

# 双碳目标下 2025—2035 年河南省煤炭需求量预测

杜春彦<sup>1</sup>, 郑可欣<sup>2</sup>, 尉雪菲<sup>1</sup>

(1. 河南省国土空间调查规划院, 郑州 450016;

2. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000)

**摘要:** 在双碳目标下对煤炭需求量进行中长期预测可以为能源结构优化和政策制定提供科学依据。采用长短期记忆神经网络(long short-term memory networks, LSTM)模型、灰色预测模型(GM(1,1))与支持向量机(support vector machine, SVM)模型,选择河南省生产总值(gross domestic product, GDP)、清洁能源消费占比、能源消费弹性系数、人口数量与城镇化率 5 个参数作为特征序列,对 2025—2035 年河南省煤炭需求量进行预测,并选择长远能源规划(Long-range Energy Alternatives Planning System, LEAP)模型对政策强制情景、技术突破情景、经济波动情景进行煤炭需求量预测。结果表明:LSTM 模型、GM(1,1)模型与 SVM 模型预测 2025—2035 年煤炭需求量分别为 12009.12~14498.02 万吨标准煤、11092.74~14793.42 万吨标准煤和 11209.26~14200.20 万吨标准煤。河南省 2025—2035 年的煤炭需求量与国际能源组织基于低碳加速背景下的煤炭需求量较为接近,能够满足双碳目标下对煤炭需求的预期。

**关键词:** 河南省; 煤炭需求量; 双碳目标; LSTM 模型; GM(1,1)模型; SVM 模型

**中图分类号:** TD 82-05

## Forecast of coal demand in Henan province from 2025 to 2035 under the dual carbon goals

DU Chunyan<sup>1</sup>, ZHENG Kexin<sup>2</sup>, WEI Xuefei<sup>1</sup>

(1. Henan Provincial Institute of Territorial Space Investigation and Planning, Zhengzhou 450016, China;

2. College of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract:** Conducting medium and long-term prediction of coal demand under the dual-carbon goals can provide a scientific basis for the optimization of energy structure and policy-making. Herein, five parameters—GDP of Henan Province, proportion of clean energy consumption, energy consumption elasticity coefficient, population, and urbanization rate were selected as feature sequences to predict Henan Province's coal demand from 2025 to 2035, and Long Short-term Memory Networks (LSTM), Grey Prediction Model (GM(1,1)), and Support Vector Machine (SVM) were employed for the prediction. The predicted coal demand ranges from 2025 to 2035 by the LSTM model, the GM(1, 1) model and the SVM model were 120.0912~144.9802 Mtce, 110.9274~147.9342 Mtce and 112.0926~142.0020 Mtce, respectively. The coal demand in 2035 was relatively close to that of the International Energy Organization under the background of accelerating low-carbon development, which was expected to meet the expected coal demand under the dual carbon goals.

**Keywords:** Henan province, coal demand, dual carbon goals, LSTM model, GM(1, 1) model, SVM model

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评

**基金项目:** 河南省部分战略性矿产共生、低品位资源再评价及战略性矿产出让区块调查评价项目资助(豫自然资函(2024)402号)

**作者简介:** 杜春彦(1972—),女,正高级工程师,主要研究方向为地质矿产、矿业经济研究等, chunyan1991@163.com. E-mail: paper@cutech.edu.cn

估报告显示：相较于 1850—1900 年（工业化前基准期），全球地表平均温度已上升约 1 °C<sup>[1]</sup>。我国作为受全球变暖影响最严重的地区之一，自 1951 年以来，平均气温已上升 1.38 °C，上升速度达到每十年 0.23 °C<sup>[2]</sup>。在双碳目标背景下，我国的能源结构在未来十年将会发现显著变化。国家“十四五”规划明确提出到 2025 年非化石能源在一次能源消费中的占比需不低于 20%，能源综合生产能力高于 46 亿吨标准煤<sup>[3]</sup>。河南省作为能源消费大省，在过去五年内的煤炭需求量与生产量比例约为 1.95:1，准确预测未来十年煤炭需求有利于在双碳背景下维持能源供需平衡，推动清洁能源的使用，同时可以帮助制定长期经济发展规划。

前人针对化石能源需求预测及影响因素开展了很多工作。Nguyen 等<sup>[4]</sup>立足于全球尺度，利用自回归分布滞后建模技术确定全球化、人口变化、煤炭消费和二氧化碳排放之间的长短期关系，结果表明，经济的快速增加无论在短期还是长期都会促进煤炭消费量的增长，二氧化碳排放会在长期内减少煤炭消耗。谢和平等<sup>[5]</sup>立足于全国尺度，运用能源消费弹性系数法与分能源增量贡献值法（CVSI），对经济发展、能源消费和弹性系数进行阶段划分，对中国 2019—2025 年的能源消费量进行预测，结果表明，全国 2025 年煤炭消费需求为 28 亿~29 亿吨标准煤，占能源消费总量的 50%~52%。宋昆鹏等<sup>[6]</sup>立足于省级尺度，构建 ARIMA-LSTM 组合模型，选取工业增加值、能源消费总量 2 个指标与 ARIMA 模型的预测残差作为影响参数输入 LSTM 模型，预测河南省 2023 年煤炭消费量为 15130.36 万吨标准煤，通过对比模型之间的误差，表明混合模型能够更准确的捕捉消费量的变化与趋势。匡立春等<sup>[7]</sup>立足于全国尺度，采用全球变化评估模型的二次开发模型，根据不同场景的能源需求，设置了稳健型、积极性和激进型三种情景，对中国 2020—2060 年的能源需求量进行了预测，结果表明 2020—2035 年煤炭比重将从 56.8% 降至 37.8%，直到 2060 年煤炭消费占比降至 10% 以下。宋豪等<sup>[8]</sup>同样立足于全国尺度，基于环境约束，采用 BP 神经网络模型，选择 GDP、SO<sub>2</sub> 排放量、烟粉尘排放量、产业结构作为影响因素，对 2020—2050 年中国煤炭需求量进行中长期预测，认为我国煤炭需求量在 2025 年左右达到峰值，约 30 亿吨标准煤。王浩等<sup>[9]</sup>立足于全国尺度以 2004—2021 年中国煤炭消费量为基础数据，基于 GM(1,1) 模型，预测了 2022—2024 年的中国煤炭消费量。赵凌生<sup>[10]</sup>立足于地区尺度，在双碳背景下，从供需两端分析了京津冀地区的煤炭消费量变化及趋势，从时间序列因素(宏观经济因素、人口、主要耗煤产业等)和政策因素两方面分析影响煤炭需求量的因素，并提出 CNN-LSTM-Attention 预测模型，利用历史数据探究了模型的拟合优度。

然而，前人多是在能源需求和环境约束的情况下对能源需求量进行预测，很少考虑双碳目标对煤炭消费的约束；前人的研究工作多是对 2020 年及以前的煤炭需求进行预测，对 2035 年的预测相对较少；之前的预测多是针对国家层面，河南省煤炭消费量长期居于全国前三，对河南省的中长期煤炭消费量预测偏少，且缺乏与省级政策情景的耦合分析。本文将在国家双碳战略目标背景下，采用 LSTM 模型、GM(1,1) 模型和 SVM 模型，选取生产总值、清洁能源消费占比、能源消费弹性系数、人口数量与城镇化率 5 个参数，运用 Python 软件，基于历史数据对模型进行训练，对 2025—2035 年河南省煤炭需求量进行预测，并结合河南省碳达峰实施方案进行多情景分析，为省级能源政策制定提供科学依据。

## 1 预测方法与预测模型

### 1.1 预测方法

用于煤炭需求量预测的方法主要包括计量经济学方法、时间序列法、人工智能法和系统动力学与情景模拟法。

### 1.1.1 计量经济学方法

通过构建能源需求与关键经济变量（如 GDP、人口数量、产业结构等）的回归关系进行预测。采用的回归模型主要有线性回归模型<sup>[11]</sup>、向量自回归模型<sup>[12]</sup>、协整分析与误差修正模型<sup>[13]</sup>。计量经济方法可解释性强，能够分析各变量对能源消费的敏感度，但只局限于捕捉线性或近似线性关系，在面对数据突变时表现差。

### 1.1.2 时间序列法

该方法基于能源消费历史数据的变化规律通过建模进行预测，主要包括自回归模型、移动平均模型、自回归积分滑动平均模型<sup>[14]</sup>、指数平滑模型和灰色理论模型<sup>[15]</sup>。时间序列模型能够刻画周期性季节性变化，不需要引入外部变量，适合于短期预测，但面对数据突变时表现差，解释性弱。

### 1.1.3 人工智能法

人工智能方法通过自动挖掘海量数据中的复杂非线性模式提升预测精度，具有较强的机器学习能力和非线性拟合优势。该类方法主要包括支持向量机（SVM）模型、人工神经网络（artificial neural network, ANN）模型、长短期记忆神经网络（LSTM）模型<sup>[16]</sup>、循环神经网络（recurrent neural networks, RNN）模型和随机森林（random forest, RF）模型。人工智能法可以处理非线性、多变量、复杂交互问题，在预测过程中自动提取变量特征，减少人为假设依赖，预测精度高，适合中长期预测，但可解释性差，计算过程属于“黑箱”，需依赖大量的高质量数据对模型进行训练。

### 1.1.4 系统动力学与情景模拟法

该方法基于系统反馈机制和因果路径，构建能源—经济—环境的整体互动系统，进行情景分析和预测，主要包括长远能源规划（LEAP）模型、能源系统优化模型（MARKAL/TIMES）、可计算的一般均衡（computable general equilibrium, CGE）模型和系统动力学（system dynamics, SD）模型。系统动力学与情景模拟模型支持政策模拟与多情景预测，逻辑性强、可解释性强，适用于中长期战略分析，但数据需求高、建模复杂<sup>[17]</sup>。

## 1.2 预测模型

考虑到模型的可实现性及数据获取的难度，选择 LSTM 模型、灰色模型 GM(1,1)和 SVM 模型，1980—2019 年数据用于训练模型，2020—2024 年数据用于模型验证，对未来 10 年河南省的煤炭需求量进行预测，并将预测结果与双碳目标对煤炭消费量的要求进行对比分析，对比三个模型的预测能力。

### 1.2.1 长短期记忆模型（LSTM）

LSTM 模型是一种特殊的循环神经网络（RNN）模型，其内部包括记忆储存单元和门控机制（输入门、输出门、遗忘门），门控机制可以捕捉煤炭消费量的长期趋势和短期波动<sup>[18]</sup>。LSTM 模型具有非线性建模能力，可以自动学习 GDP、煤炭消费量等参数之间复杂的非线性关系，在面对政策变化（如双碳政策），模型的记忆单元状态更新机制可以缓解预测偏差。

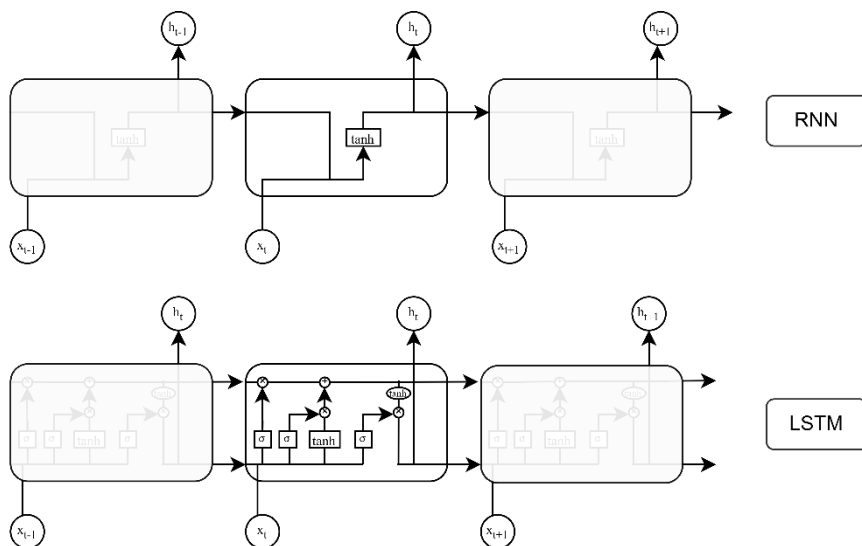


图 1 LSTM 模型工作原理

Fig. 1 Working principle of the LSTM model

125 1.2.2 灰色模型 (GM(1,1))

GM(1,1)是灰色系统理论中的经典预测模型，对历史煤炭消费量做一次累加以弱化原始煤炭消费量数据的随机性，构建一阶灰微分方程描述煤炭消费量的趋势。其核心是利用指数函数拟合数据内在规律，通过最小二乘法求解方程参数，带入参数即可构建预测模型。适用于小样本、贫信息场景，但可能增大长期预测误差<sup>[19]</sup>。

130 1.2.3 支持向量机 (SVM) 模型

SVM 模型是一种基于统计学习理论的新型机器学习方法，其核心目标是找到一个最优超平面，将不同类别的数据即  $x_1$ 、 $x_2$  分隔开，并最大化分类边界（间隔）的几何距离即  $d_1$ 、 $d_2$ ，从而提高模型的泛化能力<sup>[20]</sup>。SVM 模型可通过学习历史数据中的非线性关系构建预测模型，将 GDP、人口、清洁能源消耗等参数作为特征变量，煤炭需求量作为目标变量，选择合适

135 选择合适的核函数构建预测模型。

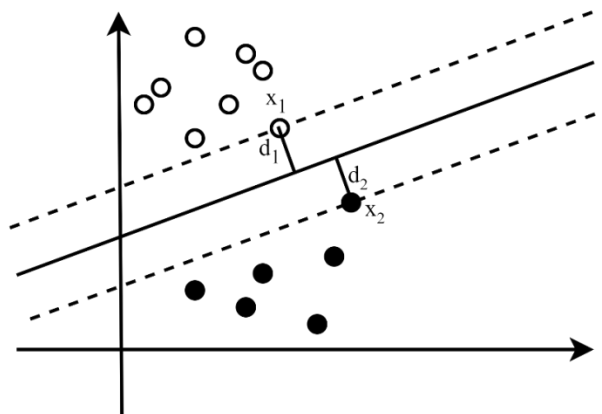


图 2 SVM 模型工作原理

Fig. 2 Working Principle of the SVM model

140 1.3 模型的率定与验证

模型的率定与验证采用均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 与拟合优度 ( $R^2$ ) 对模型进行评估。

1)  $K$  折交叉验证

145 将训练数据分为  $K$  个子集, 轮流将其中  $K-1$  个子集作为训练数据, 1 个子集作为验证数据, 共进行  $K$  次训练和验证, 取平均性能作为模型的性能指标。

2) 测试集验证

将数据分割, 使用 2020—2024 年的数据作为测试集, 评估模型的泛化能力和预测精度。

## 2 预测过程与结果

### 2.1 基础数据

150 煤炭消费量受多因素影响, 建模前需收集与煤炭消费量相关的历史数据, 并对相关参数进行筛选。影响煤炭消费量的因素主要有经济发展程度、国家政策引导、产业结构、煤炭进出口价格等, 由于难以获得与量化一些数据, 基于河南省统计年鉴, 选取 1980—2024 年河南省生产总值、工业化率、城镇化率、能源消费弹性系数、清洁能源消费占比、原煤产量、原煤消耗占比及人口<sup>[21]</sup>作为原始参数, 与煤炭消费量进行灰色关联度分析, 量化关联程度。

表 1 1980—2024 年河南省煤炭消费量、生产总值、工业化率等数据

Table 1 Data on coal consumption, gross domestic product, industrialization rate, etc. of Henan Province from 1980 to 2024

年份	煤炭消费量 /万吨标准煤	河南省生 产总值/亿 元	工业化率	城镇化 率	能源消费 弹性系数	清洁能源消 费占比/%	原煤产量/ 万 t	原煤消 耗占比	人口/万 人
1980	3104.324	229.16	0.412	0.140	0.32	1.4	5626.524	0.916	7285
1981	3297.756	249.69	0.384	0.142	0.85	1.8	5824.220	0.913	7397
1982	3243.160	263.30	0.390	0.144	0.85	2.4	5968.492	0.911	7519
1983	3667.815	327.95	0.355	0.146	0.56	2.6	6400.851	0.909	7632
1984	4071.340	370.04	0.368	0.147	1.08	2.5	6933.037	0.91	7737
1985	4151.582	451.74	0.376	0.148	0.24	3.1	7883.011	0.899	7847
1986	4158.047	502.91	0.402	0.150	0.43	3.3	8162.653	0.883	7985
1987	4425.304	609.60	0.378	0.151	0.42	3.2	8172.019	0.884	8148
1988	4641.084	749.09	0.400	0.153	0.58	3.5	8389.282	0.877	8317
1989	4483.224	850.71	0.373	0.154	0.58	3.6	8994.540	0.877	8491
1990	4570.868	934.65	0.355	0.155	0.40	3.8	9186.228	0.878	8649
1991	4735.529	1045.73	0.371	0.159	0.43	3.2	9171.470	0.883	8763
1992	4935.372	1279.75	0.424	0.162	0.3	3.2	9340.647	0.884	8861
1993	5170.284	1660.18	0.458	0.165	0.32	3.0	9417.568	0.882	8946
1994	5459.325	2216.83	0.475	0.168	0.46	3.3	9620.958	0.877	9027
1995	5670.348	2988.37	0.464	0.172	0.27	2.8	10355.943	0.876	9100
1996	5822.250	3634.69	0.459	0.184	0.20	2.7	10800.668	0.875	9172
1997	5892.258	4041.09	0.458	0.196	0.09	2.6	10531.264	0.878	9243
1998	6345.744	4308.24	0.448	0.208	0.90	2.6	9886.662	0.876	9315
1999	6457.500	4517.94	0.436	0.220	0.23	2.7	8324.831	0.875	9387
2000	6937.044	5052.99	0.452	0.232	0.77	2.8	7723.240	0.876	9488
2001	7279.290	5533.01	0.451	0.244	0.66	3.5	8515.792	0.87	9555
2002	7798.330	6035.48	0.477	0.258	0.84	4.1	9921.210	0.866	9613
2003	9185.865	6942.41	0.482	0.272	1.62	3.9	13146.843	0.867	9667
2004	11322.084	8411.19	0.485	0.289	1.83	4.2	16552.097	0.866	9717
2005	12753.000	10243.47	0.508	0.307	0.83	4.1	18564.427	0.872	9768
2006	14188.516	11977.87	0.527	0.325	0.76	4.6	19258.757	0.874	9820
2007	15643.926	14824.49	0.533	0.343	0.68	4.4	18776.864	0.877	9869
2008	16547.072	17735.93	0.548	0.360	0.53	4.8	20077.412	0.872	9918
2009	17183.370	19181.00	0.538	0.377	0.37	5.1	22238.904	0.87	9967

2010	15702.192	22655.02	0.537	0.388	0.69	7.9	22557.346	0.828	10800
2011	16696.992	26318.68	0.533	0.405	0.66	8.0	20173.691	0.816	10922
2012	16736.000	28961.92	0.519	0.420	0.22	8.5	15441.580	0.8	10932
2013	16913.748	31632.50	0.506	0.436	0.52	10.0	16663.932	0.772	11039
2014	17785.530	34574.76	0.496	0.451	0.51	9.8	14830.400	0.777	11102
2015	17070.052	37084.1	0.484	0.470	0.14	10.3	13538.98	0.764	11217
2016	16831.542	40249.34	0.472	0.488	0.14	10.2	11905.26	0.754	11370
2017	15867.992	44824.92	0.467	0.506	0.14	13.8	11688.04	0.716	11377
2018	15838.641	49935.90	0.441	0.522	0.29	14.8	10628.77	0.699	11444
2019	15030.200	53717.75	0.429	0.540	0.29	16.8	10570	0.674	11486
2020	15380.352	54259.43	0.410	0.554	1.82	17.1	10490.6	0.676	11526
2021	14876.133	58071.43	0.406	0.565	0.55	21.0	9335.5	0.633	11533
2022	15280.617	58220.13	0.380	0.571	1.54	21.6	9772.83	0.627	9872
2023	—	59132.39	0.375	0.581	—	—	10214.76	—	9815
2024	—	—	—	—	—	—	10428.99	—	—

160 将河南省生产总值、工业化率、城镇化率、能源消费弹性系数、清洁能源消费占比、原煤产量、原煤消耗占比、人口作为特征序列，煤炭消费量作为目标序列，运用 Python 软件分析两个序列的关联程度，分析结果见表 2。根据关联度分析结果，各参数与煤炭消费量的关联度排序：河南省生产总值>原煤产量>清洁能源消费占比>城镇化率>人口>能源消费弹性系数>原煤消耗占比>工业化率。生产总值反映经济发展水平，直接影响煤炭需求；原煤产量对煤炭消费量产生影响；清洁能源消费占比在近年来显著升高，可以有效降低煤炭消费量；城镇化率间接影响产业结构和能源消费结构；人口增长推动基础设施建设需求，会增加煤炭消费；能源消费弹性系数反映经济增长对能源的依赖程度；原煤消耗占比反映煤炭在能源消费结构中的地位，近年可再生能源的普及会降低煤炭在能源结构中的占比；工业化率反映工业化进程，工业化初期主要依赖煤炭，中后期比重下降。

165

表 2 关联度分析结果  
Table 2 Result of correlation degree analysis

指标	河南省 生产总 值	工业化 率	城镇化 率	能源消 费弹性 系数	清洁能源 消费占比	原煤产量	原煤消耗占 比	人口
关联 度	0.8709	0.5886	0.7058	0.6646	0.7151	0.7742	0.5964	0.6961

170

## 2.2 LSTM 模型预测

基于表 2 选取影响煤炭消费量的 5 个关键因素（即特征变量：河南省生产总值、原煤产量、清洁能源消费占比、城镇化率、人口）对 2025—2035 年煤炭消费量（目标变量）进行预测，具体步骤如下<sup>[16]</sup>：

175 1) 原始数据归一化处理。使用 Python 软件，运用 MinMaxScaler 命令将特征变量和目标变量置于[0,1]区间，以避免量纲差异。

### 2) 模型构建

a. 监督学习数据转换。设置时间步长，用历史特征变量来预测目标变量，生成滑动窗口转换时序数据为监督学习格式。

180 b. 网络架构。搭建双层 LSTM 框架（128+64 神经元），输出层为 1 个全连接神经元；训练选用 Adam 算法作为优化器。

3) 模型训练。将数据集分割为训练集和测试集，评估模型的泛化能力。

4) 预测未来数据。采用滚动预测的方法,对 2025—2035 年煤炭消费量进行预测,预测结果如图 3 所示。

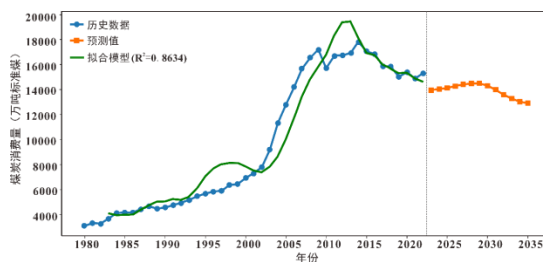


图 3 LSTM 模型预测结果

Fig.3 Prediction results of the LSTM model

LSTM 模型的拟合优度为 0.8634,说明拟合效果好,可以较准确地反映未来趋势。在 1994—2001、2010—2014 两个区间煤炭消费量偏差较大,这可能是由于 2001—2009 年煤炭消费量超常规大幅度增长,影响这一时间段前后的数据拟合效果。在 2025—2035 年期间预测值曲线呈先小幅上升、后慢慢下降的趋势,在 2028 年达到最大值(14498.02 万吨标准煤),在 2035 年达到最小值(12900.12 万吨标准煤),见图 3。LSTM 模型的预测结果显示煤炭消费量呈现先升后降的趋势,这符合河南省当前的经济发展与能源转型的实际情况——推动重点产业转型和推进“外电入豫”。

### 2.3 GM(1,1)模型预测

由于灰色系统在面对波动较大的数据时存在短板,故选取 2014—2022 年的煤炭消费量数据作为基础数据,运用 Python 软件对 2025—2035 年数据进行预测,具体步骤如下<sup>[15]</sup>:

1) 生成累加序列 (AGO),对基础数据计算一阶累加序列  $x^{(1)}$ :

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

2) 生成紧邻均值序列,并用于构建灰色微分方程:

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2}, k = 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

3) 通过最小二乘法求解灰色微分方程,求解得到参数  $a$  (发展系数)与  $b$  (灰色作用量)。

4) 求得累加序列预测值,并对该序列进行递减还原。

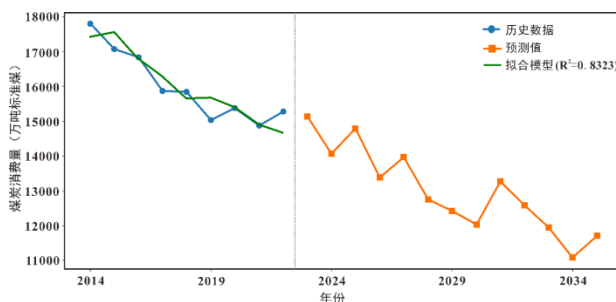


图 4GM(1,1)模型预测结果

Fig. 4 Prediction results of the GM(1, 1) model

GM(1,1)模型的拟合优度为 0.8323,拟合效果较好,可以大致反映未来发展趋势。2025—2035 年预测值整体呈现波动式下降趋势。在 2025 年达到最大值,为 14793.42 万吨标准煤;

在 2034 年达到最小值，为 11092.74 万吨标准煤；2035 年出现小幅度回升，为 11716.95 万吨标准煤（表 3）。根据 GM(1,1)模型的预测结果可知，预测峰值早于 LSTM 模型与 SVM 模型，这一定程度上体现了灰色系统对中长期预测过程的不确定性。虽然 GM(1,1)模型对短期波动的拟合精度不及机器学习模型，但仍反映出河南省煤炭消费已于“十四五”末至“十五五”初期达峰，后期虽有反复，但整体下行趋势明确。

### 2.4 SVM 模型预测

基于表 2 选取影响煤炭消费量的 5 个关键因素（即特征变量：河南省生产总值、原煤产量、清洁能源消费占比、城镇化率、人口）（对 2025—2035 年煤炭消费量（目标变量）进行预测，具体步骤如下<sup>[20]</sup>：

- 1) 将年份作为额外特征变量，与其他特征变量合并为五维矩阵 ( $X$ )，煤炭消费量为  $y$ 。
- 2) 对数据进行标准化预处理。对  $X$  和  $y$  进行标准化以消除量纲影响。
- 3) 使用径向基核函数，并为核函数、正则化函数与容忍误差定值。正则化函数控制拟合强度，核函数控制模型光滑程度。运用标准化后的数据训练模型，拟合数据，观察模型的拟合效果。
- 4) 对训练数据进行预测。得到标准化预测值，并逆标准化还原为原始量纲。
- 5) 构造未来特征。对特征添加随机噪声以模拟现实中的不确定性
- 6) 输入含噪声的未来特征，输出标准化预测结果（图 5），最后逆标准化。

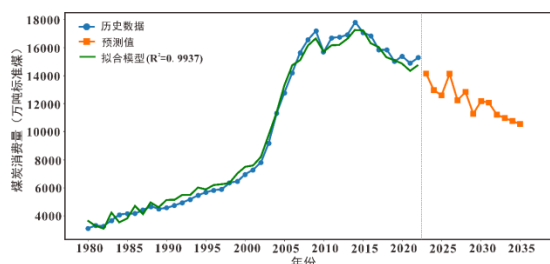


图 5 SVM 模型预测结果

Fig.5 Prediction results of the SVM model

SVM 模型的拟合优度为 0.9937，拟合效果最好，能够很好地解释数据变异。SVM 的预测结果总体呈锯齿状下降的变化趋势，预测值在 2026 年达到最大值，为 14200.20 万吨标准煤；在 2035 年达到最小值，为 11209.26 万吨标准煤（表 3）。该预测趋势与河南省“十四五”现代化能源体系规划及碳达峰实施方案的路径基本吻合，预测曲线呈锯齿状下降，这可能反映了河南省在工业转型过程中工业经济波动、可再生能源不稳定及重点耗煤行业技术迭代过程中的阶段性特征。

表 3 基于不同模型的煤炭需求量预测结果  
Table3 Coal demand prediction results based on different models

年份	煤炭需求量预测 (万吨标准煤)		
	LSTM 模型	灰色模型 (GM(1, 1))	SVM 模型
2025	14138.02	14793.42	12515.52
2026	14270.68	13378.62	14200.20
2027	14402.18	13972.20	12077.73
2028	14498.02	12752.87	12731.58
2029	14489.66	12425.20	11592.00

2030	14308.56	12032.12	12015.57
2031	13973.87	13275.85	12009.19
2032	13596.61	12600.35	11699.47
2033	13271.72	11948.39	11516.56
2034	13032.53	11092.74	11367.79
2035	12900.12	11716.95	11209.26
$R^2$	0.8542	0.8323	0.9937

## 2.5 政策情景对比预测

为评估河南省双碳政策对煤炭需求的影响，运用 LEAP 模型，基于政策强制情景、技术突破情景、经济波动情景这 3 种情景，对 2025—2035 年河南省煤炭需求量进行预测。预测结果如表 4 所示。

1) 政策强制情景：严格执行《河南省碳达峰实施方案》中的约束性指标，如 GDP 能耗下降、非化石能源消费占比增加等。

2) 技术突破情景：碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS)、氢能、核聚变等前沿能源技术在 2030 年后实现大规模商业化应用，能源迭代进程加快。

3) 经济波动情景：设置经济高增长与经济低增长两种情况。

表 4 基于 LEAP 模型的不同政策情境下河南省煤炭需求量预测结果  
Table 4 prediction results of coal demand in Henan province under different policy scenarios based on LEAP model

年份	煤炭需求量预测			
	政策强制情景	技术突破情景	经济波动情景-高	经济波动情景-低
2025	14203.19	14127.54	15368.27	14554.27
2026	14250.63	14003.73	15549.58	14627.33
2027	14200.27	13856.92	15652.26	14653.32
2028	14113.24	13637.36	15756.21	14656.49
2029	13957.94	13336.14	15800.74	14583.83
2030	13758.11	12953.62	15852.82	14358.71
2031	13588.26	12553.18	15857.27	14155.84
2032	13274.43	12180.21	15754.49	13909.97
2033	12868.16	11663.32	15603.53	13638.11
2034	12468.78	11159.67	15468.64	13209.25
2035	12010.21	10533.79	15265.13	12852.34

据表 4 可知强有力的政策干预可显著降低煤炭需求。在政策强制情景下，2035 年煤炭需求降至 1.20 亿吨标准煤。此结果与 SVM 模型的预测值 (1.12 亿吨标准煤) 最接近，这说明在现有技术、经济条件下，通过严格执行既定政策，河南省有望实现甚至超越双碳目标路径下的煤炭消费控制目标。

在技术突破情景下，2035 年煤炭需求量为 1.05 亿吨标准煤，低于表 3 中的所有模型预测结果，说明低碳技术的突破是达到双碳目标的重要方式，效果显著。

经济波动情境下，高经济增长情境下，煤炭需求量居高不下，这是因为煤炭是经济发展的支柱能源；而在低经济增长情境下，煤炭需求量为下降趋势。

为突出政策对完成双碳目标的作用，将政策强制情景 2035 年预测结果与三种模型 2035 年的预测结果进行对比 (表 5) 发现，预测结果均落在合理区间内。

表 5 基于不同模型的煤炭需求量预测结果  
Table 5 Coal demand forecast results based on different models

万吨标准煤

政策强制情景	LSTM 模型	灰色模型 (GM(1,1))	SVM 模型
12010.21	12900.12	11716.95	11209.26

270 为检验预测结果是否满足国家双碳目标的要求,将预测结果与国际能源署(International Energy Agency, IEA)对中国在不同情景下的煤炭消费量预测值进行换算与对比。

275 IEA 在基准情景、低碳加速情景、技术突破情景这 3 种发展情景下对中国 2035 年煤炭消费量的预测分别为 25~28 亿吨标准煤、20~24 亿吨标准煤、26~30 亿吨标准煤如表 6 所示<sup>[22]</sup>。按发电煤耗法进行折算,中国 2022 年一次能源消费总量约为 54 亿吨标准煤,煤炭消费量占一次能源消费总量的 56.0%<sup>[23]</sup>,即 2022 年煤炭消费量约为 30.24 亿吨标准煤。2022 年河南省煤炭消费量为 1.52 亿吨标准煤<sup>[21]</sup>,占全国煤炭消费量的 5.02%。基于 IEA 的预测数据推断出双碳目标下不同情景模式对河南省 2035 年煤炭消费量(表 6)。将基于 IEA 的河南省 2035 年煤炭消费量预测结果与上述模型预测结果进行对比发现,模型预测结果略低于基准情景下河南省煤炭消费量,明显高于低碳加速情景下煤炭消费量,说明依据目前的经济、技术水平,河南省在 2035 年的煤炭消费量能够满足国家双碳目标要求。

280 表 6 IEA 基于双碳目标对 2035 年煤炭消费量的预测结果

Table 6 Coal consumption (100 Mtce) predicted by IEA in 2035 under the dual carbon goals  
亿吨标准煤

285

IEA 对不同情景下中国 2035 年煤炭消费量预测		
基准情景	低碳加速情景	技术突破情景
25~28	20~24	26~30

河南省 2035 年煤炭消费量预测		
基准情景	低碳加速情景	技术突破情景
1.255~1.41	1.00~1.20	1.31~1.51

## 2.6 模型验证与性能评估

采用 RMSE、MAPE 与  $R^2$  对模型进行评估。

### 1) K 折交叉验证

290  $K=5$ ,对 LSTM 和 SVM 模型进行 5 折交叉验证,由于 GM(1,1)适用于小样本序列预测,不参与此验证方法。结果见表 7。

表 7K 折交叉验证结果

Table 7 K-fold cross-validation results

预测模型	$R^2$	RMSE/万吨标准煤	MAPE/%
LSTM	0.841±0.032	385.62±45.17	4.82±0.56
SVM	0.978±0.012	152.39±28.45	1.95±0.32

295 由表 7 可知,SVM 的标准差(28.45)小于 LSTM 标准差(45.17),说明 SVM 模型的预测精度更高,模型性能更加稳定,对不同数据的泛化能力更强。

### 2) 测试集验证

2020—2024 年的数据作为测试集,评估模型的预测性能,结果见表 8。

表 8 测试集验证结果

Table 8 Verification results of the test set

预测模型	$R^2$	RMSE/万吨标准煤	MAPE/%
LSTM	0.889	312.45	3.21
SVM	0.985	105.33	1.12

GM(1, 1)	0.815	498.76	5.88
----------	-------	--------	------

300 由表 8 可知, SVM 模型再次显现出最优的预测能力, MAPE 值仅为 1.12%, 说明预测值与实际值误差值高度吻合。

综上所述, SVM 在  $R^2$ 、RMSE 与 MAPE 方面均表现最佳, 其次是 LSTM 模型, GM(1, 1)模型则更适用于趋势性判断。

### 3 结论

305 采用 LSTM 模型、GM(1,1)与 SVM 模型, 基于 GDP、人口等特征变量对未来 10 年河南省的煤炭消费量进行了预测。LSTM 模型、GM(1,1)与 SVM 模型的预测结果表明, 到 2035 年河南省煤炭的消费量分别为 12900.12 万吨标准煤、11716.95 万吨标准煤和 11209.26 万吨标准煤。不同模型结论虽存在差异, 但总体均呈现稳步下降的趋势, 按目前的经济与技术水平, 2035 年的煤炭消费量能够满足基准情景下国家双碳目标对河南省煤炭消费量的要求。采用 LEAP 模型对三种政策情景条件进行煤炭需求量预测, 其中政策强制情景预测结果表明, 若严格执行河南省碳达峰实施方案, 到 2035 年河南省煤炭消费量将为 12010.21 万吨, 也可满足基准情景下国家双碳目标对河南省煤炭消费量的要求。本研究仍存在一定局限性, 模型预测依赖于历史数据的连续性, 对于突发政策、极端气候事件的响应力度较弱, 可运用组合模型, 结合不同模型的优势增加模型的抗风险能力。

### 315 [参考文献] (References)

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [EB/OL]. [2021-8-9]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [2] 黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1607-1640.
- 320 HUANG J P, CHEN W, WEN Z P, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: climate and climate change[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(10): 1607-1640. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-3-13]》[https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- 325 Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and Vision 2035 of the People's Republic of China [EB/OL]. [2021-3-13]》[https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm). (in Chinese)
- [4], NGUYEN T C V, LE Q H. Impact of globalization on coal consumption in Vietnam: an empirical analysis [J]. The Journal of Asian Finance, Economics and Business, 2020, 7(6): 185-195.
- [5] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.
- 330 XIE H P, WU L X, ZHENG D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960. (in Chinese)
- [6] 宋昆鹏, 宋亚开. 基于 ARIMA-LSTM 模型的煤炭能源消费预测研究: 以河南省为例[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(9): 48-54.
- 335 SONG K P, SONG Y K. Coal energy consumption forecasting research based on ARIMA-LSTM model: a case study of Henan Province[J]. Coal Economic Research, 2024, 44(9): 48-54. (in Chinese)

- [7] 匡立春, 邹才能, 黄维和, 等. 碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展趋势[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(1): 9-17.
- 340 KUANG L C, ZOU C N, HUANG W H, et al. China's energy demand projection and energy transition trends under carbon peak and carbon neutrality situation[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(1): 9-17. (in Chinese)
- [8] 宋豪, 张艳, 高天明, 等. 基于神经网络的环境约束下我国煤炭需求预测[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 72-78.
- SONG H, ZHANG Y, GAO T M, et al. Prediction of coal demand in China under environmental constraints based on the neural network[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5): 72-78. (in Chinese)
- 345 [9] 王浩, 成玮. 基于 GM(1, 1)模型煤炭消费量预测研究[J]. 能源与节能, 2023(5): 51-53, 57.
- WANG H, CHENG W. Prediction of coal consumption based on GM(1, 1) model[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(5): 51-53, 57. (in Chinese)
- [10] 赵凌生. 双碳背景下京津冀地区煤炭需求预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024: 19-26, 43-50.
- 350 ZHAO L S. Research on coal demand forecast in Beijing-Tianjin-Hebei Region under the background of dual-carbon goals. Beijing: North China Electric Power University, 2024: 19-26, 43-50. (in Chinese)[知网硕士中文]
- [11] 刘健, 程根银. 基于多元线性回归对我国煤炭消费量的分析[J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(3): 108-112.
- LIU J, CHENG G Y. Analysis of coal consumption in China based on multiple linear regression[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2018, 15(3): 108-112. (in Chinese)
- 355 [12] 董洁芳, 王强, 王兴民, 等. 山西省煤炭消费需求影响因素的实证研究[J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(5): 641-650.
- DONG J F, WANG Q, WANG X M, et al. Empirical study on the influencing factors of coal consumption in Shanxi province[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, 33(5): 641-650. (in Chinese)
- 360 [13] 徐丽娜, 张晓华, 邓灿辉, 等. 中国西部地区能源消费量影响因素分析: 基于协整模型的实证研究[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(12): 68-70.
- XU L N, ZHANG X H, DENG C H, et al. Analysis of factors influencing energy consumption in western China: empirical research based on cointegration model[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(12): 68-70. (in Chinese)
- 365 [14] 杨英明, 李全生, 方杰. 基于最优加权组合模型的煤炭消费预测分析[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 156-160.
- YANG Y M, LI Q S, FANG J. Coal consumption forecasting based on optimum weighted composition model[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 156-160. (in Chinese)
- [15] 程文荣, 姚天祥. 基于新陈代谢 GM(1,1)模型的中国煤炭消费量预测分析[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(16): 93-98.
- 370 CHENG W R, YAO T X. Application of an information renewal GM(1, 1) model predicting in coal consumption forecast of China[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(16): 93-98. (in Chinese)
- [16] 李润宸. 基于 LSTM 的煤炭消费预测模型[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(4): 20-24.

- 375 LI R C. Coal consumption forecast model based on LSTM[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(4): 20-24. (in Chinese)
- [17] 李姗姗, 马雨晴, 孔维龄, 等. 基于 LEAP 模型的安徽省能源需求与碳排放预测[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4911-4922.
- LI S S, MA Y Q, KONG W L, et al. Energy demand and carbon emission prediction in Anhui Province based on LEAP model[J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4911-4922. (in Chinese)
- 380 [18] GRAVES A. Long short-term memory [M]// Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks. Berlin: Springer, 2012: 1735-1780.
- [19] 刘思峰, 邓聚龙. GM(1, 1)模型的适用范围[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(5): 121-124.
- LIU S F, DENG J L. The range suitable for GM (1, 1)[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(5): 121-124. (in Chinese)
- 385 [20] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10.
- DING S F, QI B J, TAN H Y. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2-10. (in Chinese)
- [21] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 2-1, 3-1, 7-1, 7-2, 7-4.
- 390 Henan provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Henan. Henan statistical yearbook 2024 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024: 2-1, 3-1, 7-1, 7-2, 7-4. (in Chinese)
- [22] 国际能源署. 世界能源展望 2023 [EB/OL]. [2023-10-24]. [https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?wpappninja\\_v=0yrwaldze](https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?wpappninja_v=0yrwaldze)
- International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. (in Chinese)
- 395 [23] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 9-2.
- National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2024 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024. (in Chinese)