

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.2010

安徽省能源消费变化特征及能源需求预测研究

——基于 Grey-Markov 模型

姜佩, 董洪光, 费翔

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为梳理安徽省能源需求特征, 科学预测安徽省未来能源需求量, 为安徽省制定“十五五”能源规划提供依据, 采用灰色马尔可夫优化组合模型, 对安徽省未来能源消费量进行预测。研究表明: 安徽省能源消费具有逐年上升、能源结构“一煤独大”、人均能源消费需求潜力大、能源消费强度低、能源消费弹性系数大等特征; 预计2025年和2030年, 安徽省能源消费量将分别达到17 785.38万t和21 723.79万t标准煤; 构建的安徽省能源需求预测组合模型精度较高(预测误差为0.17%)。为构建“清洁低碳, 安全高效”的安徽省能源体系, 建议安徽省政府管理者通过倡导节能、提高能源利用率、大力发展可再生能源、加大科技创新与地区能源合作等对策应对不断上涨的能源需求。

关键词: 安徽省; 能源需求; GM(1, 1)模型; 马尔可夫模型

中图分类号: F206

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)02-0081-08

引文格式: 姜佩, 董洪光, 费翔. 安徽省能源消费变化特征及能源需求预测研究: 基于 Grey-Markov 模型 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 81-88.

Study on Energy Consumption Change Characteristics and Energy Demand Forecasts in Anhui Province: Based on Grey-Markov Model

JIANG Pei, DONG Hongguang, FEI Xiang

(School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In view of a detailed analysis of the energy demand characteristics of Anhui Province, as well as a scientific forecast of its future energy consumption, thus providing a basis for formulating the 15th Five-Year Plan for energy development in Anhui, a grey Markov optimized combination model has thus been adopted for the future energy consumption prediction of Anhui Province. The research results indicate that: The energy consumption in Anhui Province is characterized with a yearly increase, a "coal-dominated" energy structure, a high potential per capita energy consumption demand, a low energy consumption intensity, and a high energy consumption elasticity coefficient; It is expected that by 2025 and 2030, the energy consumption in Anhui Province will reach 177.853 8 million tons of standard coal and 217.237 9 million tons of standard coal, respectively; There is a high accuracy in the constructed Anhui Province energy demand forecast combination model (with a prediction error of 0.17%). To construct a "clean, low-carbon, safe and efficient" energy system in Anhui Province, it is recommended that governmental administrators of Anhui Province respond to the constantly rising energy demand by advocating energy conservation, improving energy

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 安徽省哲学社会科学规划基金资助项目 (AHSKY2021D138)

作者简介: 姜佩, 男, 安徽理工大学硕士生, 主要研究方向为能源预测与管理, E-mail: jiangpei128@163.com

通信作者: 董洪光, 男, 安徽理工大学副教授, 主要研究方向为能源预测, E-mail: 15156439747@163.com

utilization efficiency, vigorously developing renewable energy, intensifying technological innovation and strengthening regional energy cooperation, etc.

Keywords: Anhui Province; energy demand; GM(1, 1) model; Markov model

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础^[1]。做好能源需求预测,可以为政府管理者制定经济发展规划提供决策依据。安徽省是长三角地区的能源基地,担负着向长三角兄弟省份提供能源的重要使命。2012年以来,安徽省能源消费与供给缺口持续扩大^[2],能源对外依存度逐年提高。因此,加强安徽省能源需求预测,进而对能源发展采取针对性对策,对促进安徽省和长三角地区的经济发展具有重大意义。

目前能源预测研究已经广泛展开,能源预测的研究方法主要分为单一方法预测和组合模型预测。在单一方法预测方面,王新安等^[3]采用ARIMA (autoregressive integrated moving average model)模型对陕西省2003—2020年能源消耗及未来走向进行了分析与预测,并制定了调控该省能源消耗的策略。谢和平等^[4]测算了我国煤炭、石油、天然气和非化石能源消费量,并通过能源消费弹性系数法预测了2025年我国能源消费需求。何峙琦等^[5]结合基于GM(1, 1)方法改进的预测模型 δ RGM(1, 1),预测我国2027年能源消费总量将突破63亿t标准煤。Ming X. X.等^[6]以浙江省为研究对象,基于LEAP (long-range energy alternatives planning system)模型,综合考虑区域经济特征、人口和能源消费模式,构建了不同政策下的4种社会情景进行能源预测。李姗姗等^[7]构建了LEAP-Anhui模型对安徽省未来能源需求进行预测,并得出工业结构调整情景会使工业能源需求降至102.98 Mt标准,建筑节能情景使得建筑业能源需求稳步下降至3.07 Mt标准等研究结果。

在组合模型能源预测方面,陈晖等^[8]结合ARIMA模型和ARDL (autoregressive distributed lag model)模型构造能源消费预测模型,对广东省长期能源消费总量和结构进行分析和预测,为能源发展提供政策建议。李红霞等^[9]通过双变异差分进化算法优化BP神经网络预测模型,建立DMDE-BPNN混合预测模型,探讨青海省能源清洁化发展对策。任继勤等^[10]将BP神经网络与马尔可夫模型相结合,运用其高适用性和高精度性对北京市2016—2020年一次能源消费总量和能源消费结构进行了预测,有助于推进能源低碳化进程。Xie N. M.等^[11]结合灰色预测与马尔可夫链模型有效模拟,预测出节能政策下

我国2015年和2020年的能源生产和消费的总量和结构。Jia Z. Q.等^[12]运用灰色马尔可夫链模型对甘肃省1999—2020年的煤炭消费量进行了预测,为制定煤炭中长期发展战略提供决策依据。这些研究为能源预测提供了多样化的方法和深入的见解。

综合国内外学者的研究,能源需求预测领域采用了多样化的分析方法。然而,众多预测大体采用单一方法研究,鲜有学者采用组合模型预测的同时对预测值进行修正以提高预测精度。此外,大多数研究倾向于从国家层面进行分析,而对省份或特定区域的探讨往往集中在经济发展较快的地区。从时间跨度来看,多数研究的预测期限截至2020年或2025年,而对更长远时间范围的预测研究较为罕见。现有针对安徽省能源问题的研究成果较为匮乏,研究数据相对陈旧。

由于能源需求受多种因素综合影响,属于信息半透明的灰色状态,较适合采用灰色预测^[13-16]方法;同时,马尔可夫模型能够预测时间序列的随机波动范围,有效提高短期预测精度。因此,本研究拟聚焦于安徽省的能源消费发展现状,采用灰色马尔可夫优化组合模型^[17-18],对安徽省“十五五”期间的能源需求进行预测,并提出相应的能源安全保障措施,以为安徽省政府能源管理决策提供依据和借鉴,为国家能源发展贡献安徽力量。

1 安徽省能源消费现状

为了解安徽省能源消费现状,以《安徽统计年鉴》2005—2022年数据为基础,对安徽省能源消费现状特征进行分析,课题组发现安徽省能源消费现状具有如下特征。

1)安徽省能源消费总量“逐年上升”。能源消费^[19]是指为满足人们日常生产和生活中动力、热力等能量需求而消费的各类能源,是有效能源需求的反映。本研究分析用能源消费代替能源需求。针对安徽省的能源消费主要由煤炭、石油、天然气和一次电力等能源结构组成,计量单位为万t标准煤。

依据《安徽统计年鉴》(2023)数据绘制出安徽省能源消费总量变化趋势图,如图1所示。由图1可知:①2005—2022年间,安徽省能源消费总量呈直

线上升趋势。能源消费量由 2005 年的 6 506 万 t 标准煤逐年上升到 2022 年的 15 882.66 万 t 标准煤, 年均增长率为 5.6%。②安徽省能源消费逐年增长率呈下降趋势。研究期间, 能源消费逐年增长率大体由 2005 年的 8.13% 下降到 2022 年的 3.52%。

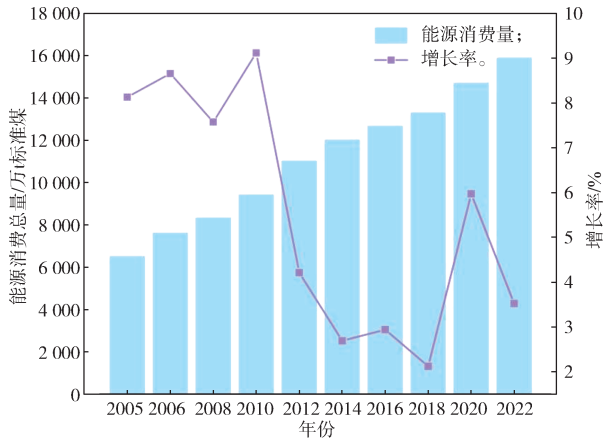


图 1 安徽省能源消费总量变化趋势图

Fig. 1 Trend chart of total energy consumption in Anhui Province

2) 安徽省能源消费量呈现“一煤独大”现象。在能源领域, 能源消费结构反映了不同能源品种在能源消费总量中的相对重要性。具体而言, 这一概念涵盖了煤炭、石油、天然气、一次电力以及其他能源形式在能源总需求中的比例。

依据安徽省历年统计年鉴数据, 可绘制出 2005—2022 年安徽省能源消费结构堆积图, 如图 2 所示。

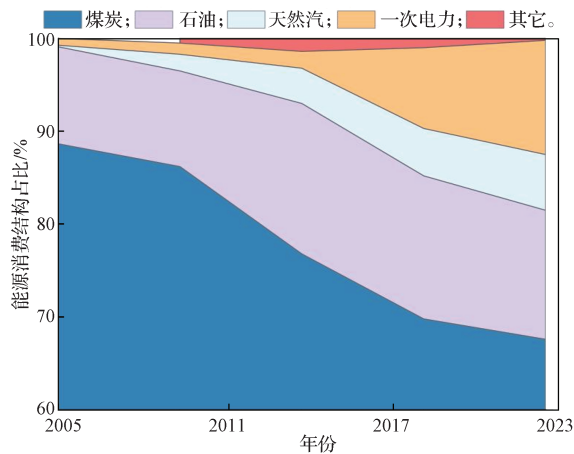


图 2 安徽省 2005—2022 年能源消费结构百分比堆积面积图

Fig. 2 Percentage stacked area of energy consumption structure in Anhui Province, 2005—2022

由图 2 可知: ① 2022 年安徽省能源消费结构中煤炭消费占比为 67.6%, 同期我国煤炭在能源消费中的占比为 56.8%, 两者之间存在较大的差距; ②研究期间, 安徽省煤炭消费占比一直保持在能源消费总量的 2/3 以上, 给安徽省“碳中和、碳达峰”带来严峻挑战。因此安徽省要想实现双碳目标, 亟须优化

能源消费结构并促进煤炭的清洁利用; ③清洁能源比例呈逐年上升趋势。研究期间, 安徽省清洁能源在消费结构中占比呈逐年上升趋势, 由 2005 年的 0.9% 逐步上升到 2022 年的 18.5%。

3) 人均能源消费量低, 消费潜力大。近年来, 安徽省经济的迅猛增长带动了能源消费需求的显著增加, 年均增长率达 5.6% (参见图 1)。然而, 通过横向对比分析发现, 安徽省的人均能源消费量不仅显著低于该地区的其他省份, 并且未达到全国平均消费水平。

查阅国家统计局官网 (<https://www.stats.gov.cn/>) 相关数据, 绘制出人均能源消费量表, 计量单位为 t 标准煤/人, 如表 1 所示。

表 1 安徽省人均能源消费量与上海等对比情况表

Table 1 Comparison table of per capita energy consumption between Anhui and Shanghai, and other provinces

年度	安徽	上海	江苏	浙江	全国 (安徽/全国)/%	
2005	1.06	4.09	2.26	2.41	2.00	53.00
2010	1.58	4.45	3.28	3.10	2.69	58.74
2015	2.05	4.45	3.65	3.28	3.14	65.29
2020	2.41	4.46	3.85	3.81	3.53	68.22
2022	2.59	4.42	4.21	4.43	3.83	67.62

由表 1 可知: ① 2022 年安徽省人均能源消费量为 2.59 t 标准煤, 低于长三角兄弟省份, 仅约为全国平均水平的 67.62%, 上海的 58.60%、江苏的 61.52% 和浙江的 58.47%。由此可见安徽省人均能源消费量较低, 消费潜力较大; ②在研究过程中发现, 随着安徽省居民的生活水平逐渐提升, 该省的人均能源消耗量也呈现出稳定的增长趋势。展望未来, 预计随着安徽省经济的持续增长和居民生活质量的进一步提升, 该省的人均能源消费量将会显著增加, 逐渐缩小与长三角地区其他省份以及全国平均水平之间的差距。

4) 安徽省能源强度低于全国平均水平。能源强度^[19]也称单位产值能耗或能源密集度, 通常以单位 GDP 耗能量表示。能源强度是衡量一个经济体对能源依赖性的关键指标。当能源强度较高时, 意味着经济活动对能源的依赖性较强; 反之, 则低。

为消除物价上涨因素对 GDP 的影响, 本节采用 GDP 指数 ($G_{1978}=100$), 即以 1978 年作为不变价基期, 分别对 2005—2022 年安徽省和全国的能源强度进行计算, 计量单位为 t 标准煤/万元, 计算结果如图 3 所示。

由图 3 可知: ① 2022 年, 安徽省能源强度为 0.36, 相当于全国的 78.26%。表明安徽省每创造 1 万元

GDP, 需要消费 0.36 t 标准煤; ②从纵向看, 随着技术的发展, 安徽省能源强度呈逐年下降趋势。能源结构的优化, 特别是可再生能源的快速发展, 提高了能源利用效率。2005 年能源强度为 1.27, 逐年下降到 2022 年的 0.36, 能源强度不断降低, 说明经济增长对能源的依赖程度降低, 进一步印证了安徽省在能源利用效率和节能降耗方面取得了显著成效。

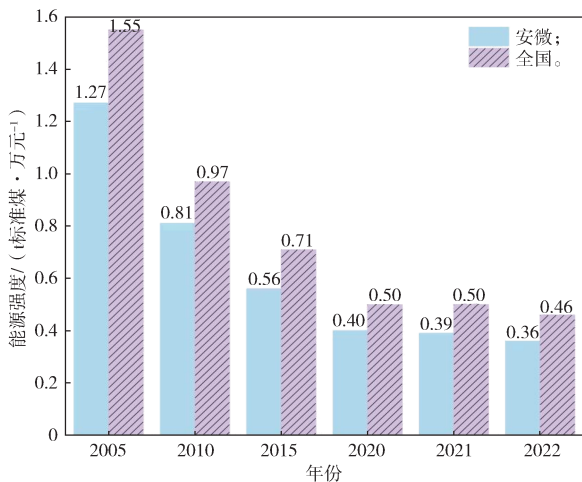


图3 安徽省与全国能源强度对比图

Fig. 3 Energy intensity comparison between Anhui Province and other provinces in China

5) 安徽省能源消费弹性系数大。能源消费弹性系数^[20]是能源消费增速与经济发展速度之比, 是评价一个国家能源消费与经济发展关联性的指标之一, 其波动反映了经济增长变化与能源消费变化之间的关系。能源消费弹性系数越高, 表明经济发展对能源消耗的依存度越高。

其计算公式为

$$e = \frac{\Delta E/E}{\Delta G/G} = \frac{\Delta E}{\Delta G} \cdot \frac{G}{E} \quad (1)$$

式中: e 为能源消费弹性系数; E 为能源消费量; G 为 GDP; ΔE 为能源消费增量; ΔG 为 GDP 增量。

查阅《中国能源统计年鉴》《安徽统计年鉴》, 绘制能源消费弹性系数对比图, 如图4所示。

由图4可知: ①2022年, 安徽省能源消费弹性系数 ($e=1$) 高于全国水平 ($e=0.97$), 表明安徽省经济每增加1%, 所消耗的能源量高于全国平均水平, 安徽省的经济发展模式依然处于相对粗放的发展阶段; ②研究期间, 安徽省能源消费弹性系数的变化具有波动性。2005—2011年, 该省经济增长与能源消费之间的关联性显得尤为紧密。然而, 2013—2021年, 能源消费弹性系数显著降低。除了2021年由于新冠疫情的冲击导致该系数有所反弹外, 其余年份均保持在0.6以下。特别值得注意的是, 在2015年, 全国

和安徽省的能源消费弹性系数分别降至0.19和0.31, 反映出—个较低的水平。之后随着产业结构的不断优化和能源使用效率的提高, 经济增长对能源消耗的依赖性逐渐减弱, 能源消费与经济增长开始显现出脱钩的趋势。

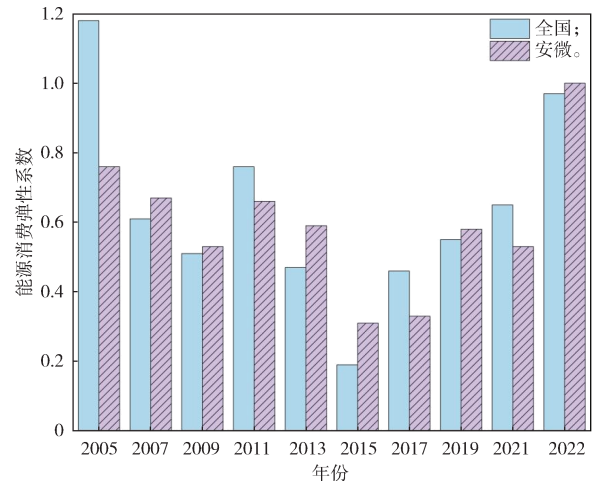


图4 安徽省与全国能源消费弹性系数对比图

Fig. 4 Comparison chart of energy consumption elasticity coefficients between Anhui Province and other provinces in China

2 安徽省能源预测研究

能源是经济发展的物质基础。由于安徽省具有能源消费量持续上涨、人均能源消费力巨大、能源消费强度低、能源消费对外依赖度高等特点, 因此加强安徽省能源需求量预测意义重大。

2.1 研究方法

GM(1, 1) 模型, 作为灰色系统理论衍生的预测模型, 在对“小样本”和“信息不足”的不确定性问题进行短期预测时, 展现出显著优势。马尔可夫模型 (Markov model) 是一种通过分析系统状态的初始概率分布以及状态之间的转移概率预测模型, 适用于样本数量较少、预测周期较短、波动性较小的系统。本研究针对安徽省“十五五”期间的能源需求量进行预测, 属于短期预测。能源需求受多种因素影响, 属于灰色决策系统, 适合采用 GM(1, 1) 模型预测; 同时, 安徽省 2005—2022 年间能源需求量持续增长、波动不大, 也适合采用马尔可夫模型预测。因此, 为了提高预测精度, 本研究构建灰色马尔可夫组合模型进行预测。

2.1.1 GM(1, 1) 模型构建

步骤1 首先选取等时距且相连的原始数据序列

$X^{(0)} = \{X_{(k)}^{(0)}, i=1, 2, \dots, n\}$, 对其进行可行性分析验证是否适合建模。通过可行性分析后, 对其进行一次累

加生成处理,生成一个新的、规律性的序列,称作一次累加生成序列(1-AGO序列):

$$X^{(1)} = \{X_{(k)}^{(1)}, j=1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$

步骤2 对 $X^{(1)}$ 建立一阶白化微分方程 GM(1, 1):

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b. \quad (3)$$

步骤3 根据最小二乘法原理计算出 a 、 b 两个参数。同时,得到灰色预测模型:

$$\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = \left[X_{(0)}^{(1)} - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} = \left[X_{(1)}^{(0)} - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a}. \quad (4)$$

2.1.2 Grey-Markov 模型构建

Grey-Markov 模型的构建步骤如下:

1) 数据收集与初步预测。目标数据通过上述 GM(1, 1) 模型得到初步的预测值 $\hat{X}^{(0)}$ 。

2) 划分马尔可夫状态。依据数据量和预测误差的可接受范围,将预测误差划分为 n 个不同的状态区间 $E_i = [e_{1i}, e_{2i}]$, e_{1i} 、 e_{2i} 分别为区间的最小值和最大值。

3) 构建状态转移概率矩阵。记 m_{ij} 为状态 E_i 经过 k 步转移到状态 E_j 的频数, M_i 为状态 E_i 出现的总频数,状态转移概率矩阵元素为

$$P_{ij} = P(E_{ij} / E_i) = P(E_i \rightarrow E_j) = m_{ij} / M_i.$$

4) 计算马尔可夫预测值。已知所属状态 E_i 的状态区间,结合灰色预测值 $\hat{X}^{(0)}$,灰色马尔可夫预测表达式为

$$Y = \frac{\hat{X}_{(k)}^{(0)}}{1 \pm 0.5 * (e_{1i}, e_{2i})}. \quad (5)$$

式中:若实际值 < 灰色预测值,分母中符号取+;若实际值 > 灰色预测值,分母中符号取-;若相等则不对其进行优化修正。

2.1.3 预测模型检验

根据邓聚龙教授在其著作《灰色理论基础》^[21]中的阐述,GM(1, 1)模型的预测准确性通过残差检验、后验差检验以及小误差概率3种方法检验,并根据表2预测模型精度分级判断模型是否符合标准。

表2 预测模型精度分级

Table 2 Prediction model accuracy grading

模型精度等级	平均相对残差	标准差比值 C	小误差概率 $P/\%$
1级(优秀)	0.01	$C \leq 0.35$	$P \geq 0.95$
2级(良好)	0.05	$0.35 < C \leq 0.5$	$0.80 \leq P < 0.95$
3级(合格)	0.10	$0.5 < C \leq 0.65$	$0.70 \leq P < 0.80$
4级(不合格)	0.20	$0.65 < C$	$P < 0.70$

2.2 研究过程

本研究选取安徽省2015—2022年能源需求总量

数据作为原始序列,建立 GM(1, 1) 预测模型,对安徽省“十五五”期间能源消费量进行预测。预测及检验过程如下。

2.2.1 模型构建

依据上述模型构建过程,以2015—2022年安徽省能源需求总量数据为基础,通过灰色预测模型,利用 Matlab 软件进行处理,确定模型的时间响应式,求出 GM(1, 1) 预测模型,为

$$\hat{X}_{(k+1)}^{(1)} = 305\ 532e^{0.04k} - 293\ 231.25. \quad (6)$$

由式(6)可得,式(4)中的参数: $a=-0.04$;
 $b=11\ 729.25$ 。

2.2.2 精度检验

1) 残差检验。根据上述 GM(1, 1) 预测模型对2015—2022年安徽省能源需求总量进行预测,首先计算出 $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)}$,其次将 $\hat{X}_{(k+1)}^{(1)}$ 累减生成 $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$,最后计算原始序列 $X_{(k)}^{(0)}$ 和 $\hat{X}_{(k)}^{(0)}$ 的残差序列,结果见表3。

表3 2015—2022年能源需求总量的灰色模型的预测结果
Table 3 Forecast results of the gray model for total energy demand, 2015—2022 万 t 标准煤

年份	实际值	预测值	残差	相对误差
2015	12 301.23	12 301.23	0	0
2016	12 662.89	12 469.23	193.66	0.015 3
2017	13 018.71	12 978.25	40.46	0.003 1
2018	13 294.71	13 508.06	-213.35	-0.016 0
2020	14 679.90	14 633.43	46.47	0.003 2
2021	15 342.63	15 230.80	111.83	0.007 3
2022	15 882.66	15 852.56	30.10	0.001 9

由表3的验算结果,进一步计算出模型的平均相对残差 $\varepsilon_{\text{avg}}=0.008\ 6$,对比表2预测模型精度分级表可知 $0.008\ 6 < 0.01$,表明预测精度等级达到1级(优秀)。

2) 后验差检验和小误差概率。经计算得出 $S_1=1\ 300.49$, $S_2=139.49$,后验差比 $C=0.107$, $0.674\ 5S_1=877.18$ 。 $\left| \Delta_{(k)}^{(0)} - \bar{\Delta}^{(0)} \right| = \{2.426, 191.234, 38.034, 215.776,$

$192.186, 44.044, 109.404\}$,小误差概率为 $P = P\left\{ \left| \Delta_{(k)}^{(0)} - \bar{\Delta}^{(0)} \right| < 0.674\ 5S_1 \right\} = 1$,所以标准差比值和小误差概率均为1级,模型精度为优。

2.2.3 优化修正

观察2015—2022年安徽省能源需求总量的灰色预测模型的预测值和实际值,发现两者之间仍存在一定的差距,因此采用马尔可夫链优化 GM(1, 1) 模型,进一步提高安徽省能源需求量的预测精度。

马尔可夫优化过程如下:

1) 划分状态。对灰色 GM(1, 1) 预测残差相对误差进行划分, 由表 3 可以看出相对误差范围为 -0.02~0.02, 故将该区间划分为 3 个状态:

$$E_1=[-0.02, -0.01), E_2=[0, 0.01), E_3=[0.01, 0.02)。$$

结合状态区间的划分和相对误差的结果, 对 2015—2022 年各年能源需求总量所处状态进行划分, 具体如表 4 所示。

表 4 2015—2022 年各年能源需求总量所处状态
Table 4 Total energy demand per year, 2015—2022

年份	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
状态	E_2	E_3	E_2	E_1	E_1	E_2	E_2	E_2

2) 转移概率的计算。结合上述状态划分区间, 计算出一步概率转移矩阵 $P^{(1)}$ 为

$$P^{(1)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}。$$

3) 预测及修正。通过一步转移概率矩阵 $P^{(1)}$ 和 GM(1, 1) 模型的预测值, 将其与 2015—2022 年度状态数据相结合, 对上述 GM(1, 1) 模型的预测结果进行马尔可夫修正, 修正结果如表 5 所示。

观察表 5 所示修正结果和图 5 所示拟合曲线发现: 预测结果的平均相对误差由 0.86% 降低到 0.17%。通过马尔可夫链的修正, 使得预测精度更高, 证明了灰色马尔可夫组合模型可以很好地运用到安徽省能源需求量的短期预测上。

表 5 2015—2022 年 GM(1, 1) 预测及马尔可夫修正结果对比
Table 5 Comparison of GM(1, 1) forecast and Markov correction results, 2015—2022

年份	原始值	GM(1,1) 预测结果	GM(1,1) 预测 相对误差 /%	马尔可夫 修正结果	马尔可夫修正结 果相对误差 /%
2015	12 301.23	12 301.23	0	12 301.23	0
2016	12 662.89	12 469.23	1.53	12 659.12	0.03
2017	13 018.71	12 978.25	0.31	13 043.47	0.19
2018	13 294.71	13 508.06	1.60	13 308.43	0.10
2019	13 869.73	14 059.49	1.37	13 851.71	0.13
2020	14 679.90	14 633.43	0.32	14 706.96	0.18
2021	15 342.63	15 230.80	0.73	15 307.34	0.23
2022	15 882.66	15 852.56	0.19	15 932.22	0.31
平均相对误差			0.86		0.17

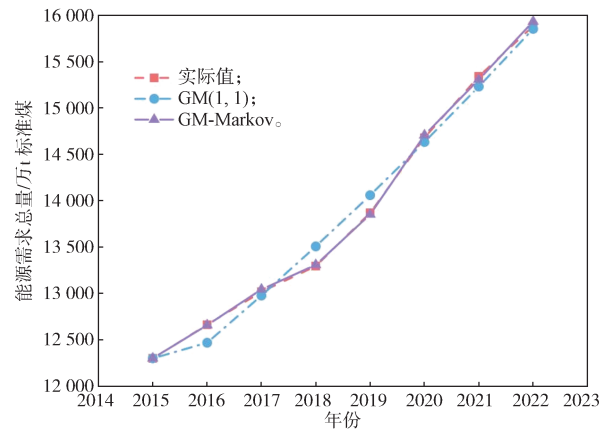


图 5 两种模型预测值与实际值的拟合曲线图

Fig. 5 Fitting curves of the predicted and actual values of the two models

2.2.4 趋势预测

运用灰色马尔可夫组合模型进一步对 2023—2030 年安徽省能源需求总量进行预测, 如表 6 所示。

表 6 2023—2030 年安徽省的能源需求总量预测结果

Table 6 Forecast results of total energy demand in Anhui Province, 2023—2030

年份	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
GM(1,1) 结果	16 499.70	17 173.25	17 874.31	18 603.98	19 363.44	20 153.90	20 976.63	21 832.95
马尔可夫修正结果	16 417.61	17 087.81	17 785.38	18 511.42	19 267.10	20 053.13	20 871.75	21 723.79

表 6 中的数据表明, 在“十四五”“十五五”规划期间, 安徽省能源需求总量仍在继续增长, 2023 年为 16 417.61 万 t 标准煤, 2030 年增长到 21 723.79 万 t 标准煤。

3 结论与建议

3.1 结论

1) 研究期间, 安徽省能源消费具有如下 5 个特征: ①能源消费总量逐年上升; ②能源结构煤炭“一

煤独大”; ③人均能源消费量低, 需求潜力大; ④能源强度低于全国平均水平; ⑤能源消费弹性大。

2) 通过组合预测表明, 安徽省未来能源消费量将持续上涨, 预测 2025 年和 2030 年的能源消费总量分别达到 17 785.38 万 t 标准煤和 21 723.79 万 t 标准煤。与 2022 年的 15 882.66 万 t 标准煤相比, 分别约增长 12.0% 和 36.8%, 增长迅速。安徽省未来能源问题依然严峻, 必须采取相应措施, 改变“一煤独大”的能源消费现状。

3) 构建的灰色马尔可夫组合模型, 预测精度达到 1 级(优秀), 预测误差仅为 0.17%。预测结果与实际值的高拟合度表明, 将其应用于能源需求预测是切实可行且高效的, 可为安徽省制定合理的能源战略规划提供科学依据。

3.2 建议

1) 大力发展清洁能源。鉴于煤炭在安徽省能源消费中的高比例, 降低其在能源结构中的比例是控制能源消费总量的关键。皖北地区应利用其地理优势, 大力发展风能和太阳能。同时, 皖南地区可借助其充沛的水能资源, 融合人工智能技术、云技术及大数据分析等前沿科技, 促进智能水利系统的构建与发展。

2) 提高能源利用效率。提高能源利用效率是减少能源消费的关键途径。安徽省在能源转换和加工方面的效率较低, 应专注于能源消耗行业和领域, 深化对钢铁、石油化工等关键行业的节能潜力挖掘, 并促进数据中心的绿色升级。同时, 应鼓励企业采用节能技术, 逐步实现能源转换技术的改造和升级, 以提高能源加工转换的效率。

3) 加强地区能源合作。通过“西电东输”“西煤东运”等工程, 缓解安徽省能源供需矛盾, 更好地发挥安徽省供给基地和能源枢纽的作用; 同时, 还可以通过跨区域互联互通等方式, 实现能源资源的优势互补, 推动能源的协调发展。

4) 加大科技创新力度。加强安徽省深部煤炭开采技术的研发, 培育出具有产业带动力、创新引领力、市场主导力的主导型企业; 同时储备各类能源技术与管理人才, 加强关键核心技术攻关和技术成果转化应用, 加大科研投入, 更好地服务安徽省能源管理工业。

5) 政府加大监管力度。政府应优化能源消耗强度和总量的双重管控机制, 全面提升能源管理效率。同时, 应加大节能审查的监管力度, 确保能源目标的实现。通过技术手段和信息化提升能源管理的智能化水平, 并推动重点领域的节能降碳改造。此外, 建立激励和补偿机制, 以确保能源发展与环境保护的和谐, 促进能源行业的规范化和可持续发展。

参考文献:

- [1] 杨明, 杜萍静, 刘凤全, 等. 能源消费发展及预测方法综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(1): 56-62, 71.
YANG Ming, DU Pingjing, LIU Fengquan, et al. Review of Energy Consumption and Demand Forecasting Methods[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(1): 56-62, 71.
- [2] 李坦, 陈天宇, 范玉楼, 等. 安徽省能源消费碳排放的影响因素、产业差异及预测[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1494-1503.
LI Tan, CHEN Tianyu, FAN Yulou, et al. Influencing Factors, Industry Differences and Forecast of Carbon Emission of Energy Consumption in Anhui Province[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1494-1503.
- [3] 王新安, 张亚杰, 王羲. 基于 ARIMA 模型的陕西省能源消费及其控制研究[J]. 西安石油大学学报(社会科学版), 2018, 27(3): 8-14, 19.
WANG Xin'an, ZHANG Yajie, WANG Xi. Research on the Energy Consumption and Control in Shaanxi Province Based on ARIMA Model[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition), 2018, 27(3): 8-14, 19.
- [4] 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.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the Energy Consumption and Coal Demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [5] 何峙铨, 董延佳. 基于改进 GM(1, 1) 模型的我国能源消费总量预测[J]. 节能, 2024, 43(1): 89-91.
HE Zhiqian, DONG Yanjia. Prediction of China's Total Energy Consumption Based on Improved GM(1, 1) Model[J]. Energy Conservation, 2024, 43(1): 89-91.
- [6] MING X X, WANG Q, LUO K, et al. An Integrated Economic, Energy, and Environmental Analysis to Optimize Evaluation of Carbon Reduction Strategies at the Regional Level: A Case Study in Zhejiang, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119742.
- [7] 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 Shanshan, MA Yuqing, KONG Weiling, et al. Energy Demand and Carbon Emission Prediction in Anhui Province Based on LEAP Model[J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4911-4922.
- [8] 陈晖, 蔡宇涵, 谢伦裕. 区域能源消费总量与结构的预测方法研究: 基于广东省相关数据的分析[J]. 价格理论与实践, 2020(5): 161-164, 176.
CHEN Hui, CAI Yuhuan, XIE Lunyu. Prediction of Regional Energy Consumption and Structure: Take Guangdong Province as an Example[J]. Price (Theory & Practice), 2020(5): 161-164, 176.
- [9] 李红霞, 张祥成, 李芳, 等. 清洁能源示范省建设背景下青海能源需求预测及清洁化发展对策[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 1-10, 26.
LI Hongxia, ZHANG Xiangcheng, LI Fang, et al.

- Qinghai Energy Demand Forecasting and Development Strategy Research Under the Background of Construction of Clean Energy Demonstration Province[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 1-10, 26.
- [10] 任继勤, 夏景阳, 殷悦. 基于改进的BP神经网络和马尔科夫模型的一次能源消费预测: 以北京市为例[J]. *生态经济*, 2017, 33(11): 28-33.
REN Jiqin, XIA Jingyang, YIN Yue. The Prediction of Primary Energy Consumption Based on Improved BP Neural Network and Markov Model: A Case Study of Beijing[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 28-33.
- [11] XIE N M, YUAN C Q, YANG Y J. Forecasting China's Energy Demand and Self-Sufficiency Rate by Grey Forecasting Model and Markov Model[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 66: 1-8.
- [12] JIA Z Q, ZHOU Z F, ZHANG H J, et al. Forecast of Coal Consumption in Gansu Province Based on Grey-Markov Chain Model[J]. *Energy*, 2020, 199: 117444.
- [13] DUAN H M, HE C L, PU S W. A New Circular Neural Grey Model and Its Application to CO₂ Emissions in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 445: 141318.
- [14] XIA L, REN Y Y, WANG Y H. Forecasting China's Total Renewable Energy Capacity Using a Novel Dynamic Fractional Order Discrete Grey Model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 239: 122019.
- [15] CHENG M L, LIU Y, LI J N. A New Modeling Method of Gray GM (1, N) Model and Its Application to Predicting China's Clean Energy Consumption[J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2023, 52(8): 3712-3723.
- [16] WANG H P, ZHANG Z. Forecasting Per Capita Energy Consumption in China Using a Spatial Discrete Grey Prediction Model[J]. *Systems*, 2023, 11(6): 285.
- [17] 梁秀兰, 欧善国, 潘蔚娟. 基于灰色马尔科夫模型的广东春旱预测[J]. *广东气象*, 2023, 45(6): 88-91.
LIANG Xiulan, OU Shanguo, PAN Weijuan. Prediction of Spring Drought in Guangdong Province Based on Grey Markov Model[J]. *Guangdong Meteorology*, 2023, 45(6): 88-91.
- [18] 仲纹岐. 基于灰色马尔可夫模型的昆明市能源消费量预测[J]. *时代金融*, 2018(12): 175-177.
ZHONG Wenqi. Prediction of Energy Consumption in Kunming Based on Grey Markov Model[J]. *Times Finance*, 2018(12): 175-177.
- [19] 魏一鸣, 焦建玲, 廖华. 能源经济学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 3.
WEI Yiming, JIAO Jianling, LIAO Hua. *Energy Economics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 3.
- [20] 刘卫东, 仲伟周, 石清. 2020年中国能源消费总量预测: 基于定基能源消费弹性系数法[J]. *资源科学*, 2016, 38(4): 658-664.
LIU Weidong, ZHONG Weizhou, SHI Qing. Forecast of China's Total Energy Consumption in 2020 Based on Method of Fixed Base Energy Consumption Elasticity Coefficient[J]. *Resources Science*, 2016, 38(4): 658-664.
- [21] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 125-127.
DENG Julong. *Basis of Grey Theory*[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 125-127.

(责任编辑: 申剑)