

“双碳”目标下重庆市碳排放影响因素及其预测研究

陈欢^{1,2}, 牟瑛³

1. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067
2. 重庆工商大学 会计学院, 重庆 400067
3. 重庆资源与环境交易中心, 重庆 401120

摘要:针对“双碳”目标下各省市面临的减碳压力,利用 Tapio 脱钩指数分析法、LMDI 模型,结合重庆市经济发展数据和碳排放数据,分析碳排放的影响因素并预测其达峰情况。研究表明:总体来看,重庆市近 15 年来碳排放量有所升高,但年度碳排放量仅占全国同期的 1%~2%;从煤、油、气、电四大能源行业的碳排放量占比结构看,煤电的碳排放占比明显下降,油、气的碳排放占比显著上升;重庆市经济增长与二氧化碳脱钩情况较好,一直处于扩张相对脱钩状态;重庆市碳排放量主要受城市化、人口增长、经济增长三大因素的影响;根据预测结果,基准情景下,重庆市碳排放将在 2034 年达到峰值,峰值在 2.06 亿 t 左右,达峰情景模式下,预计将在 2029 年达峰,碳排放峰值约为 1.85 亿 t,比传统模式下少 0.21 亿 t。最后,为重庆市绿色发展提出了优化产业结构、构建清洁低碳、高效多元的能源体系、加速绿色工业、绿色交通、技术创新等对策建议,对各地制定实现“双碳”目标的具体措施具有一定借鉴意义和参考价值。

关键词:“双碳”目标; Tapio 脱钩指数; LMDI 模型; 碳排放预测

中图分类号: O643 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0002.002

Research on the Influencing Factors and Forecasting of Carbon Emissions in Chongqing under the “Double Carbon” Target

CHEN Huan^{1,2}, MU Ying³

1. Engineering Research Center of Waste Oil Recovery Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
2. School of Accounting, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
3. Chongqing Resources and Environment Trading Center, Chongqing 401120, China

Abstract: In view of the carbon reduction pressure faced by provinces and cities under the “double carbon” target, a forecasting method for peaking carbon emissions was proposed. Using Tapio decoupling index analysis method and the LMDI model, combined with Chongqing’s economic development data and carbon emission data, the influencing factors of carbon emission were analyzed and the peak situation was predicted. The results show that: overall, the carbon emissions in Chongqing had increased in the past 15 years, but the annual carbon emissions only accounted for 1%~2% of the national carbon emissions in the same period; from the perspective of the proportion of carbon emissions in the four major energy industries of coal, oil, gas, and electricity, the proportion of carbon emissions from coal and electricity declined significantly, and the proportion of carbon emission from oil and gas increased significantly; the decoupling of economic growth and carbon dioxide in Chongqing was relatively good, and it has been in a state of relative decoupling of expansion;

收稿日期: 2022-03-05 **修回日期:** 2022-05-18 **文章编号:** 1672-058X(2023)02-0007-08

基金项目: 重庆市教委科技资助重大项目(KJZD-M201900802); 中国博士后科学基金项目(2022M710017); 重庆工商大学校内项目(1951027).

作者简介: 陈欢(1984—),女,讲师,博士,从事宏观经济政策与微观企业行为相关研究。

引用格式: 陈欢,牟瑛.“双碳”目标下重庆市碳排放影响因素及其预测研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(2):7-14.

CHEN Huan, MU Ying. Research on the influencing factors and forecasting of carbon emissions in Chongqing under the “double carbon” target[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 7-14.

Chongqing's carbon emissions are mainly affected by urbanization, population growth and economic growth; according to the forecast results, under the benchmark scenario, Chongqing's carbon emissions will peak at 206 million tons in 2034, and in the peak scenario mode, in 2029, the peak carbon emissions will peak at 185 million tons, 21 million tons less than the traditional model. This paper puts forward countermeasures and suggestions for the green development of Chongqing, such as optimizing the industrial structure, building a clean, low-carbon, efficient and diversified energy system, and accelerating green industry, green transportation and technological innovation. It has certain reference significance and reference value for all regions to make specific measures to achieve the goal of "double carbon".

Keywords: "double carbon" target; Tapio decoupling index; LMDI model; carbon emission forecast

1 引言

随着全球气候变暖,应对气候变化已经成为世界重要议题之一。习近平总书记于 2020 年 9 月 22 日在第七十五届联合国大会上向世界郑重宣布中国“双碳”目标,即二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。推进“双碳”工作是破解资源环境约束问题、实现可持续发展的迫切需要,是顺应技术进步趋势、推动经济结构转型升级的现实需要。目前,国家正在构建“1+N”的政策体系,《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030 年前碳达峰行动方案》已经正式公开印发。各省市要根据当地的实际情况对照顶层指导意见和实施方案制订贯彻落实意见和碳达峰实施方案。由于各省市的资源禀赋、经济社会发展状况等各不相同,因此,需要根据各省域内碳排放的历史情况,总结规律,找出影响当地碳排放的驱动因素及其影响程度,为省级层面科学制订实施意见和碳达峰实施方案提供建议性的参考意见。

当前,已有碳排放的相关研究主要集中在碳排放的测算、影响因素等方面。碳排放预测的主要方法及模型工具可以大致归类为情景分析预测方法、灰色预测模型、计量经济模型以及神经网络模型四类^[1-4]。我国学者分别利用不同的方法对云南、湖北、黄河流域或全国的碳排放进行了预测^[5-9],欧阳红兵等^[10]比较了多种模型对时序序列的预测效果,发现 LSTM 神经网络模型相较于其他模型具有更高的预测精度。通过对现有文献的梳理,国内研究大多集中在一定行政区域内或行业领域内,缺乏对重庆碳排放预测的研究。此外,各省市产业发展情况、经济发展水平各不相同,影响碳排放的因素和作用力度也可能大相径庭。因此,以重庆市为研究对象,全面深入研究区域碳排放量现状,从系统角度剖析碳排放的影响因素,科学预测碳达峰情况,为重庆制订碳达峰实施方案,实现“双碳”目标有着十分重要的意义。

依据生态环境部发布的《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》计算近年来碳排放数据,通过

Tapio 脱钩指数分析重庆经济发展水平与碳排放脱钩状态,通过 Kaya 恒等式对影响碳排放的关键因素进行识别,运用 LMDI 模型,进一步测算了各因素对碳排放量的影响程度,并预测了传统发展情景模式和达峰情景模式下重庆市 2020—2035 年的碳排放量及碳达峰时间。以期为重庆市加快构建绿色低碳循环经济体,有力有序开展碳达峰、碳中和工作,助力实现节能减排目标提供科学依据和理论参考。

2 重庆市碳排放概况

2.1 重庆市近年来碳排放总体情况

厘清碳排放的历史分布格局是研究区域经济社会发展、绿色低碳转型的基础。首先通过查询重庆市 2005 至 2019 年历年统计年鉴得到年度能源消耗和电力净调入数据,再根据生态环境部《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》,碳排放总量为能源活动的二氧化碳排放量与电力调入蕴含的间接二氧化碳排放量之和,经计算得到重庆市年度碳排放总量数据。

从表 1 可知,重庆市近 15 年来碳排放总量不断增加,从 2005 年的 0.6 亿 t 增长到 2019 年 1.63 亿 t。根据国际能源网数据显示,截至 2019 年年底,全球二氧化碳排放量约为 336 亿 t,其中,中国 2019 年年度排放总量为 98.76 亿 t,占全球碳排放量的 30%。中国碳排放量整体呈增长态势,但近 5 年来,我国的碳排放增长速度不断放缓。从同期历史数据比较,重庆市碳排放年度占比只占全国同期的 1.11%~1.65%,占比较小。

表 1 中国及重庆 2005—2019 主要年份碳排放情况(单位:亿 t)
Table 1 China and Chongqing's carbon emissions in major years from 2005 to 2019 (unit: 100 million tons)

年份	2005	2010	2012	2014	2016	2018	2019
重庆碳排放量	0.6	0.93	1.23	1.32	1.46	1.58	1.63
全国碳排放量	54.07	78.3	88.23	92.24	91.27	97.12	98.76
重庆碳排放量在全国占比/%	1.11	1.19	1.39	1.43	1.60	1.63	1.65

注:1. 全国碳排放数据来源于国际能源网(<https://www.iea.org>);2. 因统计数据滞后性,公开的碳排放数据截止时间为 2019 年。

2.2 重庆市能源品种碳排放情况

能源结构是决定碳排放高低的关键因素,从表 2

可看出能源结构变化带来的碳排放变化趋势。在重庆市碳排放中,煤、油、气、电四大类能源行业的二氧化碳排放量都呈现出增长趋势。从排放占比来看,煤电行业有明显的下降,油、气有明显的上升。具体来看,煤行业碳排放占比从 2005 年 74.75% 下降到 2020 年的 68.94%,油从 2005 年 9.81% 上升到 2020 年的 15.54%,气从 2005 年 10.21% 上升到 2020 年的 14.10%。电整体上从 2005 年 5.23% 下降到 2020 年的 1.42%,说明最近 15a 来重庆市能源结构不断优化调整取得明显成效,能源趋向清洁低碳化。

表 2 重庆市 2005—2020 主要年份分能源品种碳排放情况
Table 2 Chongqing's carbon emissions by energy types in major years from 2005 to 2020

能源行业	年份							
	2005	2010	2012	2014	2016	2018	2020	
煤行业碳排放量/万t	4 488	6 783	8 235	9 197	10 183	10 652	10 232	
煤行业碳排放占比/%	74.75	72.89	71.81	72.90	72.56	71.58	68.94	
油行业碳排放量/万t	589	1 159	1 492	1 666	2 062	2 208	2 307	
油行业碳排放占比/%	9.81	12.40	13.01	13.21	14.69	14.84	15.54	
气行业碳排放量/万t	613	1 050	1 349	1 580	1 730	1 941	2 092	
气行业碳排放占比/%	10.21	11.28	11.76	12.52	12.33	13.04	14.10	
电行业碳排放量/万t	314	314	392	173	58	80	211	
电行业碳排放占比/%	5.23	3.37	3.42	1.37	0.41	0.54	1.42	

3 重庆市碳排放与经济脱钩状态分析

为了科学判断重庆市碳排放与经济增长的关系,利用 Tapio 脱钩指数模型,结合重庆 GDP 与工业总产值、地区生产总值指数、碳排放年度数据等进行深入分析。碳排放年度数据经手工收集得到,GDP 与工业总产值、地区生产总值指数数据来自《重庆统计年鉴》(2015—2020),工业生产者出厂价格分类指数(PPI)数据来自《重庆调查年鉴》(2015—2020)。各年 GDP 与工业总产值以 2015 年为基期进行调整。

3.1 Tapio 脱钩指数模型

二氧化碳排放与 GDP 的脱钩状态往往采用 Tapio 脱钩指数模型进行分析。Tapio 脱钩指数模型是 Tapio (2005) 在研究欧洲经济发展、交通容量和二氧化碳之间关系时构建的一种弹性系数分析方法,近年来得到广泛应用。借鉴该方法构建了二氧化碳排放和 GDP 的 Tapio 脱钩指数模型(1)。

$$e(\text{CO}_2, y) = \frac{\Delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2}{\Delta Y / Y} \quad (1)$$

二氧化碳脱钩弹性形容经济增长与二氧化碳排放之间联系的程度,根据弹性值大小和 GDP 和二氧化碳排放的增减情况分为 8 种类型(见图 1)。

第一象限中,弹性大于 0, GDP 和二氧化碳都增长。

1) 扩张相对脱钩:二氧化碳排放随着 GDP 的增加而增加,但其增长率相对于 GDP 增长率较小(弹性值小于 0.8),是经济低碳化发展的相对较好状况。

2) 扩张连接状态:GDP 增长率与二氧化碳排放增长率大小相近(弹性值在 0.8~1.2 间),此时认为经济的增长伴随着二氧化碳排放增加。

3) 扩张相对负脱钩:GDP 增长率明显小于二氧化碳增长率(弹性值大于 1.2),此时认为经济的增长非常依赖于二氧化碳排放。

第二、四象限中,当弹性为负是两种极端情况。

4) 绝对脱钩:二氧化碳排放减少的情况下,GDP 依然增加,是经济低碳化发展的最理想状况。

5) 绝对负脱钩:GDP 减少时,二氧化碳排放反而增加,是最不理想的状态。

第三象限中,弹性大于 0, GDP 和二氧化碳都减少。

第三象限中三种状态与第一象限类似,依然是比较 GDP 增长率与二氧化碳排放增长率的大小,只是与第一象限最大的不同在于此时 GDP 增长率为负。

6) 衰退相对负脱钩:GDP 与二氧化碳都减少,但二氧化碳排放减少程度小于 GDP 减少程度(弹性值在 0~0.8 间)。

7) 衰退连接:GDP 与二氧化碳都减少,二氧化碳排放减少程度与 GDP 减少程度相近(弹性值在 0.8~1.2 间)。

8) 衰退相对脱钩:GDP 与二氧化碳都减少,但二氧化碳排放减少程度大于 GDP 减少程度(弹性值大于 1.2)。

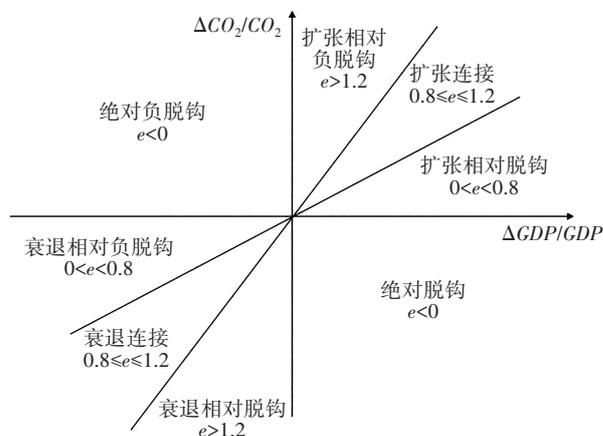


图 1 重庆市经济增长与碳排放的脱钩情况
Fig. 1 Decoupling of economic growth and carbon emissions in Chongqing

3.2 主要结论

(1) 重庆市经济发展与二氧化碳排放整体处于扩张相对脱钩状态

从表 3 的结果可以看出,2015—2019 年重庆市经济整体与二氧化碳排放脱钩情况较好,一直处于扩张相对脱钩状态,脱钩弹性绝对值较小。但扩张相对脱钩状态呈现先升后降再升趋势,总体呈下降趋势,表明近年来在新常态下,重庆保持经济增长的同时,碳排放强度持续下降,有力支撑了经济的高质量发展。

表 3 重庆市 2016—2019 年经济发展与二氧化碳排放脱钩整体情况

Table 3 The overall situation of decoupling between economic development and CO₂ emissions from 2016 to 2019 of Chongqing

年份	$\Delta CO_2/CO_2$	$\Delta GDP/GDP$	脱钩弹性	脱钩情况
2016	0.032	0.107	0.299	扩张相对脱钩
2017	0.043	0.093	0.462	扩张相对脱钩
2018	0.009	0.060	0.150	扩张相对脱钩
2019	0.020	0.063	0.317	扩张相对脱钩

(2) 重庆市三次产业发展与二氧化碳排放脱钩情况差异较大

如表 4 所示,分产业来看,重庆市第一产业在 2016、2017 年脱钩表现较好,之后出现了反弹,变成扩张连接状态,但总体脱钩状态仍然较好;第二产业在 2016 年和 2019 年脱钩表现优异,达到了绝对脱钩状态,但在 2017、2018 年分别处于扩张连接和扩张相对负脱钩状态,说明第二产业处于调整阶段;第三产业在 2016 至 2019 年整体处于弱连接状态,产业发展与碳排放相对弱粘连状态,表明以后第三产业高速发展过程中更加注重能源结构优化。

表 4 重庆市 2016—2019 年三次产业二氧化碳脱钩弹性情况

Table 4 The carbon dioxide decoupling elasticity of three industries in Chongqing from 2016 to 2019

产业类型	年份	$\Delta CO_2/CO_2$	$\Delta GDP/GDP$	脱钩弹性	脱钩情况
第一产业	2016	0.029	0.047	0.617	扩张相对脱钩
	2017	0.015	0.040	0.375	扩张相对脱钩
	2018	0.047	0.044	1.068	扩张连接
	2019	0.035	0.036	0.972	扩张连接
第二产业	2016	-0.063	0.113	-0.558	绝对脱钩
	2017	0.084	0.093	0.903	扩张连接
	2018	0.095	0.030	3.167	扩张相对负脱钩
	2019	-0.039	0.064	-0.609	绝对脱钩
第三产业	2016	0.203	0.11	1.845	扩张相对负脱钩
	2017	-0.013	0.101	-0.130	绝对脱钩
	2018	0.034	0.090	0.378	扩张相对脱钩
	2019	0.063	0.064	0.984	扩张连接

(3) 重庆市六大高耗能行业发展与二氧化碳排放脱钩情况不稳定

除以上分析外,还对 2016—2019 年期间重庆市高耗能行业分行业脱钩情况进行了分析,结果见表 5。具体来讲,石油加工、炼焦及核燃料加工业从衰退相对脱钩到绝对负脱钩;化学原料及化学制品制造业从绝对脱钩到衰退相对脱钩;非金属矿物制品业基本保持绝对脱钩;黑色金属冶炼及压延加工业从绝对负脱钩到扩张相对脱钩;有色金属冶炼及压延加工业从绝对脱钩到扩张相对负脱钩;电力、热力的生产和供应业基本处于绝对脱钩状态。综上分析,六大高耗能行业都没有绝对稳定脱钩。

表 5 重庆市 2016—2019 年高耗能行业二氧化碳脱钩情况

Table 5 Carbon dioxide decoupling in high energy-consuming industries in Chongqing from 2016 to 2019

行业	年份	$\Delta CO_2/CO_2$	$\Delta GDP/GDP$	脱钩弹性	脱钩情况
石油加工、炼焦及核燃料加工业	2016	-0.284	-0.023	12.348	衰退相对脱钩
	2017	-0.768	-0.207	3.710	衰退相对脱钩
	2018	-0.526	0.353	-1.490	绝对脱钩
	2019	0.077	-0.616	-0.125	绝对负脱钩
化学原料及化学制品制造业	2016	-0.378	0.057	-6.632	绝对脱钩
	2017	0.423	-0.187	-2.262	绝对负脱钩
	2018	0.117	-0.040	-2.925	绝对负脱钩
	2019	-0.101	-0.060	1.683	衰退相对脱钩
非金属矿物制品业	2016	-0.134	0.121	-1.107	绝对脱钩
	2017	0.383	-0.219	-1.749	绝对负脱钩
	2018	-0.308	0.039	-7.897	绝对脱钩
	2019	-0.143	0.070	-2.043	绝对脱钩
黑色金属冶炼及压延加工业	2016	0.171	-0.129	-1.326	绝对负脱钩
	2017	-0.376	-0.391	0.962	衰退连接
	2018	0.965	0.191	5.052	扩张相对负脱钩
	2019	0.081	0.190	0.426	扩张相对脱钩
有色金属冶炼及压延加工业	2016	-0.007	0.097	-0.072	绝对脱钩
	2017	-0.046	-0.183	0.251	衰退相对负脱钩
	2018	0.132	-0.109	-1.211	绝对负脱钩
	2019	0.434	0.182	2.385	扩张相对负脱钩
电力、热力的生产和供应业	2016	-0.217	0.049	-4.429	绝对脱钩
	2017	0.547	-0.045	-12.156	绝对负脱钩
	2018	0.153	0.066	2.318	扩张相对负脱钩
	2019	-0.155	0.042	-3.690	绝对脱钩

4 碳排放驱动因素分析

4.1 碳排放影响因素分析模型

目前,国内外学者主要利用 Laspeyres 指数、Fisher 理想指数法、对数均值迪氏指数分解法(LMDI)、随机 STIRPAT 等因素分解法等模型方法来研究区域或行业二氧化碳排放驱动因素。其中,由于 LMDI 具有能够消除不能解释的残差项,能处理零值与负值问题,且具有计算过程较为简单、所得分解结果直观等优点,LMDI 分解方法成为应用最为广泛的方法之一,适合对有连续变化规律的数据进行分析。因此,选用 LMDI 分解方法对碳排放驱动因素进行研究。首先通过扩展 Kaya 恒等式将二氧化碳排放量分解为能源结构(ES)、能源强度(EI)、产业结构(IS)、经济增长(EG)、城市化率(UR)和人口(P),分析六大因素对重庆市二氧化碳排放的影响,二氧化碳排放分解模型式(2)所示:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{GIO} \times \frac{GIO}{GDP} \times \frac{GDP}{PC} \times \frac{PC}{P} \times P = ES \times EI \times IS \times EG \times UR \times P \quad (2)$$

则二氧化碳排放量变化可以表示为如下:

$$\Delta CO_2 = ES^T CI^T IS^T EG^T UR^T R^T - ES^0 CI^0 IS^0 EG^0 UR^0 P^0 = \Delta C_{ES} + \Delta C_{EI} + \Delta C_{IS} + \Delta C_{EG} + \Delta C_{UR} + \Delta C_P$$

根据 LMDI 方法,对上式分解为得出:

$$\Delta C_{EI} = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{EI^T}{EI^0} \right)$$

$$\Delta C_{ES} = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{ES^T}{ES^0} \right)$$

$$\Delta C_{IS} = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{IS^T}{IS^0} \right)$$

$$\Delta C_{EG} = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{EG^T}{EG^0} \right)$$

$$\Delta C_{UR} = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{UR^T}{UR^0} \right)$$

$$\Delta C_P = \sum L(C^T, C^0) \ln \left(\frac{P^T}{P^0} \right)$$

$$L(C^T, C^0) = (C^T - C^0) / (\ln C^T - \ln C^0)$$

4.2 碳排放影响因素分析结果

根据分析结果显示(见表 6 和图 2),碳排放驱动因素分析如下:

(1) 能源结构变化导致 CO₂ 排放增加转变为 CO₂ 排放减少,说明重庆市在能源结构优化上已取得一定突破;

(2) 能源强度的减少是促进重庆 CO₂ 减排的最主要因素;

(3) 产业结构对 CO₂ 排放的总体上影响并不大,仅在 2018 年由于工业行业碳排放猛增对当年的 CO₂ 排放影响较大;

(4) 经济增长毫无疑问是 CO₂ 排放最主要的影响因素,但影响程度有所下降,说明重庆市正在逐渐实现经济增长与 CO₂ 排放脱钩;

(5) 城市化是 CO₂ 排放的另一重要因素,快速的城市化不利于重庆市 CO₂ 减排。

表 6 重庆市 2016—2019 碳排放影响因素分解结果
Table 6 Decomposition results of carbon emission driving forces in Chongqing from 2016 to 2019

年份	经济增长	城市化	人口	产业结构	能源结构	能源强度
2016	2.056	0.860	0.336	-0.116	0.202	-2.339
2017	1.345	0.553	0.207	0.022	0.499	-1.625
2018	3.116	2.443	0.965	-5.299	-2.063	1.838
2019	1.696	0.975	0.359	0.047	-0.537	-1.540

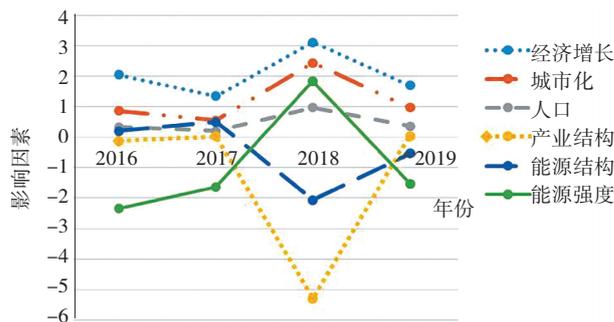


图 2 重庆市 2016—2019 碳排放影响因素分解

Fig. 2 Decomposition of influencing factors of carbon emissions in Chongqing from 2016 to 2019

5 重庆市碳达峰预测

5.1 碳排放预测模型

目前国内外对碳排放未来预测出于不同研究对象和目的,主要选择 IPAT 模型、Kaya 模型、STIRPAT 模型、LMDI 模型、LEAP 模型、Logistic 模型、EKC 模型、灰色系统 GM(1,1) 模型、系统动力学(SD)模型、CGE 模型、MARKAL 模型等。前述模型各有优缺点,其中 LMDI 因素分解法在理念基础、适应性、可操作性及结果呈现特性方面,相对其他研究方法均表现出一定优越性。该方法分为“加法分解”和“乘法分解”两种,分解结果一致且不会产生残差,同时能够处理零值与负值问题,在绿色低碳循环经济研究领域中得到广泛应用。综合考虑能源结构、能源强度、经济发展、人口规模、城镇化率、产业结构等研究数据的可获得

性,对此,选择基于 LMDI 分解模型预测重庆市碳排放量有关情况。根据 LMDI 特点构建如下碳排放分解模型(3):

$$TC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \frac{TC_{ijk}}{EC_{ijk}} \times \frac{EC_{ijk}}{EC_{ij}} \times \frac{EC_{ij}}{GDP_{ij}} \times \frac{GDP_{ij}}{GDP_i} \times \frac{GDP_i}{PO_j} \times \frac{PO_j}{PO} \times PO \quad (3)$$

式(3)中, i 表示产业类型, $i=1$ 表示第一产业, $i=2$ 表示第二产业, $i=3$ 表示第三产业; j 表示人口分类, $j=1$ 表示城镇人口, $j=2$ 表示农村人口; k 表示能源类型, $k=1$ 表示煤炭, $k=2$ 表示油品, $k=3$ 表示天然气, $k=4$ 表示外购电力; TC 表示能源碳排放量, EC 表示各类能源消耗量, GDP 表示产业或地区生产总值, PO 表示人口数量。

令 C_0 为基期碳排放量, C_t 为第 t 期碳排放量,定义 ΔC 为重庆市能源消费碳排放量变化综合效应,公式为:

$$\Delta C = C_t - C_0$$

根据各碳排放影响因素作用效应的定义,将 TC 分解为六个简单的方程之和,简化的 LMDI 方程中,任意 t 时期对基期的碳排放变化公式如下:

$$\Delta TC = TC^t - TC^0 = \sum_{x=a}^g \Delta TC_x$$

$$\Delta TC = \sum_{k=1}^K L(TC_k^t, TC_k^0) \ln\left(\frac{X_k^t}{X_k^0}\right)$$

基于 LMDI 分解模型设定 $\Delta p(x)_k$ 为各类驱动因素 X 未来“ t ”时期相对基期“0”的变化率,则:

$$X_k^t = X_k^0 [1 + \Delta P(X)_k]$$

由此,得到碳排放量预测模型及各类驱动因素变化量函数式(4):

$$\Delta TC_x = \sum_{k=1}^k \frac{TC_k^0 \times \left\{ \prod_{x=a}^g [1 + \Delta P(X)_k] - 1 \right\}}{\ln\left\{ \prod_{x=a}^g [1 + \Delta P(X)_k] \right\}} \times \ln[1 + \Delta P(X)_k] \quad (4)$$

5.2 情景设置

5.2.1 情景分类

结合碳排放趋势、经济增速、能源消费总量、能耗强度、碳排放强度、能源结构等因素,按照基准、达峰两种不同情景,测算重庆市碳排放峰值,两个情景以 2020 年为基准年,目标年为 2035 年。

(1) 基准情景定义。以《重庆市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》内提出的经济与减排目标、行动计划和相关政策为支撑,考虑“十二五”“十三五”期间重庆市实际发展情况,延续当前政策的情景。

(2) 达峰情景定义。在基准情景的基础上,进一步考虑《重庆市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》,严格按照“十四五”规划中提出的要求,政府把低碳发展置于优先地位,以完成国家下达的“十四五”能耗双控和碳强度下降目标为导向,“十五五”延续“十四五”目标约束趋势,产业结构和能源结构深度调整,能效水平大幅提高,减排潜力充分挖掘并确保 2030 年前碳排放达峰情景进行预测。

5.2.2 情景参数设置

(1) 基准情景参数。根据目前的经济发展、人口增长及能源消费趋势,按照既有的政策措施,不附加其他节能降碳手段,结合有关政策和规划等,基准情景各因素数值设置见表 7。

(2) 达峰情景参数。为完成“十四五”能源双控和碳强度下降的目标任务,在现有政策措施的基础上,考虑为实现 2030 年前全市碳排放达峰的目标,采取更强有力的节能降碳措施,加强能源强度下降和能源结构调整措施,据此设置达峰情景各因素数值,见表 8。

表 7 基准情景参数

指 标	年 份			
	2020	2025	2030	2035
GDP 年均增速	—	6	5.5	5
年均人口增速	1	0.9	0.8	0.7
能源强度五年降低率	—	13.2	16.7	18.4
非化石能源占一次能源消费比重	20.9	23.7	26.4	28.5
城镇化年均增率	—	1.03	0.9	0.8
产业结构	7.2;40.0;52.8	6.5;39;54.5	6;38;56	5.5;38;56.5

表 8 达峰情景参数

指 标	年 份			
	2020	2025	2030	2035
GDP 年均增速	—	6.5	6	5.5
年均人口增速	1	0.9	0.8	0.7
能源强度五年降低率	—	14.5	17.8	19.3
非化石能源占一次能源消费比	20.9	23.9	27.8	31.1
城镇化年均增率	—	1.03	0.9	0.8
产业结构	7.2;40;52.8	6.3;39;54.7	6;38;56	5.5;38;56.5

5.3 预测结果

根据上述设定数据构建的基准情况和达峰情景模式,预测 2020—2035 年两种不同情景下重庆市碳排放情况,预测结果如表 9 所示。

表 9 两种情景下碳排放预测结果

Table 9 Prediction results of carbon emissions under the two scenarios 万t

年 份	基准情景	达峰情景	两种情景差值
2020	17 462.72	17 462.72	0
2021	17 819.79	16 961.09	858.7
2022	18 059.62	17 008.26	1 051.36
2023	18 472.26	17 051.82	1 420.44
2024	18 732.97	17 797.81	935.16
2025	19 492.23	18 315.87	1 176.36
2026	19 777.62	18 370.17	1 407.45
2027	20 086.66	18 482.95	1 603.71
2028	20 006.54	18 507.15	1 499.39
2029	20 119.32	18 509.05	1 610.27
2030	20 191.31	18 123.75	2 067.56
2031	20 217.43	17 911.04	2 306.39
2032	20 451.8	17 688.41	2 763.39
2033	20 681.19	17 606.72	3 074.47
2034	20 685.69	17 470.19	3 214.81
2035	20 670.62	17 430.57	3 240.05

从预测结果来看(图 3),在基准情景下,即延续现有经济发展模式前提下,采用保守的低碳减排政策,碳排放量在 2034 年二氧化碳排放峰值,达峰时二氧化碳排放量约为 2.06 亿t;而在达峰情景下,重庆市二氧化碳排放峰值预测出现在 2029 年,峰值排放量约为 1.85 亿t。达峰情景下,重庆将提前实现“碳达峰”目标,且达峰情景下的碳排放量峰值也远低于传统发展模式下的水平。



图 3 重庆市 2020—2035 年碳排放预测结果

Fig. 3 Prediction results of carbon emissions in Chongqing from 2020 to 2035

6 结论与建议

6.1 结 论

通过生态环境部《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》梳理了重庆市 2005 至 2020 年碳排放数据,从历来数据来看,重庆市碳排放逐年呈现上升趋势,各年度占比为全国同期的 1%~2%。从能源品种产生碳排放变化趋势来看,重庆市煤、油、气、电的碳排放量都呈现出增长的趋势,但排放占比中煤、电行业有较明显的下降趋势,油、气行业排放明显上升,行业排放通过 Tapio 脱钩指数模型分析发现重庆市经济增长与二氧化碳脱钩情况总体较好,一直处于扩张相对脱钩状态,脱钩弹性绝对值较小。三次产业与二氧化碳脱钩情况呈现不规律性摆动。

基于 LMDI 模型进行了碳排放主要驱动因素分析和排放预测。当前重庆市碳排放主要受城市化、人口增长、经济增长三大主要因素驱动。基于基准和达峰两种情景对重庆市未来 15 年碳排放进行预测,结果显示在基准情景下重庆市碳排放估计于 2034 年达到峰值,约为 2.06 亿t,但在达峰情景模式下的碳排放峰值约为 1.85 亿t,两种情景碳排放差值达 0.21 亿t。

6.2 建 议

以筑牢长江上游生态屏障,加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系,确保 2030 年前顺利实现碳达峰为总体目标,有关方面可以采取以下措施:

一是加强顶层设计。按照国家碳达峰碳中和工作指导意见和 2030 年前碳达峰行动方案,结合重庆市实际,加快构建和完善绿色低碳经济、技术、财税、金融等碳达峰碳中和政策体系。

二是优化产业结构。以构建绿色低碳循环经济体系为目标,强化产业准入和落后产能退出,坚决遏制“两高”项目盲目发展。立足当地资源禀赋和发展基础,加快培育集成电路、新型显示、新能源汽车和智能网联汽车、生物、高端装备制造、绿色环保、新兴服务业等高新技术和战略新兴产业。对传统产业进行节能低碳化和清洁化改造、提升资源利用率和产出率。大力开展绿色工厂、绿色园区等示范创建。

三是加快构建清洁低碳安全高效多元能源体系。坚持内部挖潜与外部引进来齐步走,一方面充分挖掘内部水、风光等资源,加快内部可再生能源开发,另一

方面加快川渝特高压交流工程、哈密—重庆特高压输电通道等建设,引进优质低碳电源。

四是调整交通运输结构和用能结构。加快调整公、铁、水、空在客、货运中的比例,大宗货物及人流从公转铁、公转水方向调整。大力发展舒适、便捷的公共交通、轨道交通。调整交通用能结构,大力发展氢能、纯电动汽车等新能源汽车。

五是加大绿色低碳技术研发与推广。采取“揭榜挂帅”机制,实施一批具有前瞻性、战略性的重大前沿科技项目,开展低碳零碳负碳关键核心技术攻关。如充分利用当地特色,打通科研机构—火力发电厂—页岩气三个主体开展碳捕获、利用与封存(CCUS)技术研究与示范;利用雄厚的汽车产业基础,大力开展氢能汽车和纯电动汽车研发与推广,加速汽车产业向绿色低碳化发展。

参考文献(References):

- [1] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological economics*, 2003, 46(3): 351—365.
- [2] 王兴, 马守田, 濮超, 等. 西南地区农业碳排放趋势及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S2): 231—234.
WANG Xing, MA Shou-tian, PU Chao, et al. Research on the trend and influencing factors of agricultural carbon emissions in Southwest China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(S2): 231—234.
- [3] 杨玉文, 吴爱玲. 民族地区碳排放驱动机制分析及趋势预测[J]. *云南民族大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 37(3): 88—95.
YANG Yu-wen, WU Ai-ling. Analysis and trend prediction of carbon emission driving mechanism in ethnic areas [J]. *Journal of Yunnan Minzu University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2020, 37(3): 88—95.
- [4] 胡剑波, 罗志鹏, 李峰. “碳达峰”目标下中国碳排放强度预测——基于 LSTM 和 ARIMA-BP 模型的分析[J]. *财经科学*, 2022(2): 89—101.
HU Jian-bo, LUO Zhi-peng, LI Feng. Prediction of China's carbon emission intensity under the “carbon peak” target: analysis based on LSTM and ARIMA-BP model[J]. *Finance and Economics*, 2022(2): 89—101.
- [5] 罗薇. 2019. 基于 LEAP 模型的云南省交通运输业能源消费及环境排放趋势研究[D]. 昆明: 云南大学.
LUO Wei. Research on the energy consumption and environmental emission trends of the transportation industry in Yunnan Province based on the LEAP model[D]. Kunming: Yunnan University, 2019.
- [6] 胡茂峰, 郑义彬, 李宇涵. 多情景下湖北省交通运输碳排放峰值预测研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(4): 464—472.
HU Mao-feng, ZHENG Yi-bin, LI Yu-han. Prediction of peak carbon emissions from transportation in Hubei province under multiple scenarios[J]. *Journal of Environmental Science*, 2022, 42(4): 464—472.
- [7] 张国兴, 苏钊贤. 黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测[J]. *管理评论*, 2020, 32(12): 283—294.
ZHANG Guo-xing, SU Zhao-xian. Decomposition of influencing factors and scenario prediction of transportation carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. *Management Review*, 2020, 32(12): 283—294.
- [8] 肖枝洪, 王明浩. 中国碳排放量的组合模型及预测[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(1): 9—15.
XIAO Zhi-hong, WANG Ming-hao. Combination model and prediction of carbon emissions in China[J]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2016, 33(1): 9—15.
- [9] 陈蔚. 基于线性 ARIMA 与非线性 BP 神经网络组合模型的进出口贸易预测[J]. *统计与决策*, 2015(22): 47—49.
CHEN Wei. Import and export trade forecast based on linear ARIMA and nonlinear BP neural network combination model [J]. *Statistics and Decision*, 2015(22): 47—49.
- [10] 欧阳红兵, 黄亢, 闫洪举. 基于 LSTM 神经网络的金融时间序列预测[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(4): 27—35.
OUYANG Hong-bing, HUANG Kang, YAN Hong-ju. Financial time series forecasting based on LSTM neural network [J]. *China Management Science*, 2020, 28(4): 27—35.