

川渝地区碳排放效率测度及其影响因素研究

刘与秋

云南财经大学物流与管理工程学院，云南 昆明

收稿日期：2024年12月26日；录用日期：2025年1月17日；发布日期：2025年1月28日

摘要

在新的历史发展阶段，经济发展迫切需要低碳转型，节能减排和绿色低碳已成为我国经济发展的重中之重，提高碳排放效率是实现“双碳”目标的同时保持经济高质量发展的关键。本文基于2003~2021年川渝地区22个城市面板数据，采用考虑非期望产出的Super-SBM模型以及Global-Malmquist-Luenberger指数法测算碳排放效率，利用面板Tobit模型探究了区域碳排放效率的因素。结果表明：(1) 碳排放效率变化呈“U”型趋势，已经完成由恶化到进步的转变，碳排放绩效呈加速提高的态势；(2) GML指数显示，碳排放效率增速经历了先迅速上升后逐渐放缓的趋势；(3) 效率分解——2009年后川渝地区整体碳排放水平的提高，由单维的技术进步贡献转变为技术效率和技术进步双重贡献；(4) 土地结构、工业产业结构、政府干预程度、城镇化水平对川渝地区碳排放效率具有显著负向相应。绿色技术创新能力、经济发展水平对川渝地区碳排放效率具有显著正向效应。

关键词

碳排放效率，Tobit回归，影响因素，SBM模型，川渝地区

Research on the Measurement of Carbon Emission Efficiency and Its Influencing Factors in Sichuan-Chongqing Region

Yuqiu Liu

School of Logistics and Management Engineering, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming Yunnan

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

文章引用：刘与秋. 川渝地区碳排放效率测度及其影响因素研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(1): 260-272.
DOI: 10.12677/mse.2025.141027

Abstract

In the new historical development stage, economic development urgently needs low-carbon transformation, energy saving, emission reduction and green low-carbon has become the top priority of China's economic development, and improving carbon emission efficiency is the key to achieve the "double carbon" goal while maintaining high-quality economic development. Based on the panel data of 22 cities in Sichuan and Chongqing region from 2003 to 2021, this paper uses the Super-SBM model considering non-expected output and the Global-Malmquist-Luenberger index method to measure carbon emission efficiency, and uses the panel Tobit model to explore the factors of regional carbon emission efficiency. The results show that: (1) The change of carbon emission efficiency shows a U-shaped trend, which has completed the transformation from deterioration to progress, and the carbon emission performance shows an accelerated trend of improvement; (2) GML index shows that the growth rate of carbon emission efficiency has experienced a trend of rapid rise and then gradual slowdown; (3) Efficiency decomposition—the improvement of the overall carbon emission level in Sichuan and Chongqing region after 2009 has changed from the single-dimensional contribution of technological progress to the dual contribution of technological efficiency and technological progress; (4) Land structure, industrial structure, government intervention degree and urbanization level have significant negative corresponding effects on carbon emission efficiency in Sichuan and Chongqing region. Green technology innovation ability and economic development level have significant positive effects on carbon emission efficiency in Sichuan and Chongqing region.

Keywords

Carbon Emission Efficiency, Tobit Regression, Influencing Factors, SBM Model, Sichuan-Chongqing Region

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

因气候变暖引发的海平面上升、灾害频发、生物多样性减少等一系列生态环境问题被视为全球十大环境危机之首[1]。Friedlingstein 等人[2]的研究发现，2013 年中国碳排放量占全球碳排放量的近 30%，几乎等同于欧盟与美国碳排放量的总和。目前，我国温室气体排放总量已居世界第二位[3]。为应对全球气候变化，中国政府在 2020 年作出了“力争在 2030 年前实现碳达峰，努力争取在 2060 年前实现碳中和”的承诺。碳排放效率作为经济发展和节能减排有机融合的核心体现，是一个国家“降碳促经”效用的关键所在，提高碳排放效率对“双碳”目标的实现有着极大的推动作用[4]。成渝城市群处于全国“两横三纵”城市化战略格局沿长江通道横轴和包昆通道纵轴的交汇地带，是全国最重要的城镇化区域，也是西部经济基础最好、经济实力最强的区域之一[5]。但目前关于碳排放相关研究多集中于省际和长三角、珠三角城市群的碳排放测度，以成渝新兴城市群为对象的系统研究比较少。因此，展开对成渝地区碳排放效率的影响及作用机制研究十分必要。

从研究进展来看，与本文密切相关的文献有两支。其一是对碳排放效率的测度，目前对碳排放效率的研究方法主要分为两大类：一类是需要对效率前沿做出一系列的假设，对多投入多产出的处理存在一

定难度的非参数法[6]；另一类是利用线性规划，能更好地处理多投入多产出问题的非参数法，如数据包络分析方法以及进一步演化的 SBM 超效率(Super Efficiency Slacks-based Measure)模型[7]，此类方法的应用更加广泛。主要使用的投入指标为资本、劳动力和能源消耗，产出指标为国内生产总值，非期望产出指标为二氧化碳排放量[8][9]。其二是探讨碳排放的影响因素，现有文献集中于考察地方政府行为如政府竞争、环境规制[10]，及外部环境如金融发展[11]、金融科技[12]、数字技术[13]、“两业”融合[14]等因素对碳排放强度或效率的作用效果。

川渝地区总体碳排放效率如何，地级市之间碳排放效率差距如何，哪些因素影响碳排放效率水平？本文基于这些问题，运用超效率 SBM 模型，对川渝地区 2003~2021 年碳排放效率的静态和动态变化进行实证研究，并利用 Tobit 回归模型，分析碳排放效率的影响因素。

2. 研究方法

2.1. 碳排放效率的测度

2.1.1. 非期望产出的超效率 SBM 模型

传统 DEA 模型大多数使用角度和径向测度来计算决策单元的效率，只能单一地从投入或产出角度出发，也难以充分考虑投入产出的松弛性问题，对无效率程度的度量只包含了所有投入(产出)等比例缩减(增加)的比例，而非径向非角度的超效率 SBM 模型就能够同时从投入和产出两个角度来对无效率状况进行测量，避免了因径向和角度的选择所带来的影响[6]。因此选择超效率 SBM 模型对城市碳排放效率进行测算，具体模型如下：

$$\begin{aligned} \min \varphi = & \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^-}{\frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \frac{s_r^+}{y_{r0}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{s_t^{b-}}{b_{t0}} \right)} \\ s.t. & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1, j \neq j_0}^n x_j \lambda_j - s^- \leq x_0 \quad (i = 1, \dots, m) \\ \sum_{j=1, j \neq j_0}^n y_j \lambda_j - s^+ \leq y_0 \quad (r = 1, \dots, q_1) \\ \sum_{j=1, j \neq j_0}^n b_j \lambda_j - s^{b-} \leq b_0 \quad (t = 1, \dots, q_2) \\ 1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \sum_{r=1}^{q_1} \frac{s_r^+}{y_{r0}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{s_t^{b-}}{b_{t0}} > 0 \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+, s_t^{b-} \geq 0 \quad (j = 1, \dots, n, j \neq j_0) \end{array} \right. \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中， φ 为城市碳排放效率值； j 为各个决策单元， n 为决策单元个数， m ， q_1 ， q_2 分别为投入、期望产出和非期望产出的指标数量； s_i^- ， s_r^+ ， s_t^{b-} 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量； λ_j 为强度变量； x_j ， y_j ， b_j 分别为第 j 个决策单元的 m 维投入变量； q_1 为维期望产出变量； q_2 为维非期望产出变量； x_0 ， y_0 ， b_0 分别为被评价决策单元 DMU_0 的投入变量、产出变量和非期望产出变量。

2.1.2. Global-Malmquist-Luenberger 指数模型

参考赵桂梅等人[15]的成果，采用全球马姆奎斯特 - 伦伯格(GML)指数分解法定量分析河北省农业碳排放效率，并将 GML 指数分解为技术效率变化(EC)指数和技术进步变化(TC)指数，进一步分析驱动城市碳排放效率变化的内在因素。具体公式如下：

$$\begin{aligned}
GML_k(t, s) &= \frac{1+D^G(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})}{1+D^G(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})} = \frac{1+D^t(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})}{1+D^s(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})} \times \\
&\quad \frac{1+D^G(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})}{1+D^t(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})} \times \frac{1+D^s(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})}{1+D^G(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})} \\
&= EC_k(t, s) \times TC_k(t, s)
\end{aligned} \tag{2-2}$$

式中： $D^G(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})$ 、 $D^G(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})$ 分别为第 k 个决策单元在 t 时期、 s 时期的全局方向距离函数， $D^t(x_k^t, y_k^{gt}, y_k^{bt}; y_k^{gt}, -y_k^{bt})$ 、 $D^s(x_k^s, y_k^{gs}, y_k^{bs}; y_k^{gs}, -y_k^{bs})$ 分别表示第 k 个决策单元在 t 时期、 s 时期的当前方向距离函数，分别为 x_k 、 y_k^g 、 y_k^b 投入、期望产出和非期望产出。

2.2. Tobit 面板回归

Tobit 模型，由经济学家 James Tobin 在 1958 年提出，是一种用于处理因变量存在截断现象的计量经济学模型。该模型考虑了截断数据的影响，可以有效地处理存在截断数据的问题，该模型特别适用于因变量的观测值被限制在某个区间内，本文碳排放效率的取值范围是 $[0, 1]$ ，因此选择 Tobit 回归模型更加合适、准确。将第三章求得的川渝地区各个城市的碳排放效率作为解释变量，选取的影响因素作为因变量，用 Tobit 回归模型对川渝地区 22 个城市碳排放效率的影响因素进行分析。构建 Tobit 模型基本如下：

$$\begin{aligned}
y_{pt}^* &= \beta x_{pt} + \mu_{pt} \\
y_{pt} &= \begin{cases} y_{pt}^*, 0 < y_{pt}^* \leq 1 \\ 0, y_{pt}^* \leq 0, y_{pt}^* > 1 \end{cases}
\end{aligned} \tag{2-3}$$

式中， y_i^* 为潜变量向量； y_i 为实际的被解释变量观察值，即第三章中测算的川渝地区各城市碳排放效率值； x_i 表示解释变量，即影响川渝地区各个城市碳排放效率的影响因素； β 为相关系数向量，表示解释变量的待估系数； μ_i 为随机误差项，独立且服从正态分布，即 $\delta_i \sim N(0, \sigma^2)$ ； y_i 为碳排放效率值。

3. 研究对象、数据来源及指标选取

3.1. 研究对象和数据来源

选择川渝地区共 22 个城市作为研究对象，并以 2003~2021 年作为研究时段。年末就业人数、全社会固定资产投资额以及地区生产总值等社会经济数据主要来源于 2003~2021 年《中国城市统计年鉴》、各地级市统计年鉴，缺失的个别数据通过插值法进行相应补充处理；能源消耗来源于 figshare 平台，通过夜间灯光推演得到；碳排放总量数据来源于 China Emission Accounts and Datasets (CEADs) 数据库 (<https://www.ceads.net.cn>)。

3.2. 指标选取与处理

3.2.1. 投入产出变量

本研究依据科学性、可比性和可操作性的原则，借鉴现有文献中的研究成果，针对碳排放效率评价指标进行筛选，并考虑到数据的可用性，从而建立了以下指标体系如表 1 所示。其中劳动力投入用城市年末从业人数衡量；资本投入用城市全社会固定资产投资总额衡量；能源投入用城市夜光数据反演测算得到，并依照标准煤折合系数折算为标准煤；期望产出以地区生产总值衡量；非期望产出以城市二氧化碳排放总量衡量。碳排放效率测算中，价值型变量均以 2003 年为基期进行平减。

Table 1. Carbon emission efficiency index system
表 1. 碳排放效率指标体系

变量类别	变量名称	衡量指标选取	原始数据来源
投入要素	资本	全社会固定资产投资额	《城市统计年鉴》
	劳动力	年末就业人数	EPS 全球统计数据
	能源消耗	夜间灯光数据反向推演	Figshare 平台
期望产出	地区生产总值	地区生产总值	《城市统计年鉴》
非期望产出	二氧化碳排放量	夜间灯光数据反向推演	CEADs 数据库

3.2.2. 影响因素变量

识别影响碳排放效率的因素对于提高川渝地区碳排放效率至关重要。本研究参考了相关领域的先前研究以及市级面板数据的可获得性，本文最终从土地结构[16]、技术水平[17]、经济水平、产业结构[18]、政府干预、人口[10]六个方面考察。变量具体情况如表 2 所示。

Table 2. Definition of variables affecting urban carbon emission efficiency in Sichuan and Chongqing region and descriptive statistical analysis table

表 2. 影响川渝地区城市碳排放效率的变量定义及描述性统计分析表

	变量	符号	解释	均值	标准差
土地结构	土地错配指数	land	2003~2008 年：协议出让土地面积/全部出让土地面积； 2009~2021 年：工矿仓储用地供应面积/国有建设用地出让总面积	0.46	0.20
	经济发展水平	ey	城市绿色专利授权数		
技术水平	经济增长压力	egp	实际人均 GDP	2.89	1.87
	城镇化水平	ul	城市 GDP 增长率 - 省内平均 GDP 增长率		
产业结构	工业产业结构	is	城镇人口/常住人口	0.96	0.22
	政府干预程度	gp	第二产业产值/GDP		
人口	居住人口密度	rpd	财政支出/GDP	41.04	12.18
			每平方千米的人口数	46.23	10.60
				26.53	24.24
				385.72	277.25

4. 碳排放效率实证分析

超效率 SBM 模型允许对那些在常规 SBM 模型中效率值为 1 的决策单元进行进一步的区分和排序。在超效率 SBM 模型中，效率值大于 1 意味着决策单元不仅在技术上是有效的，而且相对于其他有效的决策单元，它们在资源利用上更为高效。

4.1. 碳排放效率值静态特征

本文基于川渝地区 22 个城市 2003~2021 年相关数据，运用 Dearun3.2 软件求解超效率 SBM 模型，得出各个城市 2003~2021 年的碳排放效率值，并计算出期间每年的碳排放效率均值。碳排放效率值及其均值如表 3 所示。

整体来看，川渝地区各城市 2003~2021 年间的碳排放效率年平均增长率为 3.38%，说明近年来随着“双碳”目标的提出，川渝地区的碳排放效率有所提高，经济结构向低碳方向转型，但从效率的均值来看，2003~2021 年的川渝地区平均碳排放效率为 0.58，整体效率较低，有 13 个城市的效率位于平均水平

以下，这意味着在同等的投入情况下，大部分的城市碳排放效率仍有非常大的减排空间，提高弱势城市的碳排放效率任重而道远。

Table 3. Carbon emission efficiency and growth of super efficiency SBM model in 22 cities in Sichuan and Chongqing
表 3. 川渝 22 城超效率 SBM 模型碳排放效率及增长情况

城市	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
重庆	0.16	0.16	0.16	0.18	0.21	0.23	0.28	0.32	0.35	0.40	0.46
成都	0.44	0.38	1.02	0.42	0.84	0.46	0.48	0.70	0.66	0.89	0.72
德阳	0.45	0.54	0.67	0.60	0.63	0.58	0.63	0.46	0.45	0.57	0.57
绵阳	0.44	0.33	0.33	0.40	0.36	0.47	0.39	0.40	0.38	0.59	0.48
内江	0.53	0.46	0.55	0.54	0.43	0.45	0.42	0.46	0.50	0.61	0.53
自贡	0.78	0.70	0.78	0.72	0.83	0.61	0.86	0.93	0.64	0.83	0.88
达州	0.64	0.59	0.52	0.43	0.53	0.54	0.46	0.44	0.38	0.55	0.43
广安	1.02	0.37	0.50	0.36	0.44	0.36	0.38	0.41	0.39	0.48	0.48
南充	0.40	0.28	0.28	0.28	0.28	0.36	0.33	0.39	0.34	0.35	0.39
遂宁	0.42	0.82	0.71	0.43	0.53	0.48	0.38	0.41	0.41	0.47	0.54
宜宾	0.75	0.46	0.56	0.65	0.45	0.44	0.47	0.58	0.57	0.64	0.74
资阳	1.05	0.76	0.56	0.88	0.56	0.73	0.57	0.57	0.58	0.57	0.79
泸州	0.83	0.46	0.39	0.62	0.44	0.46	0.49	0.43	0.44	0.55	0.52
雅安	0.57	0.65	0.51	0.67	0.43	0.43	0.42	0.41	0.52	0.45	0.49
乐山	0.48	0.43	0.37	0.45	0.55	0.53	0.44	0.50	0.43	0.50	0.51
眉山	0.44	0.42	0.36	0.45	0.37	0.37	0.36	0.37	0.38	0.43	0.43
广元	0.37	0.45	0.46	0.65	0.35	0.41	0.40	0.32	0.34	0.36	0.44
巴中	1.08	0.84	0.79	1.01	0.65	0.58	0.62	0.69	0.60	0.66	0.63
攀枝花	0.61	0.58	0.56	0.56	0.54	0.67	0.56	0.62	0.57	0.68	0.70
凉山彝族自治州	0.43	0.36	0.33	0.40	0.33	0.38	0.36	0.46	0.46	0.38	0.50
甘孜藏族自治州	1.15	0.62	0.51	0.55	0.47	0.38	0.40	0.42	0.41	0.42	0.46
阿坝藏族羌族自治州	1.09	0.78	0.63	0.61	0.56	0.45	0.47	0.47	0.49	0.57	0.62
均值	0.64	0.52	0.52	0.54	0.49	0.47	0.46	0.49	0.47	0.54	0.56
城市	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	年均增长率(%)	均值	
重庆	0.50	0.55	0.67	0.73	0.78	0.82	0.87	1.05	11.24	0.47	
成都	0.75	0.83	0.82	0.89	0.91	1.06	1.03	1.04	13.85	0.76	
德阳	0.58	0.78	0.78	0.96	0.73	1.04	0.88	1.04	6.48	0.68	
绵阳	0.54	0.58	0.57	0.65	0.79	0.83	0.83	0.77	4.73	0.53	
内江	0.56	0.73	0.60	0.61	0.63	0.64	0.73	0.64	2.03	0.56	
自贡	1.01	0.93	0.87	1.01	1.04	0.87	0.95	1.04	3.18	0.86	
达州	0.44	0.43	0.45	0.65	0.47	0.56	0.64	0.73	2.66	0.52	
广安	0.44	0.53	0.54	0.48	0.49	0.52	0.57	0.57	-0.06	0.49	
南充	0.37	0.44	0.40	0.40	0.42	0.44	0.63	0.62	3.72	0.39	
遂宁	0.46	0.48	0.60	0.53	0.54	0.57	0.59	0.65	5.37	0.53	
宜宾	0.73	0.79	0.67	0.73	0.89	1.04	1.01	1.03	3.35	0.69	

续表

	0.62	0.63	0.71	1.00	1.01	1.01	1.02	1.01	2.70	0.77
资阳	0.62	0.63	0.71	1.00	1.01	1.01	1.02	1.01	2.70	0.77
泸州	0.56	0.67	0.61	0.60	0.78	0.69	0.71	0.76	1.90	0.58
雅安	0.49	0.55	0.54	0.57	0.52	0.51	0.59	0.62	1.76	0.52
乐山	0.57	0.65	0.53	0.56	0.67	0.72	0.62	0.85	4.41	0.55
眉山	0.46	0.60	0.47	0.52	0.55	0.52	0.51	0.52	1.78	0.45
广元	0.40	0.44	0.44	0.44	0.47	0.46	0.48	0.51	3.65	0.43
巴中	0.64	0.73	0.75	0.68	0.75	0.69	0.67	0.68	-1.47	0.72
攀枝花	0.75	0.90	0.85	1.03	0.92	1.03	0.99	1.03	3.61	0.74
凉山彝族自治州	0.53	0.39	0.51	0.41	0.41	0.42	0.43	0.43	1.52	0.42
甘孜藏族自治州	0.44	0.45	0.48	0.49	0.52	0.47	0.53	0.55	-2.78	0.51
阿坝藏族羌族自治州	0.63	0.63	0.63	0.66	0.64	0.61	0.74	1.02	0.71	0.65
均值	0.57	0.62	0.61	0.66	0.68	0.70	0.73	0.78	3.38	0.58

从时间看，2003~2021年碳排放效率有一定波动，但整体呈现“先下降后上升”的“U”型发展趋势。2009年前的碳排放效率处于下降趋势，其均值从2003年的0.64降至2009年的0.46。而在2009年之后，随着川渝地区对碳减排法重视和各种减碳政策的实施，城市碳排放效率呈现一定上升趋势，2021年达到了0.78。分析碳排放效率呈“U”型变化的原因，可能是2003年到2009年，川渝地区处于经济快速发展阶段，工业化和城市化进程加快，能源需求迅速增长，尤其是对煤炭等传统能源的依赖，导致碳排放量增加，碳排放效率下降。而2010年之后，随着经济结构的调整和产业升级，高能耗、高排放的产业比重下降，碳排放效率得到提升。另外，2010年前，节能减排政策可能尚未得到充分实施或执行力度不够，导致碳排放效率下降。2010年之后，政府加大了对节能减排政策的推行力度，如实施“节能产品惠民工程”等，有效促进了碳排放效率的提升。

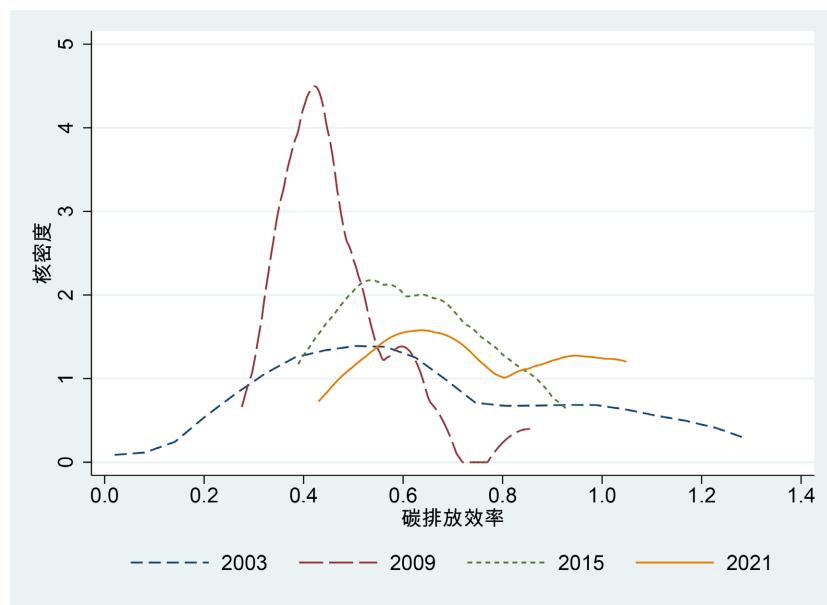


Figure 1. Nuclear density map of carbon emission efficiency in Sichuan-Chongqing region
图 1. 川渝地区碳排放效率核密度图

由图1可知,川渝地区22个城市的碳排放效率均值在研究期间整体上呈先下降后上升的“U”型趋势。各城市的碳排放效率均值由低值集中逐渐转变为中值集中和两端收窄状态,从整体曲线走势来看,碳排放效率已经出现由恶化到进步的转变,碳排放效率呈加速提高的态势。值得注意的是,2003年曲线两端扩散,碳排放效率低值集中,表明有少量城市的碳排放效率较高但是整体城市碳排放效率水平偏低,随着时间推移,2021年曲线变为中高值与高值集中,曲线两端缩窄,表明区域内各城市碳排放效率的差距在逐步缩小,大量城市的碳排放效率逐渐趋向于高端水平。

4.2. 碳排放效率 GML 指数分解分解

为进一步分析各城市碳排放效率的动态变化,采用GML生产率指数法,对GML(碳排放效率变化指数)及其分解项EC(技术效率变化指数)、TC(技术进步指数)进行分析,结果如表4所示。

Table 4. GML index and decomposition mean of carbon emission efficiency of 22 cities in Sichuan and Chongqing from 2003 to 2021

表 4. 2003~2021 年川渝 22 城碳排放效率水平的 GML 指数及其分解均值

城市	2003~2009			2009~2015			2015~2021		
	EC	TC	GML	EC	TC	GML	EC	TC	GML
重庆	1.00	1.01	1.01	1.00	1.31	1.31	1.00	1.48	1.48
成都	1.00	1.12	1.12	1.00	1.26	1.26	1.00	1.09	1.09
德阳	1.00	1.23	1.23	1.00	1.34	1.34	1.00	1.13	1.13
绵阳	0.93	1.20	1.12	1.03	1.32	1.36	1.03	1.14	1.17
内江	0.97	1.15	1.11	1.10	1.23	1.35	0.96	1.14	1.09
自贡	1.00	1.24	1.24	1.00	1.32	1.32	1.00	1.12	1.12
达州	0.96	1.14	1.10	0.93	1.35	1.26	1.09	1.14	1.24
广安	0.96	1.05	1.02	1.05	1.20	1.26	0.99	1.14	1.13
南充	0.99	1.04	1.03	1.01	1.22	1.23	1.05	1.16	1.22
遂宁	0.96	1.06	1.02	1.04	1.19	1.24	1.11	1.11	1.23
宜宾	0.99	1.12	1.11	1.01	1.33	1.34	1.00	1.20	1.20
资阳	1.00	1.19	1.19	1.00	1.28	1.28	1.00	1.22	1.22
泸州	1.01	1.10	1.11	1.04	1.28	1.33	0.98	1.19	1.17
雅安	0.92	1.10	1.01	0.98	1.10	1.08	1.06	1.10	1.17
乐山	1.02	1.03	1.05	1.09	1.26	1.37	1.00	1.20	1.19
眉山	0.97	1.05	1.02	1.10	1.16	1.28	0.95	1.15	1.09
广元	0.99	1.03	1.01	1.03	1.12	1.15	1.04	1.07	1.11
巴中	1.00	1.05	1.05	0.73	1.67	1.21	0.98	1.09	1.07
攀枝花	1.00	1.06	1.06	1.00	1.56	1.56	1.00	1.18	1.18
凉山彝族自治州	1.01	1.09	1.10	0.98	1.26	1.24	0.99	1.10	1.09
甘孜藏族自治州	0.99	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
阿坝藏族羌族自治州	0.99	1.01	1.00	0.99	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
川渝地区	0.98	1.09	1.08	1.01	1.26	1.26	1.01	1.14	1.15

2003~2009 年川渝地 GML 指数几何平均值为 1.08，年均提升 8%，到 2009~2015 年 GML 指数几何平均值为 1.26，年均提升 26%，增速较快，但 2015~2021 年 GML 指数下降为 1.15，这表明川渝地区城市的碳排放效率在不断提升，但是从 2009 年以后碳排放效率提升速率变慢。从驱动因素上来看，川渝地区整体碳排放水平的提高，由单维的技术进步贡献转变为技术效率和技术进步双重贡献，特别是以重庆和成都为技术进步中心城市向外缘城市辐射。分城市看，重庆、成都、德阳作为区域内的重要城市，其碳排放效率变化指数在三个时间段内保持相对稳定，显示出较好的能源管理和技术进步。

4.2.1. GML 指数

从图 2 可以看出，2003~2021 年川渝地区碳排放 GML 指数整体上效率都大于 1，但是其增速经历了先迅速上升后逐渐放缓的趋势。



Figure 2. Hot spot chart of GML index change trend of cities in Sichuan and Chongqing from 2003 to 2021

图 2. 2003~2021 年川渝各地市 GML 指数变化趋势热点图

4.2.2. EC 指数

从图 3 来看，2003~2021 年川渝地区的 EC 指数整体上没有较大的波动比较平缓，大部分城市 EC 指数都呈现低效情况。从各地级市来看，阿坝藏族自治州、甘孜藏族自治州、攀枝花市、成都市、德阳市、巴中市、资阳市、重庆市、自贡市在小范围内上下波动，整体变化幅度较为平缓与川渝地区整体的变化趋势较为一致。雅安市、内江市、宜宾市、广安市、眉山市呈先上升后下降的变化趋势；遂宁市经历了逐渐上升的变化趋势；凉山彝族自治州、泸州市乐山市经历了逐渐降低，最后变为低效的趋势；广元市、南充市、达州市、绵阳市、达州市经历了缓慢上升然后趋于平稳的变化趋势。

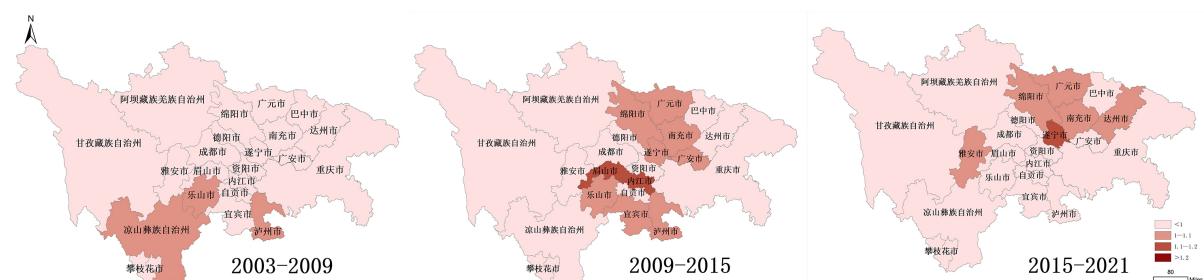


Figure 3. Change trend of EC index in Sichuan and Chongqing cities from 2003 to 2021

图 3. 2003~2021 年川渝各地市 EC 指数变化趋势

4.2.3. TC 指数

从图 4 中可以看出 2003~2021 年各地市的 TC 指数整体呈波动变化的趋势，不同地市的变化差异较大。甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、广元市、广安市、巴中市、遂宁市整体波动较小趋于平稳；绵阳市、德阳市、自贡市在 2015~2021 年年均 TC 指数呈下降趋势，重庆市、宜宾市、雅安市、资阳市、

眉山市呈逐渐上升的趋势；凉山彝族自治州、乐山市、成都市、南充市、达州市、攀枝花市、内江市、泸州市呈先上升后下降的变化趋势。

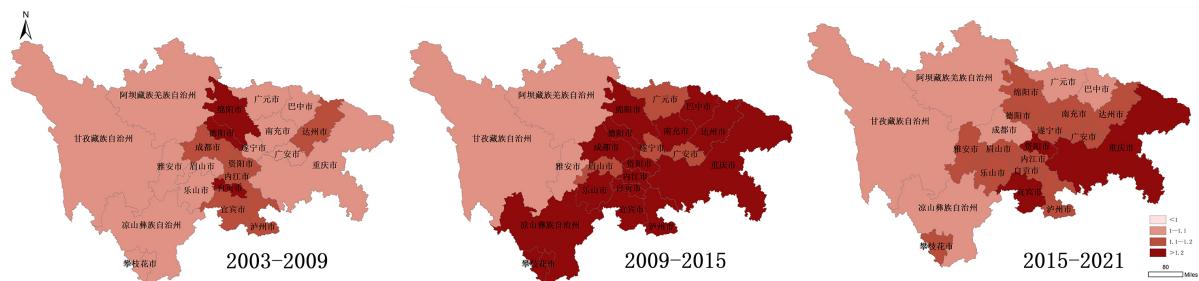


Figure 4. Change trend of TC index in Sichuan and Chongqing cities from 2003 to 2021
图 4. 2003~2021 年川渝各地市 TC 指数变化趋势

5. 川渝地区碳排放效率影响因素实证分析

模型基准回归结果如表 5 所示，由于碳排放数据存在删失，应首先考虑使用面板 Tobit 模型，LR 检验拒绝了混合 Tobit 模型的原假设，因此最终选取面板随机效应 Tobit 模型作为分析川渝地区碳排放效率影响因素的具体模型形式。

Table 5. Regression results of Tobit model in panel
表 5. 面板 Tobit 模型回归结果

CEF	系数	标准误差	Z 值	P 值
land	-0.0518*	0.029684	-1.74	0.081
lnrgti	0.0254***	0.0082865	3.06	0.002
ey	0.0704691***	0.0075791	9.3	0
is	-0.00305***	0.000821	-3.72	0
gp	-0.00262***	0.0004786	-5.48	0
rpd	0.000006	0.0000732	0.08	0.934
ul	-0.00879***	0.0018668	-4.71	0
egp	0.001070	0.0010167	1.05	0.293
_cons	0.904***	0.0734667	12.31	0
sigma_u	0.13	0.02	6.26	0.00
sigma_e	0.10	0.00	28.10	0.00
rho	0.63	0.08		

LR test of sigma_u = 0: chibar2(01) = 257.27 Prob ≥ chibar2 = 0.000

注：*、**和***分别表示估计系数通过 P < 10%、P < 5% 和 P < 1% 显著性检验。

表 5 的结果表明，模型拟合优度良好。土地错配程度以 10% 的显著水平通过检验，工业产业结构、政府干预程度、城镇化水平以 1% 的显著水平通过检验，影响为负。川渝地区政府以往为了吸引企业入驻，常使用出让工业用地和提供基础设施建设等优惠政策手段，这种行为导致会导致工业用地的增加，造成供地结构错配，进而增加了对水泥、钢铁等高能耗产品的需要，这些都会导致产生大量碳排放。另外，川渝地区在成渝双城经济圈政策的推动下得到了快速发展，城镇化加快，这导致能源消耗和碳排放量的

增加。就目前来看，这些问题的存在需要通过优化土地资源配置、推动产业结构升级、促进技术创新、调整能源结构等措施来解决。

绿色技术创新能力以 5% 的显著水平通过检验，经济发展水平以 1% 的显著水平通过检验，影响为正。目前，国家大力推动成渝地区双城经济圈建设，推进中心城区聚集高端现代功能并推动周边城市与中心城区同城化发展。川渝地区在该政策的推动下已经取得了显著的发展成果。经济上，川渝地区通过优化产业结构，推动产业升级，减少高耗能、高排放产业的比重，增加服务业和高新技术产业的比重，从而降低单位 GDP 的碳排放强度。技术创新方面，川渝地区鼓励和支持绿色低碳技术的研发和应用，提高能源利用效率，发展循环经济。此外，川渝地区还加强了生态保护和修复，提升生态系统的碳汇能力，如实施森林、湿地等生态保护工程，增强自然生态系统的碳吸收和储存能力。

经济增长压力和居住人口密度没有通过显著性检验，但这并不表示经济增长压力与居住人口密度对川渝地区碳排放效率没有影响。可能的原因是，存在其他未被模型包括的外部因素，这些因素可能对碳排放效率有影响，从而掩盖了经济增长压力和居住人口密度的作用。另外，虽然人口密度会影响带动经济发展从而影响碳排放效率，但根据第七次全国人口普查，川渝地区已经是中国人口较为密集的区域之一，尤其是重庆市和成都市，作为该地区的主要城市，吸引了大量的人口聚集，该地人口的提升空间已经有限，对于碳排放效率的影响不大。

6. 讨论与结论

6.1. 讨论

本文基于 2003~2021 年川渝地区生产投入面板数据，运用带有非期望产出的 Super-SBM 模型，对川渝地区 22 个城市碳排放效率进行了测算，并基于 Global-Malmquist-Luenberger 指数分解进行了分析，在此基础上利用面板 Tobit 模型对影响川渝地区碳排放效率的因素进行了分析。与现有省际层面研究相比，本文在研究对象的选择上关注到了川渝地区这一新兴城市群的生产与发展，同时通过动态指数分析，将不同时期的城市碳排放效率进行横向与纵向的比较，对碳排放效率的内部驱动力进行了分析。与吴丹、陈道平等对四川、重庆的碳排放研究相比，本文在关注城市碳排放量的同时，又进一步测算了城市碳排放效率，既考虑到了经济效益这一期望产出，又考虑到了生产过程中的非期望产出，能够更加全面地了解川渝地区碳排放的情况。本文为碳排放强度变化趋势提供了实证数据支持，揭示了影响川渝地区碳排放效率的关键因素，为川渝地区实现“双碳目标”和可持续发展提供了指导作用。

面板 Tobit 估计结果表明，当前影响川渝地区碳排放效率的因素主要包括了土地错配、工业产业结构、政府干预程度、城镇化水平、绿色技术创新、经济发展水平等因素，对于区域内是否存在空间差异这是本文后续需要拓展的方向。

6.2. 结论

(1) 川渝地区各城市 2003~2021 年间的碳排放效率年平均增长率为 3.38%，川渝地区的碳排放效率有所提高，经济结构向低碳方向转型，但从效率的均值来看，2003~2021 年的川渝地区平均碳排放效率为 0.58，整体效率较低，有 13 个城市的效率位于平均水平以下。从时间上来看，碳排放效率已经出现由恶化到进步的转变，碳排放效率呈加速提高的态势。2003~2021 年碳排放效率有一定波动，整体呈现“先下降后上升”的“U”型发展趋势。2009 年前的碳排放效率处于下降趋势，其均值从 2003 年的 0.64 降至 2009 年的 0.46。而在 2009 年之后城市碳排放效率呈现一定上升趋势，2021 年达到了 0.78。

(2) GML 指数几何平均值为 1.08，年均提升 8%，到 2009~2015 年 GML 指数几何平均值为 1.26，年均提升 26%，增速较快，但 2015~2021 年 GML 指数下降为 1.15，这表明 2015~2021 年碳排放效率提升

但是其提升速率相比上一时期变慢。从驱动因素来看，川渝地区整体碳排放水平的提高，由单维的技术进步贡献转变为技术效率和技术进步双重贡献。

(3) 土地结构、工业产业结构、政府干预程度、城镇化水平对川渝地区碳排放效率具有显著负向效应。绿色技术创新能力、经济发展水平对川渝地区碳排放效率具有显著正向效应。

基于以上结论，本文提出如下对策建议：

(1) 加强技术进步和技术创新。第一，加快形成一批智慧低碳零碳乃至负碳技术、工艺和装备，推动制造业数字化、绿色化转型升级。第二，集中开工科技创新重大项目，聚焦人工智能、大健康、生态环保、现代农业等重点领域，共同出资联合开展共性关键核心技术攻关。第三，联动打造成渝地区双城经济圈绿色技术创新中心和绿色工程研究中心，协同实施重大绿色技术研发与示范工程。

(2) 调整土地利用结构。以国土空间规划为基础，优化成渝地区双城经济圈协调发展、城乡融合发展空间格局。严格控制新增建设用地占用耕地，有序推进城市群内不动产统一登记，完善城乡建设用地增减挂钩制度，支持农村土地三项制度改革试点经验在成渝城市群复制推广。同时，以保持“六江”生态原真性和完整性为核心，坚持山水林田湖草沙一体化保护和修复，强化长江上游生态保护，深入打好污染防治攻坚战，深化川渝地区生态保护修复协作。

(3) 优化工业产业结构。第一，推动传统产业绿色化升级改造，促进工业能源消费低碳化，提升工业电气化水平。第二，打造绿色低碳制造业集群，以传统优势产业绿色升级改造为契机，重点打造一批龙头企业，并基于碳排放的全生命周期要求开展碳排放管理，引导产业链向绿色低碳转变。第三，支持重庆中心城区、成都、自贡、德阳等地培育壮大节能环保产业集群。

(4) 提升城镇化质量。合理规划城市发展，提高城镇化水平，减少城市扩张对土地的占用和碳排放。通过优化城市规划和提升城市管理效率，降低城镇化过程中的碳排放。

参考文献

- [1] Lade, S.J., Steffen, W., de Vries, W., Carpenter, S.R., Donges, J.F., Gerten, D., et al. (2019) Human Impacts on Planetary Boundaries Amplified by Earth System Interactions. *Nature Sustainability*, **3**, 119-128.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0454-4>
- [2] Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M.W., et al. (2020) Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data Discussions*, 1-3.
- [3] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008(3): 14-19.
- [4] 王小广, 周擎擎, 梁雅楠, 等. 加强国家战略腹地建设中存在的问题及政策建议[J]. 区域经济评论, 2024(5): 48-57.
- [5] 王婷婷, 杨霞, 刘守江, 等. 成渝地区双城经济圈乡村旅游重点村空间格局及影响因素研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版): 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/51.1699.N.20241209.1456.002>, 2024-12-09.
- [6] Tone, K. and Tsutsui, M. (2010) Dynamic DEA: A Slacks-Based Measure Approach. *Omega*, **38**, 145-156.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.07.003>
- [7] 王雪青, 娄香珍, 杨秋波. 中国建筑业能源效率省际差异及其影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(2): 56-61.
- [8] 范建双, 虞晓芬, 周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2177-2192.
- [9] 张克中, 王娟, 崔小勇. 财政分权与环境污染: 碳排放的视角[J]. 中国工业经济, 2011(10): 65-75.
- [10] 蒋语聪, 李艳颖, 王顺平, 等. 基于减排水平指数的中国区域碳排放影响因素分析[J]. 环境科学: 1-22.
<https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202408126>, 2024-11-28.
- [11] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004 [J]. 中国人口·资源与环境, 2006(6): 158-161.
- [12] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(3): 18-24.

- [13] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010, 45(8): 66-78.
- [14] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [15] 赵桂梅, 耿涌, 孙华平, 等. 中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 49-55.
- [16] 黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 781-789.
- [17] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. 经济研究, 2019, 54(11): 118-132.
- [18] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 等. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光数据[J]. 地理研究, 2021, 40(7): 2051-2065.