将从东部、中部和

西部角度分析低碳经济发展绩效的区域差异, 结果如表 5 所示.

表 5 2010—2014 年中国 3 大区域平均低碳经济发展绩效及其分解

年份	东部			中部			西部		
	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E	T_E	P_{TE}	S_E
2010	0.830 1	0.865 4	0.956 1	0.604 4	0.625 9	0.964 9	0.675 1	0.701 6	0.961 5
2011	0.934 8	0.971 7	0.958 4	0.799 6	0.877 9	0.906 9	0.826 8	0.865 5	0.954 5
2012	0.946 3	0.970 4	0.971 3	0.857 0	0.920 3	0.925 9	0.870 2	0.900 3	0.966 5
2013	0.943 9	0.970 1	0.968 5	0.873 0	0.944 5	0.918 9	0.858 2	0.906 2	0.946 6
2014	0.931 8	0.972 3	0.952 9	0.839 0	0.932 8	0.894 5	0.864 3	0.923 0	0.937 1
平均值	0.917 4	0.950 0	0.961 4	0.794 6	0.860 3	0.922 2	0.818 9	0.859 3	0.953 3

从结果来看: 比较 5 年平均值和绝大部分年份绩效值, 东部地区低碳经济发展综合技术效率值最高、西部其次、中部最低, 呈现出“东 > 西 > 中”的格局. 这种排位与 3 大区域的经济实力存在一定出入. 东部地区的经济一直以来都处于全国领先地位, 经济活跃, 人才汇聚, 低碳理念先进, 在提高低碳经济发展绩效方面具备很多优势. 西部地区的绩效值高于中部地区, 主要是因为西部地区大部分省份第 2 产业不占主导地位, 而二氧化碳排放相对较低的第 1 产业、第 3 产业占比较大, 如青海、新疆、甘肃、贵州等地区. 而中部地区中很多省份的支柱产业是高耗能的重工业, 如吉林省、黑龙江省等东北老工业基地; 此外, 中部地区一直是我国的能源供应基地, 如山西省是产煤大省. 但是产煤大省往往也是耗煤大省, 而煤炭是化石能源中二氧化碳排放率最高的, 在经济发展过程中, 这些都严重影响低碳经济发展整体绩效值.

低碳经济发展纯技术效率在东中西部地区呈现差异化, 从 5 年平均纯技术效率看, 东部地区效率最高达 0.950 0, 中部为 0.860 3, 西部效率最低为 0.859 3, 中西部较为接近. 这表明东部地区在促进低碳经济转型、实现节能减排和加大新能源技术领域科技创新力度方面优于中西部地区. 针对东中西部地区内部技术效率方面的差距, 应注重提升中西部地区的内部技术效率, 尤其是加强东部地区与中西部地区之间的人才和技术交流, 利用东部优秀的人才和发达的技术所带来的更高资源利用水平来实现低碳经济发展.

低碳经济发展规模效率整体水平较高, 都达到 0.9 以上. 差异较小的主要原因是: 近几年, 中国低碳经济发展在经济规模优化方面取得了显著成效, 在全国范围内低碳经济投入产出资源优化实现了较为合理的配置. 全国规模效率接近最优前沿面, 能够

实现规模经济, 可以通过进一步扩大生产, 以达到增加经济效益和提高低碳经济发展绩效, 应在现有基础上重点调整要素配置, 使得投入要素规模能发挥最大作用.

4 结论与政策建议

本文从低碳经济发展绩效的内涵出发, 利用 3 阶段 DEA 方法分析全要素低碳经济发展绩效, 剥离外部环境因素和随机噪声影响, 从而得到了更准确客观的绩效值. 可得出如下结论:

1) 在第 2 阶段调整前后各省市低碳经济发展绩效值发生了较大的变化, 平均综合技术效率值、平均纯技术效率值被低估, 而平均规模效率值被高估, 这说明环境因素和随机误差对低碳经济发展绩效值产生了较大影响. 将第 1 阶段及第 3 阶段得出的效率值与人均 GDP 进行 Spearman 等级相关分析发现, 各效率值与人均 GDP 的相关性有明显提高, 则更进一步说明采用 3 阶段 DEA 模型对低碳经济发展绩效评价是合理必要的;

2) 我国低碳经济发展绩效整体水平不高, 多数省市地区的低碳经济发展绩效未达到最优, 纯技术效率值远小于规模效率值, 因此纯技术效率是制约低碳经济发展的主要因素. 但是, 全国整体低碳经济发展平均绩效值在 2010—2014 年间有明显上升, 这表明我国低碳经济发展呈现上升趋势;

3) 从区域来看, 低碳经济发展绩效区域差异明显, 呈现出“东 > 西 > 中”的格局, 与传统的经济格局存在一定出入. 这说明东部地区发达的经济、科技、人才实力极大地促进低碳经济发展绩效提高. 而中部地区由于以高耗能重工业为支柱产业, 二氧化碳排放较高, 导致低碳经济发展绩效较低.

根据实证结果, 提高中国低碳经济发展, 缩小区

域间差距,应考虑以下几方面: (i) 大力发展清洁能源,调整优化以碳基能源为主的能源生产与消费结构,以逐步提高能源利用效率; (ii) 引进、消化和吸收国外先进低碳技术,加强区域间合作,逐步提高低碳技术的自主研发能力,促进低碳经济整体发展绩效的改善; (iii) 加快产业结构调整,大力发展低碳产业,尤其是第3产业中的高新技术服务业,努力形成新的经济增长点以拉动经济快速健康发展; (iv) 适当控制城镇发展速度与规模,合理调整城镇产业布局,促进其与低碳经济协调发展; (v) 中西部地区与东部地区多交流,制定适合自身的经济发展战略,逐步调整经济结构和生产模式,最终实现区域间低碳的协同发展。

5 参考文献

- [1] Fujino T, Ehara Y, Mastuoka T, et al. Back-casting analysis for 70% emission reduction in Japan by 2050 [J]. Climate Policy 2008, 8(sup1): 108-124.
- [2] Lutsey N, Sperling D. America's bottom-up climate change mitigation policy [J]. Energy Policy 2008, 36(2): 673-685.
- [3] Shimada K, Tanaka Y, Gomi K, et al. Developing a long-term local society design methodology towards a low-carbon economy: an application to Shiga Prefecture in Japan [J]. Energy Policy 2007, 35(9): 4688-4703.
- [4] 贾林娟. 低碳经济发展影响因素及路径设计 [J]. 科技进步与对策 2014(3): 26-29.
- [5] Guo Jianhua. The efficiency evaluation of low carbon economic performance based on dynamic TOPSIS method [J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2017, 20(1): 231-241.
- [6] Zhou Peng, Ang Bengwah, Han J Y. Total factor carbon emission performance: a Malmquist index analysis [J]. Energy Economics 2010, 32(1): 194-201.
- [7] 周泽炯, 胡建辉. 基于 Super-SBM 模型的低碳经济发展绩效评价研究 [J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2457-2466.
- [8] 谢志祥, 秦耀辰, 沈威, 等. 中国低碳经济发展绩效评价及影响因素 [J]. 经济地理 2017, 37(3): 1-9.
- [9] 吴战勇. 基于 DEA 的河南省发展低碳经济的效率评价 [J]. 统计与决策 2015(5): 56-58.
- [10] 段永峰, 罗海霞. 基于 DEA 的资源型城市低碳经济发展的效率评价: 以内蒙古地级资源型城市为例 [J]. 科技管理研究 2014, 34(1): 234-238.
- [11] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价 [J]. 中国人口·资源与环境 2012, 22(6): 52-56.
- [12] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952—2006 年 [J]. 数量经济技术经济研究 2008(10): 17-31.
- [13] 李健, 周慧. 中国碳排放强度与产业结构的关联分析 [J]. 中国人口·资源与环境 2012, 22(1): 7-14.
- [14] 李凯杰, 曲如晓. 技术进步对中国碳排放的影响: 基于向量误差修正模型的实证研究 [J]. 中国软科学 2012(6): 51-58.

The Evaluation of Development Performance of Chinese Regional Low-Carbon Economy Based on Three-Stage DEA Model

LIU Jian¹, TU Jian^{1, 2}, CHENG Huibing³

(1. School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. Business School, Jiangxi Institute of Fashion Technology, Nanchang Jiangxi 330201, China;

3. School of Management, Jinan University, Guangzhou Guangdong 510632, China)

Abstract: From the perspective of economic efficiency, CO₂ emissions are regarded as undesired outputs, linear data transfer function methods are used to convert into bigger and better expected outputs, and three-phase DEA method is used to evaluate the performance of low-carbon economic development in provinces and cities in China. The results show that after eliminating environmental and random factors, the average technical efficiency and pure technical efficiency of low-carbon economic development in provinces and cities are underestimated, while the average-scale efficiency is overestimated. The overall level of low-carbon economic development is not high, but the development performance of low-carbon economy in 2010-2014 is on the rise. The study finds that the regional differences are obvious. Eastern China is the highest and central China is the lowest, which is different slightly from the traditional economic situation.

Key words: low-carbon economic development performance; three-phase DEA model; evaluation

(责任编辑: 曾剑锋)