

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.10.012

杨丹荔, 陈海玲, 罗怀良, 等. 攀枝花市碳排放脱钩效应及其驱动因素分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(10): 134-144.

# 攀枝花市碳排放脱钩效应及其驱动因素分析

杨丹荔<sup>1</sup>, 陈海玲<sup>1</sup>, 罗怀良<sup>2</sup>, 胡艳<sup>1</sup>

1. 内江师范学院 沱江流域高质量发展研究中心, 四川 内江 641100;

2. 四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610101

**摘要:** 为探究攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩关系, 实现其碳减排与经济协调发展的协调共进, 将 Tapio 模型和 LMDI 因素分解法相结合, 分析四川省攀枝花市 2007—2022 年碳排放与经济增长的脱钩特征及驱动因素对脱钩状况的影响。研究结果表明: ①近 16 年, 攀枝花市年均碳排放量为  $1\ 837.37 \times 10^4$  t, 其前期持续上升(2007—2011 年)、中期相对稳定(2012—2014 年)、后期持续下降(2015—2022 年), 碳排放强度从 4.80 t/万元持续下降到 1.06 t/万元; ②攀枝花市原煤碳排放量占比最高, 达 55.68%, 其次为洗精煤(25.06%)和焦炭(16.72%), 电力、柴油、汽油和煤油碳排放量总计低于 5%; ③ 2008—2014 年, 攀枝花市碳排放的脱钩状态较不稳定, 表现为弱脱钩、扩张负脱钩和强脱钩 3 种状态交替出现, 2015—2022 年碳排放的脱钩状态集中表现为强脱钩; ④ 能源强度效应是抑制攀枝花市碳排放量和促进碳排放与经济增长脱钩的主要因素; 经济水平效应则是促进攀枝花市碳排放量和阻碍碳排放与经济增长脱钩的主要因素; 能源结构效应和人口规模效应将成为未来促进攀枝花市碳排放脱钩的主要因素。基于此, 持续推进能源结构调整、加快传统产业结构的优化升级以及加强人才发展和引进是攀枝花市实现低碳发展和“双碳”目标的主要措施。

**关键词:** Tapio 脱钩模型; LMDI 因素分解; 碳排放; 经济增长;  
攀枝花市

中图分类号: X321

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2025)10-0134-11



## Analysis of the Decoupling Effect of Carbon Emissions and Driving Factors in Panzhihua City

YANG Danli<sup>1</sup>, CHEN Hailing<sup>1</sup>, LUO Huailiang<sup>2</sup>, HU Yan<sup>1</sup>1. Tuojiang River Basin High-quality Development Research Center, Neijiang Normal University,  
Neijiang Sichuan 641100, China;

2. The Faculty of Geography Resource Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 教育部人文社会科学规划项目(15XJA790003); 四川省社会科学重点研究基地资源型城市发展研究中心重点项目(ZYZX-ZD-2302); 四川省社会科学重点研究基地四川矿产资源研究中心一般项目(SCKCZY2024-YB011); 四川省“大学生创新创业训练计划”项目(X2024087)。

作者简介: 杨丹荔, 博士, 讲师, 主要从事环境科学与资源利用研究。

通信作者: 罗怀良, 教授。

**Abstract:** To explore the decoupling relationship between carbon emissions and economic growth in Panzhihua City, aiming to achieve coordinated progress in carbon reduction and economic development, we combined the Tapio model with the LMDI factor decomposition method to analyze the decoupling characteristics of carbon emissions and economic growth in Panzhihua from 2007 to 2022, along with the impact of driving factors on this relationship. The results indicate that: ① Over the past 16 years, Panzhihua's average carbon emissions were  $1\ 837.37 \times 10^4$  t, with emissions rising from 2007 to 2011, stabilizing from 2012 to 2014, and declining from 2015 to 2022. Carbon emission intensity decreased from 4.80 t/ten thousand yuan to 1.06 t/ten thousand yuan. ② In Panzhihua, raw coal accounted for 55.68% of carbon emissions, followed by cleaned coal (25.06%) and coke (16.72%), while total emissions from electricity, diesel, gasoline, and kerosene were less than 5%. ③ The decoupling state of carbon emissions in Panzhihua from 2008 to 2014 was unstable, exhibiting three alternating states: weak decoupling, expansionary negative decoupling, and strong decoupling. From 2015 to 2022, the state concentrated on strong decoupling. ④ The energy intensity effect primarily restrains the carbon emissions and promotes the decoupling of emissions from economic growth in Panzhihua, while the economic level effect promotes the emissions and hinders the decoupling. In the future, the energy structure effect and population size effect are expected to become significant factors promoting decoupling. Therefore, to achieve low-carbon development and meet the "double carbon" goals, Panzhihua should focus on continuously adjusting its energy structure, optimizing and upgrading traditional industries, and enhancing talent development and introduction.

**Key words:** Tapio decoupling model; LMDI factorization; carbon emissions; economic growth; Panzhihua City

工业革命以来,人类社会在快速发展的同时也在加剧对自然资源的攫取,尤其是对化石能源的粗放式利用,导致二氧化碳等温室气体的排放量急剧增加<sup>[1]</sup>。联合国环境规划署发布的《2023年排放差距报告》指出,2022年全球温室气体排放量已达创纪录的  $574 \times 10^8$  t 二氧化碳当量。面对当前的环境变化,各国采取了积极的应对措施,尤其是2020年我国在第七十五届联合国大会上首次提出2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”的碳减排目标,为我国实现绿色低碳发展指明了方向<sup>[2]</sup>。我国经济社会发展所需90%以上的煤炭和石油、70%以上的天然气和重要矿产资源由资源型城市供给<sup>[3]</sup>。据相关测算,在正常碳达峰情景下,我国2030年126个资源型城市将以  $72.65 \times 10^8$  t 的二氧化碳排放量达峰,约占当年全国二氧化碳排放总量的60%。这无疑加大了资源型城市维持自身发展和实现“双碳”目标的难度。因此,要在控制资源型城市碳排放量的同时实现经济的稳步增长<sup>[4]</sup>,这就要求资源型城市大力发展低碳经济,实现碳排放与经济增长的脱钩<sup>[5]</sup>。

脱钩理论最早由经济合作与发展组织提出<sup>[6]</sup>,旨在探讨经济活动与其所产生的环境压力或资源消耗之间的关系<sup>[7-8]</sup>。碳排放脱钩是指碳排放量与经济增长之间的关联性逐渐减弱乃至达到近乎无关联的状态,是衡量地区低碳发展的重要指标<sup>[9-10]</sup>。目前我国已有不少学者从不同角度对此进行了研究:文献<sup>[11]</sup>指出我国能源消费碳排放与经济增长的脱钩自2000年以后呈“M”型的脱钩特征,且新疆、海南、陕西、宁夏等地区的脱钩状态较差;文献<sup>[12]</sup>指出黄河流域91.2%的城市实现了碳排放与经济增长的相对脱钩,但脱钩程度仍低于珠三角、长三角以及京津冀地区;文献<sup>[13]</sup>研究表明长江经济带2004—2018年交通碳排放量持续增长,且碳排放脱钩以“弱脱钩”为主;文献<sup>[14]</sup>指出2004—2020年我国电力行业碳排放与经济增长处于弱脱钩状态,且在不同情景预测下电力行业碳排放还将持续增加。目前对碳排放与经济增长脱钩关系的研究主要集中在国家层

面<sup>[15]</sup>、省级层面<sup>[16]</sup>以及不同行业之间<sup>[17-18]</sup>, 鲜有关于小尺度地级市尤其是资源型城市碳排放脱钩的研究。此外, 厘清影响碳排放的因素有利于促进碳排放与经济增长的脱钩。目前, 不少学者利用 STIRPAT 模型<sup>[19]</sup>、LMDI 分解法<sup>[20]</sup>以及聚类分析<sup>[21]</sup>等方法从能源结构、能源消耗、产业结构、经济发展等方面探讨了影响碳排放的驱动因素, 但较少与脱钩模型相结合来解释驱动因素对碳排放脱钩的贡献。

资源型城市作为我国重要的能源资源战略保障基地, 需要在碳减排和经济增长之间找到平衡点, 破解“碳诅咒”<sup>[22]</sup>。为此, 本文以我国典型成熟型资源城市四川省攀枝花市为例, 研究攀枝花市 2007—2022 年碳排放特征以及碳排放与经济增长之间的脱钩关系, 将 Tapio 脱钩模型和 LMDI 因素分解法相结合, 构建脱钩因素分解模型, 量化各驱动因素对攀枝花市碳排放以及碳排放脱钩的贡献, 以期为攀枝花市碳减排与经济协调发展的协调共进提供方向性指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

攀枝花市辖区面积 7 401.4 km<sup>2</sup>, 2022 年末常住人口 121.6 万人。由于攀枝花市特殊的地理位置和丰富的矿产资源, 20 世纪 60 年代攀枝花市被国家列为三线建设的重中之重, 成为新中国首批资源开发特区, 在西南高山峡谷区建成了中国西部首个大型钢铁企业攀枝花钢铁公司。经过 50 多年的发展, 如今的攀枝花市已是国内第一、世界第二的钒制品生产基地和国内最大、全球最重要的全流程钒钛工业基地<sup>[23]</sup>。2022 年, 攀枝花市实现地区生产总值 1 220.52 × 10<sup>8</sup> 元, 占四川省经济总量的 2.15%。近年来, 攀枝花市正在从钢铁城市向钒钛之都和阳光宜居城市转型。然而由于攀枝花市是一座因钒钛磁铁矿开发而兴起的典型资源型城市, 能源化工、装备制造等依然是攀枝花市经济发展的支柱产业。要实现“双碳”目标和城市的绿色低碳发展, 攀枝花市仍然面临着巨大的挑战。

### 1.2 数据来源

本文研究主要涉及攀枝花市碳排放测算、碳排放与经济增长的脱钩关系以及影响因素分析 3 个方面。碳排放测算所涉及的能源消费量数据, 以及碳排放脱钩关系和影响因素计算所涉及的 GDP 和年末常住人口等数据来源于 2008—2023 年《攀枝花市统计年鉴》, 折算标准煤系数和碳排放系数来源于《中国能源统计年鉴》以及文献<sup>[24]</sup>的研究结果。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 碳排放的计算

根据攀枝花市能源消耗量统计数据, 原煤、洗精煤、焦炭、汽油、煤油、柴油以及电力这 7 种能源的消耗量占攀枝花市能源总消耗量的 99% 以上, 因此本文仅选用这 7 种能源进行碳排放研究。碳排放量的计算公式如下:

$$C = \sum E_i \times \beta_i \times \gamma_i \quad (1)$$

式中:  $C$  表示碳排放总量;  $E_i$  为第  $i$  种能源的消费量;  $\beta_i$  为第  $i$  类能源折算标准煤系数;  $\gamma_i$  为第  $i$  类能源碳排放系数;  $i=1, 2, \dots, 7$ 。其中, 各能源折算标准煤系数参考《中国能源统计年鉴》, 各能源碳排放系数借鉴文献<sup>[24]</sup>的研究结果(表 1)。

表 1 各能源折算标准煤系数和碳排放系数

	原煤	洗精煤	焦炭	汽油	煤油	柴油	电力
折算标准煤系数	0.714 3	0.971 4	0.971 4	1.471 4	1.471 4	1.457 1	0.122 9
碳排放系数	0.755 9	0.755 9	0.885 0	0.553 8	0.571 4	0.592 1	2.213 2

碳排放强度是指单位 GDP 的二氧化碳排放量<sup>[25-26]</sup>。通常情况下,碳排放强度会随着经济增长和技术进步而下降。具体计算公式如下:

$$I_{CI} = \frac{C}{G} \quad (2)$$

式中:  $I_{CI}$  为碳排放强度;  $G$  为地区生产总值(GDP)。

### 1.3.2 Tapio 脱钩弹性指数

Tapio 脱钩弹性指数是在 OECD 的脱钩模型上优化而来,用以度量经济增长是否以消耗资源和破坏环境为代价<sup>[27-28]</sup>。该指标不仅测量精度高,更有利于脱钩状态的判断,而且能消除量纲因素的影响。其计算公式如下:

$$e = \frac{\Delta C}{\Delta G} = \frac{(C_t - C_{t-1}) \times (C_{t-1})^{-1}}{(G_t - G_{t-1}) \times (G_{t-1})^{-1}} \quad (3)$$

式中:  $e$  为碳排放与 GDP 的脱钩弹性指数;  $\Delta C$  为碳排放的变化率;  $\Delta G$  为 GDP 的变化率;  $G_t$  和  $C_t$  为年份  $t$  的 GDP 和碳排放量。依据脱钩弹性指数可将脱钩状态划分为脱钩、负脱钩和连接 3 种状态,指标的关系及意义如图 1 所示。

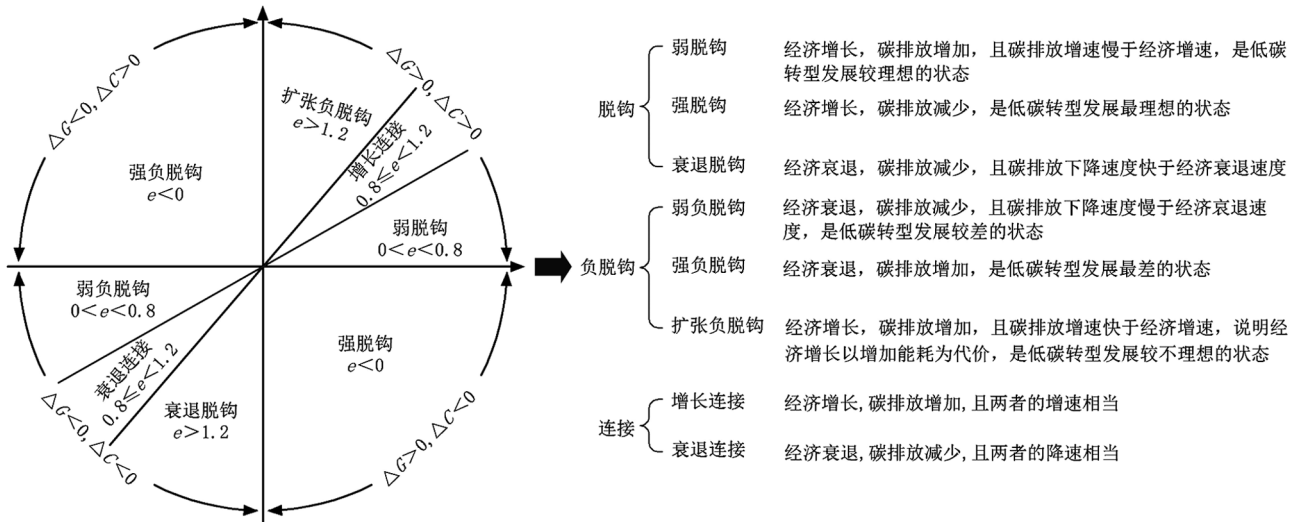


图 1 碳排放与经济成长的脱钩状态划分

### 1.3.3 LMDI 因素分解模型

Kaya 恒等式由日本教授 Yoichi Kaya 于 1989 年在 IPCC 研讨会上为分析经济、人口政策等影响二氧化碳排放量的因素而提出<sup>[13]</sup>, 其表达式为:

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{G} \times \frac{G}{P} \times P \quad (4)$$

式中:  $C$  为碳排放量;  $E$  为能源消耗总量;  $G$  为国内生产总值 GDP;  $P$  为人口总数。从(4)式得到影响碳排放量的因素为能源碳排放系数( $\frac{C}{E}$ )、能源强度( $\frac{E}{G}$ )、人均 GDP( $\frac{G}{P}$ )以及人口( $P$ )。

由于 Kaya 恒等式分解因素有限, 本文根据资源型城市的碳排放特征, 在借鉴前人研究成果<sup>[11,13,29]</sup>的基础上, 对 Kaya 恒等式进行扩展, 构建如下关系式:

$$C = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{E} \times \frac{E}{G} \times \frac{G}{P} \times P \quad (5)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  类能源的碳排放量;  $E_i$  为第  $i$  类能源的消耗量;  $E$  为能源消耗总量;  $G$  为地区生产总值;

$P$  为地区年末常住人口。将(5)式进一步表示为:

$$C = \sum_{i=1}^7 F_i \times S_i \times I \times A \times P \quad (6)$$

结合(5)式和(6)式可定义  $F_i = \frac{C_i}{E_i}$ 、 $S_i = \frac{E_i}{E}$ 、 $I = \frac{E}{G}$ 、 $A = \frac{G}{P}$  分别表示第  $i$  类能源的碳排放系数、第  $i$  类能源的结构比例、能源强度和人均 GDP。

根据 LMDI 分解法中的加法模型, 得到  $t$  时期相对基期碳排放量变化的表达式为:

$$\Delta C = C^t - C^0 = \sum_{i=1}^7 F_i^t \times S_i^t \times I^t \times A^t \times P^t - \sum_{i=1}^7 F_i^0 \times S_i^0 \times I^0 \times A^0 \times P^0 = \Delta C_F + \Delta C_S + \Delta C_I + \Delta C_A + \Delta C_P \quad (7)$$

对式中各驱动因素的效应值进行进一步分解, 得到如下表达式:

$$\Delta C_F = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{F_i^t}{F_i^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_S = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{S_i^t}{S_i^0} \quad (9)$$

$$\Delta C_I = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{I^t}{I^0} \quad (10)$$

$$\Delta C_A = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{A^t}{A^0} \quad (11)$$

$$\Delta C_P = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \ln \frac{P^t}{P^0} \quad (12)$$

$$\delta = \frac{\Delta C_x}{\sum_x |\Delta C_x|} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $\Delta C$  为碳排放变化量;  $C^t$  和  $C^0$  为  $t$  时期和基期的碳排放量;  $\Delta C_F$ 、 $\Delta C_S$ 、 $\Delta C_I$ 、 $\Delta C_A$ 、 $\Delta C_P$  分别为能源碳排放系数效应、能源结构效应、能源强度效应、经济水平效应以及人口规模效应对碳排放变化量的影响。若效应值大于 0, 则表示该驱动因素会造成碳排放量的增加; 反之, 则会抑制碳排放量的增加;  $\delta$  为驱动因素的相对贡献度;  $x$  为各驱动因素。

为进一步分析各驱动因素对攀枝花市碳排放与经济增长之间脱钩的影响, 由(7)式和(3)式得到扩展的碳排放与经济增长的脱钩模型表达式为:

$$e = \frac{\Delta C \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} = \Delta C \times \frac{(C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} = (\Delta C_F + \Delta C_S + \Delta C_I + \Delta C_A + \Delta C_P) \times \frac{(C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} = \frac{\Delta C_F \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} + \frac{\Delta C_S \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} + \frac{\Delta C_I \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} + \frac{\Delta C_A \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} + \frac{\Delta C_P \times (C^0)^{-1}}{\Delta G \times (G^0)^{-1}} = T_F + T_S + T_I + T_A + T_P \quad (14)$$

式中:  $T_F$ 、 $T_S$ 、 $T_I$ 、 $T_A$  和  $T_P$  分别为能源碳排放系数效应的脱钩弹性指数、能源结构效应的脱钩弹性指数、能源强度效应的脱钩弹性指数、经济水平效应的脱钩弹性指数以及人口规模效应的脱钩弹性指数。若效应的脱钩弹性指数大于 0, 则表示该效应对碳排放与经济增长之间的脱钩起阻碍作用; 反之则对二者之

间的脱钩起促进作用。由于第  $i$  种能源碳排放系数在研究中取固定值, 即  $F_i^t = F_i^0$ , 所以  $\Delta C_F = 0$ , 故在文中不对该驱动因素进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 攀枝花市碳排放特征

由图 2 可知, 近 16 年攀枝花市碳排放均值为  $1\ 837.37 \times 10^4$  t, 其动态变化可划分为 3 个阶段: ① 2007—2011 年为前期上升阶段, 从  $1\ 594.44 \times 10^4$  t 增长到  $2\ 340.42 \times 10^4$  t, 5 年间增长了  $745.98 \times 10^4$  t, 年均增长率为 10.07%; ② 2012—2014 年为中期稳定阶段, 3 年平均碳排放总量高达  $2\ 276.11 \times 10^4$  t; ③ 2015—2022 年为后期下降阶段, 从  $2\ 221.21 \times 10^4$  t 下降到  $1\ 299.28 \times 10^4$  t, 8 年间下降  $921.92 \times 10^4$  t, 年均下降率为 7.37%。近 16 年攀枝花市能源碳强度也呈持续下降的趋势, 从 4.80 t/万元下降到 1.06 t/万元, 年均下降 9.55%。此外, 攀枝花市碳排放以原煤为主, 其碳排放量平均占比达 55.68%, 总体呈先增长后下降的趋势; 其次为洗精煤(25.06%)和焦炭(16.72%), 总体呈先下降后增长的趋势; 电力、柴油、汽油和煤油的碳排放量均较低, 总计占比低于 5%。

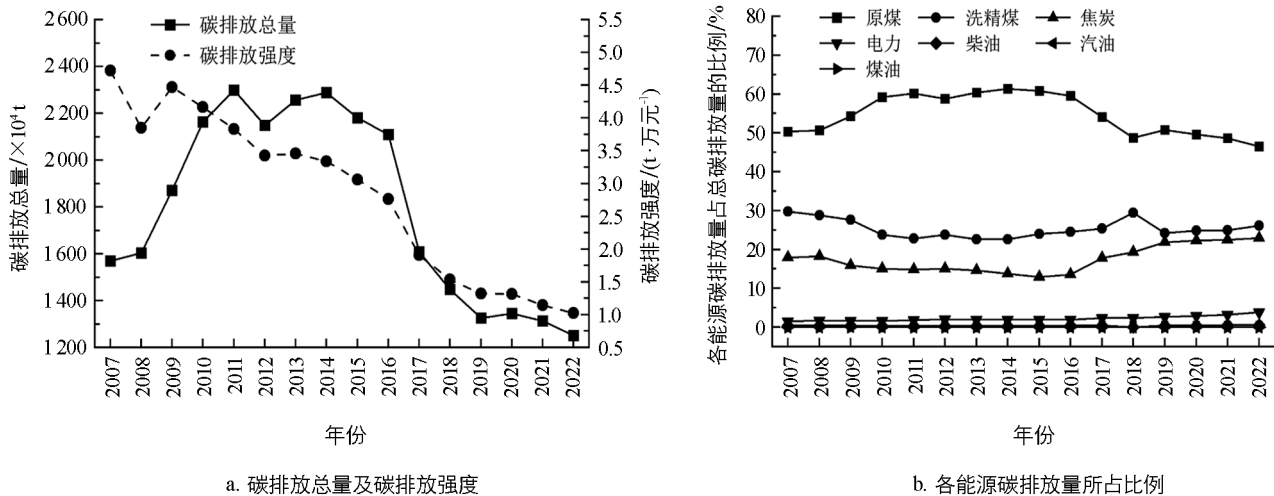


图 2 2007—2022 年攀枝花市碳排放特征

### 2.2 攀枝花市碳排放与经济成长的脱钩效应

由表 2 可知, 攀枝花市碳排放与经济成长的脱钩状态包括弱脱钩、扩张负脱钩和强脱钩, 脱钩指数除 2009 年较高以外, 其余年份呈较为平稳的波动变化。根据碳排放与经济成长的脱钩指数和脱钩状态, 可将二者脱钩关系的变化划分为 2 个阶段: ① 2008—2014 年, 攀枝花市碳排放与经济成长交替出现弱脱钩、扩张负脱钩和强脱钩 3 种状态, 可见这一阶段二者的脱钩状态较不稳定, 且出现两次扩张负脱钩的不理想状态; ② 2015—2022 年, 这一阶段攀枝花市碳排放与经济成长的脱钩状态集中表现为强脱钩, 相较于上一阶段脱钩状态得到明显的改善。

表 2 2008—2022 年攀枝花市碳排放与经济成长的脱钩状态

年份	$\Delta C$	$\Delta G$	$e$	脱钩状态	年份	$\Delta C$	$\Delta G$	$e$	脱钩状态
2008	0.02	0.25	0.09	弱脱钩	2016	-0.03	0.07	-0.44	强脱钩
2009	0.17	0.00	34.15	扩张负脱钩	2017	-0.23	0.10	-2.26	强脱钩
2010	0.16	0.24	0.65	弱脱钩	2018	-0.10	0.12	-0.85	强脱钩
2011	0.06	0.16	0.41	弱脱钩	2019	-0.08	0.06	-1.26	强脱钩

续表 2

年份	$\Delta C$	$\Delta G$	$e$	脱钩状态	年份	$\Delta C$	$\Delta G$	$e$	脱钩状态
2012	-0.06	0.05	-1.35	强脱钩	2020	0.02	0.02	0.72	弱脱钩
2013	0.05	0.04	1.24	扩张负脱钩	2021	-0.02	0.12	-0.17	强脱钩
2014	0.01	0.05	0.26	弱脱钩	2022	-0.04	0.06	-0.67	强脱钩
2015	-0.05	0.04	-1.22	强脱钩					

### 2.3 攀枝花市碳排放脱钩驱动因素分析

基于 Kaya-LMDI 模型对攀枝花市碳排放驱动因素进行分解。如表 3 所示, 各驱动因素对攀枝花市碳排放的影响效应存在显著的差异, 按照其影响程度(按绝对值排序)依次为能源强度效应(贡献度为 -52.84%)、经济水平效应(贡献度为 43.80%)、人口规模效应(贡献度为 2.32%)、能源结构效应(贡献度为 1.03%)。其中, 绝大多数年份的经济水平效应为正值, 表明经济水平效应对攀枝花市碳排放的变化起正向驱动作用, 即经济增长会引起攀枝花市碳排放量的增加; 绝大多数时期能源强度效应为负值, 表明能源强度效应对攀枝花市碳排放的变化起负向驱动作用, 即能源强度降低能抑制攀枝花市碳排放的增加; 能源结构效应和人口规模效应均表现为正负值交替出现, 但对攀枝花市碳排放的变化总体起正向驱动作用, 即目前攀枝花市能源结构和人口变化可能会带来碳排放量的增加。

表 3 2008—2022 年影响攀枝花市碳排放的驱动因素

年份	能源结构效应		能源强度效应		经济水平效应		人口规模效应	
	$\Delta C_s$	$\delta_s/\%$	$\Delta C_l$	$\delta_l/\%$	$\Delta C_A$	$\delta_A/\%$	$\Delta C_p$	$\delta_p/\%$
2008	2.94	0.42	-329.63	-47.32	355.81	51.08	8.16	1.17
2009	-25.02	-6.90	285.95	78.85	-21.58	-5.95	30.08	8.29
2010	-26.40	-4.54	-115.06	-19.81	363.68	62.60	75.83	13.05
2011	-4.10	-0.80	-181.69	-35.43	317.69	61.95	9.33	1.82
2012	13.49	3.56	-262.68	-69.30	88.04	23.23	14.82	3.91
2013	-11.23	-8.63	31.37	24.10	87.56	67.27	0.00	0.00
2014	-9.90	-4.75	-75.20	-36.08	119.54	57.36	-3.78	-1.81
2015	-2.03	-0.69	-196.53	-67.01	91.02	31.03	-3.72	-1.27
2016	11.45	2.90	-229.97	-58.32	151.09	38.32	-1.79	-0.45
2017	44.11	4.54	-735.50	-75.65	189.60	19.50	-3.09	-0.32
2018	24.26	4.29	-362.77	-64.11	176.29	31.15	-2.56	-0.45
2019	5.46	1.71	-213.78	-66.94	94.29	29.52	-5.84	-1.83
2020	6.63	13.00	-14.81	-29.04	29.56	57.96	0.00	0.00
2021	8.39	2.29	-197.90	-54.02	158.91	43.38	1.13	0.31
2022	15.71	6.48	-148.85	-61.36	75.85	31.27	2.18	0.90
总计	53.77	1.03	-2747.03	-52.84	2277.34	43.80	120.76	2.32

脱钩弹性指数仅限于研究碳排放与经济增长之间的同步关系, 无法解释碳排放量变化的机理<sup>[13]</sup>。因此, 本文将 Tapio 脱钩弹性指数和 LMDI 模型相结合, 得到各驱动效应对碳排放与经济增长脱钩的脱钩弹性指数, 结果如表 4 所示。总体来看, 碳排放与经济增长的脱钩变化主要受能源强度效应和经济水平效应的影响, 其中绝大多数年份能源强度效应的脱钩指数为负值, 可以促进攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩; 经济水平效应的脱钩指数基本为正值, 对攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩起阻碍作用; 能源结构效

应的脱钩指数和人口规模效应的脱钩指数在研究时段内呈正负值交替出现, 年均脱钩指数分别为-0.16和0.27, 说明能源结构在一定程度上能够促进碳排放与经济脱钩, 人口规模效应则起阻碍作用。

表 4 2008—2022 年攀枝花市碳排放各驱动因素的脱钩指数

年份	$T_s$	$T_I$	$T_A$	$T_P$	$e$	年份	$T_s$	$T_I$	$T_A$	$T_P$	$e$
2008	0.01	-0.82	0.88	0.02	0.09	2016	0.07	-1.46	0.96	-0.01	-0.44
2009	-3.17	36.25	-2.74	3.81	34.15	2017	0.20	-3.29	0.85	-0.01	-2.26
2010	-0.06	-0.25	0.80	0.17	0.65	2018	0.13	-1.87	0.91	-0.01	-0.85
2011	-0.01	-0.53	0.93	0.03	0.41	2019	0.06	-2.24	0.99	-0.06	-1.26
2012	0.12	-2.42	0.81	0.14	-1.35	2020	0.22	-0.50	1.00	0.00	0.72
2013	-0.13	0.36	1.00	0.00	1.24	2021	0.05	-1.15	0.93	0.01	-0.17
2014	-0.08	-0.64	1.01	-0.03	0.26	2022	0.19	-1.81	0.92	0.03	-0.67
2015	-0.02	-2.15	1.00	-0.04	-1.22						

### 3 讨论与结论

#### 3.1 攀枝花市碳排放脱钩的驱动效应

##### 3.1.1 能源强度效应

能源强度效应是抑制攀枝花市碳排放增长以及促进碳排放与经济增长脱钩的最主要因素。除 2009 年和 2013 年以外, 能源强度效应对碳排放的效应值以及对碳排放脱钩的贡献值均为负值, 且对促进碳减排的贡献度( $\delta_I$ )总体呈增大趋势。此外, 能源强度效应的脱钩弹性指数( $T_I$ )变化幅度最大, 并且其变化趋势与碳排放脱钩指数的变化趋势高度吻合, 进一步说明攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩主要受能源强度效应的影响。

此外, 碳排放强度可用于衡量能源的综合利用效率, 评估经济增长对于能源的依赖程度<sup>[11]</sup>。2007—2022 年, 攀枝花市碳排放强度从 4.80 t/万元下降到 1.06 t/万元, 下降幅度达 9.55%, 节能降耗成效显著, 这主要与攀枝花市不断强化的节能降耗政策有关。“十二五”期间, 攀枝花市通过加强节能技术的开发、示范和推广应用使得单位规模工业增加值能耗 5 年累计降幅达 43.86%; “十三五”期间, 攀枝花市通过调整工业结构、化解产能过剩以及限制关停高耗能产业等措施促使能源需求量大幅回落; “十四五”期间, 攀枝花市印发的《攀枝花市碳达峰实施方案》中明确指出要通过提升节能降碳管理水平、实施节能降碳重点工程、推进重点用能设备节能增效等措施全面提高能源利用效率。研究时段内, 攀枝花市化石能源总消费量从  $3\,972.46 \times 10^4$  t 降至  $2\,157.99 \times 10^4$  t, 碳排放量从  $2\,340.42 \times 10^4$  t 降至  $1\,299.29 \times 10^4$  t, 而 GDP 则从  $332.50 \times 10^8$  元增至  $1\,220.52 \times 10^8$  元。可见, 攀枝花市在落实节能降耗, 实现能源强度和碳排放总量“双降”的同时 GDP 也在稳步增长, 是四川省能源强度下降最显著的市(州)。

值得注意的是, 2009 年能源强度效应对碳排放的效应值以及脱钩指数均为正值且数值较高。这主要是受 2008 年“5·12”汶川特大地震和“8·30”攀枝花—会理大地震的影响, 抗震抢险和灾后恢复重建带来各种能耗大幅上升, 对节能降耗造成了严重影响。同时, 地震还造成攀钢、攀煤等企业的生产一度中断, 造成严重的直接经济损失。可见, 地震等突发性自然灾害会给地区的能源消耗和经济造成巨大波动, 严重影响节能降耗的效果。

##### 3.1.2 经济水平效应

经济水平效应是促进攀枝花市碳排放增长以及阻碍碳排放与经济增长脱钩的最主要因素。但从现实来

看,不能通过降低经济发展水平来实现碳排放的下降以及碳排放与经济增长之间的脱钩。经济增长是满足国家及地区发展与基本需求的必要条件,研究时段内攀枝花市人均 GDP 从 2007 年的 29 060 元/人增长到 2022 年的 100 372 元/人,增长了 3.45 倍,且 2022 年其人均 GDP 已赶超成都市位居四川省第一。由此可见,攀枝花市经济发展迅猛,为促进当地人民生活水平的提高带来巨大动力。

此外,从表 3 和表 4 可以看出,经济水平效应对碳排放的累积效应值以及对碳排放脱钩的贡献值均低于能源强度效应,进一步说明攀枝花市碳排放的降低以及碳排放与经济增长之间脱钩要通过降低能源强度来实现。在 2010 年以后,经济水平效应对攀枝花市碳排放的正向驱动效应值呈现缓慢的波动式下降,说明攀枝花市在努力转变资源型城市固有的粗放型经济发展方式,通过产业结构调整与空间结构重构<sup>[30]</sup>,逐步实现经济向高质量发展转型,未来经济水平效应对攀枝花市碳排放的促进作用可能会进一步减弱。

### 3.1.3 能源结构效应和人口规模效应

能源结构效应在一定程度上会导致攀枝花市碳排放量的增加,但对碳排放与经济增长之间的脱钩起到了一定的促进作用,尤其在 2009—2011 年和 2013—2015 年,能源结构效应对抑制碳排放以及促进碳排放脱钩起到了明显作用。攀枝花市作为典型的资源型城市,是我国西南地区最大的钒钛、钢铁生产基地,化石能源是攀枝花市支柱产业发展的基础。原煤、洗精煤以及焦炭等能源消费量所占比重仍然较大,以煤为主的能源消费结构将长期存在。要想进一步提升能源结构效应对碳排放的抑制作用以及对碳排放与经济增长脱钩的促进作用,能源消费结构的优化有待加强。因此,近年来攀枝花市积极发展和扩大新能源利用规模,推动新能源在发电领域的应用,显著提高新能源发电在能源消费中的比重,加快构建“水风光氢储”五位一体、多能互补的清洁能源体系,努力使能源结构效应成为今后促进碳排放与经济增长脱钩的主要驱动力。

人口规模效应是促进攀枝花市碳排放量增加和阻碍碳排放与经济增长之间脱钩的因素之一,但在 2014—2019 年人口规模效应对攀枝花市碳排放量表现为抑制作用并促进碳排放与经济增长之间的脱钩。2014—2019 年攀枝花市年末常住人口从 122.5 万人下降到 121.3 万人,可见攀枝花市人口流动性较大。虽然人口的减少在一定程度上能够减少能源消耗,降低碳排放。但从长远来看,人口的持续减少会带来劳动力不足,经济增长缓慢等问题<sup>[31]</sup>。因此,要使人口规模效应成为攀枝花市碳排放脱钩的主要驱动力,不能简单通过控制人口数量来实现,尤其是攀枝花市作为我国的工业重镇,总人口却仅占四川省总人口的 1.45%。为扭转人口持续下降的局面,攀枝花市相继出台了育儿补贴政策、《促进人力资源聚集十六条》和《攀枝花市青年人才集聚支持实施细则》等政策来吸引人才,尤其是能够推动攀枝花市产业结构优化升级的高水平人才,利用其创新技术进一步降低能源强度,使人口规模效应的负面作用向积极作用转变。

## 3.2 攀枝花市碳减排的建议

基于以上研究结果,为进一步促进攀枝花市碳排放与经济增长之间的稳定脱钩,提出以下建议:

1) 攀枝花市要实现碳排放与经济增长之间持续稳定的脱钩仍要依靠降低能源强度。但能源强度存在极限,当能源强度降低到一定程度后就难以进一步促进二者的脱钩<sup>[11]</sup>。因此,在继续推进节能降耗相关措施的同时,更要通过发展新能源、调整能源结构来实现脱钩。虽然目前能源结构对攀枝花市碳排放与经济增长之间脱钩的促进作用较小,但攀枝花市具有发展氢能、光伏等新能源的良好条件。因此,加强能源结构的改善,对稳定攀枝花市碳排放与经济增长之间的脱钩具有重要作用。

2) 经济增长虽然是促进碳排放增加以及阻碍碳排放脱钩的主要因素,但要通过限制经济增长促进攀枝花市碳排放的脱钩,显然与经济实际相悖,然而可以通过转变经济发展方式来实现<sup>[13]</sup>。攀枝花市

是我国典型的成熟型资源城市,在依靠资源带动经济快速发展的同时,要加快传统产业结构的优化升级,因地制宜重点打造“钒钛之都”“康养之城”等城市名片,发展新质生产力推动经济增长,实现攀枝花市碳减排与经济协调发展的协调共进。

3) 人口的增长和收缩都会对碳排放与经济增长的脱钩产生重要影响:一方面,人口增多带来能源消费量的增加;另一方面,人口收缩会造成经济增长困难<sup>[31]</sup>。虽然目前人口规模效应对攀枝花市碳排放的脱钩起阻碍作用,但通过引进和发展高素质人才促进攀枝花市产业结构优化升级,将人口规模的负面作用转变为促进碳排放减少和经济增长的积极作用。

### 3.3 结论

本文将 Tapio 模型和 LMDI 因素分解法相结合,分析了近 16 年攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩特征及驱动因素对脱钩状况的影响,得出以下结论:

1) 近 16 年,攀枝花市碳排放量均值为  $1\ 837.37 \times 10^4$  t,其前期持续上升(2007—2011 年)、中期相对稳定(2012—2014 年)、后期持续下降(2015—2022 年),而碳排放强度从 4.80 t/万元持续下降到 1.06 t/万元,可见攀枝花市降碳减排效果显著。但攀枝花市能源碳排放以原煤为主,其碳排放量平均占比达 55.68%,当前的能源消费结构不利于攀枝花市实现绿色低碳发展的转型。

2) 研究时段内,根据碳排放与经济增长之间脱钩指数和脱钩状态的变化可将二者的脱钩关系划分为 2 个阶段:2008—2014 年,攀枝花市碳排放与经济增长交替出现弱脱钩、扩张负脱钩和强脱钩 3 种状态,这一阶段二者的脱钩状态较不稳定;2015—2022 年,攀枝花市碳排放与经济增长的脱钩状态集中表现为强脱钩,相较于上一阶段,脱钩状态得到了明显改善。

3) 能源强度效应和经济水平效应是影响攀枝花市碳排放与经济增长之间脱钩的主要因素,能源强度效应对二者的脱钩起促进作用,经济水平效应则起阻碍作用。能源结构效应和人口规模效应可能成为未来促进攀枝花市碳排放与经济增长脱钩的主要驱动力。

### 参考文献:

- [1] 罗涛,董洪光,高乐红,等.宁夏碳排放驱动因素与碳达峰研究[J].内江师范学院学报,2022,37(8):70-76.
- [2] 顾佰和,于东晖,王琛,等.进一步深化碳达峰、碳中和战略转型路径的若干思考[J].中国科学院院刊,2024,39(4):726-736.
- [3] 刘玲娜,雷涯邻,张万益,等.“双碳”目标下资源型城市韧性发展[J].地质通报,2024,43(8):1361-1372.
- [4] 王安静,郭琳,赵景峰.中国经济与碳排放脱钩的时空异质性及其驱动因素分析[J].软科学,2024,38(5):100-106.
- [5] 彭佳雯,黄贤金,钟太洋,等.中国经济增长与能源碳排放的脱钩研究[J].资源科学,2011,33(4):626-633.
- [6] XU WH, XIE Y L, XIA D H, et al. A Multi-Sectoral Decomposition and Decoupling Analysis of Carbon Emissions in Guangdong Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113485.
- [7] 吴振信.碳排放与经济增长关系研究[M].北京:经济科学出版社,2015:1-3.
- [8] 王胜蓝,周宝同,陈怡君,等.重庆市土地利用碳排放与经济增长的脱钩分析[J].内江师范学院学报,2016,31(10):52-56.
- [9] 刘子成,燕志鹏.碳排放、煤炭消费与经济脱钩效应分析[J].经济问题,2023,(7):38-43,128.
- [10] ZHANG M, SONG Y, SU B, et al. Decomposing the Decoupling Indicator between the Economic Growth and Energy Consumption in China [J]. Energy Efficiency, 2015, 8(6): 1231-1239.
- [11] 孙叶飞,周敏.中国能源消费碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究[J].经济与管理评论,2017,33(6):21-30.
- [12] 张华明,元鹏飞,朱治双.黄河流域碳排放脱钩效应及减排路径[J].资源科学,2022,44(1):59-69.

- [13] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 862-877.
- [14] 李旭东, 谭青博, 赵浩辰, 等. 碳达峰背景下中国电力行业碳排放因素和脱钩效应 [J]. 中国电力, 2024, 57(5): 88-98.
- [15] 庄莹. 我国经济增长与碳排放的脱钩效应研究 [J]. 中国集体经济, 2022, (6): 31-32.
- [16] 吕靖烨, 李珏. 中国各省份碳排放脱钩效应、驱动因素及预测研究 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(2): 210-220.
- [17] 宋晓聪, 杜帅, 沈鹏, 等. 中国制造业 CO<sub>2</sub> 排放与经济脱钩关系解析 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 201-208.
- [18] 李振环, 冯学钢, 王亚玲. 中国旅游业碳排放脱钩效应测度与时空格局演变 [J]. 统计与决策, 2021, 37(22): 46-51.
- [19] 范育洁, 曲建升, 张洪芬, 等. 西北五省区交通碳排放现状及影响因素研究 [J]. 生态经济, 2019, 35(9): 32-37+67.
- [20] 陈涛, 李晓阳, 陈斌. 中国碳排放影响因素分解及峰值预测研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(1): 396-406.
- [21] 义欣, 张正勇, 刘琳, 等. 聚类分析视角下的中国省域碳排放时空格局及驱动因素分析 [J]. 生态学报, 2024, 44(11): 4558-4573.
- [22] FRIEDRICH SJ, INDERWILDI O R. The Carbon Curse: Are Fuel Rich Countries Doomed to High CO<sub>2</sub> Intensities? [J]. Energy Policy, 2013, 62: 1356-1365.
- [23] 罗怀良. 区域视角下西南地区成熟型资源城市转型研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2022: 72-73.
- [24] 赵菲菲, 胡政, 赵旭, 等. 长江经济带碳排放与经济增长“脱钩陷阱”的识别与破解研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(6): 1127-1137.
- [25] 高志刚, 丁梦雅. 数字经济、碳排放强度与资源型城市高质量发展 [J]. 甘肃社会科学, 2024(2): 184-195.
- [26] 钱萍, 马彩虹. 中国能源消费碳排放时空动态变化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(10): 93-100.
- [27] YANG J, HAO Y, FENG C. A Race between Economic Growth and Carbon Emissions: What Play Important Roles towards Global Low-Carbon Development? [J]. Energy Economics, 2021, 100: 105327.
- [28] 马建东. 中国西部地区经济发展质量及测度研究 [D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2019.
- [29] 陈亮, 张楠, 王一帆, 等. 京津冀地区碳排放强度变化驱动因素及归因分析 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4382-4394.
- [30] 张欣. 攀枝花市产业结构转型与空间结构重构研究 [J]. 中国集体经济, 2021 (22): 35-36.
- [31] 辛奕霖, 刘艳军, 柳力玮. 中国老工业城市人口增长与收缩对碳排放强度的影响效应 [J]. 地理研究, 2024, 43(3): 558-576.

责任编辑 张宥

柳剑