



移动扫码阅读

洪竞科, 杜薇, 邵金, 等. 基于套索算法和灰色模型的浙江省碳排放量分析与预测[J]. 能源环境保护, 2024, 38(3): 152-161.

HONG Jingke, DU Wei, SHAO Jin, et al. Carbon emission forecasting in Zhejiang Province based on LASSO algorithm and grey model[J]. Energy Environmental Protection, 2024, 38(3): 152-161.

基于套索算法和灰色模型的浙江省碳排放量分析与预测

洪竞科¹, 杜薇¹, 邵金^{1,*}, 劳慧敏²

(1. 重庆大学管理科学与房地产学院, 重庆 400044; 2. 浙江省科技信息研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 在我国“碳达峰、碳中和”的绿色低碳发展背景下,对碳排放量的周期性分析与准确预测具有重要的现实意义。以浙江省碳排放量为研究对象,引入变分模态分解方法提取多尺度信息,将套索算法(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, LASSO)和灰色模型 GM(1, N)相结合,对浙江省的碳排放量进行深入分析和预测。首先,使用变分模态分解方法对浙江省碳排放量进行数据分解,分析其历史波动的周期性。其次,利用套索算法对影响碳排放的关键因素进行有效筛选,降低数据维度,提取主要特征。最后,结合“十四五”规划与实际发展路径,假设了常态、低碳、惯性发展情景,并采用 GM(1, N)模型对浙江省 2020—2030 年碳排放量进行预测,克服了传统预测方法在处理非线性、小样本数据时的局限性,预测结果更加稳健。结果表明浙江省的碳排放量的主导因素包括第三产业占 GDP 的比重、私人汽车拥有量、全省固定资产投资、电力消费总量、研发强度、技术市场成交额 6 个指标。预计到 2030 年,仅低碳发展情景下的碳排放量达到峰值,为 400.28 Mt,而常态发展情景的碳排放量为 474.23 Mt,惯性发展情景为 568.77 Mt,且常态发展情景和惯性发展情景下的碳达峰量在 2030 年后仍会有所增长。因此,建议浙江省继续优化产业结构、提升能源效率、增加低碳研发投入,稳扎稳打推进“碳达峰”目标。

关键词: 碳排放量; 套索算法; GM(1, N); 预测

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2024)03-0152-10

Carbon emission forecasting in Zhejiang Province based on LASSO algorithm and grey model

HONG Jingke¹, DU Wei¹, SHAO Jin^{1,*}, LAO Huimin²

(1. School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Science and Technology Information of Zhejiang Province, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Under the green and low-carbon development goal of achieving "carbon peaking and carbon neutrality" in China, cyclical analysis and accurate prediction of carbon emissions are of great importance. This paper investigates carbon emissions in Zhejiang Province. First, the variable mode decomposition method is used to decompose the historical data of carbon emissions in Zhejiang Province, enabling an analysis of its cyclicity fluctuations. Second, the LASSO algorithm is employed to identify the key influencing factors of carbon emissions. Finally, considering the 14th Five-Year Plan and the province's development trajectory, three development scenarios (normal, low-carbon, and inertia) are assumed, and the GM(1, N) model is used to predict the carbon emissions in Zhejiang Province from

收稿日期: 2023-11-14

修回日期: 2023-12-22

DOI: 10.20078/j.eep.20240101

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03146); 国际合作重点资助项目(T2261129477); 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关资助项目(21JZD029); 浙江省重点软科学研究资助项目(2023C25059)

作者简介: 洪竞科(1986—), 男, 四川成都人, 教授, 主要研究方向为城市可持续发展。E-mail: hongjingke@cqu.edu.cn

通讯作者: 邵金(1996—), 男, 安徽池州人, 博士研究生, 主要研究方向为智能预测。E-mail: shaojin@stu.cqu.edu.cn

2020 to 2030. The analysis reveals that the dominant factors affecting carbon emissions in Zhejiang Province are the proportion of the third industry in GDP, the number of private cars, the total fixed asset investment in the province, the total electricity consumption, R&D intensity, and technology market turnover. Under the low-carbon scenario, carbon emissions are projected to peak at 400.28 Mt in 2030. In contrast, under the normal scenario, carbon emissions are estimated to reach 474.23 Mt, while the inertia development scenario predicts carbon emissions of 568.77 Mt. Furthermore, carbon emissions are expected to continue rising beyond 2030 in the normal and inertia development scenarios. In light of these findings, It is recommended that Zhejiang Province should focus on optimizing its industrial structure, improving energy efficiency, increasing investment in low-carbon research and development, and steadily advancing the goal of "carbon peaking".

Keywords: Carbon emissions; Lasso algorithm; GM (1, N); Forecasting

0 引 言

工业革命以来,煤、石油、天然气等化石燃料的大量采用使得二氧化碳、甲烷等温室气体的排放量不断增加,地球大气温度升高,温室效应随之增强,导致全球气候变暖、冰川消融等一系列全球性生态问题,引起国际社会的广泛关注。2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布“中国将提高国家自主贡献程度,采取更加有力的政策和措施,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”^[1]。毋庸置疑,无论是生态文明建设还是经济社会可持续发展的需要,我国已经进入了以减碳为战略抓手的新发展时期。

2020年,习近平总书记在浙江考察时赋予了浙江省“努力成为新时代全面展示中国特色社会主义制度优越性的重要窗口”的新目标新定位,并强调“生态文明建设要先行示范”^[2]。为响应国家政策,积极推进“碳达峰、碳中和”,浙江省制定了“到2030年,经济社会发展全面绿色转型取得显著成效,二氧化碳排放达到峰值后稳中有降”的阶段性任务^[3]。因此,探析浙江省碳排放的影响因素及其演变特征,并对其碳达峰峰值和时间点进行科学预测,不仅是对现存碳排放研究的方法拓展,也为推进浙江省绿色低碳发展提供科学证据。

在碳排放峰值预测方面,王勇等^[4]利用STIRPAT模型和岭回归方法在不同发展情景下预测中国工业及其细分行业的碳达峰峰值和年份,同时基于公平和效率视角评估细分行业的减排潜力并给出相关建议;芦颖等^[5]采用IPCC碳核算方法对贵州省2000—2015年能源碳排放量进行测算,基于STIRPAT的岭回归拟合模型分析出贵州省能

源碳达峰的最早时间为2033年;朱宇恩等^[6]通过构建优化的IPAT模型研究了2015—2040年山西省能源碳排放量及达峰年份;洪竞科等^[7]通过构建RICE-LEAP新型综合评估模型,完成了对中国2020—2050年碳达峰路径的研究预测工作;王会芝^[8]以天津市为研究对象,采用LEAP模型对城市交通的能源消费和碳排放量进行预测;杜涵蓓等^[9]结合Kaya和LEAP两种模型预测了南京市某市辖区能源消费碳排放峰值及达峰时间;PU等^[10]将传统线性灰色模型GM(1,1)和BP神经网络算法相结合完成了对我国2020—2060年建筑业能源消耗量和碳排放量的预测工作;黄锐^[11]基于某市2020年的碳排放目标,利用GM(1,N)模型研究出该市7类土地分别应规划控制的用地面积;MA等^[12]基于关联规则算法和优化的GM(1,N)模型分析预测了全国层面及我国东部、中部、西部局部地区的碳排放。以上研究大多使用STIRPAT模型、岭回归法、IPAT模型、LAEP模型、Kaya恒等式、BP神经网络、灰色预测模型等,并结合情景分析法进行碳达峰分析与预测。在上述方法中,不难发现灰色模型在碳排放预测领域出现频率较高,一是因为灰色模型对数据长度没有严格要求,模型构建成本低,能提供相对稳定的预测性能;二是因为我国碳排放量公开数据以年为单位,数据量较小,不适合使用神经网络/深度学习模型。鉴于上述分析,本文使用灰色模型对浙江省碳排放进行预测。

在碳排放影响因素研究中,马金玲等^[13]基于主成分分析法对广东省城市客运交通碳排放量进行研究,发现前三个影响碳排放的因素为经济水平、城市交通规模及运输能力;刘莉娜等^[14]首先使用因子分析法去除影响中国农村家庭人均二氧

化碳排放量的不显著因素,继而基于灰色关联度法分析出农林牧渔总产值因子是影响我国农村家庭人均碳排放量的重要因素;HUANG等^[15]结合灰色关联度法和主成分分析法研究中国碳排放量的影响因素,最终筛选出4个主要因子并输入LSTM预测模型进行分析;叶晓佳等^[16]通过LMDI分解模型分析影响浙江省碳排放的因素情况,研究表明1995—2008年间对浙江省碳排放量产生正向驱动作用的因素是经济发展和人口规模,产生负向作用的是能源强度和结构调整;李汉东等^[17]使用组合神经网络模型,从人口因素探究并预测了国家层面碳排放强度的变化趋势,表明了人口数量变动与碳排放的相关关系;郭文军^[18]采用自适应套索算法探析影响我国区域碳价的主要因素;RAO等^[19]在2020年的研究中通过建立LARS-LASSO模型对武汉市环境污染指标中影响经济增长的因素进行了分析。上述影响因素筛选的研究大多聚焦于主成分分析法^[20]、灰色关联度法^[21]、LMDI分解法、套索算法等。主成分分析法只能从自变量的角度对影响因素进行筛选,忽略了因变量的变化;灰色关联度法和LMDI分解法在变量的选择上存在一定的主观性。换言之,上述方法可以实现对碳排放影响因素的筛选,但筛选出的变量往往预测能力较弱,而套索算法能够识别影响程度较低的影响因素并压缩其系数为0,相比前三种方法具有更加卓越的变量筛选能力。

本文以浙江省为研究对象,利用套索算法和灰色模型,同时结合情景分析法对浙江省碳排放量进行分析与预测。主要工作可分为3个部分:1)对1997—2019年浙江省碳排放数据特征进行分析,挖掘碳排放波动的周期性与复杂性,进一步分析内在波动规律;2)广泛收集碳排放影响因素,通过套索算法筛选出关键影响因素;3)利用情景分析法,假设常态发展、低碳发展、惯性发展3种情景,设置不同情境下碳排放影响因素的增长趋势,将历史碳排放量及筛选后的碳排放关键影响因素作为输入训练灰色模型,在3种假设情景下使用GM(1, N)模型进行预测,预测2020—2030年浙江省碳排放量。

2 算法介绍

2.1 变分模态分解(VMD)

变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)是一种自适应的模态分解方法^[22],基

于经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[23]中的本征模态函数的概念对信号进行自适应分析并提取出不同本征模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)。由于VMD可以手动设置分解子序列的个数,被广泛应用于数据特征分析、故障诊断、预测等领域。在对信号进行VMD分析之前,需要确定VMD的参数,即需要事先确定模式数和惩罚因子。该方法的变分约束问题如下:

$$\min_{\{u_k\}, \{w_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_k u_k = f \quad (I)$$

其中, k 为手动设置的模态个数, t 为信号第 t 元素, ∂_t 为对 t 求偏导, $\sigma(t)$ 为狄拉克分布函数, j 为虚数, $*$ 为卷积变换, $e^{-jw_k t}$ 为 u_k 的中心频率 w_k 对应的指数项, $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 是模态分解的各个分量, $\{w_k\} = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 是每个模态的中心频率, f 为输入的原始序列。

2.2 套索算法(LASSO)

套索算法的概念最早由统计学家ROBERT TIBSHIRANI提出^[24],是一种处理具有复共线性数据的有偏估计,它是在线性回归的基础上L1正则化后得到的新模型,加入的正则项起到了防止模型过拟合的作用,假设 $y^{(i)}$ 为第 i 期的因变量, $h(x^{(i)}) = \theta_i x^{(i)}$ 为第 i 期的自变量,其中 θ_i 为第 i 期的回归系数,公式如下:

$$\min \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 + \lambda \sum_{j=1}^n |\theta_j| \quad (II)$$

其中, m 为样本个数, n 为参数个数, $\lambda \sum_{j=1}^n |\theta_j|$ 即L1正则化。

LASSO算法通过构造一个惩罚函数来对模型的回归系数进行压缩估计,强制系数的绝对值之和小于某个固定值,在此过程中,部分变量的回归系数会变为0,从而筛选出部分关键特征,达到精简特征库的目的。

2.3 灰色模型——GM(1, N)

灰色理论是1982年由邓聚龙教授提出^[25]。灰色模型是将随机无规律的原始数据经过累加生成较有规律的生成数据列,再根据生成数据列建立白色化形式的微分方程,对其进行求解。考虑到大多碳排放研究使用的是GM(1, 1)模型,仅以预测目标作为输入,预测能力受限。为了提升预测准确率,本文使用GM(1, N)模型^[26],将碳排放

的影响因素也纳入预测建模中,从而实现多输入单输出目标。该模型是由 N 个变量组成的一阶线性动态模型,本质上反映的是 $N-1$ 个变量对原始序列的一阶导数的影响,综合反映原始序列和子序列的一系列动态变化规律。假设 $X_1^{(0)} = (x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n))$ 为特征序列, $X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_N^{(0)}$ 为相关因素序列,其中 $X_i^{(1)}$ 为 $X_i^{(0)}$ 的一次累加(1-Accumulating Generation Operational, 1-AGO)序列, $Z_1^{(1)} = \{z_1^{(1)}(1), z_1^{(1)}(2), \dots, z_1^{(1)}(n)\}$ 为 $X_1^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列,构建 GM(1, N) 模型,具体公式如下:

$$x_i^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (III)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_N^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_N^{(1)}(3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \dots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (IV)$$

其中, $x_i^{(0)}(k)$ 为 $X_i^{(0)}$ 序列的第 k 期值, $-a$ 为系统发展系数, $b_i x_i^{(1)}(k)$ 为驱动项, b_i 为驱动系数, $a = [a, b_2, \dots, b_N]^T$ 为参数列。

3 浙江省碳排放影响因素分析

3.1 数据来源

本文收集了 1997—2019 年浙江省碳排放量(X1)作为研究变量,数据来源于 CEAD 中国碳核算数据库,如图 1 所示。此外,本文基于现有学者的相关研究^[27-33],采用文献分析的方式对碳排放影响因素进行整理,结合浙江省“碳达峰、碳中和”相关政策内容,从经济因素、社会因素、能源因素、

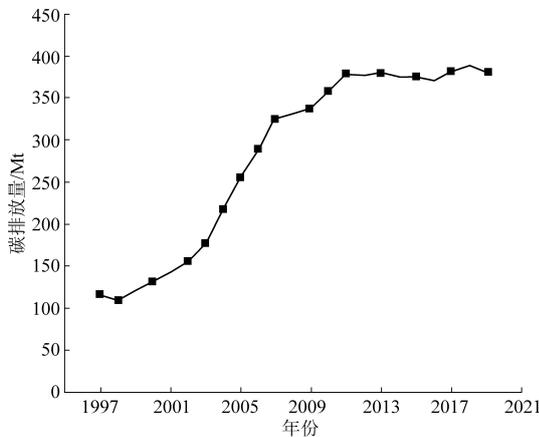


图 1 1997—2019 年浙江省碳排放量

Fig. 1 Carbon emissions in Zhejiang Province from 1997 to 2019

技术因素 4 个维度总结归纳了 15 个主要指标(X2~X16)以构建浙江省碳排放影响因素指标体系,指标数据来源参照浙江省统计局,具体见表 1。

3.2 碳排放的数据特征分析

为了更好地分析碳排放量历史波动规律与特征,引入了信号分解领域的 VMD 方法对历史碳排放量数据分解进一步分析,分解结果如图 2 所示。VMD 具体参数设置如下:K 值设置为 5, alpha 设置为 2 000, tau = 0, DC = 0, init = 1, tol = 10⁻⁷。

表 1 碳排放量影响因素指标体系

Table 1 Index system of influencing factors of carbon emissions

指标类别	编号	变量名	单位
经济因素	X2	人均 GDP	元
	X3	GDP	亿元
	X4	第二产业占 GDP 比重	%
	X5	第三产业占 GDP 比重	%
	X6	工业增加值占 GDP 比重	%
	社会因素	X7	总人口
X8		城市化率	%
X9		私人汽车拥有量	万辆
X10		全省固定资产投资	亿元
能源因素	X11	能源强度	Mt 标准煤/亿元 (GDP 能耗)
	X12	能源消费总量	Mt 标准煤
	X13	煤炭消费占比	%
	X14	电力消费总量	亿千瓦时
技术因素	X15	研发强度	%(R&D 经费占 GDP 比重)
	X16	技术市场成交额	亿元

从图 2 可知,浙江省碳排放量数据通过分解以后得到 5 个分量,其中 IMF1~IMF4 为模态分量,RES 为残差,每个分量对应不同的数据内在特征。具体而言,IMF1 与 IMF2 为长期趋势项,IMF3 呈现了周期波动特征,IMF4 与 RES 为短期波动项,呈现了随机波动特征。从长期趋势项来看,由于我国经济发展仍处于增长期,我国对能源的需求仍将保持刚性增长,若不加以关注,随着经济的惯性发展,碳排放量将持续保持增长状态,如图中 IMF2 所示;从周期性特征来看,1997 年以来,浙江省碳排放量虽然总体上一直处于增长状态,但从频域角度来看其中存在约 5 年的周期性,每 5 年会达到一个新的周期,如图中 IMF3 所示,具体周期性特征将通过自相关图的方式来分析;从短期

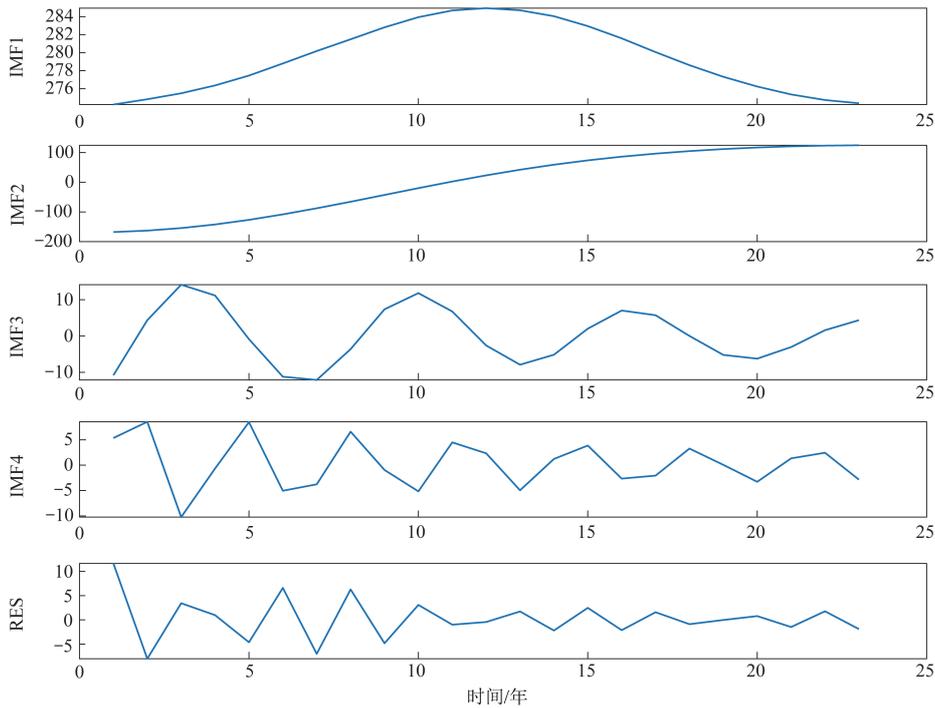


图2 浙江省碳排放数据分解结果

Fig. 2 Decomposition results of carbon emission data in Zhejiang Province

波动项来看,碳排放的随机波动趋势整体来说不强,如 IMF4 和 RES 所示,这表明可以通过相应的政策来促进碳排放量的降低。

时间序列往往体现了变量的历史波动,若其本质特征仍能延续到未来,则称时间序列具有平稳性。平稳性也是推测经济系统在未来出现起伏走势的重要因素之一。为检验分解的模式数据是否平稳,对各分量进行单位根检验。原假设为数据是平稳的,若拒绝原假设则表示该列数据不平稳。表2展示了该5个分量的检验值及其P值,通过表2可看出 IMF1 和 IMF2 是不平稳序列,IMF3、IMF4 和 RES 是平稳序列。

表2 各分量的平稳性检验

Table 2 Stationarity test of each component

分解分量	t 统计量	P 值	是否拒绝原假设	结论
IMF1	0.019 1	0.646 8	0	不平稳
IMF2	-1.218 0	0.196 5	0	不平稳
IMF3	-2.765 0	0.008 3	1	平稳
IMF4	-6.206 3	0.000 0	1	平稳
RES	-21.384 5	0.000 0	1	平稳

时间序列中的周期性表现可能非常复杂,以天、周、年单位为周期交织存在于经济系统中。不同于常见的趋势分解方法直接提取出时间序列的趋势、周期、残差部分,而是需要对 VMD 自适应分

解出的多个模式进行深入分析。本文对分解后的各个模式使用自相关的方法提取出各分量的内在周期性。自相关(Autocorrelation)是一个信号与其自身在不同时间点的相关度,可以理解为2次观察值之间的相似度对它们之间时间差的函数,具体如图3所示。IMF3的周期性最长,大多大于5年;IMF4的周期通常在3~4年;RES的周期性最短,基本在2~3年。

3.3 关键影响因素筛选

为了从多维度指标中有效筛选出影响浙江省碳排放量的因素,本文采用LASSO算法进行特征选择。主要步骤如下:数据归一化,确定Lambda值,特征选择。首先,由于数据之间差异较大,为了保证实验的精确性,将数据归一化到(0,1)区间内;其次,使用五折交叉验证方法确定Lambda,选择均方误差(Mean Squared Error, MSE)作为最佳参数指标,稀疏系数确定MSE最小值,如图4所示,绿色直线代表MSE最小值,根据绿色直线最终确定Lambda值为0.154 11;最后,将Lambda值输入到LASSO模型中,选择影响碳排放的关键特征。

通过LASSO算法从15个影响因素筛选出6个显著变量,分别为第三产业占GDP的比重(X3)、私人汽车拥有量(X7)、全省固定资产投资(X8)、电力消费总量(X11)、研发强度(X12)、技术市场成交额(X13)。

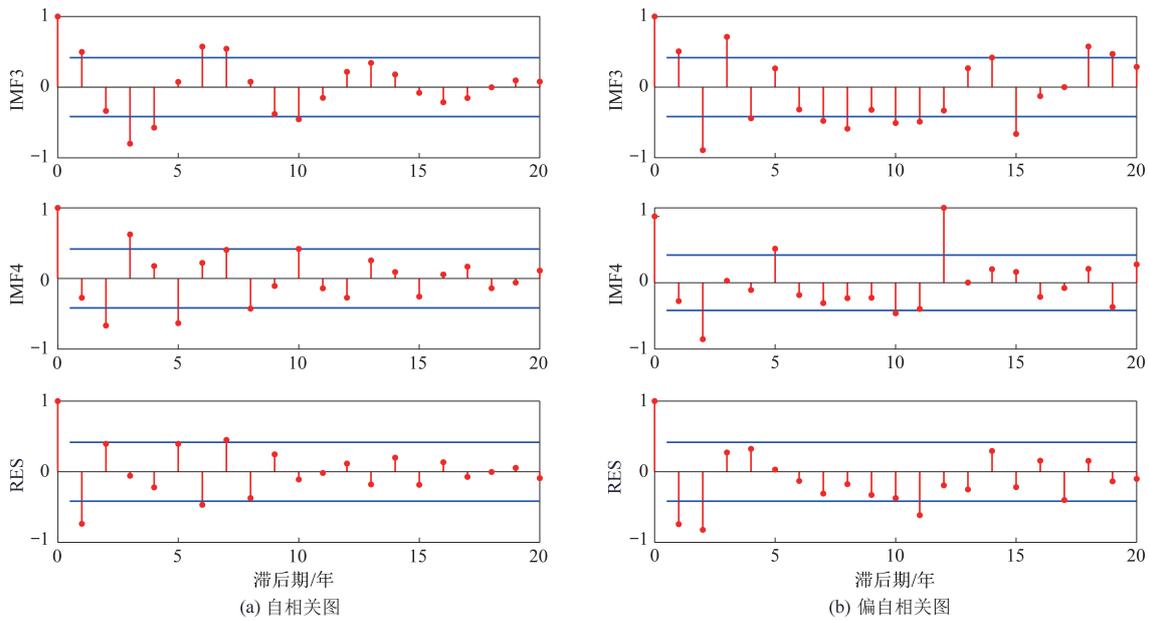


图3 自相关图与偏相关图

Fig. 3 Autocorrelation plots and partial correlation plots

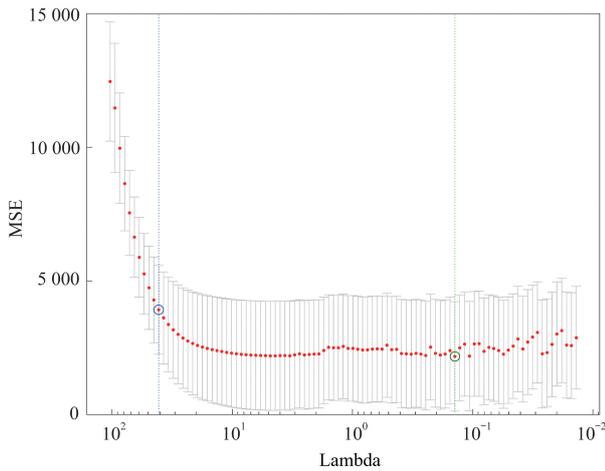


图4 五折交叉验证

Fig. 4 Five-fold cross verification

4 情景假设与预测

4.1 情景假设

情景模拟是一种预测碳排放量趋势的常用方法。为探讨不同政策和发展模式对浙江省未来二氧化碳排放量的影响,本文依据《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》及浙江省“十四五”规划,以《国家创新驱动发展战略纲要》和《2050年世界与中国能源展望(2020版)》为补充,设置了惯性发展、常态发展、低碳发展3种情景。以此为依据,同时参考各指标的历史变化值,设置了相关参数的增长率,见表3。

表3 不同情景下各指标的增速

Table 3 Growth rate of each indicator under different scenarios

情景	指标	2020—2025	2026—2030
惯性发展情景	第三产业占 GDP 的比重(X3)	1.0	1.5
	私人汽车拥有量(X7)	2.5	2.5
	全省固定资产投资(X8)	7.0	4.0
	电力消费总量(X11)	2.2	1.8
	研发强度(X12)	2.0	2.2
	技术市场成交额(X13)	4.0	6.0
常态发展情景	第三产业占 GDP 的比重(X3)	2.0	2.3
	私人汽车拥有量(X7)	2.5	2.0
	全省固定资产投资(X8)	6.5	3.5
	电力消费总量(X11)	2.0	1.5
	研发强度(X12)	2.3	2.5
	技术市场成交额(X13)	2.0	4.0
低碳发展情景	第三产业占 GDP 的比重(X3)	2.5	3.0
	私人汽车拥有量(X7)	1.5	1.0
	全省固定资产投资(X8)	6.0	3.0
	电力消费总量(X11)	1.5	1.0
	研发强度(X12)	2.6	2.8
	技术市场成交额(X13)	3.0	5.0

惯性发展情景:该情景是假设在浙江省实现既定社会发展目标的前提下,虽然关注碳排放问题,但没有采取更多有针对性的减排措施。

常态发展情景:该情景是假设浙江省在保持中高速经济发展速度和发展模式的情况下,依据

浙江省碳达峰碳中和“十四五”规划,积极采取节能减排措施,推进能源结构调整和产业转型升级。

低碳发展情景:该情景是假设以新常态化情景为基础,考虑《中美气候变化联合声明》《巴黎协定》作出的承诺,以提前实现浙江省碳达峰碳中和为目标,浙江省将降低经济发展速度,将增长速度调整为中速率,同时制定更加严格的碳排放标准和政策,采取更加积极的节能减排措施。

4.2 情景预测

根据表3设计的碳排放影响因素的增速参数,计算得到3种情景模式下浙江省2020—

2030年第三产业占GDP的比重、私人汽车拥有量、全省固定资产投资、电力消费总量、研发强度和技术市场成交额的具体数据。以浙江省1997—2019年碳排放数据输入到GM(1, N)模型进行训练,运用训练好的模型对浙江省未来的能源消费碳排放量进行预测,得到结果如表4和图5所示。

通过表4和图5可以发现,在常态发展情景下,浙江省的碳排放量以较弱的增长率保持增加,预计在2030年左右能够达到碳达峰的目标,以5年周期性特征为依据,可估计出在2030年以后

表4 不同情景下的碳排放量预测结果及各指标具体状况

Table 4 Carbon emission forecasts under different scenarios and the specific status of each indicator

情景	年份	指标						碳排放量(X1)/Mt
		X3	X7	X8	X11	X12	X13	
惯性发展情景	2020	55.10	1495.69	0.39	4809.74	2.73	923.53	386.91
	2021	55.65	1533.08	0.42	4915.55	2.79	960.47	385.59
	2022	56.21	1571.41	0.45	5023.69	2.84	998.89	384.26
	2023	56.77	1610.69	0.48	5134.21	2.90	1038.84	383.35
	2024	57.34	1650.96	0.51	5247.17	2.96	1080.40	383.72
	2025	57.91	1692.24	0.55	5362.60	3.02	1123.61	387.18
	2026	58.78	1734.54	0.57	5459.13	3.08	1191.03	396.94
	2027	59.66	1777.91	0.60	5557.40	3.15	1262.49	418.15
	2028	60.56	1822.35	0.62	5657.43	3.22	1338.24	456.63
	2029	61.46	1867.91	0.64	5759.26	3.29	1418.54	512.61
2030	62.39	1914.61	0.67	5862.93	3.37	1503.65	568.77	
常态发展情景	2020	55.65	1495.69	0.39	4 800.32	2.74	905.77	389.04
	2021	56.76	1533.08	0.42	4 896.33	2.80	923.88	396.82
	2022	57.89	1571.41	0.44	4 994.26	2.87	942.36	404.75
	2023	59.05	1610.70	0.47	5 094.14	2.94	961.21	412.85
	2024	60.23	1650.96	0.50	5 196.03	3.00	980.43	421.10
	2025	61.62	1683.98	0.54	5 325.93	3.08	1019.65	429.53
	2026	63.04	1717.66	0.55	5 459.07	3.15	1060.44	438.12
	2027	64.48	1752.01	0.57	5 595.55	3.23	1102.85	446.88
	2028	65.97	1787.06	0.59	5 735.44	3.31	1146.97	455.82
	2029	67.49	1822.80	0.61	5 878.83	3.40	1192.85	464.93
2030	69.04	1859.25	0.64	6 025.80	3.48	1240.56	474.23	
低碳发展情景	2020	55.92	1481.10	0.39	4 776.79	2.75	914.65	396.72
	2021	57.32	1503.32	0.41	4 848.44	2.82	942.09	397.53
	2022	58.75	1525.86	0.44	4 921.17	2.89	970.35	398.17
	2023	60.22	1548.75	0.46	4 994.99	2.96	999.46	398.68
	2024	61.72	1571.98	0.49	5 069.91	3.03	1029.44	399.09
	2025	63.57	1587.70	0.52	5 145.96	3.11	1060.33	399.41
	2026	65.48	1603.58	0.54	5 197.42	3.20	1113.34	399.67
	2027	67.45	1619.62	0.55	5 249.40	3.28	1169.01	399.88
	2028	69.47	1635.81	0.57	5 301.89	3.38	1227.46	400.04
	2029	71.55	1652.17	0.59	5 354.91	3.47	1288.84	400.17
2030	73.70	1668.69	0.60	5 408.46	3.57	1353.28	400.28	

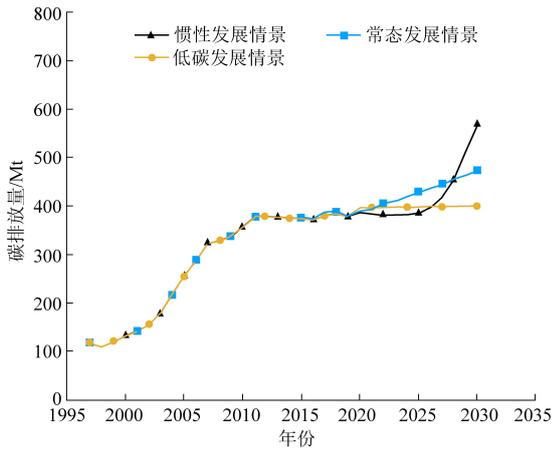


图5 三种情景下碳排放量走势

Fig. 5 Carbon emission trends under the three scenarios

常态发展情景下的碳排放量增长率会逐步下降;在低碳发展情景模式下,浙江省未来碳排放量均呈现微弱的增长趋势,即碳排放量先以逐年降低的增长率缓慢上升,到2030年基本能够达到峰值,经过一段时间的平时期转而逐年下降;在惯性发展模式下,以经济发展为目标而忽视可持续低碳,浙江省碳排放量将呈持续增长的趋势,碳达峰的目标难以达到,且在2030年碳排放量并未表现出下降趋势,仍然处于逐年上升期。

此外,相较于惯性发展情景,低碳发展情景下碳达峰时间提前了6年,且峰值降低了约168 Mt;相较于常态发展情景,到2030年低碳发展情景的碳排放减少了约74 Mt,且通过周期性分析可以发现低碳发展情景领先了常态发展情景。比较3种情景模式,仅低碳发展情景达到了“2030年前实现碳达峰”的目标,说明低碳发展战略对实现“双碳”目标具有促进作用。

5 结 论

在我国低碳发展的新型格局下,以浙江省碳排放量为研究对象,基于数据分解技术对碳排放历史波动进行分析,基于套索算法和灰色模型对碳排放影响因素进行分析与预测。首先,通过提取碳排放多尺度特征分析了浙江省1997—2019年碳排放数据内在波动规律,挖掘其内在周期性;其次,通过收缩方法将关键因素与碳排放进行回归,得到6个关键影响因素;最后,在设定的常态发展、低碳发展、惯性发展3种情景下,采用GM(1, N)模型对浙江省2020—2030年碳排放量进行预测。

结果表明,惯性发展、常态发展、低碳发展情

景下的峰值分别为568.77、474.23、400.28 Mt。低碳发展情景模式下,浙江省碳排放增长率逐年降低,碳排放量先上升后下降,预测2030年基本能够实现碳达峰的目标;常态发展情景下,浙江省2030年后碳排放量仍缓慢上升;惯性发展情景下,碳排放量在2030年呈现持续上升的趋势,预测难以在2030年达到峰值。综上,本文预测浙江省在低碳情景下能够完成2030年前碳达峰的目标,同时依据浙江省碳排放的5年周期性特征,低碳情景下浙江省碳达峰时间相比惯性发展情景提前了6年。

因此,为促进浙江省早日实现碳达峰目标,提出如下建议:1)充分协调经济发展、能源消耗、居民生活和经济社会低碳转型的关系。浙江省目前仍然处于经济发展的高峰期,碳排放呈上升趋势,而浙江省碳达峰路径受到多因素的共同影响。因此,浙江省应对经济、社会、能源、技术等多方面进行优化改革,共同促进浙江经济体系的高质量低碳发展。2)强化政策导向作用,完善加强保障措施。在我国碳达峰碳中和“1+N”政策的指引下,浙江省应贯彻落实“能源、工业、建筑、交通、农业、居民生活”6大重点领域碳达峰实施方案,加快完善双碳相关保障支撑文件及地方法律法规,通过政策的规划引领作用推动浙江省各重点领域、重点区域碳达峰的实现。3)积极实施能源消费强度与总量的“双控”目标,加快能源结构的调整,严格控制煤炭、石油等化石能源的使用量,大力开发利用非化石能源,争取2030年浙江省非化石能源消费比重达到30%左右。优化产业结构,积极发展商业服务业,增加第三产业占GDP的比重,改造高碳行业向绿色低碳转型,引入低碳高效行业,改善工业结构高碳化的现状。推进交通运输体系的绿色低碳发展,积极向公众宣传节能减排理念,倡导节约用电、低碳出行的生活方式。增加研发投入,大力发展应对气候变化的科技创新技术,坚持实施绿色低碳科技创新战略,利用低碳技术和数字化技术推动浙江省经济社会的绿色转型,最终实现浙江省2030年前碳达峰的目标。

参考文献 (References):

- [1] 新华社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL].(2020-09-22)[2023-11-10].
http://www.qstheory.cn/yaowen/2020-09/22/c_1126527764.htm.
- [2] 浙江省发改委.省发展改革委 省生态环境厅关于印发《浙江

- 省应对气候变化“十四五”规划》的通知[EB/OL].(2021-06-16)[2023-11-08].https://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/6/16/art_1229123366_2302792.html.
- [3] 浙江省住房和城乡建设厅.浙江省委省政府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实施意见[EB/OL].(2022-02-17)[2023-11-06].https://jst.zj.gov.cn/art/2022/2/17/art_1569971_58928904.html.
- [4] 王勇,毕莹,王恩东,等.中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估[J].中国人口·资源与环境,2017,27(10):131-140.
WANG Yong, BI Ying, WANG Endong, et al. Scene prediction of carbon emission peak and emission reduction potential estimation in Chinese industry[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(10): 131-140.
- [5] 芦颖,李旭东,杨正业.贵州省能源碳排放现状及峰值预测[J].环境科学与技术,2018,41(11):173-180.
LU Ying, LI Xudong, YANG Zhengye. Current situation and peak forecast of energy carbon emissions in Guizhou Province[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(11): 173-180.
- [6] 朱宇恩,李丽芬,贺思思,等.基于IPAT模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J].资源科学,2016,38(12):2316-2325.
ZHU Yuen, LI Lifen, HE Sisi, et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis[J]. Resources Science, 2016, 38(12): 2316-2325.
- [7] 洪竞科,李沅潮,蔡伟光,等.多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于RICE-LEAP模型[J].资源科学,2021,43(4):639-651.
HONG Jingke, LI Yuanchao, CAI Weiguang, et al. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 639-651.
- [8] 王会芝.交通能源消费碳排放情景预测研究——以天津市为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):37-41.
WANG Huizhi. Scenario prediction of Tianjin transportation energy consumption and carbon emission[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 37-41.
- [9] 杜涵蓓,赵立君,刘臣炜,等.基于LEAP模型和KAYA模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):983-991.
DU Hanbei, ZHAO Lijun, LIU Chenwei, et al. Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(8): 983-991.
- [10] PU X, YAO J, ZHENG R. Forecast of energy consumption and carbon emissions in China's building sector to 2060[J]. Energies, 2022, 15(14): 4950-4969.
- [11] 黄锐.基于灰色模型的土地利用与碳排放关系研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(6):856-861.
HUANG Rui. The research on the relationship between land use and carbon emissions based on the grey model[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 47(6): 856-861.
- [12] MA X, JIANG P, JIANG Q. Research and application of association rule algorithm and an optimized grey model in carbon emissions forecasting[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 158: 120159-120173.
- [13] 马金玲,刘永红,李丽,等.基于主成分分析法的城市客运交通碳排放影响因素研究[J].环境污染与防治,2018,40(10):1188-1192.
MA Jinling, LIU Yonghong, LI Li, et al. Research on the influencing factors of carbon emission in urban passenger transport based on principal component analysis[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(10): 1188-1192.
- [14] 刘莉娜,曲建升,曾静静,等.灰色关联分析在中国农村家庭碳排放影响因素分析中的应用[J].生态环境学报,2013,22(3):498-505.
LIU Lina, QU Jiansheng, ZENG Jingjing, et al. Application of gray relational analysis method in the influencing factor analysis of China's rural household carbon emissions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(3): 498-505.
- [15] HUANG Y, SHEN L, LIU H. Grey relational analysis, principal component analysis and forecasting of carbon emissions based on long short-term memory in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 415-423.
- [16] 叶晓佳,孙敬水,董立锋.低碳经济发展中的碳排放驱动因素实证研究——以浙江省为例[J].经济理论与经济管理,2011,4:13-23.
YE Xiaojia, SUN Jingshui, DONG Lifeng. Empirical research on carbon emissions' driving factors in low-carbon economic development: An example of Zhejiang Province[J]. Economic Theory and Business Management, 2011, 4: 13-23.
- [17] 李汉东,向梓航,崔雪峰.人口因素驱动下的中国碳排放强度预测[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(5):822-829.
LI Handong, XIANG Zihang, CUI Xuefeng. Predicting China's carbon emission driven by population factors[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2023, 59(5): 822-829.
- [18] 郭文军.中国区域碳排放权价格影响因素的研究——基于自适应Lasso方法[J].中国人口·资源与环境,2015,25(5):305-310.
GUO Wenjun. Factors impacting on the price of China's regional carbon emissions based on adaptive Lasso method[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 305-310.
- [19] RAO C, YAN B. Study on the interactive influence between economic growth and environmental pollution[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(31): 39442-39465.
- [20] ZHANG Y, WAHAB M I M, WANG Y. Forecasting crude oil market volatility using variable selection and common factor[J]. International Journal of Forecasting, 2023, 39(1): 486

- 502.
- [21] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法[J]. 统计研究, 1995, 12(3): 46-48.
TAN Xuerui, DENG Julong. Grey relational analysis: A new method for multifactor statistical analysis[J]. Statistical Research, 1995, 12(3): 46-48.
- [22] SUN S, FENG J, LI H, et al. A new hybrid optimization ensemble learning approach for carbon price forecasting[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 97: 182-205.
- [23] ZHU B, YE S, WANG P, et al. A novel multiscale nonlinear ensemble learning paradigm for carbon price forecasting[J]. Energy Economics, 2018, 70: 143-157.
- [24] EFRON B, HASTIE T, JOHNSTONE I, et al. Least angle regression [J]. The Annals of Statistics, 2004, 32(2): 407-451.
- [25] 邓聚龙. 社会经济灰色系统的理论与方法[J]. 中国社会科学, 1984, 6: 47-60.
- [26] 宋廷山. 经济预测与决策方法及其计算机实现[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006: 203-211.
- [27] SHUAI C Y, CHEN X, WU Y, et al. Identifying the key impact factors of carbon emission in China: Results from a largely expanded pool of potential impact factors[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 175: 612-623.
- [28] SHI Kaifang, YU Bailang, ZHOU Yuyu, et al. Spatiotemporal variations of CO₂ emissions and their impact factors in China: A comparative analysis between the provincial and prefectural levels[J]. Applied Energy, 2019, 233: 170-181.
- [29] 王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020, 29(3): 512-522.
WANG Ying, HE Yanfen. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of provincial carbon emissions in China[J]. World Regional Studies, 2020, 29(3): 512-522.
- [30] 陈军华, 李乔楚. 成渝双城经济圈建设背景下四川省能源消费碳排放影响因素研究——基于 LMDI 模型视角[J]. 生态经济, 2021, 37(12): 30-36.
CHEN Junhua, LI Qiaochu. Research on the influencing factors of energy consumption carbon emission in Sichuan Province under the background of the construction of Chengdu - Chongqing double city economic circle: From the perspective of LMDI method[J]. Ecological Economy, 2021, 37(12): 30-36.
- [31] 门丹, 黄雄. 江西省碳排放影响因素研究——基于 LMDI 分解法[J]. 生态经济, 2019, 35(5): 31-35.
MEN Dan, HUANG Xiong. Research on the factors affecting carbon emissions in Jiangxi Province: Based on LMDI method [J]. Ecological Economics, 2019, 35(5): 31-35.
- [32] 牛乐, 张丽霞, 郝凤明, 等. 辽宁省碳排放影响因素及情景预测[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 499-509.
NIU Le, ZHANG Lixia, XI Fengming, et al. Influencing factors and scenario forecasting of carbon emissions in Liaoning Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(2): 499-509.
- [33] 王长建, 汪菲, 张虹鸥. 新疆能源消费碳排放过程及其影响因素——基于扩展的 Kaya 恒等式[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2151-2163.
WANG Changjian, WANG Fei, ZHANG Hongou. The process of energy-related carbon emissions and influencing mechanism research in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2151-2163.