

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.02.004

绿色低碳约束下重庆能源 DEA 效率实证分析

李剑波, 鲜学福

(重庆大学 a.煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室; b.资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘要: 客观评价重庆能源投入产出效益, 探究环境污染、能源消费和经济增长之间的关系, 进行能源结构优化, 是当前重庆能源消耗走向绿色低碳方向发展面临的重大问题, 也是重庆制定节能减排政策、能源发展战略和经济规划的重要基础。本文将能源投入和经济社会等产出因子科学分组, 运用数据包络分析技术(DEA), 通过构建的能源需求结构方程以及 DEA 模型, 对重庆能源消费进行了一系列 DEA 实证研究, 得到了重庆能源投入产出规模效率在不同历史时期、不同阶段的变化规律, 获取了能源冗余投入(径向改进和松弛改进)值、规模效应值、综合技术效率值和纯技术效率值, 确定了 DEA 弱有效、DEA 强有效、DEA 完全有效的生产前沿面, 并在此基础上对 2016—2020 年重庆能源结构进行了优化。研究成果可以为确定重庆能源绿色低碳发展方向、优化“十三五”重庆能源消费结构提供科学依据。

关键词: 能源规划; 绿色低碳发展; 优化; 数据包络分析

中图分类号: TK01; F224

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)02-026-11

DEA efficiency analysis of energy in Chongqing under the constraint of green and low carbon economy

LI Jianbo, XIAN Xuefu

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Objectively evaluating the efficiency of input and output of the energy in Chongqing, exploiting the relationship between environment pollution, energy consumption and economic growth, and optimizing the energy structure, are the important issues for guiding energy consumption of Chongqing to the direction of green and low carbon and the important basis of policy-making for energy saving and pollution reduction, and strategy-making of energy development and economic planning. In this work, we scientifically grouped the energy input and economic and social output factors, and then used data envelopment analysis (DEA) to construct an energy demand structure equation and a DEA model. And a series of DEA empirical studies on energy consumption in Chongqing were conducted. The variation of scale efficiency of Chongqing energy input and output in different historical periods and different stages, the energy redundant input value

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51204218); 重庆市院士基金项目资助(CSTC 2013jcyjys90001)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51204218) and CAE Member Foundation of Chongqing (CSTC 2013jcyjys90001).

作者简介: 李剑波(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事能源规划、矿产资源综合利用等方面的研究, (E-mail) jianboli99@126.com。

鲜学福(1929-), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要从事煤矿安全、煤层气、页岩气开采等方面的研究, (E-mail) xianxf@cae.cn。

(radial improvement and relaxation improvement), the scale effect value, the comprehensive technical efficiency value and the pure technical efficiency value were obtained, and then the effective production frontiers of DEA weak efficiency, DEA efficiency and DEA complete efficiency were determined. Based on these results, the energy structure from 2016 to 2020 in Chongqing was optimized. The research results can provide a scientific basis for the green and low carbon development of Chongqing and optimizing the its energy consumption structure in the 13th Five-Year Plan.

Keywords: energy planning; green and low-carbon development; optimization; data envelopment analysis

近年来,重庆经济保持了持续较快增长,但同时也消耗了巨大能源,尤其是过度依赖化石能源(如煤炭),带来了诸如 PM_{2.5} 浓度超标、工业粉尘大量排放等一系列的环境问题。在当前倡导绿色发展理念,推动低碳发展的背景下,建立清洁、高效、低碳的能源体系对于重庆经济发展十分重要^[1-6]。因此,研究重庆能源利用效率、优化能源结构问题,对于提高能源利用水平、推进能源消费低碳化、绿色化、实现重庆市经济增长与环境保护协调发展具有重要意义。

要实现重庆经济可持续发展与能源绿色低碳高效利用问题,首要问题就是要解决基于经济、社会、人口、科技发展以及相应的环境(低碳)约束条件,能源投入产出的规模效应和技术效率评价问题。当前解决这一问题的主要方法有两种:一种是参数形式的随机前沿分析法(stochastic frontier analysis, SFA)^[7-9],另一种是非参数的数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)^[10-18],其中 DEA 无需建立变量之间的严格函数,无需对所有指标进行统一的量纲处理,无需事先估计任何参数和权重等特点,在多投入和多产出的效率评价方面具有优势^[14-16]。现有的 DEA 研究,可以多达几十个研究对象作为决策单元(decision making unit, DMU)数,但涉及的投入产出因素较少,大多不超过 10 个^[17-20]。文中采用 DEA 方法,将重庆 1985—2014 年 30 年的能源数据作为决策单元,将 4 个能源投入、18 个经济社会等产出因素分组构建 DEA 模型,对重庆能源绿色低碳利用进行测度与实证研究;同时采用复合预测方案,对构建的能源需求结构方程得到的数据体系进行科学验证,揭示重庆能源投入产出规模效率在不同历史时期、不同阶段的变化规律,获取能源冗余投入(径向改进和松弛改进)值、规模效应值(scale efficiency score)、综合技术效率值(technical efficiency score, CRS)和纯技术效率值(pure technical efficiency score, VRS),确定 DEA 弱有效、DEA 强有效、DEA 完全有效的生产前沿面,探寻重庆 30 年间能源投入产出效率变化发展规律,为重庆未来 5 年能源需求结构优化和效率提高的问题提供科学依据,为重庆能源绿色低碳发展提供决策支撑。

1 CCR 投入导向的重庆能绿色低碳发展 DEA 模型构建

DEA 是数学、运筹学、数理经济学和管理科学的一个新的交叉领域。该方法由美国人 Charnes、Cooper 和 Rhodes(CCR 模型)于 1978 年首先提出^[21]。自 DEA 诞生以来,DEA 理论与方法发展迅速,应用范围不断扩展深化,应用领域和数量持续加速增长。DEA 方法采用数学规划模型进行评价,具有多个输入和多个输出单位间相对有效性的特点,采用 DEA 方法,可以有效解决能源多投入、多产出、很难统一量纲的数据采集问题、投入产出规模效应等问题,以及有效投入产出目标值与未达到目标值的比例改进值(或径向改进值)问题,获得规模效率与综合效率、纯技术效率及其之间的关系。

基于上述方法,建立重庆能源绿色低碳发展的 DEA 模型,其线性规划模型可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \frac{\sum_{r=1}^q U_r Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{rk}}, \\ \text{s.t.} \frac{\sum_{r=1}^q U_r Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m V_i X_{ij}} \leq 1, \text{其中, } V \geq 0, U \geq 0, i = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n, \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： v_i 是投入指标权重； x_{ij} 是投入因子（即指能源中煤碳、油料、天然气、电力消费 4 项主要指标）； u_r 是产出指标权重； y_{rk} 是产出因子（即指：经济方面的 GDP(gross domestic product)、第一产业增加值、第二产业增加值、第三产业增加值、工业总产值、社会消费零售总额、地方财政一般预算收入、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均可支配收入；科学方面的 R&D 经费内部支出、R&D 项目数、有效发明专利数；社会方面的全市常住人口、城镇化率；环境方面的工业废气排放总量、SO₂ 放总量、工业烟粉尘排放量、煤矿事故死亡人数等 18 项指标）。

式(1)为一个非线性规划模型，其含义在于：在使所有 DMU(决策单元)的效率值都不超过 1 的条件下，要使被评价 DMU 的效率值最大化。因此模型确定的权重 u 和 v 是对被评价 DMU_k 最有利，从这个意义上讲，CCR 模型是对被评价 DMU 的无效率状况作出的一种保守的估计，因为它采用的权重是最有利于所评价对象，采用其他权重得出的效率值都不会超过这组权重得出的效率值。

式(1)所示的 CCR 模型存在的问题是它属于非线性规划，并且存在无穷多个最优解。假设向量 u^* 和 v^* 是模型(1)的一个最优解，则 t_u^* 和 t_v^* 肯定也是模型(1)的最优解($t > 0$)。

由于 $\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \geq 0$ ，模型(1)的约束等价于 $\text{s.t.} \sum_{r=1}^q u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$ ，

令 $t = \frac{1}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}$ ，则模型(1)的目标函数变为

$$\max t \sum_{r=1}^q u_r y_{rk} = \sum_{r=1}^q t u_r y_{rk}, \quad (2)$$

再令 $\mu = t u, v = t v$ ，则非线性模型(1)变换为如下等价的线性规划模型

$$\begin{cases} \max t \sum_{r=1}^q u_r y_{rk}, \\ \text{s.t.} \sum_{r=1}^q u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m u_i y_{ij} \leq 0, \\ \sum_{i=1}^m v_i x_{ir} = 1, \\ \text{其中, } v \geq 0; u \leq 0, i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (3)$$

模型(3)即为文中采用的 DEA 模型，以 DMU_k 为例来表达投入导向 CCR 模型的线性规划，对于每个 DMU 都要分别建立规划。通过该模型，可以对重庆能源利用现状进行客观分析，对重庆能源结构进行优化，从而实现重庆经济、社会、人口、环境、科技等协调、可持续发展。

2 重庆能源低碳高效利用的 DEA 实证分析

2.1 重庆能源低碳利用的 DEA 效率测度分析

为考察重庆能源现阶段的投入产出效率状况，文中采取对投入导向规模收益不变(CCR)假设条件下的 DEA 模型进行实证分析研究，以弄清重庆能源投入与经济、社会、人口、环境可容忍的“三废”排放，以及科技成果诸多产出之间的比例关系，在此基础上，提出效率提升的努力方向。文中相关数据资料均来源于《重庆市统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。鉴于目前公开资料均无 CO₂ 排放历史数据，根据废气排放中 SO₂ 与 CO₂ 排放量的相关关系，CO₂ 的排放数据采用统计年鉴上 SO₂ 排放的数据替代，输入 MaxDEA5.1 软件，选择“包络模型”、“混合（径向和非径向）”、“投入导向”、“不变”运行后，得到运算 DEA 结果(如表 1 所示)。从表 1 中可以看出，在投入导向规模收益不变假设条件下，效率值从 1985—1995 年的 0.487 上升到 0.965，而 1996 年、2003 年、2008 年、2009 年及 2011—2014 年效率值均为 1，其中 1997—2002 年、2004—2007 年、2010 年这 11 年 DEA 强有效(如图 1)。

表 1 重庆市能源利用的 DEA 模型分析结果
Table 1 The DEA analysis results of energy utilization in Chongqing

序号	年份	CRS	VRS	规模效应值	规模收益
1	1985	0.484 705	1.000 000	0.484 705	增长
2	1986	0.495 948	1.000 000	0.495 948	增长
3	1987	0.516 707	0.953 796	0.541 737	增长
4	1988	0.578 044	0.978 879	0.590 517	增长
5	1989	0.615 932	0.970 892	0.634 398	增长
6	1990	0.685 030	1.000 000	0.685 030	增长
7	1991	0.670 763	0.930 779	0.720 647	增长
8	1992	0.676 179	0.894 237	0.756 152	增长
9	1993	0.757 968	0.995 131	0.761 677	增长
10	1994	0.888 605	1.000 000	0.888 605	增长
11	1995	0.965 917	1.000 000	0.965 917	增长
12	1996	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
13	1997	0.975 758	1.000 000	0.975 758	增长
14	1998	0.884 036	1.000 000	0.884 036	增长
15	1999	0.869 465	0.939 693	0.925 265	增长
16	2000	0.891 051	0.953 488	0.934 517	增长
17	2001	0.910 813	0.949 775	0.958 978	增长
18	2002	0.955 694	0.983 464	0.971 763	增长
19	2003	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
20	2004	0.925 347	0.967 533	0.956 398	增长
21	2005	0.912 296	0.922 521	0.988 916	增长
22	2006	0.895 145	0.928 859	0.963 703	增长
23	2007	0.944 692	0.946 591	0.997 993	增长
24	2008	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
25	2009	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
26	2010	0.908 775	0.908 775	1.000 000	持平
27	2011	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
28	2012	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
29	2013	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
30	2014	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平

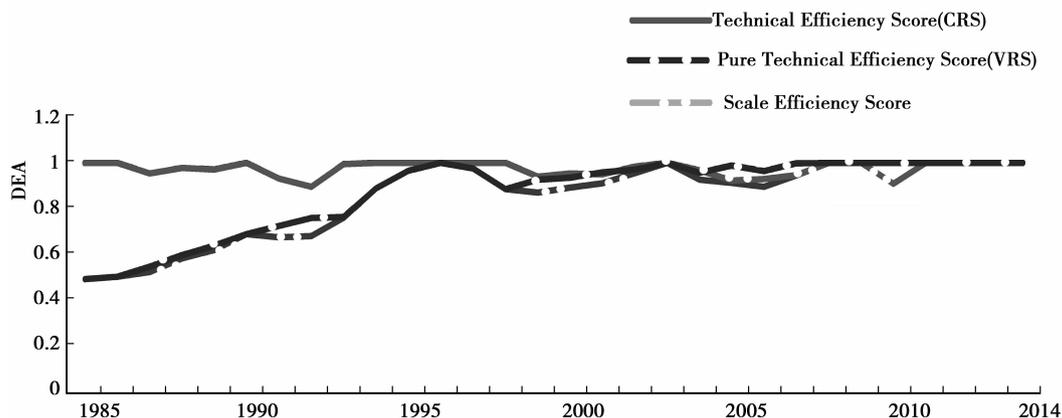


图 1 重庆市能源利用的 DEA 效率测度 (1985—2014 年)

Fig.1 DEA efficiency measurement of energy utilization in Chongqing (1985—2014)

从图 1 可以看出,煤炭消费占能源消耗比重半数以上,从 1985—1995 年径向改进值+松弛改进值(即为冗余投入)这 11 年总计达到 7048.6 万 t,平均每年可达 640.78 万 t。其中:1985 年冗余投入为 737.09 万 t,占实际消耗量 938 万 t 的 78.58%;1986 年冗余投入为 750.13 万 t,占当年煤炭实际消耗量 939 万 t 的 79.89%;1987 年冗余投入为 815.68 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 036 万 t 的 78.73%;1988 年冗余投入为 904.54 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 157 万 t 的 78.18%;1989 年冗余投入为 906.29 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1194 万 t 的 75.9%;1990 年冗余投入为 792.67 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 131 万 t 的 70.09%;1991 年冗余投入为 765.83 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 152 万 t 的 66.48%;1992 年冗余投入为 707.49 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 173 万 t 的 60.27%;1993 年冗余投入为 593.94 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 195 万 t 的 49.7%;1994 年冗余投入为 372.26 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 217 万 t 的 30.59%;1995 年冗余投入为 153.41 万 t,占当年煤炭实际消耗量 1 240 万 t 的 12.37%。这 11 年重庆市煤炭消耗量无效率消耗需改进的值下降速度相当快,从 1985 年需改进的 78.58%到 1986 年需改进的 79.89%、1987 年需改进的 78.73%到 1988 年的 78.18%逐渐下降到 1990 的 70.09%,再到 1992 年的 60.27%→1993 年的 49.7%→1994 年的 30.59%→1995 的 12.37%,这 3 年成倍数的下降,说明煤炭的无功消耗大大降低。油料、天然气的冗余投入有不同程度的改善,但都与能源投入产出比例关系的趋势相一致;经济产出 GDP 还存在较大的增长空间,一些年份 SO₂ 等工业废气排放超出了 DEA 结果的目标值。

2.2 重庆能源低碳高效利用的结构优化定量分析

为定量解决重庆能源结构优化问题,根据重庆直辖以来的能源消耗数据,用非线性回归、灰色系统 GM (1,1)模型、灰色神经网络模型分别预测了重庆未来 5 年煤炭、油料、天然气、电力的消耗量,结合重庆实际状况,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP),确定权重进行 3 种方法的复合预测,获取重庆市 2015—2020 年能源消耗预测量,在此基础上进行能源消耗内部结构优化。

根据相关资料得到的各项能源折合为标煤的系数,确定能源消耗所产生的 CO₂ 排放量技术指标如下:

1) 由于 1 t 标煤燃烧产生 CO₂ 是为 2.688 531 9 t,所以煤炭燃烧 CO₂ 排放系数 $\lambda_1 = 2.688 531 9$ 。

2) 重庆油料消耗的 CO₂ 排放量计算。根据《中国能源统计年鉴》提供的 2001—2013 年重庆油料消耗中的柴油、汽油和煤油、重油和燃料油各自比重的数据资料,依国家有关部门测算的柴油、汽油和煤油、重油和燃料油燃烧产生的 CO₂ 的系数分别为 3.115、2.574 5、3.366,再根据 2001—2013 年油料消耗结构变化趋势,以 2013 年为基点,汽油和煤油每年比重平均上升 0.05%、柴油每年比重平均下降 0.024%、重油和燃油比重平均每年下降 0.026%,测算 2014—2020 年每万 t(折标煤)油料消耗排放 CO₂ 的综合数 λ_2 ,根据这个系数,推算 2001—2020 年消耗油料的 CO₂ 排放数量。

3) 天然气消耗过程 CO₂ 排放技术指标的确定。根据天然气主要成份 CH₄ 燃烧的化学性质知,1 M³ CH₄ 可产生 1 M³ CO₂,常温下 1 M³ 天然气等于 0.714 kg,1 M³ 天然气折合标准煤为 1.33 kg,则 1 kg 天然

气折算标准煤为 1.862 744 8 kg,所以 1 t 天然气折标煤为 1.862 744 8 t;则 1 t 标准煤的天然气燃烧产生 CO₂ 系数 λ₃=0.536 844。

4) 电力消耗统计数值中不包括火电用煤量,在此,电力使用不计 CO₂ 排放,因此 λ₄=0。

根据前述各种能源消耗预测、数据包络分析结果,结合重庆 2020 年 GDP 预测数据以及重庆每亿元 GDP 的 CO₂ 排放目标必须达到下降近 20% 的要求,来计算 2020 年 CO₂ 排放量及能源内部结构优化预测值,建立以下约束方程

$$\begin{cases} E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = E_{\text{总}}, \\ E_1\lambda_1 + E_2\lambda_2 + E_3\lambda_3 + E_4\lambda_4 = B, \\ E_{1\text{预}} - E_1 + E_{2\text{预}} - E_2 = E_3 - E_{3\text{预}} + E_4 - E_{4\text{预}}, \\ 1\% < \frac{E_{1\text{预}} - E_1}{E_{1\text{预}}} < 10\%, \\ 1\% < \frac{E_{2\text{预}} - E_2}{E_{2\text{预}}} < 10\%, \\ \frac{E_3 - E_{3\text{预}}}{E_{3\text{预}}} < 15\%, \\ \frac{E_4 - E_{4\text{预}}}{E_{4\text{预}}} < 15\%。 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),采用等可能准则预测得到的 2015 年重庆 CO₂ 排放测算值为

$$B_{2015} = E_1\lambda_1 + E_2\lambda_2 + E_3\lambda_3 + E_4\lambda_4 = 4\ 714.99 \times 2.688\ 531\ 9 + 1\ 120.53 \times 2.945\ 225 + 1\ 127.76 \times 0.536\ 84 + 1\ 105.07 \times 0 = 166\ 33.91。$$

2015 年 GDP 为 15 546.23 亿元,则每亿元 GDP 排放 CO₂ 量为 1.069 964 23 万个单位,比 2014 年降低 3.86%(2014 年每亿元 GDP 排放 CO₂ 量为 1.112 912 09 万个单位),这一结果表明 2015 年等可能准则预测的方案达到国家下达的 CO₂ 排放要求,2015 年不再优化,并以此为基础作等可能准则预测方案的结构优化。

采用插值法解上述联立方程,可依次计算得到 2016—2020 年的能源煤炭、油料减少用量,以及天然气、电力增加用量后产出 CO₂ 的数量,计算得到 2015—2020 年重庆煤炭、油料、天然气、电力结构优化后的需求量如表 2 所示。从表 2 可以看出,优化后 2020 年煤炭消耗量在复合预测值基础上降低 5%,油料降低 5%,天然气在其预测值上提高 10%,电力提高 12.4%(结构优化所需的电力供应主要考虑清洁电力,由长江上游的水电和其他省份的风电、太阳能发电、垃圾焚烧发电等补充,即 2020 年的电耗在 1589.88 万 t 标准煤基础上增加的 197.16 万 t 标准煤电力不排放 CO₂)。

表 2 2016—2020 年重庆市能源结构优化结果

Table 2 Optimization results of Chongqing energy structure

年份	能源投入(万 t 标准煤)												GDP 增幅	CO ₂ 排放 /万个单位
	煤炭			油料			天然气			电力				
	预测量	比预 测减	减少/ %	预测量	比预 测减	减少/ %	预测量	比预 测增	增加/ %	预测量	比预 测增	增加/ %		
2015	4 714.99			1 120.53			1 175.87		0	1 127.76		0	15 546.23	16 633.91
2016	4 950.76	50.01	1	1 186.00	11.98	1	1 313.36	25.75	2	1 256.12	36.24	2.97	16 945.39	17 507.98
2017	5 187.27	105.86	2	1 251.19	25.53	2	1 461.01	56.19	4	1 382.00	75.20	5.71	18 470.48	18 414.67
2018	5 354.79	165.61	3	1 299.01	40.18	3	1 619.15	91.65	6	1 513.88	114.14	8.15	20 132.82	19 090.32
2019	5 573.08	232.21	4	1 357.90	56.58	4	1 788.08	132.45	8	1 665.98	156.34	9.84	21 944.77	19 940.81
2020	5 741.32	302.17	5	1 404.32	73.91	5	1 968.15	178.92	10	1 787.04	197.16	12.40	23 919.80	20 625.99

3 DEA 评价重庆能源结构优化的有效性

将重庆 2001—2014 年各能源实际消耗量、DEA 测度结果的目标值分别作为结构未优化和优化后的数据填入表 3 中,2015—2020 年的能源消耗未优化数据取实际与复合预测数据、优化数据取 2 表中数据,2001—2020 年的 CO₂ 排放数据按式(2)求得,详见表 3。

表 3 能源结构优化前后 DEA 分析结果比较
table 3 Comparison of the DEA analysis results of before and after energy structure optimization

年份	能源投入(万 t 标准煤)								产出 GDP/ 亿元	排放 CO ₂ (万个单位)	
	煤炭		油料		天然气		电力			未优化	优化数
	未优化	优化数	未优化	优化数	未优化	优化数	未优化	优化数			
2001	1 700.43	1 550.18	322.51	294.01	206.20	187.98	344.54	268.79	1 976.86	5 599.63	5 104.84
2002	1 928.90	1 844.42	331.87	317.34	213.84	204.47	348.44	312.18	2 232.86	6 245.53	5 972.00
2003	2 206.42	2 206.42	346.11	346.11	220.81	220.81	361.56	361.56	2 555.72	7 037.46	7 037.46
2004	2 205.08	1 676.77	403.52	373.63	379.97	351.67	379.84	351.70	3 034.58	7 316.95	5 793.64
2005	2 214.39	1 935.15	472.15	430.87	411.86	375.85	428.86	391.36	3 467.72	7 563.66	6 672.13
2006	2 391.46	2 139.84	532.67	442.50	469.11	419.75	497.98	441.19	3 907.23	8 238.16	7 271.64
2007	2 828.25	2 520.52	578.95	547.06	549.12	510.55	552.08	521.67	4 676.13	9 604.49	8 662.48
2008	2 860.50	2 860.50	648.38	648.38	600.57	600.57	597.20	597.20	5 793.66	9 922.27	9 922.27
2009	3 193.02	3 193.02	657.82	657.82	619.73	619.73	654.25	654.25	6 531.01	10 859.90	10 859.90
2010	3 551.05	3 205.24	750.39	681.62	741.20	673.27	768.18	697.78	7 925.58	12 166.33	10 996.57
2011	3 813.86	3 813.86	819.81	819.81	912.06	912.06	881.22	881.22	10 011.37	13 155.17	13 155.17
2012	4 034.42	4 034.42	941.24	941.24	933.99	933.99	888.60	888.60	11 409.60	14 120.03	14 120.03
2013	4 268.51	4 268.51	954.90	954.90	1 030.99	1 030.99	999.50	999.50	12 783.26	14 842.56	14 842.56
2014	4 508.09	4 508.09	1 085.68	1 085.68	1 034.39	1 034.39	1 065.8	1 065.80	14 262.60	15 873.38	15 873.38
2015	4 714.99	4 714.99	1 120.53	1 120.53	1 175.87	1 175.87	1 127.76	1 127.76	15 546.23	16 607.87	16 607.87
2016	5 000.77	4 950.76	1 197.98	1 186.00	1 287.61	1 313.36	1 219.88	1 256.12	16 945.39	17 663.89	17 507.98
2017	5 293.13	5 187.27	1 276.72	1 251.19	1 404.82	1 461.01	1 316.80	1 382.00	18 470.48	18 744.28	18 414.67
2018	5 520.40	5 354.79	1 339.19	1 299.01	1 527.50	1 619.15	1 399.74	1 513.88	20 132.82	19 604.66	19 090.32
2019	5 805.29	5 573.08	1 414.48	1 357.90	1 655.63	1 788.08	1 499.64	1 745.65	21 944.77	20 660.58	19 940.81
2020	6 043.49	5 741.32	1 478.23	1 404.32	1 789.23	1 968.15	1 589.88	1 787.04	23 919.80	21 559.89	20 625.99

通过表 4 能源投入与 GDP 为代表的经济发展产出,及以 CO₂ 为代表的环境可承受的废弃物排放所得的 CCR 投入导向型 DEA 结果表明,重碳含量的化石能源煤炭和油料的冗余消耗量,经过结构优化后,煤炭消耗仅 2006 年和 2011 年有很小的冗余消耗量 4.15 万 t、2.45 万 t,低碳较清洁的天然气只有 2011 年有冗余消耗量 65.97 万 t,这一结果表明结构优化是有效的。

表 4 能源消耗及经济环保产出的(CCR 投入导向)DEA 分析结果

Table 4 DEA analysis results of energy consumption and economic environmental protection output

年份	效率值	煤炭(投入)×1		油料量(投入)×2		天然气(投入)×3		电力(投入)×4		经济增长 GDP 产出		环保排放 CO ₂ 产出	
		冗余消耗	目标值	冗余消耗	目标值	冗余消耗	目标值	冗余消耗	目标值	产出增加潜力	目标值	可增 加排 放量	目标值
2001	1.000 000	0.000 000	1 550.18	0.000 000	294.01	0.000 000	187.98	0.000 000	268.79	0.000 000	1 976.86	0	5 104.84
2002	0.999 824	-0.32 419 3	1 844.10	-0.055 779	317.28	0.000 000	204.43	-1.190 511	310.99	16.869 465	2 249.73	0	5 972.00
2003	1.000 000	0.000 000	2 206.42	0.000 000	346.11	0.000 000	220.81	0.000 000	361.56	0.000 000	2 555.72	0	7 037.46
2004	0.999 218	-1.311 109	1 675.46	-0.292 151	373.34	-2.176 026	349.49	-0.275 003	351.42	471.690 845	3 506.27	0	5 793.64
2005	1.000 000	0.000 000	1 935.15	0.000 000	430.87	0.000 000	375.85	0.000 000	391.36	0.000 000	3 467.72	0	6 672.13
2006	0.998 058	-4.154 525	2 135.69	-0.859 119	441.64	-1.691 895	418.06	-0.856 576	440.33	550.410 308	4 457.64	0	7 271.64
2007	0.999 869	-0.329 089	2 520.19	-0.071 426	546.99	-0.066 659	510.48	-0.068 111	521.60	451.791 188	5 127.92	0	8 662.48
2008	1.000 000	0.000 000	2 860.50	0.000 000	648.38	0.000 000	600.57	0.000 000	597.20	0.000 000	5 793.66	0	9 922.27
2009	1.000 000	0.000 000	3 193.02	0.000 000	657.82	0.000 000	619.73	0.000 000	654.25	0.000 000	6 531.01	0	10 859.90
2010	1.000 000	0.000 000	3 205.24	0.000 000	681.62	0.000 000	673.27	0.000 000	697.78	0.000 000	7 925.58	0	10 996.57
2011	0.999 357	-2.454 134	3 811.41	-0.527 529	819.28	-65.974 512	846.09	-17.652 309	863.57	0.000 000	10 011.37	0	13 155.17
2012	1.000 000	0.000 000	4 034.42	0.000 000	941.24	0.000 000	933.99	0.000 000	888.60	0.000 000	11 409.60	0	14 120.03
2013	1.000 000	0.000 000	4 268.51	0.000 000	954.90	0.000 000	1 030.99	0.000 000	999.50	0.000 000	12 783.26	0	14 842.56
2014	1.000 000	0.000 000	4 508.09	0.000 000	1 085.68	0.000 000	1 034.39	0.000 000	1 065.80	0.000 000	14 262.60	0	15 873.38
2015	1.000 000	0.000 000	4 714.99	0.000 000	1 120.53	0.000 000	1 175.87	0.000 000	1 127.76	0.000 000	15 546.23	0	16 607.87
2016	0.999 991	-0.046 029	4 950.71	-0.011 027	1 185.99	-0.012 211	1313.35	-0.011 679	1 256.11	4.348 449	16 949.74	0	17 507.98
2017	1.000 000	0.000 000	5 187.27	0.000 000	1 251.19	0.000 000	1461.01	0.000 000	1 382.00	0.000 000	18 470.48	0	18 414.67
2018	0.999 996	-0.021 896	5 354.77	-0.005 312	1 299.00	-0.006 621	1619.14	-0.006 19	1 513.87	109.027 428	20 241.85	0	19 090.32
2019	0.999 989	-0.059 307	5 573.02	-0.014 450	1 357.89	-0.019 028	1788.06	-92.062 549	1 653.59	168.785 464	22 113.56	0	19 940.81
2020	1.000 000	0.000 000	5 741.32	0.000 000	1 404.32	0.000 000	1968.15	0.000 000	1 787.04	0.000 000	1 976.86	0	20 625.99

表 5 的综合技术效率、纯技术效率和规模效应值表明:从 2001—2020 年重庆市能源结构优化的综合技术效率、纯技术效率、规模效应值都是处于 DEA 分析强有效和完全有效的技术测度范围内;综合技术效率和技术规模效应值保持递增变化趋势,即除 DEA 完全有效外,2002 年规模效应从 0.999 827 增至 2019 年的 0.999 99。再到 2020 年规模效应值 1,完全达到 DEA 测度的目标值。

表 5 重庆能源结构优化后规模效率、纯技术效率、技术效率值 DEA 分析结果

Table 5 DEA analysis results of scale efficiency, pure technical efficiency, technical efficiency value after energy structure optimization in Chongqing

序号	年份	CRS	VRS	规模效应值	规模收益
1	2001	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
2	2002	0.999 827	1.000 000	0.999 827	增长
3	2003	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
4	2004	0.999 283	1.000 000	0.999 283	增长
5	2005	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
6	2006	0.998 149	1.000 000	0.998 149	增长
7	2007	0.999 873	1.000 000	0.999 873	增长
8	2008	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
9	2009	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
10	2010	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
11	2011	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
12	2012	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
13	2013	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
14	2014	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
15	2015	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
16	2016	0.999 991	1.000 000	0.999 991	下降
17	2017	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平
18	2018	0.999 996	1.000 000	0.999 996	下降
19	2019	0.999 990	1.000 000	0.999 990	下降
20	2020	1.000 000	1.000 000	1.000 000	持平

4 结 论

以重庆 1985—2014 年 30 年间能源数据作为决策单元,将 4 个能源投入、18 个经济社会等产出因子进行科学分组构建了 DEA 模型,对重庆能源绿色低碳利用进行测度,结合复合预测方案和构建的能源需求结构方程,揭示了重庆能源投入产出规模效率在不同历史阶段的变化规律、找到了改进能源冗余投入(径向改进和松弛改进)和提高能源规模效率、综合技术效率和纯技术效率的努力方向。

重庆能源投入产出的 DEA 效率分析结果表明:1985—1994 年间重庆市能源投入产出 DEA 弱有效,能源消耗冗余消耗量在 80 年代非常严重;90 年代中期至 20 世纪末,重庆能源消耗的冗余投入逐渐变低,投入产出的比例关系逐渐趋于 DEA 强有效,这与逐步淘汰与关停高耗低产企业等措施的实施有关,2011 年后,投入产出 DEA 达到生产前沿面上,CO₂ 排放强度虽然在减弱,但排放压力依然存在。为实现亿元 GDP 的 CO₂ 减排任务,探索能源绿色低碳高效利用、进行能源结构的优化十分必要。

为降低能源的无效消耗,提高能源投入产出效率,在重庆未来的能源结构调整与能源规划发展战略中,应结合实际优化能源消费结构,大幅度降低煤炭和油料的消费比重,提高天然气和电力消费比重,加大页岩气勘探开发力度,促进能源消费向低碳化发展。

参考文献:

- [1] Markandya A, Arto I, González-Eguino M, et al. Towards a green energy economy? Tracking the employment effects of low-carbon technologies in the European Union[J]. *Applied Energy*, 2016, 179:1342-1350.
- [2] European Commission. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050[J]. Communication from the Commission to the European Parliament, <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:EN:PDF>, 2011.
- [3] Liu X, Fan Y, Li C. Carbon pricing for low carbon technology diffusion: A survey analysis of China's cement industry [J]. *Energy*, 2016, 106:73-86.
- [4] Mundaca L, Markandya A. Assessing regional progress towards a 'Green Energy Economy'[J]. *Applied Energy*, 2016, 179:1372-1394.
- [5] 杜祥琬.对中国绿色低碳能源战略的探讨[J]. *太原理工大学学报*, 2010, 41(5): 453.
DU Wanxiang. An exploration of China's green and low carbon energy development strategy.[J] *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2010, 41(5): 453. (in Chinese)
- [6] Price L, Zhou N, Fridley D, et al. Development of a low-carbon indicator system for China[J]. *Habitat International*, 2012, 37(1):4-21.
- [7] 孙焱林, 何莲, 温湖炜. 异质性视角下中国省域碳排放效率及其影响因素研究[J]. *工业技术经济*, 2016, 35(4): 117-123.
SUN Yanlin, HE Lian, WEN Huwei. Research on inter-provincial carbon emissions efficiency and its determinants in china based on provincial heterogeneity perspective[J] *Journal of Industrial Technological Economics*, 2016, 35(4):117-123. (in Chinese)
- [8] 王雄, 岳意定, 刘贯春. 基于 SFA 模型的科技环境对中部地区能源效率的影响研究[J]. *经济地理*, 2013, 33(5):37-42.
WANG Xiong, YUE Yiding, LIU Guanchun. The impact of technological environment on energy efficiency of central region based on a stochastic frontier analysis model [J]. *Economic Geography*, 2013, 33(5):37-42. (in Chinese)
- [9] Lundgren T, Marklund P O, Zhang S. Industrial energy demand and energy efficiency—evidence from sweden[J]. *Resource & Energy Economics*, 2016, 43:130-152.
- [10] 续竞秦, 杨永恒. 基于 SFA 的地区能源效率评价方法研究[J]. *煤炭经济研究*, 2013, 32(6):37-42.
XU Jingqin, YANG Yongheng. Study on evaluation method of regional energy efficiency base on SFA [J]. *Coal Economic Research*, 2013, 32(6):37-42. (in Chinese)
- [11] Robaina-Alves M, Moutinho V, Macedo P. A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries[J] *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39, 403-411.
- [12] 石旻, 张大永, 邹沛江, 等. 中国新能源行业效率——基于 DEA 方法和微观数据的分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2016(4):60-77.
SHI Min, ZHANG Dayong, ZOU Peijiang, et al. Efficiency in the renewable energy sector in china[J] *Journal of Research on quantitative economic technology and economy*, 2016(4):60-77. (in Chinese)
- [13] Mishra S, Singh H. Do macro-economic variables explain stock-market returns? Evidence using a semi-parametric approach[J]. *Journal of Asset Management*, 2012, 13(2):115-127.
- [14] Wilson P W. FEAR: A software package for frontier efficiency analysis with R[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2008, 42(4):247-254.
- [15] 罗艳. 基于 DEA 方法的指标选取和环境效率评价研究[D]. 安徽:中国科学技术大学, 2012.
LUO yan. Research on the index selection and environmental efficiency evaluation based on DEA method [D]. Anhui:

- University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [16] 黄德春, 董宇怡, 刘炳胜. 基于三阶段 DEA 模型中国区域能源效率分析[J]. 资源科学, 2012, 34(4):97-104.
HUANG Dechun, DONG Yuyi, LIU Bingsheng. Research on regional energy efficiency in china based on three-stage DEA model [J]. Resources Science, 2012, 34(4):97-104. (in Chinese)
- [17] 钟华, 安新颖, 汪凌勇, 等. 国家 R&D;投入产出效率评价的实证分析——DEA 方法[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2011, 17(1):72-79.
ZHONG Hua, AN Xinying, WANG Lingyong. Applications of DEA method into the evaluation of R&D performance [J]. Journal of Chongqing university (Social Science Edition), 2011, 17(1):72-79. (in Chinese)
- [18] Zha Y, Zhao L, Bian Y. Measuring regional efficiency of energy and carbon dioxide emissions in China: A chance constrained DEA approach[J]. Computers & Operations Research, 2015, 66:351-361.
- [19] Wang J, Zhao T. Regional energy-environmental performance and investment strategy for China's non-ferrous metals industry: a non-radial DEA based analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 13:1-15.
- [20] 李雪松. 中国农业生产效率变动的驱动因素研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2015, 21(4):37-46.
LI Xuesong. A study of the driving factors of agricultural production efficiency in China [J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition), 2015, 21(4):37-46. (in Chinese)
- [21] 易丽蓉. 基于结构方程模型的区域旅游产业竞争力评价[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(10):154-158.
YI Lirong. Evaluation of regional tourism competition base on SEM[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(10):154-158. (in Chinese)
- [22] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6):429-444.

(编辑 詹燕平)