

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.002

基于 LMDI-STIRPAT 模型的 安徽省水泥行业碳排放预测与分析

王 甫¹, 许子牧¹, 聂 磊², 胡淑恒¹, 吴 为²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省工程咨询研究院, 安徽 合肥 230051)

摘 要:水泥行业是工业碳排放的主要来源之一,我国是目前世界水泥产量最大的国家,探究水泥碳减排对实现碳达峰、碳中和目标至关重要。文章以安徽省为例,采用联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)碳排放系数法计算安徽省水泥行业 2010—2021 年的碳排放量,并通过构建对数平均迪氏指数法(log-mean Divisia index, LMDI)因素分解模型分析安徽省水泥行业碳排放的主要影响因素。同时,对随机性的环境影响评估(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology, STIRPAT)模型进行扩展,设定基准、低碳和强化低碳 3 种情景,建立安徽省水泥行业碳排放预测模型,预测不同情景下碳排放量和趋势。结果表明:安徽省水泥行业碳排放量总体呈上升趋势,且煤炭消耗量占比较大,节能减排面临较大压力;能源强度和劳动生产率是对安徽省碳排放影响最显著的因子;在基准、低碳和强化低碳情景下,安徽省水泥行业的碳排放峰值年分别为 2030 年之后、2025 年和 2023 年。

关键词:碳排放;碳达峰;对数平均迪氏指数法(LMDI)模型;随机性的环境影响评估(STIRPAT)模型;水泥行业

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)12-1591-07

Prediction and analysis of carbon emissions of cement industry in Anhui Province based on LMDI-STIRPAT model

WANG Fu¹, XU Zimu¹, NIE Lei², HU Shuheng¹, WU Wei²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Engineering Consulting Institute, Hefei 230051, China)

Abstract: The cement industry is one of the main sources of industrial carbon emissions. China is currently the world's largest producer of cement, and exploring carbon emission reduction in the cement industry is crucial to achieve carbon peak and carbon neutrality goals. Taking Anhui Province as an example, this paper calculated the carbon emissions of the cement industry in Anhui Province from 2010 to 2021 by using the carbon emission coefficient method of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). By constructing log-mean Divisia index (LMDI) factor decomposition model, the main factors influencing the carbon emissions of the cement industry in Anhui Province were analyzed. At the same time, the stochastic impacts by regression on population, affluence and technology (STIRPAT) model was extended. Three scenarios of baseline, low carbon and enhanced low carbon were set up, and the carbon emission prediction model of the cement industry in Anhui Province was established to predict the carbon emissions and trend under different scenarios. The results show that the carbon emissions of the cement industry in Anhui Province are on the rise, with coal consumption accounting for a large proportion, thereby presenting greater pressure for energy saving and emission

收稿日期:2023-12-08;修回日期:2024-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32170183);安徽省重点领域能效核查工作资助项目(2023BFAFZ01442)

作者简介:王 甫(1999—),男,安徽淮南人,合肥工业大学硕士生;

许子牧(1988—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: xzm666@hfut.edu.cn.

reduction. Energy intensity and labor productivity are the most significant factors affecting the carbon emissions in Anhui Province. Under the three scenarios of baseline, low carbon and enhanced low carbon, the peak years of the carbon emissions of the cement industry in Anhui Province are after 2030, 2025, and 2023, respectively.

Key words: carbon emissions; carbon peak; log-mean Divisia index(LMDI) model; stochastic impacts by regression on population, affluence and technology(STIRPAT) model; cement industry

全球气候变暖问题已成为时代的焦点,是全人类面临的重要挑战。由人类活动产生的温室气体,特别是 CO₂ 增加是导致全球变暖的重要因素^[1]。2020 年 9 月 22 日,我国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标。

水泥作为城市化过程中频率最高、用量最大的建筑材料,为国家建设提供重要的原材料保障,在工业化、城镇化、现代化进程中发挥了重要作用^[2]。但同时水泥行业也是工业 CO₂ 排放的重要来源之一,其排放量约占全球人为 CO₂ 排放量的 8%。我国是世界上生产水泥最多的国家,据中国国家统计局统计,2020 年中国水泥产量为 23.95×10^9 t,约占全世界水泥产量的 57.15%,其中水泥行业 CO₂ 直接排放量约占全国总量的 12%,工业生产过程排放占全国排放的 60%以上^[3-5]。水泥产业的快速发展伴随着高能耗、高碳排放,给环境带来巨大挑战,是政府和相关管理部门实施双碳目标的重点对象^[6]。而作为我国水泥行业的支柱省份,安徽省水泥产量长期处于全国领先地位,中国水泥网信息中心统计显示,2021 年安徽省水泥熟料产量为 1.437×10^9 t,占全国水泥熟料 9.3%,位列全国第一。因此,我国“双碳”政策背景和全球低碳发展趋势下,研究安徽省水泥行业碳排放趋势和主要影响因素,对于准确预测和定量分析不同情境下安徽省水泥行业碳排放量具有重要意义。

近年来,许多学者致力于碳排放量的建模和计算,并通过模型预测帮助各国政府制定合理的气候和能源政策。目前已经建立多种用于碳排放定量、预测、影响因子分析的方法和模型,如对数平均迪氏指数法(log-mean Divisia index, LMDI)、低排放分析系统(long-range energy alternatives planning system, LEAP)、随机性的环境影响评估(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology, STIRPAT)模型和 IRPAT 模型等,主要侧重于探索和计算不同驱动因素对碳排放的贡献^[7-9]。文献[10]基于 LMDI 模型利用我国 30 个省(市)的旅游业碳排

放数据,揭示我国区域旅游碳排放的时空分异及其与旅游经济增长的脱钩关系,分析影响旅游业相关的碳排放的主要因素;文献[11]基于 LMDI 指数分解方法分析促进和抑制江苏省建筑业碳排放的主要影响因素;文献[12]基于 STIRPAT 模型结合情景分析方法分析中西部典型富煤地区碳排放的主要驱动因素,并预测不同情境下中西部地区的碳排放趋势、碳达峰时间和峰值;文献[13]基于 LMDI 指数分解法分析钢铁行业碳排放增长的影响因素,并通过 STIRPAT 模型和情景分析预测 2030 年我国钢铁行业的碳排放;文献[14]基于 LEAP 模型,分析评估山东省水泥行业的 CO₂ 排放量和减排潜力,设定 3 种情景预测山东水泥行业的能源需求和 CO₂ 排放量。

目前,对碳排放影响因素的分析预测研究主要集中在全国或省级层面,对于行业层面的具体研究相对较少。在水泥行业研究中,较少关注其能源消耗和 CO₂ 排放的具体数量及其驱动因素。因此,本研究通过对安徽省水泥行业历年能源消耗和 CO₂ 排放量进行计算和分析,有利于深入了解水泥行业在碳排放方面的现状和趋势,以减少碳排放并推动绿色低碳发展;通过 LMDI 模型分析其驱动因素更好地了解影响碳排放的关键因素,从而有针对性地制定措施来减少碳排放;利用扩展的 STIRPAT 模型结合情景分析预测不同情境下的安徽省水泥行业碳排放峰值和碳达峰时间,有助于制定长期规划,为推动安徽省水泥行业实现绿色低碳发展,早日实现碳达峰、碳中和的目标提供决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 碳排放测算方法

本文采用基于《国家温室气体排放指南》中自上而下路径的碳排放系数法^[15],通过分析安徽省水泥行业历年的基础数据,建立了一个用于测算安徽省水泥行业碳排放的模型,计算式为:

$$C_E = \sum_{i=1}^n C_{Ei} = \sum_{i=1}^n E_{i\alpha} F_i \quad (1)$$

其中: C_E 为能源燃烧产生碳排放总量; C_{E_i} 为第 i 种能源的碳排放量; E_i 为第 i 种能源的消费量; α_i 为第 i 种能源的折标准煤系数; F_i 为第 i 种能源的碳排放系数。主要能源相关系数见表 1 所列。

表 1 主要能源相关系数

能源名称	折标准煤系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5
天然气	13.300 0	0.448 3

1.2 LMDI 指数分解法

LMDI 指数分解法是 Kaya 在 1989 年提出,由 Kaya 恒等式发展而来^[16],文献^[17]在 Kaya 恒等式的基础上进一步优化,消除了方程残差项。因为 LMDI 适用性强,可以对多个因素进行分解,并且分解后没有残差^[18],所以本研究选用 LMDI 指数分解法。Kaya 恒等式等号左侧为 CO_2 排放量,右侧为一个国家或地区 CO_2 排放的影响因素,一般包括 CO_2 排放强度、能源强度、经济规模和人口规模等。通过分析这些因素在历史时期的变化趋势,可以了解对其 CO_2 排放的正向或负向影响,并据此制定相关的政策措施。针对安徽省水泥行业的特点,对 Kaya 恒等式进行了修正,修正后的模型计算式为:

$$C = \frac{C}{E_i} \frac{E_i}{E} \frac{E}{G} \frac{G}{S} S = FTKNS \quad (2)$$

其中: C 为 CO_2 排放量; E_i 为第 i 种能源消费量; E 为能源消费总量; G 为工业增加值; S 为水泥行业劳动人口数,用以表示行业规模; F 为 CO_2 排放强度; T 为能源强度; K 为能源结构; N 为劳动生产率。

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_F + \Delta C_T + \Delta C_K + \Delta C_N + \Delta C_S \quad (3)$$

结合改进的 Kaya 等式,设 C 为 CO_2 在 $[0, t]$ 时间段的变化总量,依据 LMDI 指数分解法的具体步骤,计算 CO_2 排放强度、能源强度、能源结构、劳动生产率和行业规模 5 个影响因素对 C 的分解值,设基期碳排放为 C^0 ,目标年份 t 的碳排放为 C^t ,各因素效应分别表示为:

$$\Delta C_F = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{C_F^t}{C_F^0} \quad (4)$$

$$\Delta C_T = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{C_T^t}{C_T^0} \quad (5)$$

$$\Delta C_K = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{C_K^t}{C_K^0} \quad (6)$$

$$\Delta C_N = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{C_N^t}{C_N^0} \quad (7)$$

$$\Delta C_S = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{C_S^t}{C_S^0} \quad (8)$$

1.3 STIRPAT 模型

STIRPAT 模型综合考虑各因素对环境变化的影响,能够解决 Kaya 恒等式和 IPAT 方程中因素不一致性的问题^[19]。

该模型可以应用于环境碳排放的变化趋势的预测和理解。STIRPAT 方程在 IPAT 方程的基础上进行改进,同时考虑了 Kaya 恒等式和 IPAT 模型中各因素对环境变化结果的不一致性,该模型的表达式为:

$$I = aP^bA^cT^d h \quad (9)$$

其中: I 、 P 、 A 、 T 分别表示环境碳排放、区域人口数、富裕度和技术水平;模型中的常数项为 a ;指数项 b 、 c 、 d 分别对应着相应变量的指数。误差项 h 被引入以消除异方差对结果的影响。为提高模型的准确性,对变量进行对数化处理,即

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln h \quad (10)$$

根据安徽省的区域特点,在原有模型基础上,加入其他影响因素:人口 P 、人均 GDP 变量 A 、能源强度 T 、城镇化率 U 、产业结构 R (产业结构以第二产业占比表示)、水泥熟料产量 M , f 、 g 分别对应着相应变量的指数,拓展后的 STIRPAT 模型公式为:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \ln U + f \ln R + g \ln M + \ln h \quad (11)$$

1.4 数据来源

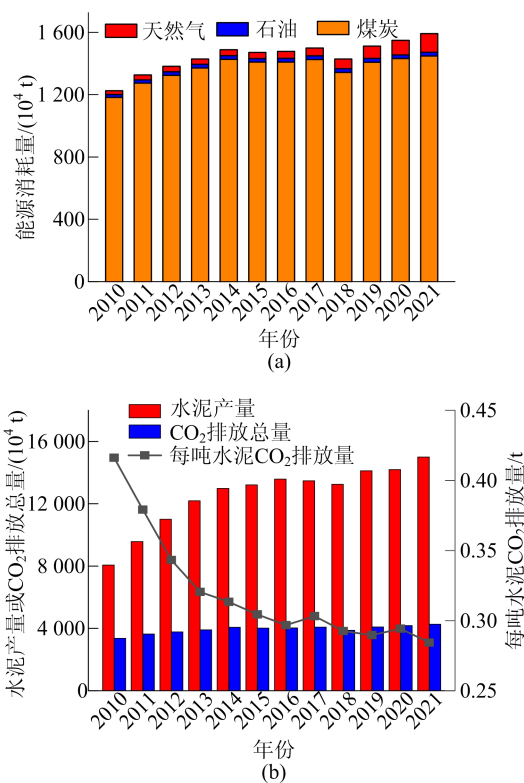
本文的数据来自国家统计局年鉴、安徽统计年鉴和中国水泥年鉴等^[20],按照国家统计局制定的《国民经济行业分类与代码》,水泥被归类于非金属矿物制品业。

在安徽省水泥碳排放量的核算中,只统计了一次能源消耗所产生的碳排放量,忽略了加工运输过程中可能产生的碳排放量及其他加工过程中的潜在碳排放量^[21]。

2 结果分析

2.1 安徽省水泥碳排放分析

基于安徽省水泥熟料产量、能源消费以及碳排放能源实物消耗量数据,使用式(1)对安徽省水泥碳排放总量进行核算,结果如图 1 所示。

图1 水泥能源消费、产量及CO₂排放情况

由图1可知:安徽省水泥产量自2010年以来一直呈增长趋势,由2010年的 $8\,068.91 \times 10^4$ t增长到2021年的 $15\,001 \times 10^4$ t,增长了1.86倍;2018年略有下降,这是由于2018年江浙等地开始执行水泥错峰政策,水泥熟料供应市场减少的不利影响;同时能源消费量也在增加,可以看出水

泥行业主要依赖煤炭作为能源,煤炭在水泥生产过程中的煅烧环节占总能源消费的90%以上。此外,天然气的使用比例也在逐渐增加,但相对来说还是较少,可以看出随着经济的快速增长,安徽省也在积极调整能源结构。总体而言,安徽省单位水泥CO₂排放量逐年下降,但煤炭仍然占据了水泥行业能源消费的主要地位。

2.2 安徽省水泥碳排放影响因素分析

结合改进的Kaya恒等式与LMDI指数分解法进行逐年分解,计算得出2010—2021年安徽省水泥行业CO₂排放量的影响因素分解值,分解结果见表2所列。能源强度、能源结构、碳排放强度、劳动生产率和行业规模是影响水泥行业碳排放的关键因素。由表2可知,不同时间段不同因素对CO₂排放量的影响具有差异性,其中能源强度和劳动生产率因素对CO₂排放量的影响较为显著。这意味着这2个因素在不同时间段对CO₂排放量的变化起着重要作用。因此,有效减少CO₂排放量,需要重点关注和优化能源强度和劳动生产率。能源强度、能源结构对碳排放表现为负效应,而碳排放强度、劳动生产率和行业规模因素对碳排放表现为正效应。能源强度的影响与劳动生产率的影响相反,可以从以下方面进行考虑,劳动生产率的提高和技术进步可以降低能源消耗和CO₂排放,从而减少碳排放强度。行业规模的控制和淘汰落后产能也对碳排放产生正面影响。

表2 2010—2021年安徽省水泥碳排放影响因子分解结果

单位:10⁴ t

年份	碳排放强度	能源强度	能源结构	劳动生产率	行业规模	CO ₂ 排放量
2010—2011	10.99	-17.69	-632.43	1 024.01	-112.95	271.94
2011—2012	1.71	-4.90	-311.32	-127.78	590.43	148.14
2012—2013	-0.40	2.42	-256.45	-34.34	418.54	129.76
2013—2014	2.89	-4.83	-100.85	77.00	186.62	160.84
2014—2015	2.40	-4.15	65.90	-77.39	-34.57	-47.82
2015—2016	11.44	-17.74	-238.55	351.80	-95.80	11.16
2016—2017	10.19	-15.43	-301.87	602.88	-241.14	54.62
2017—2018	28.15	-44.33	-545.14	508.39	-156.64	-209.57
2018—2019	25.83	-39.15	26.49	266.43	-68.67	210.94
2019—2020	19.91	-33.64	81.12	-87.45	107.28	87.22
2020—2021	45.41	-71.81	-429.40	448.30	98.84	91.34

工业增加值和能源强度的变化趋势如图2所示。从图2可以看出,在2010—2021年期间安徽省工业增加值增长2.6倍,而安徽省水泥行业能源强度一直在下降。在2011—2015年期间,劳动生产率对安徽省水泥行业的CO₂排放产生明显的负向影响,这表明,在这个时期,劳动生产率的提高主

要依赖于技术进步和淘汰落后产能。行业规模在2014—2019年对安徽省水泥行业的CO₂排放均产生了较为显著的负向影响,仅次于能源强度,说明这一时期安徽省开始控制水泥行业的发展,淘汰水泥行业中存在的落后产能,严格落实钢铁、水泥熟料、平板玻璃等行业产能置换政策。

然而,能源结构和碳排放强度对水泥行业碳排放的影响较小,由于水泥生产过程相对固定,难以改变能源消费结构和化石能源消费结构。因此减少水泥行业碳排放的关键在于提高劳动生产率、控制行业规模和淘汰落后产能。这些措施将有助于实现水泥行业的绿色低碳发展,推动我国早日实现碳达峰、碳中和的目标。

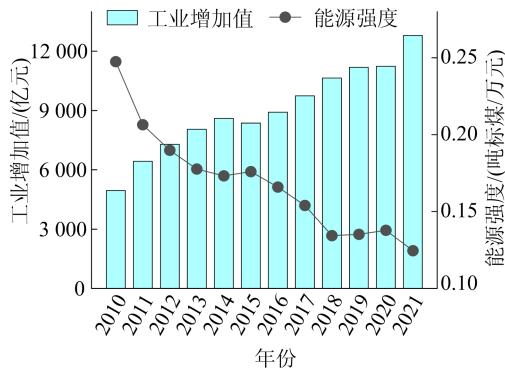


图 2 工业增加值及能源强度

2.3 STIRPAT 模型的岭回归拟合与验证

根据时间序列数据分析,发现变量之间存在严重的共线性。多重共线性会导致最小二乘回归后估计量方差扩大,影响模型的准确性。为了解决这个问题,本文选用岭回归法。

岭回归法是一种常用的数学建模算法,用于减少模型误差,是对最小二乘估计法的改良,在获得更符合实际情况结果的同时,会损失一部分信息。根据建立的 STIRPAT 扩展模型,将 $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$ 、 $\ln U$ 、 $\ln R$ 作为自变量, $\ln I$ 作为因变量,进行岭回归拟合。通过绘制岭迹图,可以更好地理解模型的变化情况,各变量趋于稳定时所对应的 K 值即为最佳值。

当 $K=0.015$ 时,各自变量回归系数变化趋于稳定。拟合得到的回归方程为:

$$\ln I = 34.448 - 3.315 \ln P + 0.274 \ln A + 0.140 \ln T + 0.689 \ln U + 0.098 \ln R - 0.009 \ln M \quad (12)$$

模型拟合结果如图 3 所示,将 2010—2021 年安徽省水泥行业 4 个因素的实际值代入式(12),得到研究期间的拟合值,通过对比研究期间的拟合值和实际碳排放量值,得到碳排放量实际值与预测值对比情况如图 4 所示。研究发现,拟合值与实际值之间的误差在合理范围内,都在 5% 以内。这表明所建立的方程具有较高的精确度,能够较好地反映水泥行业碳排放的趋势和大小

情况。

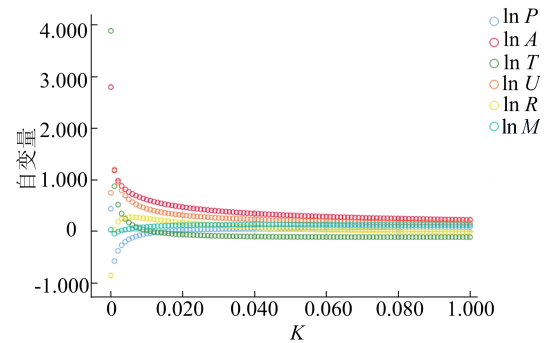


图 3 岭迹图

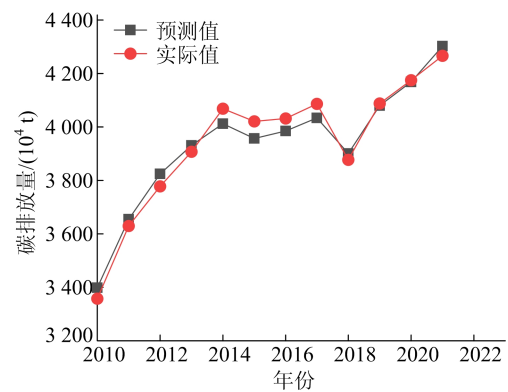


图 4 碳排放量实际值与预测值对比

2.4 情景分析及碳排放预测分析

为研究安徽地区水泥行业在“碳达峰”前景方面的情况,依据安徽省水泥行业碳排放驱动因素的历史数据变化趋势和相关的“十四五”规划进行分析^[22],采用式(12),对模型变量进行基准情景设置、低碳情景设置和强化低碳情景设置,在不同情景下,对 2021—2030 年安徽省水泥行业的影响要素分别设定变化,预测安徽水泥行业 2022—2030 年能源消费碳排放,拟探求水泥行业碳达峰年份及对应排放量。不同基本参数具体设置描述如下。

1) 人口规模。“十三五”规划期间,安徽的平均人口自然增长率为 0.32%;根据国务院发布的《国家人口发展规划》,预计我国人口将在 2030 年达到峰值,之后逐渐减少,但减少幅度较小。考虑到这些因素及安徽省的实际情况,本文假设基准情境下 2021—2025 年期间安徽省的平均人口自然增长率为 0.36%,2026—2030 年为 0.31%。

2) 人均工业增加值。基准情况下,“十四五”工业增加值取“十三五”规划期间平均值 5.80%;“十五五”期间增长率预估下降为 3.00%。

3) 能源强度。根据《安徽省工业领域碳达峰实施方案》,认为 2021—2025 年基准情景下能源强度下降 3.60%,2026—2030 年能源强度下降 3.00%。

4) 城镇化率。2020 年安徽常住人口城镇化率达到 58.33%,根据安徽省“十四五”规划,2021—2025 年安徽的城镇化率目标为 62%。基准情景下,2035 年设定城市化率将达到 70%,以此为基础反推 2021—2030 年各阶段城市化率的增长速度。

5) 产业结构。产业结构升级促进经济增长,第二产业的增长促进水泥产量。根据安徽省 2016—2020 年的数据,第二产业增加值在 GDP 中的贡献比例年均下降 1.6%,同时产业结构也

呈下降趋势。因此,设定在基准情景下,安徽省 2021—2025 年的第二产业占比年均下降 2.10%,而 2026—2030 年的第二产业占比年均减少 2.00%。

6) 熟料产量。安徽省是我国最大的水泥熟料生产省份之一。为应对环境保护的需求,安徽省严格执行钢铁、水泥熟料、平板玻璃等行业的产能置换政策,并坚决禁止任何违法违规的新增产能。设定基准情境下水泥熟料产量预计于 2025 年达峰,“十四五”时期以 1.50% 增长率小幅度增长,而后以年均 0.50% 的速率缓慢下降。

基于以上设定的基准情景模式下的各自变量数据,设定低碳、强化低碳情景模式下的各自变量数据,具体参数见表 3 所列。

表 3 不同情景情况下的基本参数设置

时期	情景类型	人口增长率	人均工业增加值增速	能源强度降低率	城镇化率增长率	产业结构变化率(第二产业占比)	熟料产量变化率
“十四五”	基准情景	0.36	5.80	-3.60	1.50	-2.10	1.50
	低碳情景	0.31	3.60	-4.50	1.70	-2.35	-1.00
	强化低碳情景	0.15	2.00	-4.90	1.70	-2.35	-1.00
“十五五”	基准情景	0.31	3.00	-3.00	1.30	-2.00	-0.50
	低碳情景	0.20	3.60	-4.20	1.42	-2.39	-1.40
	强化低碳情景	0.10	1.60	-4.70	1.42	-2.39	-1.40

结合 STIRPAT 模型拟合回归方程,预测不同发展模式下安徽省水泥行业碳排放趋势如图 5 所示。

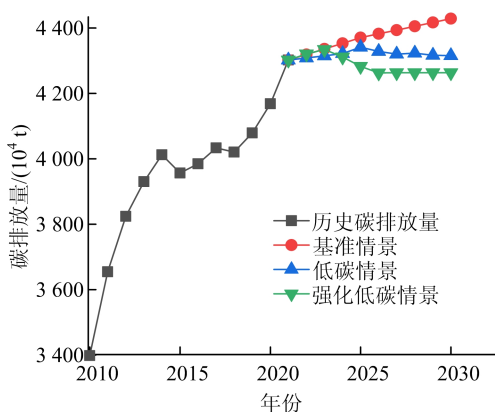


图 5 水泥行业碳排放预测趋势图

由图 5 可知:在基准情景下,2021—2030 年安徽省水泥行业的碳排放量呈持续上升的趋势,未能实现碳达峰的目标;预计到 2030 年,安徽省水泥行业的碳排放量将达到 $4\,429.25 \times 10^4$ t,较 2020 年增加了 127.28×10^4 t;相比之下,低碳情景下安徽省水泥行业的碳达峰时间为 2025 年,峰

值为 $4\,341.80 \times 10^4$ t,且将持续一段时间;而强化低碳情景下,安徽省水泥行业的碳达峰时间将提前至 2023 年,且峰值为 $4\,334.38 \times 10^4$ t。综合对 3 种情景进行比较分析,发现在基准情景下,由于没有限制条件,碳达峰时间更长。相比之下,低碳情景和强化低碳情景采取了更为严格的减排措施,因此碳达峰时间更早,碳排放峰值也更低。在实际应用中,应该采取更加积极的措施,加强碳排放的限制和减少措施,以实现可持续发展。

3 结 论

1) 安徽省水泥行业碳排放量总体呈上升趋势,单位水泥 CO_2 排放量逐年下降,但煤炭仍是安徽省水泥行业的主要能源。这表明安徽省未来应重点关注减少煤炭使用,推动可再生能源和清洁能源的应用。

2) 对行业历史碳排放进行分析,能源强度、劳动生产率和行业规模是碳排放的主要影响因素,由于水泥生产过程相对固定,难以改变能源消费结构和化石能源消费结构,能源结构和碳排放强度的影响不大。因此,安徽省应加大对技术研

发和创新的投入,提高生产效率和技术创新来降低碳排放强度,从而实现减排目标。

3) 通过 STIRPAT 模型和情景分析预测碳达峰时间,基准情景将不能在 2030 年前达峰,低碳情景会提前于基准情景达峰于 2025 年达峰,峰值为 $4\ 341.80 \times 10^4$ t;强化低碳情景将在 2023 年达峰,2030 年碳排放下降到 $4\ 263.80 \times 10^4$ t。这表明通过积极的减排措施安徽省水泥行业可以提前实现碳达峰目标。

为实现安徽省水泥行业 CO₂ 的减排和低碳发展,本文提出以下建议:安徽省应将经济低碳发展作为重要战略目标,平衡经济增长与节能减排的关系;在工业化和城镇化进程中,应考虑节能减排政策要求,对大气污染重点区域和水泥碳排放较大的地区积极实施行业碳排放减量控制试点;完善产业政策,提升减排技术;加快行业技术的发展速度,提高水泥熟料落后产能和过剩产能的淘汰标准,降低能源消耗和 CO₂ 排放量;提升水泥产业的集中度,发挥大型骨干企业的示范引领作用,加强安徽省的创新能力和促进具有优势技术领域的发展。

[参 考 文 献]

- [1] BENHELAL E, SHAMSAEI E, RASHID M I. Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: a review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 84-101.
- [2] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等. 中国水泥行业二氧化碳碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 347-355.
- [3] US Geological Survey. Mineral commodity summaries[EB/OL]. (2021-02-04)[2021-09-08]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.
- [4] 杨楠,李艳霞,赵盟,等. 水泥熟料生产企业 CO₂ 直接排放核算模型的建立[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(1): 79-87.
- [5] XU J H, FLEITER T, EICHHAMMER W, et al. Energy consumption and CO₂ emissions in China's cement industry: a perspective from LMDI decomposition analysis[J]. *Energy Policy*, 2012, 50: 821-832.
- [6] 孙挺. 水泥行业碳排放核算及低碳发展路径研究[J]. *中国水泥*, 2022(3): 80-83.
- [7] MOUTINHO V, MOREIRA A C, SILVA P M. The driving forces of change in energy-related CO₂ emissions in Eastern, Western, Northern and Southern Europe: the LMDI approach to decomposition analysis[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1485-1499.
- [8] LIU D, XIAO B. Can China achieve its carbon emission peaking: a scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 647-657.
- [9] YUE T, LONG R Y, CHEN H, et al. The optimal CO₂ emissions reduction path in Jiangsu province: an expanded IPAT approach[J]. *Applied Energy*, 2013, 112: 1510-1517.
- [10] XIONG G B, DENG J H, DING B G. Characteristics, decoupling effect, and driving factors of regional tourism's carbon emissions in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(31): 47094.
- [11] 杨钊,曹广喜. 江苏省碳排放影响因素及脱钩弹性研究: 基于 LMDI 和 Tapio 脱钩模型视角[J]. *江西理工大学学报*, 2022, 43(3): 72-78.
- [12] TIAN J J, SONG X Q, ZHANG J S. Prediction on carbon emissions peak for typical coal-rich regions in western China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2022, 31(1): 469-479.
- [13] 潘崇超,王博文,侯孝旺,等. 基于 LMDI-STIRPAT 模型的中国钢铁行业碳达峰路径研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(6): 1034-1044.
- [14] 毛紫薇,王灿,陈吉宁. 山东省水泥行业 CO₂ 排放情景与减排效果分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 1107-1114.
- [15] 伍晨. 安徽省火电行业碳排放影响因素及达峰预测研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2022.
- [16] 刘茂辉,翟华欣,刘胜楠,等. 基于 LMDI 方法和 STIRPAT 模型的天津市碳排放量对比分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 63-70.
- [17] ANG B W, LIU N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach-ScienceDirect[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 238-246.
- [18] JIANG S, ZHU Y, HE G, et al. Factors influencing China's non-residential power consumption: estimation using the Kaya-LMDI methods[J]. *Energy*, 2020, 201: 117719.
- [19] 姚明秀,王森薇,雷一东. 基于 STIRPAT 模型的上海市碳达峰预测研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2023, 62(2): 226-237.
- [20] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴(2010—2021)[M]. 北京:中国统计出版社, 2021.
- [21] 陈奕琼. 基于 STIRPAT 模型的江苏省碳排放峰值预测[D]. 南京:南京林业大学, 2017.
- [22] 邹秀清,孙学成,葛天越,等. 长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(3): 548-557.

(责任编辑 吴亮)