

基于 Super-SBM 模型的区域低碳

效率评估与空间分异

——以四川省为例

何沙 李乔楚¹

(西南石油大学 经济管理学院, 四川 成都 610500)

【摘要】: 基于 Super-SBM 模型对 2005—2018 年四川省各市(州)的低碳效率进行测算, 并结合 GIS 技术对低碳效率的空间特征开展分析。结果表明: 2005—2018 年四川省低碳效率整体呈上升趋势, 但各市(州)差异显著。成都、自贡等发达地区对外开放早, 产业结构合理, 居民低碳意识强, 故低碳效率较高; 阿坝、甘孜等西部高山高原区气候与地质条件恶劣, 生产工艺落后, 能源利用效率低, 制约着低碳经济的形成和发展; 广元、巴中等欠发达地区现阶段低碳效率较低, 且未来将面临工业化快速发展带来的碳排放绝对值增长局面, 对碳减排目标造成很大压力; 攀枝花作为全国重要的煤炭和铁矿产区, 近年来依托风能、水能资源禀赋优势, 着力优化能源结构, 带动区域低碳效率显著提升。

【关键词】: 低碳效率 Super-SBM 模型 空间特征 实证研究

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)10-040-06

习近平主席在气候变化巴黎大会上提出, 中国将于 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现, 为全球升温 2℃ 目标贡献中国力量。党的十九大对生态文明建设提出“引导应对气候变化国际合作, 成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者”的新要求。近年来, 以化石能源为主体的能源体系所产生的 CO₂ 排放问题日显突出, 应对气候变化成为人类社会面临的巨大挑战, 加快清洁低碳、安全高效的现代能源体系建设刻不容缓。四川省作为全国重要的优质清洁能源基地, 2016 年获批创建“国家清洁能源示范省”, 并被纳入国家能源发展“十三五”规划。与此同时, 四川省多年来煤、油消费所占的比重一直在 60% 左右, 能源消费的高碳特征为经济社会发展及生态环境保护带来了巨大压力。随着“成渝双城经济圈建设”上升为国家战略, 将形成区域高质量发展的重要增长极, 为四川清洁能源示范省的创建提供新动力、新路径和新目标, 通过中心城市带动经济圈、促进区域协调发展, 共同解决四川省清洁低碳转型的重要问题。

国内外学者基于数据包络分析法(DEA)针对区域环境效率评价进行了一系列研究。Mehmood 等^[1]应用网络数据包络分析方法研究了全球各大经济体 2001—2011 年 CO₂ 排放效率的时空变化。潘文砚和王宗军^[2]运用超效率 DEA 模型对中国 30 个省份 2000—2010 年的低碳效率进行测度, 将结果按照东部、中部、西部地区进行差异分析。Meng 等^[3]采用极差调整测度和数据包络分析模型, 对 2001—2014 年中国省级低碳经济效率进行评价, 并探讨了造成研究期限内绩效结果不佳的主要影响因素。周平^[4]

¹**作者简介:** 何沙, 硕士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为能源经济、石油工程管理。E-mail: luniteo@163.com

基金项目: 国家社会科学基金西部项目“中国国际石油合作中的突发事件应急管理机制研究”(12XGL013); 四川省科技计划软科学项目“温室气体减排路径与政策协同机制研究——以四川清洁能源示范省创建为例”(2020JDR0178); 四川省哲学社会科学规划“十三五”规划决策咨询专项“新形势下四川省应对气候变化及温室气体减排政策研究”(SC19JC029)

基于湖南省 14 个市(州)的实际数据,结合超效率 DEA 模型就“十二五”期间湖南省各州市的低碳效率进行定量评估,并针对低碳效率的空间分异开展分析。Chen 等^[5]将元前沿技术与基于松弛变量的测量方法(SBM)相结合,利用多阶段 DEA 模型对安徽省 2012—2016 年的碳排放效率进行实证分析。

目前针对四川省低碳效率的研究几乎处于空白状态,而四川作为“国家清洁能源示范省”,在实现碳排放达峰方面应起到带头作用,并在省级层面上为国家低碳试点创建工作树立新典范、积累新经验。在此背景下,本文基于超效率 DEA 模型测度四川省各市(州)的低碳效率,并结合 GIS 技术对其空间特征开展分析,从而明确减排工作的重点区域,为差异化低碳转型策略的制定提供实证依据,全面推动落实 2030 年国家自主贡献目标的四川行动。

1 模型构建、指标选择与数据说明

1.1 基于 Super-SBM 的 DEA 模型

数据包络分析法自 1978 年由美国运筹学家 Charnes 等^[6]提出以来,至今已有 43 年的发展历史。DEA 模型是一种非线性非参数规划方法,用来评价一系列具有相同多投入、多产出决策单元(DMU)的相对效率,每个决策单元的效率得分被定义为产出加权与投入加权值的比值^[7],其系统结构如图 1 所示。由于数据包络分析无需知道决策单元真实的生产运作函数,不需要预先估计参数,相对于其他效率评价方法具有一定的优势。因此,成为管理评价和决策分析研究的重要工具与手段。

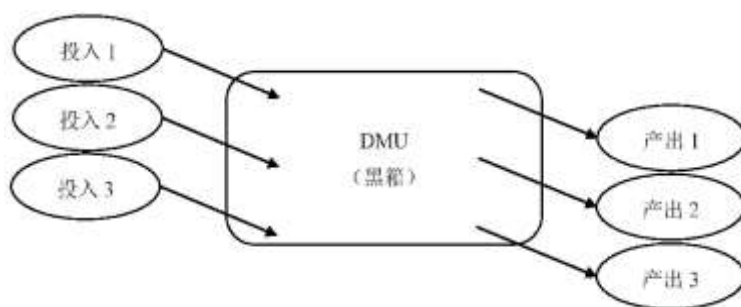


图 1 数据包络分析法 (DEA) 系统结构示意图

1978 年,Charnes 等建立了第一个基于规模报酬不变(CRS)的 CCR 模型;随后 1984 年,Banker 等^[8]提出了基于规模报酬可变(VRS)的 BCC 模型,掀起了 DEA 研究的热潮。但传统的 DEA 模型(CCR 模型、BCC 模型)经常会出现多个决策单元同时处于生产前沿面并被评为有效的情况,尤其是当投入和产出指标数量较多时,有效 DMU 数量较多且效率值均为 1,从而无法对效率水平差异进行进一步的区分和比较^[9]。为了解决此问题,Andersen & Petersen^[10]在 1993 年提出超效率模型(SEM),其核心思想为以其他决策单元构成的生产前沿面来代替待评价决策单元的参考集,且在参考集中不纳入待评价单元,此时针对有效决策单元计算得出的效率值一般大于 1,而无效决策单元的生产前沿面和效率值均没有变化,从而能够对所有决策单元的效率数值进行排序^[11]。

与此同时,传统 DEA 模型是径向和角度的测算方法。径向的 DEA 测算方法会造成投入要素的松弛或拥挤问题,当投入或产出要素出现非零松弛时,径向 DEA 模型会高估所测算的效率值;而角度问题会导致基于投入和产出视角的测算得出不同的结果,因此并不精确。鉴于此,Tone^[12]基于松弛测量方法(SBM)提出了包含非期望产出的 SBM-Undesirable 模型,其与传统模型的不同之处在于将松弛变量纳入目标函数,一方面解决了投入产出存在的非零松弛问题,另一方面也解决了生产过程所包含的非期望产出问题^[13]。

假设生产系统包含 n 个决策单元,每个决策单元由投入、期望产出与非期望产出三种元素构成,消耗 m 单位投入产生 S_i 单

位的期望产出与 S_2 单位的非期望产出，投入、期望产出以及非期望产出向量分别表示为： $x \in R^m, y^g \in R^{s_1}, y^b \in R^{s_2}$ 。其中，矩阵 X 、 Y^g 、 Y^b 的定义如下：

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n} \quad (1)$$

$$Y^g = [y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g] \in R^{s_1 \times n} \quad (2)$$

$$Y^b = [y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n} \quad (3)$$

假设 $X > 0$ 、 $Y^g > 0$ 、 $Y^b > 0$ ，则生产可能性集可定义为：

$$P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\theta, y^g \geq Y^g\theta, y^b \leq Y^b\theta, \theta \geq 0\} \quad (4)$$

结合生产可能性集，将非期望产出纳入评价决策单元，即可得到包含非期望产出的 SBM 模型为：

$$\begin{aligned} \rho = \min & \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{j=1}^{s_2} \frac{S_j^b}{y_{j0}^b} \right)} \\ s.t. & \begin{cases} x_0 = X\theta + S^- \\ y_0^g = Y^g\theta - S^g \\ y_0^b = Y^b\theta + S^b \\ S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \theta \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $S = (S^-, S^g, S^b)$ 为投入、期望产出与非期望产出的松弛量； ρ 为决策单元效率值。

对于被评价的决策单元 (x_0, y_0^g, y_0^b) ，当且仅当 $\rho = 1$ 时，即 $S^- = S^g = S^b = 0$ 时，DMU 有效；当 $\rho < 1$ 时，表示 DMU 与生产前沿面上的决策单元相比存在效率损失，在投入与产出指标上有待进一步改进，如式 (6)~(8) 所示。

$$x_0 \leftarrow x_0 - S^- \quad (6)$$

$$y_0^g \leftarrow y_0^g + S^g \quad (7)$$

$$y_0^b \leftarrow y_0^b - S^b \quad (8)$$

基于此，本文将超效率模型引入 SBM-Undesirable 模型，目标函数选取为非导向形式，基于规模报酬不变 (CRS) 的 Super-SBM 模型如式 (9) 所示。

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{y_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{y_r^b}{y_{r0}^b} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \theta_j x_j \\ \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n \theta_j y_j^g \\ \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n \theta_j y_j^b \\ \bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b, \theta_j \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： ρ^* 为决策单元超效率值，其取值可大于1。

1.2 指标选择与数据说明

近年来四川省经济处于高速发展的进程中，2020 年全省实现地区生产总值 4.86 万亿元，稳居全国第六位、西部第一位。与此同时，现代化生产活动是一个客观的物理过程，能源消耗在带动经济发展的同时所产生的碳排放问题日显突出，能源消费的高碳特征为生态环境保护带来了巨大压力，应对气候变化成为人类社会面临的巨大挑战，加快清洁低碳、安全高效的现代能源体系建设已刻不容缓。在此背景下，低碳效率便成为评价区域生态文明建设的良好指标。

在参考已有相关研究成果的基础上，结合数据包络分析法的基础理论以及低碳效率的自身内涵与特点，构建如图 2 所示的四川省低碳效率测度体系。

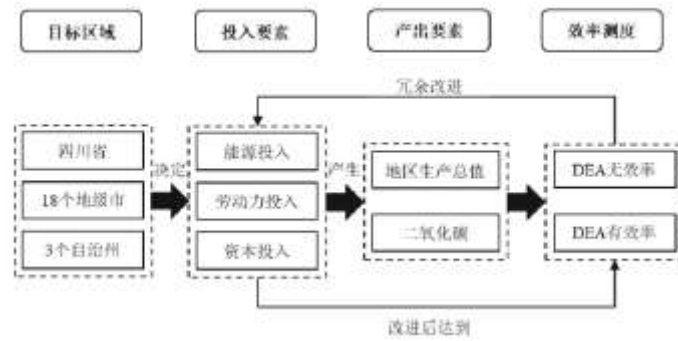


图 2 四川省低碳效率测度体系

依据所构建的研究体系，低碳效率测度即针对目标区域，考虑在投入能源、劳动力、资本等生产要素的前提下，获得所需的期望产出 (GDP) 以及伴随的非期望产出 (CO₂)，基于此，结合 Super-SBM 模型对区域低碳发展水平开展评价，从而为无效率 DMU 达到 DEA 有效提供路径参考。具体研究指标如下所示：

(1) 能源投入。

采用四川省各市(州)历年的能源消费总量来表示能源投入水平。为了更加直观地比较各年份的能源消费情况,消除能源单位差异造成的影响,在数据分析时将各市(州)不同年份的煤炭、石油、天然气等一次能源的消费量统一折算成标准煤,并采用电力等价值,单位为万吨标准煤。能源投入核算的原始数据来源于《中国能源统计年鉴》(2006—2019 年)及《四川统计年鉴》(2006—2019 年)。

(2) 劳动力投入。

鉴于劳动力的受教育程度、劳动效率等指标不具有数据可得性,因此对于劳动力投入的衡量选用四川省各市(州)历年的就业人员数。劳动力投入核算的原始数据来源于《四川统计年鉴》(2006—2019 年)。

(3) 资本投入。

多数研究发现资本存量能够很好地表征资本投入,但由于无法直接查到资本存量的相关数据,使得在统计分析中需要对资本存量进行估算。目前国内学者通常使用 Goldsmith^[14]开创的永续盘存法(PIM),基本公式如式(10)所示。

$$K_t = K_{t-1}(1 - \delta) + I_t \quad (10)$$

式中: K_t 、 K_{t-1} 为第 t 年及 $t-1$ 年的资本存量; δ 为固定资产折旧率; I_t 为第 t 年的实际固定资产投资额。

本文参考了张军等^[15]、单豪杰^[16]、柯善咨和向娟^[17]、张健华和王鹏^[18]对资本存量的估算方法,选用四川省各市(州)历年的固定资本形成总额作为指标衡量当年的资本存量,同时考虑到资产的交付使用率以及不同种类资产的实际寿命,计算过程中折旧率统一取 9.6%,基于永续盘存法测算 2005—2018 年四川省各市(州)的资本存量。为了消除不同年份价格波动产生的影响,基于固定资产投资价格指数以 2005 年的价格水平作为基准进行换算。资本投入核算的原始数据来源于《中国统计年鉴》(2006—2019 年)及《四川统计年鉴》(2006—2019 年)。

(4) 地区生产总值。

选取 2005—2018 年四川省各市(州)的地区生产总值作为低碳效率测算的期望产出变量。为了避免价格变动产生的影响,基于 GDP 平减指数将原始数据按可比价格统一折算成以 2005 年为基期的实际 GDP。地区生产总值核算的原始数据来源于《四川统计年鉴》(2006—2019 年)。

(5) 二氧化碳排放量。

依据历年四川省温室气体排放清单,从排放部门来看,能源活动和工业生产是四川省温室气体的主要排放源;从排放种类来看,二氧化碳对区域“温室效应”的贡献占据绝对的主导地位,故选取能源活动和工业生产过程中的二氧化碳排放量作为四川省低碳效率测算的非期望产出变量。二氧化碳排放量核算参照《IPCC 国家温室气体清单指南》推荐的参考方法,原始数据来源于《中国能源统计年鉴》(2006—2019 年)及《四川统计年鉴》(2006—2019 年)。

2 实证分析

精确测算四川省各市(州)的低碳效率是准确评价、预测全省减排潜力的重要因素，也是制定四川省不同区域“十四五”碳达峰工作的关键依据。鉴于统计指标的一致性和时间的连续性，本文基于 2005—2018 年四川省各市(州)的时间序列数据形成面板数据。以四川省各市(州)不同年份的低碳发展情景作为决策单元，基于包含非期望产出的 Super-SBM 模型，利用 DEASolverPro5.0 软件对四川省各市(州)2005—2018 年的低碳效率进行测算，具体结果汇总于表 1。

采用 GIS 技术对四川省各市(州)的低碳效率开展空间分析^[19-21]，基于 ArcGIS10.6 地理信息系统得到四川省低碳效率分布系列图谱如图 3~图 6 所示。由于篇幅限制，仅展示部分年份的分布图。

依据图 3~图 6 可得，在 2005—2018 年，从整体上来看，四川省低碳效率不断呈现上升趋势，2018 年全省低碳效率平均值为 0.7321，仍有较大的提升空间。从四川省各市(州)来看，研究期限内不同区域低碳效率差异显著。2018 年处于生产前沿面上的区域有成都市、自贡市、德阳市以及资阳市，成都市低碳效率值最高为 1.0560，造成这种现象的主要原因是作为全省政治经济文化中心的成都市、川西地区的德阳市、川南地区的自贡市经济发达，对外开放较早，产业结构合理，且第二产业中轻重工业比例较为协调，工业结构呈现“低能耗、低排放、高附加值”的特征，与此同时，三市建城历史悠久，居民受教育程度高、低碳意识较强，故区域低碳效率较高；资阳市经济发展水平相对较低，能源消耗量小，对碳排放的贡献较不显著，且近年来持续采取环境保护措施，2017 年底印发《资阳市节能减排综合工作方案(2017—2020 年)》，2018 年制定《资阳市环境空气质量限期达标规划》，节能减排工作成效明显，故区域低碳效率较高。但与此同时，资阳市目前正处于工业化、城镇化加速发展的重要时期，未来节能减排工作仍面临不小的压力和难度。

表 1 2005—2018 年四川省各市(州)低碳效率

市(州)	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
成都	0.6299	0.6519	0.6725	0.6929	0.7052	0.7640	0.8128
自贡	0.7691	0.8287	0.8591	0.8949	0.8705	1.0013	1.0010
攀枝花	0.3488	0.3871	0.4300	0.4834	0.5148	0.5529	0.5913
泸州	0.5530	0.5819	0.6050	0.6254	0.6130	0.6133	0.6274
德阳	0.9325	1.0012	1.0226	1.0039	0.7488	0.7953	0.8201
绵阳	0.6035	0.6440	0.6831	0.6514	0.5805	0.6480	0.6635
广元	0.4568	0.4667	0.4780	0.4581	0.4194	0.4549	0.4687
遂宁	0.6351	0.6289	0.6158	0.5866	0.5350	0.5491	0.5647
内江	0.5677	0.5927	0.6147	0.6400	0.6164	0.6393	0.6963
乐山	0.4985	0.5052	0.5192	0.5633	0.5591	0.5659	0.5913
南充	0.6826	0.6659	0.6642	0.6847	0.6328	0.6269	0.6190
眉山	0.5197	0.5102	0.5026	0.5079	0.4939	0.5366	0.5632
宜宾	0.5854	0.5912	0.6098	0.6356	0.6350	0.6661	0.6743
广安	0.4368	0.4435	0.4550	0.4893	0.4880	0.6147	0.6425

达州	0.5534	0.5188	0.4935	0.4754	0.4541	0.4996	0.5150
雅安	0.4885	0.4853	0.4891	0.4879	0.4771	0.4343	0.4600
巴中	0.6619	0.6475	0.6308	0.6245	0.5709	0.6010	0.6015
资阳	1.0298	0.9929	0.9872	0.9826	0.8831	0.8161	0.8181
阿坝	0.4526	0.4518	0.4573	0.3717	0.3706	0.2422	0.2407
甘孜	0.4007	0.3986	0.3978	0.3950	0.3901	0.4011	0.4067
凉山	0.7280	0.6746	0.6578	0.6503	0.5961	0.5769	0.5878
平均值	0.5969	0.6033	0.6117	0.6145	0.5788	0.6000	0.6174
市(州)	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
成都	0.8648	0.8825	0.8896	0.9353	0.9321	0.9565	1.0560
自贡	1.0110	1.0011	0.9680	1.0226	1.0034	0.9936	1.0219
攀枝花	0.6640	0.6700	0.7080	0.8240	0.8694	0.9348	0.9616
泸州	0.6367	0.6046	0.6016	0.6214	0.6108	0.6150	0.6227
德阳	0.8611	0.8458	0.8383	0.8571	0.8815	0.9426	1.0097
绵阳	0.6999	0.7193	0.7521	0.8160	0.8802	0.9326	0.9768
广元	0.4961	0.5077	0.5318	0.5630	0.5885	0.6122	0.6382
遂宁	0.5889	0.5947	0.6005	0.6493	0.6694	0.7059	0.7515
内江	0.7184	0.6967	0.6654	0.6520	0.6251	0.6420	0.6627
乐山	0.6059	0.5966	0.6021	0.6333	0.6448	0.6646	0.6817
南充	0.6310	0.6262	0.6303	0.6452	0.6487	0.6645	0.6898
眉山	0.5892	0.5959	0.6128	0.6499	0.6663	0.6798	0.7050
宜宾	0.6759	0.6427	0.6381	0.6767	0.6844	0.7018	0.7126
广安	0.6612	0.6541	0.6564	0.6843	0.6731	0.6802	0.6943
达州	0.5277	0.5302	0.5410	0.5509	0.5744	0.5741	0.5879
雅安	0.4865	0.4912	0.5039	0.5278	0.5424	0.5885	0.6114
巴中	0.5872	0.5668	0.5569	0.5549	0.5359	0.5524	0.5626
资阳	0.7956	0.7329	0.7296	0.7636	0.8497	0.9311	1.0206
阿坝	0.2542	0.2616	0.2569	0.2712	0.2740	0.2840	0.2974

甘孜	0.4121	0.4150	0.4130	0.4227	0.4263	0.4536	0.4748
凉山	0.6046	0.5890	0.6109	0.6185	0.6108	0.6308	0.6341
平均值	0.6368	0.6297	0.6337	0.6638	0.6758	0.7019	0.7321

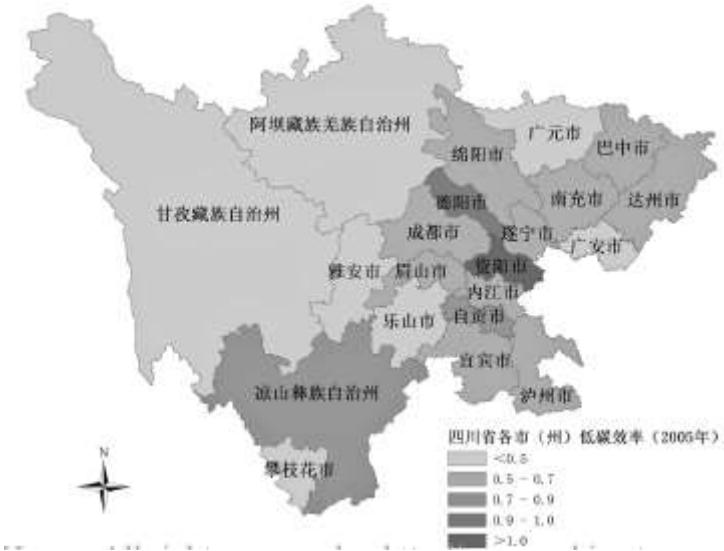


图 3 2005 年四川省低碳效率分布图



图 4 2009 年四川省低碳效率分布图



图 5 2014 年四川省低碳效率分布图

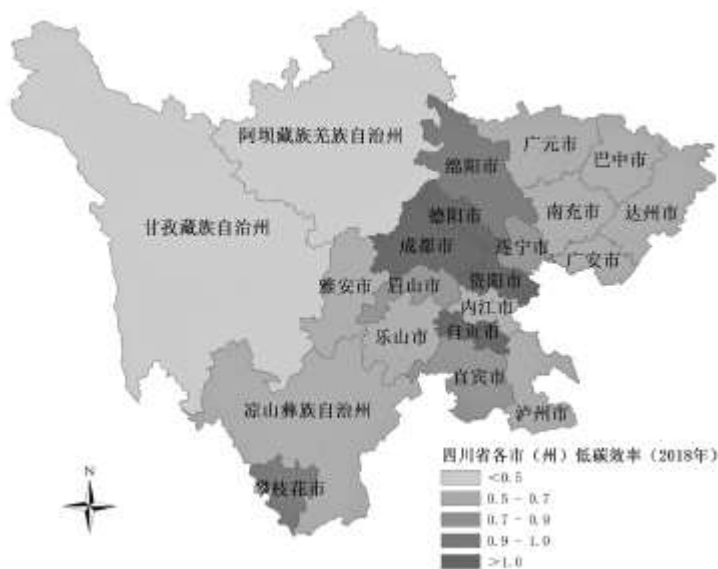


图 6 2018 年四川省低碳效率分布图

阿坝藏族自治州、甘孜藏族自治州低碳效率最低，2018 年分别为 0.2974、0.4748，造成这种现象的主要原因是西部高山高原区气候与地质条件恶劣、人口稀少，生产工艺、技术水平落后，能源利用效率较低，居民低碳环保意识不足，技术密集型产业和服务业比重极低，故上述区域面临巨大的资源和环境压力，制约着低碳经济的形成和发展。低碳效率较低的区域还包括广元市、巴中市等欠发达地区，其未来还将面临工业化快速发展带来的碳排放绝对值增长局面，对碳减排目标的实现造成很大压力。川南地区北部的内江市作为四川省的老工业基地，历年来煤、油消费量在一次能源消费量中的比重超过 80%，且近年来产业转型成效并不显著，故也是四川省低碳发展的低效率区域。

攀枝花市作为四川省乃至全国重要的煤炭和铁矿产区，特殊的地理位置、资源禀赋条件以及经济发展布局造成了钢铁工业和能源工业在攀枝花市占有很大的比重，2010 年前区域低碳效率显著较低。但近年来，攀枝花市通过多措并举共同推动全社会

能源消耗总量和单位 GDP 能耗下降工作，依托风能、水能资源禀赋优势，着力优化能源结构，大力发展清洁能源，逐步形成以水电为支柱，火电为支撑，风电、光伏发电、垃圾发电为补充，沼气和天然气、太阳能光热应用全面突破的能源发展新格局，清洁能源占一次能源消费量的比重从 2015 年的 26.94% 上升到 2018 年的 35.45%，远远超过了全国 2018 年 14.3% 的平均水平。与此同时，依据四川省统计局公布的全省 21 个市(州)节能降耗数据，2018 年攀枝花市全社会能耗增量为-6.9 万吨标准煤、单位 GDP 能耗下降率为 7.44%，均排名第二，位居全省前列，从而带动攀枝花市的低碳效率从 2005 年的全省末位上升至 2018 年的全省第六位。

随着“成渝双城经济圈”战略的提出，将进一步推动区域产业结构协同优化升级，实现成渝地区经济发展水平的有效提升，但经济发展伴随的能源消耗与 CO₂ 排放源增加是一把“双刃剑”，由此造成了产业发展策略对区域整体低碳效率的影响具有不确定性。成都市作为双城经济圈建设的中心城市，未来将吸引更多“低能耗、低污染”的高新产业聚集，调整后的产业结构对本地区发展具有环境友好性。然而，周边地区将承接大量从中心城市潜移、淘汰的“高能耗、高污染”产业，对生态环境造成干预和影响。与此同时，四川省不同市(州)发展水平差异显著，对于部分不发达区域，虽然现今的碳排放强度较低，但未来将会面临工业化、城镇化加速发展阶段带来的温室气体排放快速增长局面，与此同时，“污染避难所”现象在四川省仍然存在，欠发达地区宽松的环境规制形势造成高碳排放企业“趋利所至”，对区域低碳效率的提升造成很大压力^[22]。

由此可得，为了有效推动“成渝双城经济圈”的协同一体化发展，在区域产业结构调整过程中应充分考虑弱势地区的产业优化转型、接纳和分配问题，而不仅仅只是将“高能耗、高污染”产业转移至周边城市^[23]。除了分享产业协同效益外，各区域还应该在该在环境责任方面推行共担模式，实现经济社会发展与节能减排任务平等对待、责任共担。

3 结论与建议

成都、自贡等发达地区对外开放较早，产业结构合理，居民低碳意识较强，故低碳效率较高；阿坝、甘孜等西部高山高原区气候与地质条件恶劣、人口稀少，生产工艺、技术水平落后，能源利用效率较低，制约着区域低碳经济的形成和发展；广元、巴中等欠发达地区现阶段低碳效率较低，且未来还将面临工业化快速发展带来的碳排放绝对值增长局面，对碳减排目标的实现造成很大压力；攀枝花作为四川省乃至全国重要的煤炭和铁矿产区，近年来依托风能、水能资源禀赋优势，着力优化能源结构，带动区域低碳效率显著上升。基于以上分析结果，结合四川省的发展现状针对性地提出几点建议：

(1) 经济发展不协调致使低碳效率地域差异显著，应定位区域发展优势，制定差异化减排策略：发达地区应以巩固现有低碳发展成果为基础，着眼于新能源汽车、智能电网、节能环保为主导的重点低碳产业，加快培育食品业、冶金业、电子产品制造业、现代服务业等先进产业集群。欠发达地区应积极学习先进的低碳发展经验，可参照广元低碳试点城市建设做法，着力发展生态农业和康养旅游业等特色低碳产业，积极发展民用天然气用户，实现未来经济发展与碳排放脱钩。

(2) 积极聚焦四川省冶金、建材、化工等碳排放重点行业，尽快将其纳入“碳交易”市场，出台重点行业低碳改造技术指南，倒逼企业不断提升能源效率及生产效率。在四川省“5+1”现代产业体系的政策引导下，电子信息、食品饮料、装备制造、新型材料、能源化工五大产业的支柱作用有待进一步增强，未来仍需以政策引导加快部署传统产业转型升级，着重加大对绿色载能、多晶硅、光伏等清洁能源领域战略性新兴产业的培育与发展，多措并举引领经济发展低碳高效新趋势，做强“一干多支”发展战略的产业支撑。

(3) 加快常规天然气增产步伐、推进非常规天然气勘探开发，推广天然气分布式能源系统的应用，全面发展居民用气、交通工具“油改气”、工业企业“煤改气”及部分化工原料用气，有序推进中国“气大庆”工程建设。立足资源禀赋优势统筹推进水电和新能源开发，开展风电、光伏竞争性配置，结合水库电站建设推进风光水互补开发，加快构建绿色多元的能源供应体系，增强清洁能源供应保障能力。

(4)加大低碳领域的技术创新,如碳捕捉利用与储存(CCUS)技术、煤炭绿色开采和清洁利用技术、多能互补联供技术等,从而提升常规能源利用效率,推动新能源的开发利用。继续推进煤电机组节能减排升级改造,加强四川省燃机设备的自主研发和示范应用。密切关注能源互联网、氢能、储能等前沿技术和业态发展动向,推进核心技术装备攻关和新业态新模式发展。

(5)加快推动电能替代工作,积极引导工业生产、交通运输、农业生产、供暖供冷、家具家电等领域因地制宜地实施“以电代煤、以电代油、以电代柴”,着力提升电能终端能源消费中的比重。深入研究成渝地区双城经济圈中长期电力增长需要,按照“川渝电网加强、川电送渝增量”的原则,推动川渝电网一体化发展。加强农村电网升级改造力度,大力发展光伏扶贫项目。

参考文献:

[1]Mehmood K,Iftikhar Y,Chen S M,et al.Analysis of inter-temporal change in the energy and CO₂ emissions efficiency of economies:A two divisional network DEA approach[J].Energies,2020,13(13):3300.

[2]潘文砚,王宗军.我国区域低碳效率实证研究[J].金融与经济,2013(9):15-18.

[3]Meng M,Fu Y N,Wang L X.Low-carbon economy efficiency analysis of China's provinces based on a range-adjusted measure and data envelopment analysis model[J].Journal of Cleaner Production,2018,199:643-650.

[4]周平.基于超效率DEA模型的区域低碳效率空间分异——以湖南省各市州为例[J].经济地理,2017(3):188-192.

[5]Chen Y,Xu W,Zhou Q,et al.Total factor energy efficiency,carbon emission efficiency,and technology gap:Evidence from sub-industries of Anhui Province in China[J].Sustainability,2020,12(4):1402.

[6]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.

[7]杨龙,胡晓珍.基于DEA的中国绿色经济效率地区差异与收敛分析[J].经济学家,2010(2):46-54.

[8]Banker R D,Charnes A,Cooper W W.Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J].Management Science,1984,30(9):1078-1092.

[9]Zhou C S,Shi C Y,Wang S J,et al.Estimation of eco-efficiency and its influencing factors in Guangdong Province based on Super-SBM and panel regression models[J].Ecological Indicators,2018,86:67-80.

[10]Andersen P,Petersen N C.A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J].Management Science,1993,39(10):1261-1264.

[11]胡青江,陈彤,闫海龙.财政分权视角下城镇化对绿色经济效率的影响实证研究[J].商业经济研究,2020(15):181-184.

[12]Tone K.A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J].European Journal of Operational Research,2001,130(3):498-509.

-
- [13]王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020(6): 1316-1330.
- [14]Goldsmith R W. A perpetual inventory of national wealth[R]. Cambridge:National Bureau of Economic Research, 1951.
- [15]张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10): 35-44.
- [16]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.
- [17]柯善咨, 向娟. 1996—2009 年中国城市固定资本存量估算[J]. 统计研究, 2012(7): 19-24.
- [18]张健华, 王鹏. 中国全要素生产率: 基于分省份资本折旧率的再估计[J]. 管理世界, 2012(10): 18-30.
- [19]张雪花, 许文博, 张宝安. 雄安新区对京津冀城市群低碳协同发展促进作用预评估[J]. 经济地理, 2020(3): 16-23.
- [20]刘晓婷, 陈闻君. 基于 ESDA-GIS 的新疆能源碳排放空间差异动态演化分析[J]. 干旱区地理, 2016(3): 678-685.
- [21]王娟. 基于 GIS 网络分析的生态住区绿色交通出行效率研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [22]张彩云, 苏丹妮. 环境规制、要素禀赋与企业选址——兼论“污染避难所效应”和“要素禀赋假说”[J]. 产业经济研究, 2020(3): 43-56.
- [23]刘小差, 冯瑜. 统筹成渝双城经济圈产业要素合理流动和高效集聚[J]. 中国发展观察, 2020(12): 51-55.