

引文: 杜学平, 郎智凯, 柳梦琳, 等. 中国经济驱动型省级天然气负荷的预测模型[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1184-1192, 1200.

DU Xueping, LANG Zhikai, LIU Menglin, et al. Prediction model for economy-driven provincial natural gas load in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1184-1192, 1200.

中国经济驱动型省级天然气负荷的预测模型

杜学平^{1,2} 郎智凯¹ 柳梦琳¹ 吴江涛¹

1. 西安交通大学能源与动力工程学院; 2. 北京控股集团有限公司

摘要: 为解决省级天然气规划中发展目标的合理确立与发展潜力的比较问题, 开展天然气负荷预测模型的创新探索。通过数据归类、相关性分析以及与发达国家的对标分析, 利用曲面拟合方法建立了中国经济驱动型省级天然气负荷中长期预测模型, 绘制了天然气消费潜力、GDP 以及一次能源消费的三维坐标系, 选取南方 10 个省/直辖市为研究对象, 定量分析了各省/直辖市 2030 年天然气消费需求。结果表明: 未来天然气需求旺盛, 在 GDP 复合增长率为 5% 情景下, 10 个省/直辖市在 2030 年天然气需求总量达 $3.155 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是 2021 年的 2.5 倍, 其中消费绝对增量与增速最大的分别为广东省、湖南省。研究结果可为天然气市场调节与发展提供参考。(图 9, 表 7, 参 23)

关键词: 天然气消费; 负荷预测; 影响因素; 曲面拟合; 省级能源规划

中图分类号: TK01+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1184-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.012

Prediction model for economy-driven provincial natural gas load in China

DU Xueping^{1,2}, LANG Zhikai¹, LIU Menglin¹, WU Jiangtao¹

1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University; 2. Beijing Enterprises Group Company Limited

Abstract: In order to reasonably establish the objectives and compare the potential of development in provincial natural gas planning, innovative exploration was carried out for the natural gas load prediction model. Through data classification, correlation analysis and benchmarking analysis with the developed countries, the medium- and long-term prediction model of economy-driven provincial natural gas load in China was established by the surface fitting method. Meanwhile, the three-dimensional coordinate system of natural gas consumption potential, GDP and primary energy consumption was drawn. Ten southern provinces (municipalities directly under the Central Government) were selected as the research subjects to quantitatively analyze the natural gas consumption demand in 2030. The results indicate that there is a strong demand for natural gas in the future. Under the scenario of a compound GDP growth rate of 5%, the total demand for natural gas in the ten provinces (municipalities directly under the Central Government) will reach $3.155 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2030, which is 2.5 times that of 2021. Among them, Guangdong Province and Hunan Province have the largest absolute increase and the highest growth rate of consumption, respectively. Generally, the research results could provide reference for the market regulation and development of natural gas. (9 Figures, 7 Tables, 23 References)

Key words: natural gas consumption, load prediction, influencing factors, surface fitting, provincial energy planning

随着“双碳”目标的提出, 迫切要求中国加快构建清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系^[1]。天然气作为一种优质、低碳的一次能源^[2], 将在中国未来的绿色能源低碳转型中发挥重要作用^[3]。然而, 中国不同地区的天然气资源及消费水平存在明显差异^[4]。其中, 南方(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、海南, 不包括港澳台地区)^[5] 10 个省/市 2021 年

天然气消费量占全国消费总量的 34%, 而产量仅占全国总量的 7%^[6]。地区间天然气生产与消费的不均衡、不匹配也决定了不能简单地以全国平均指标框定各地区发展目标^[7]。基于此, 为解决区域天然气发展规划中目标合理确立的问题, 建立中国经济驱动型省级天然气负荷预测模型, 通过与发达国家对标分析、数值拟合可视化处理对各省/直辖市的天然气消费发展趋势与需求

量进行预测,以期对相关省份天然气的产供销体系建设与精准施策提供数据支撑,助力中国天然气产业整体布局“平稳有序、供需均衡”。

1 中国天然气需求现状及负荷预测

1.1 需求分析

1.1.1 市场需求旺盛

近年来,中国天然气消费量不断上升,由2010年的 $1\ 080 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至2021年的 $3\ 726 \times 10^8 \text{ m}^3$,年复合增长率高达11.9%^[6]。2021年,天然气在中国能源消费中占比上升至8.9%^[6](图1,数据来源于《中国统计年鉴》),但这一比例仍落后于世界一次能源消费结构中24.7%的天然气占比^[8]。因此,随着节能减排与清洁能源战略部署的大力推进^[9],进一步提高天然气消费占比已成为国家能源发展的重要路径。根据《中国天然气发展报告(2021)》^[10]预测,2030年中国天然气消费量将达到 $(5\ 500 \sim 6\ 000) \times 10^8 \text{ m}^3$ (复合增长率5.1%~6.1%)。

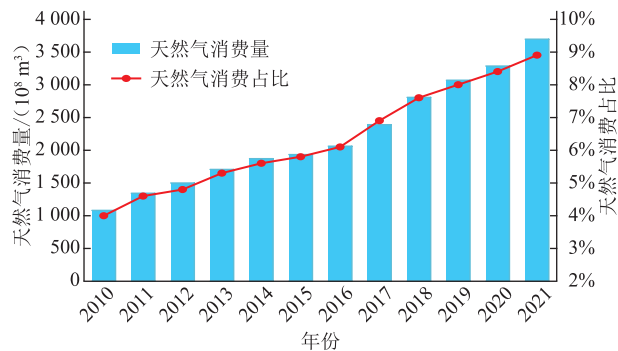


图1 2010—2021年中国天然气市场消费量变化图
Fig. 1 Current situation of natural gas market consumption in China from 2010 to 2021

1.1.2 地区间分布不均匀

中国各省份的天然气消费情况存在明显差异(图2,数据来源于《中国统计年鉴》)。对于不同区域的天然气市场,影响需求潜力的因素可能各不相同。为对比区域间的消费潜力差异,需要进行市场分类与共性因素判断。结果表明,中国天然气市场可分为3类^[5]:北方“煤改气”政策驱动型、南方经济驱动型以及西部资源驱动型。其中,北方(北京、河北、天津、辽宁、山西、黑龙江、吉林、山东、河南)^[5]地区受“煤改气”等环保政策的进一步驱动,天然气消费需求不断增长,冬季采暖需求潜力仍有待探究;南方(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、海南)地区近年来经济增长较快,制造业迅速发展,城市化进程不断加快,天然气消费需求有进一步扩大的

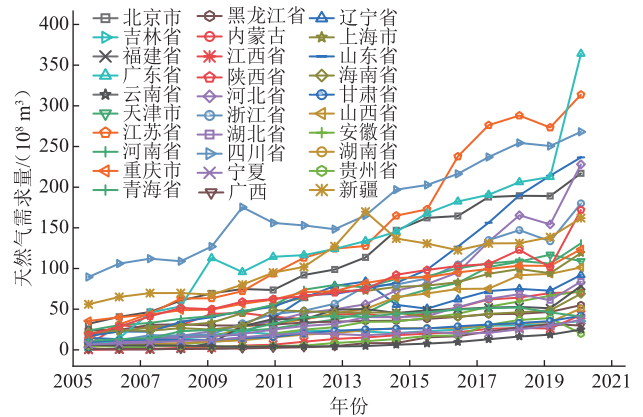


图2 2005—2021年中国部分省/直辖市天然气消费曲线(不包含港澳台与西藏)

Fig. 2 Natural gas consumption curve of various provinces and cities in China from 2005 to 2021 (excluding Hong Kong, Macao, Taiwan and Tibet)

趋势;西部(新疆、陕西、青海、甘肃、宁夏、西藏、四川、重庆、广西、云南、贵州、内蒙古)^[5]部分地区由于天然气资源较丰富或更靠近管道天然气进口端,因此具有发展天然气产业链的先天优势。这种分类很好地将天然气生产型区域(西部)与天然气消费型区域(包括北方、南方)相区别,同时基于相关性因素的优化结果与模型的实用性因素,选取中国南方地区10个省/直辖市为研究对象,重点分析经济环境与天然气消费之间的定量关系。

1.2 负荷预测

能源需求负荷预测是能源供需管理的理论前提^[11]。目前,天然气负荷预测的模型与方法较为多元化^[12]。叶志宏等^[13]改进传统灰色系统GM(1,1)模型,建立灰色残差GM(1,1)模型,对中国天然气需求量进行了预测;Zhu等^[14]利用残差自回归模型对中国天然气需求量进行了预测;Khani等^[15]提出了一种基于时间序列的在线校准模型,并基于历史数据实现天然气需求量预测;穆献中等^[16]建立天然气供需系统动力学模型,对2015—2035年中国天然气供应量、消费量、净进口量、对外依存度以及二氧化碳排放量等进行了预测;Szoplik^[17]利用人工神经网络模型,分析并预测了Szczecin的天然气消费量的变化趋势;李哲等^[18]利用多项式分析理论,建立中国天然气消费需求预测模型,并进行了预测分析。

中国现有天然气负荷预测研究集中体现于对中国整体的天然气未来需求量所采取的预测分析^[13-14,16,18],也有部分学者对省、市以及地区天然气需求进行了预测。李洪兵等^[19]采用逐步回归的方法对川渝天然气需求进行了预测;杨义等^[20]采用项目调查分析法对延边州未来天然气需求量进行了预测;秦步文等^[21-22]建立了天

然气需求组合预测模型对中国城市未来天然气需求量进行分析;王建良等^[23]对中国中、东、西3个地区天然气影响因素与未来需求量分别进行了研究与预测。

综上,现有预测模型多基于某地区视角下对天然气需求量进行预测,还有少量研究针对不同地区进行预测,但缺少在同一框架下对不同省份的对标分析。为此,基于区域一次能源消费与GDP经济共性因素构建了天然气消费三维坐标定位体系,将中国天然气市场进行细分,并利用非线性曲面拟合方法针对南方经济驱动型省/直辖市的天然气负荷进行建模分析与预测。三维曲面拟合模型可视化性强,预测结果更直观,同时模型函数关系更简洁,方法易于推广应用,可避免多元回归中的多重共线性问题(多重共线性是指多元回归分析模型中解释变量之间由于存在精确相关关系或高度相关关系而使模型估计失真或难以估计准确。模型纳入更多的相关性因素,并不能保证更精确的预测结果)。

2 数据归类

2.1 国内数据的分类

在预测中长期负荷(天然气消费量)时,一般需进行数据归类。一方面剔除干扰、减小误差,另一方面能够从其他数据集中发掘相似数据,延展数据集的范围,从而扩大拟合方程(模型)的应用范围。共性因素与主要影响因素的确定是进行跨区域对比的关键。相关学者通过调研天然气需求影响因素,发现天然气消费与经济发展密切相关^[23],GDP是影响消费型区域未来天然气

需求量的重要因素;此外,一次能源消费量对天然气需求具有重要影响,且天然气在一次能源消费中的比例也是天然气规划中的重要指标,因此选取一次能源消费量作为另一影响因素。为进行中长期预测,选取了2005—2021年中国南方10个省/直辖市及其他一些省级区域的天然气消费数据绘制了中国部分省(直辖市)天然气消费量气泡图(图3)。图中气泡大小代表该地区天然气消费量需求的多少。由图3可知中国能源需求地区差异大,如果不进行数据归类,则以省(直辖市)为单位的负荷点散落范围大,难以发现明显的递变规律建立模型。此外,由于西部资源型、北方政策驱动型省/市的天然气供需格局与南方省/市差别较明显,经试算前两者天然气消费与GDP、一次能源总量两个因素的相关性相对较弱,故在后续研究中剔除前两者地区数据,重点以南方10个省/直辖市(表1~表3)为例,分析经济驱动型区域的市场潜力,并建立了比较方法。

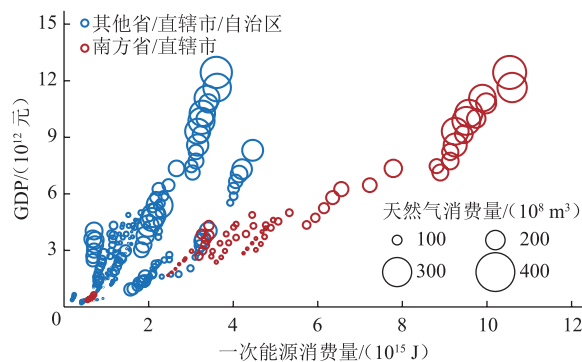


图3 中国部分省(直辖市)天然气消费量气泡图
Fig. 3 Bubble chart of natural gas consumption in some provinces (municipalities directly under the Central Government) of China

表1 2015—2021年中国南方10个省/直辖市及部分发达国家天然气消费量数据表

Table 1 Natural gas consumption data of ten southern China's provinces (municipalities directly under the Central Government) and some developed countries from 2015 to 2021

省/直辖市及部分发达国家	不同年份的天然气消费量/(10 ⁸ m ³)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
上海	77.41	79.04	83.23	93.49	99.40	94.84	98.35
江苏	165.02	172.73	237.69	276.21	288.06	280.38	302.92
浙江	80.35	87.78	104.93	134.91	147.20	142.48	179.88
安徽	34.83	39.18	44.37	53.01	59.64	67.13	60.98
福建	45.38	48.55	50.16	51.92	52.77	52.18	61.53
江西	18.02	20.04	21.73	25.93	26.96	27.81	37.60
湖北	40.26	41.50	49.96	62.70	68.46	61.40	71.00
湖南	26.51	28.32	26.98	30.47	32.90	40.21	48.60
广东	145.16	167.79	182.38	190.64	206.18	274.36	340.98
海南	46.00	41.29	43.45	44.27	46.15	50.03	55.63
法国	430.41	405.83	436.62	428.38	447.66	445.30	407.52
德国	905.30	871.13	892.83	858.51	877.38	848.85	769.54
西班牙	338.99	324.90	359.74	314.97	317.12	291.22	285.44
英国	769.48	730.30	776.86	785.66	785.49	806.74	720.45
日本	1 036.22	1 041.28	1 081.23	1 157.08	1 169.86	1 164.17	1 187.18

表 2 2015—2021 年中国南方 10 个省/直辖市及部分发达国家一次能源消费量数据表

Table 2 Primary energy consumption data in ten southern China's provinces (municipalities directly under the Central Government) and some developed countries from 2015 to 2021

省/直辖市及部分发达国家	不同年份的一次能源消费量/(10 ¹⁵ J)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
上海	3.19	3.28	3.34	3.37	3.42	3.25	3.42
江苏	8.90	9.13	9.25	9.25	9.51	9.57	10.60
浙江	5.74	5.94	6.15	6.35	6.56	7.23	7.79
安徽	3.60	3.72	3.81	3.89	4.07	4.30	4.48
福建	3.48	3.51	3.69	3.83	4.01	4.07	4.45
江西	2.46	2.55	2.63	2.72	2.84	2.87	3.01
湖北	4.54	4.65	4.74	4.89	5.06	4.77	5.33
湖南	4.24	4.33	4.45	4.54	4.68	4.77	4.95
广东	8.81	9.13	9.45	9.75	9.98	9.89	10.54
海南	0.56	0.59	0.61	0.64	0.67	0.67	0.70
法国	9.40	8.84	9.83	10.04	9.86	9.92	10.10
德国	12.62	12.35	13.29	13.64	13.99	13.82	13.58
西班牙	5.59	5.18	5.71	5.88	5.80	5.71	5.65
英国	7.17	7.05	7.84	8.05	8.08	8.11	8.20
日本	17.71	17.12	18.47	18.94	19.03	18.79	19.05

表 3 2015—2021 年中国南方 10 个省/直辖市及部分发达国家 GDP 数据表

Table 3 GDP data of ten southern China's provinces (municipalities directly under the Central Government) and some developed countries from 2015 to 2021

省/直辖市及部分发达国家	不同年份的 GDP/(10 ¹² 元)						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
上海	2.69	2.99	3.29	3.60	3.80	3.87	4.32
江苏	7.13	7.74	8.59	9.32	9.87	10.27	11.64
浙江	4.35	4.73	5.24	5.80	6.25	6.46	7.35
安徽	2.38	2.63	2.97	3.40	3.68	3.87	4.30
福建	2.68	2.96	3.38	3.87	4.23	4.39	4.88
江西	1.68	1.84	2.02	2.27	2.47	2.57	2.96
湖北	3.03	3.34	3.72	4.20	4.54	4.34	5.00
湖南	2.85	3.09	3.38	3.63	3.99	4.18	4.61
广东	7.47	8.22	9.16	9.99	10.80	11.08	12.44
海南	0.37	0.41	0.45	0.49	0.53	0.55	0.65
法国	18.95	17.95	18.76	18.38	17.44	16.38	15.20
德国	27.25	26.25	26.63	26.45	24.83	23.03	20.93
西班牙	9.20	8.84	9.59	9.44	8.85	8.18	7.47
英国	20.56	18.68	19.52	18.70	17.71	17.40	18.25
日本	31.85	34.82	35.04	32.89	32.90	32.81	27.34

2.2 国外数据的选取

在数据发掘或类比分析中,选取成熟的天然气消费市场作为参照系,能够相对便捷地确定发展目标。选取经济发展水平高且能源强度较低的发达国家作为经济驱动型省级天然气市场的愿景目标。因此,在世界 GDP 排名前二十名的国家中,基于以下主要特

征进一步确定对标对象:能源消费型地区,纬度与中国相近且存在明显季节性波动的能源需求,天然气供给主要依靠外部输入,可以同时利用或靠近 LNG 接收站、长输管道进口,用气结构具有一定的相似性,居民、工业及发电用气占比大,人口与国土面积与中国部分经济大省体量相当。结合行业经验,选取了法国、德国、英国、西班牙、日本作为中国南方部分省/直辖市天然气市场发展目标的参照系(表 1~表 3)。将中国南方部分省/直辖市与部分发达国家天然气消费量的数据进行归类(图 4)。

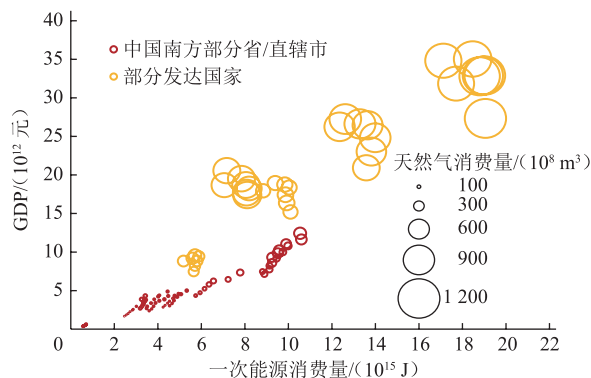


图 4 中国南方部分省(直辖市)与部分发达国家天然气消费量气泡图

Fig. 4 Bubble chart of natural gas consumption in some southern provinces (municipalities directly under the Central Government) of China and some developed countries

3 模型构建及求解

当采用最小二乘法进行曲面拟合求取曲面方程时,首先基于历史数据的分布趋势来选择合适的拟合曲面模型,进而通过对比不同曲面模型的拟合结果评价参数或实际拟合效果,最终选取拟合效果最好的曲面模型。

(1)确定多项式曲面方程。若高次多项式曲面方程的所有项都存在,则称之为规范化曲面方程。二元二次多项式曲面的规范化方程为:

$$z = z_0 + ax + by + cx^2 + dy^2 + fxy \quad (1)$$

式中: x 为一次能源消费量,10¹⁵ J; y 为 GDP,10¹² 元; z 为天然气消费量,10⁸ m³; z_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 f 均为待定系数。

(2)求解多项式曲面方程的待定系数。为使拟合曲面在各历史数据点位(x 、 y 、 z)处的真实值与预测值的误差平方和最小,定义二元二次多项式曲面模型的总误差 Q 为:

$$Q(z_0, a, b, c, d, f) =$$

$$\sum_{i=1}^n [z_i - (z_0 + ax_i + by_i + cx_i^2 + dy_i^2 + fx_i y_i)]^2 \quad (2)$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个历史数据点; n 为历史数据点的个数, 选取中国南方 10 个省/直辖市与 5 个发达国家 2015—2021 年历史数据, 共 105 个点位数据, 即 $n=1, 2, 3, \dots, 105$ 。

基于最小二乘法基本原理, 求解多项式曲面方程待定系数的原则是使曲面模型的总误差最小, 即求解六元函数的极值问题, 联立以下方程即可解得待定系数:

$$\begin{cases} \partial Q / \partial z_0 = 0, & \partial Q / \partial a = 0 \\ \partial Q / \partial b = 0, & \partial Q / \partial c = 0 \\ \partial Q / \partial d = 0, & \partial Q / \partial f = 0 \end{cases} \quad (3)$$

4 预测结果及分析

4.1 拟合结果

基于 2015—2021 年中国南方部分省/直辖市及选取的发达国家的历史数据, 进行二元二次曲面方程拟合求解, 可得拟合方程的系数及误差(表 4)。

表 4 二元二次曲面拟合方程系数及误差表
Table 4 Coefficients and errors of binary quadric surface fitting equations

系数	求解值	标准差
z_0	99.35	21.35
a	-97.63	11.34
b	75.45	5.19
c	8.79	1.68
d	0.48	0.46
f	-5.23	1.60

根据拟合结果可知一次能源消费量(x)、GDP(y)以及天然气消费量(z)的二元二次拟合方程为:

$$z = 99.35 - 97.63x + 75.45y + 8.79x^2 + 0.48y^2 - 5.23xy \quad (4)$$

4.2 拟合效果验证

为了对比拟合效果, 同时对 3 个变量进行了二元一次回归方程拟合, 其拟合方程为:

$$z = -19.55 - 15.6x + 43.1y \quad (5)$$

对同一组历史数据, 不同的拟合方程存在较大差异。因此, 通过分析两个拟合方程的 3 种拟合结果评价参数来对比不同拟合方程的拟合效果, 选取最佳的拟合曲面模型: ①残差平方和, 即曲面预测值与历史数

据值的误差平方和; ②均方根误差, 即曲面预测值、历史数据值的误差和观测次数比值的平方根; ③可决系数(R^2), 即曲面预测值、历史数据值分别与历史数据均值之差的平方和的比值。

当残差平方和与均方根误差越小, R^2 越接近 1 时, 曲面模型的拟合效果越好。基于以上拟合效果评价参数, 将二元二次曲面拟合方程与二元一次平面拟合方程对比(表 5)。可见, 二元二次拟合方程的残差平方和、均方根误差均小于二元一次拟合方程。在可决系数方面, 对于影响因素较多的数值回归过程, 较少的自变量不足以完全说明变量回归过程, 这种情况下可决系数一般较小, 且影响天然气消费量的变量很多, 但本方程选取的两个因素(一次能源消费量与 GDP)使二元二次拟合方程的可决系数(0.97)达到较高水平, 并大于二元一次拟合方程的可决系数(0.951), 这说明数据归类较为得当。综上, 二元二次方程拟合效果较好, 且优于二元一次方程, 利用二元二次拟合方程预测未来天然气消费量走势具有较强的参考性。由此, 建立了一次能源消费量(x)、GDP(y)以及天然气消费量(z)之间的定量关系式(即二元二次预测模型)。在消费驱动型省级天然气负荷预测的二元二次曲面模型(图 5)中, 坐标点表示

表 5 天然气消费量二元二次与二元一次拟合方程结果统计对比表
Table 5 Statistical comparison of binary quadric and binary linear fitting equation solutions for natural gas consumption

拟合方程	数据点数量	自由度	均方根误差	残差平方和	可决系数
二元二次	105	99	3.653	361.638	0.970
二元一次	105	102	5.653	576.646	0.951

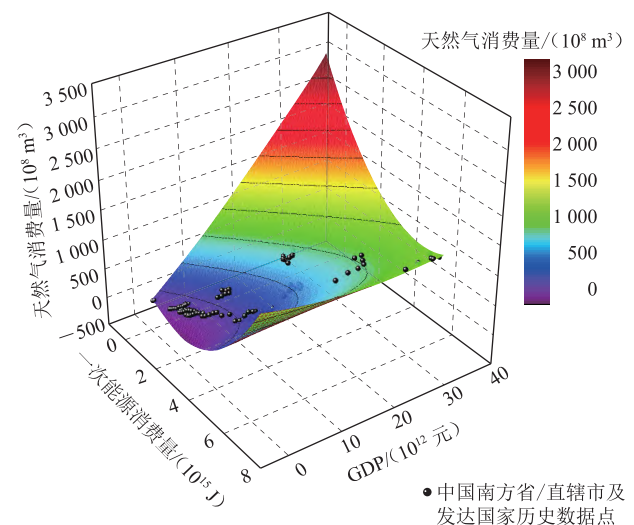


图 5 天然气负荷预测二元二次曲面拟合图
Fig. 5 Binary quadric surface fitting diagram for prediction of natural gas load

各地区所在的三维坐标位置,未来发展趋势可表示为各点在曲面附近移动的过程。以中国南方 10 个省/直辖市的现状为起点,将部分发达国家的现状作为目标点,可以规划出各省份未来的天然气发展路径,即两点之间位于曲面上的曲线。此外,还可通过对曲线方程求导的方式找出增长率函数的方程。

4.3 误差分析

将 2021 年一次能源消费量(x)与 GDP(y)的实际值代入式(4),得到天然气需求量(z)的预测值,将其与实际值进行对比(图 6)。2021 年南方 10 个省/直辖市预测值与实际值的平均绝对误差为 27、均方误差为 869。在 10 个省/直辖市中,浙江、江苏误差率均为 15%,广东误差率为 10%。在历史数据积累较为有限、不同省市能源消费差异较大的情况下,部分省市短期预测结果取得了误差范围 10%~15%的效果,证明所得模型具有一定的应用价值。需要说明的是,非线性曲面拟合预测模型更适用于中长期趋势的判断,若用于短期预测则可能出现误差范围相对较大的情况。

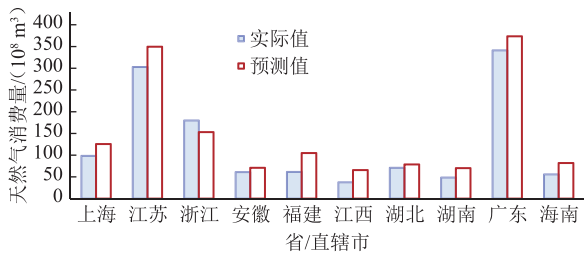


图 6 中国南方 10 个省/直辖市天然气需求量预测值与实际值对比图(2021 年)

Fig. 6 Comparison of predicted and actual natural gas demand in ten southern provinces (municipalities directly under the Central Government) of China (2021)

4.4 2030 年中国省级天然气负荷预测

4.4.1 GDP 预测

以 2021 年各省份 GDP 实际数据为基数,并对 2022—2030 年之间各省份 GDP 的复合增长率以 3%~7%进行多情景预测。相较于其他相关性因素,GDP 的未来发展增速可以借鉴一些权威经济机构与组织的预测结果,不需要再次进行复杂的预测,避免了一般常见的多元回归分析时需要对自变量影响因素额外进行建模预测的问题。其中,GDP 年均复合增长率 m 的计算式为:

$$m = \left(\frac{B}{A}\right)^t - 1 \tag{6}$$

式中: t 为年限; B 为最后一年单位 GDP 能耗,元/(10^6 J);

A 为第一年单位 GDP 能耗,元/(10^6 J)。

4.4.2 一次能源消费需求预测

通过上述数据归类与气泡图三维数据图解分析(图 4),发现选取的发达国家、中国南方省/直辖市的经济增长与一次能源消费需求之间均存在类似的线性关系,其回归方程斜率代表了经济发展能耗强度,是能源规划中的重要参数之一。对比 2015—2021 年数据发现,坐标系中线性关系的斜率呈规律性升高,这表示随着经济技术的发展单位 GDP 能耗逐渐降低(图 4、图 7)。因此,采取对标分析的思路,计算中国南方 10 个省/直辖市 2015 与 2021 年的平均单位 GDP 能耗分别为 $1.314 2 \times 10^6$ J/元、 $0.950 4 \times 10^6$ J/元,基于式(6)计算得出 2015—2021 年年均复合增长率为 -5.26%,将其作为未来至 2030 年的年均复合增长率,可得出 2030 年 10 个省/直辖市的单位 GDP 能耗为 $0.584 2 \times 10^6$ J/元,即单位能耗的 GDP 产出为 14.66 元/(10^6 J)。通过最小二乘拟合(图 7)得出发达国家 2015—2021 年的平均单位能耗的 GDP 产出为 14.22 元/(10^6 J),与中国 2030 年预测值误差为 3%。因此,将发达国家 2015—2021 年平均水平作为中国南方省/直辖市 2030 年发展愿景,从而得到 2030 年中国一次能源预测值与 GDP 预测值之间的关系为: $y = 4.858 3x + 2.298 1$ 。

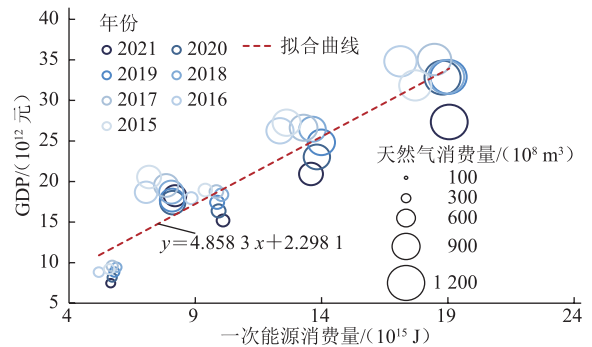


图 7 部分发达国家能源强度回归图(2015—2021 年)
Fig. 7 Regression diagram of energy intensity of some developed countries (2015-2021)

4.4.3 预测结果及分析

基于二元二次曲面拟合得到 2030 年中国南方 10 个省/直辖市的天然气负荷预测结果(表 6、表 7),并基于预测结果绘制了 GDP 复合增长率 3%、5%、7%的 3 种情景下天然气负荷预测气泡图(图 8)。可见,GDP 的增速对未来天然气需求增长呈正向促进作用,符合行业发展实际情况。同时,在 GDP 复合增长率为 5%的情景下,绘制了中国南方部分省/直辖市天然气未来需求增量与增长倍速的分布图(图 9)。结果表明:①中

表6 不同GDP复合增长率下中国南方省级天然气2030年气量及其相对于2021年绝对增量预测结果表

Table 6 Predicted results of China's provincial (southeastern) natural gas volume in 2030 and its absolute increment relative to 2021 under different GDP compound growth rates

省/直辖市	2030年气量预测值/(10 ⁸ m ³)					2030年相对于2021年绝对增量/(10 ⁸ m ³)				
	3%	4%	5%	6%	7%	3%	4%	5%	6%	7%
	上海	221	233	246	261	277	122	134	148	163
江苏	480	523	571	625	685	177	220	268	322	382
浙江	320	343	369	398	430	140	163	189	218	250
安徽	220	232	245	260	276	159	171	184	199	215
福建	238	252	268	285	303	177	191	206	223	242
江西	180	188	196	206	216	142	150	159	168	178
湖北	242	256	272	290	309	171	185	201	219	238
湖南	230	243	257	273	291	181	194	209	225	242
广东	512	560	612	672	738	171	219	271	331	397
海南	116	118	119	121	123	60	62	64	65	67

表7 不同GDP复合增长率下中国南方省级天然气2022—2030年复合增长率与2030年相对于2021年增长倍数预测结果表

Table 7 Predicted results of China's provincial (southeastern) natural gas compound growth rate from 2022 to 2030 and 2030 relative to 2021 under different GDP compound growth rates

省/直辖市	2022—2030天然气复合增长率					2030年相对于2021年增长倍数				
	3%	4%	5%	6%	7%	3%	4%	5%	6%	7%
	上海	9.4	10.1	10.7	11.5	12.2	2.2	2.4	2.5	2.7
江苏	5.2	6.3	7.3	8.4	9.5	1.6	1.7	1.9	2.1	2.3
浙江	6.6	7.4	8.3	9.2	10.2	1.8	1.9	2.1	2.2	2.4
安徽	15.3	16.0	16.7	17.5	18.3	3.6	3.8	4.0	4.3	4.5
福建	16.2	17.0	17.8	18.6	19.4	3.9	4.1	4.3	4.6	4.9
江西	19.0	19.6	20.1	20.8	21.4	4.8	5.0	5.2	5.5	5.7
湖北	14.6	15.3	16.1	16.9	17.8	3.4	3.6	3.8	4.1	4.4
湖南	18.9	19.6	20.3	21.1	22.0	4.7	5.0	5.3	5.6	6.0
广东	4.6	5.7	6.7	7.8	9.0	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2
海南	8.5	8.7	8.8	9.0	9.2	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2

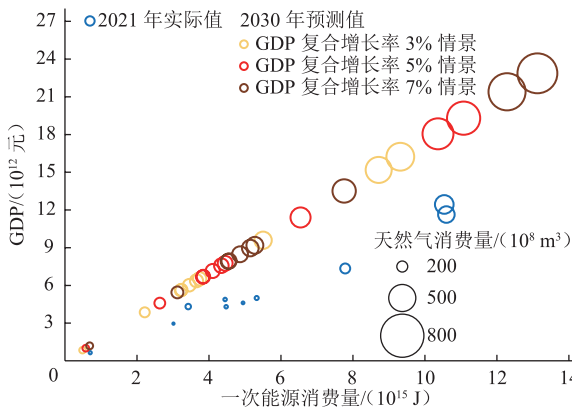
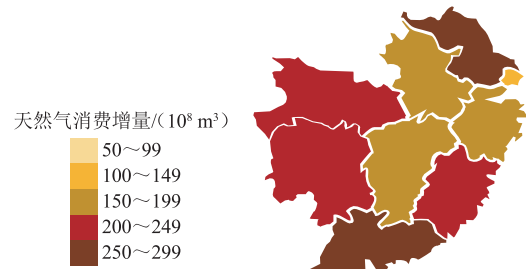
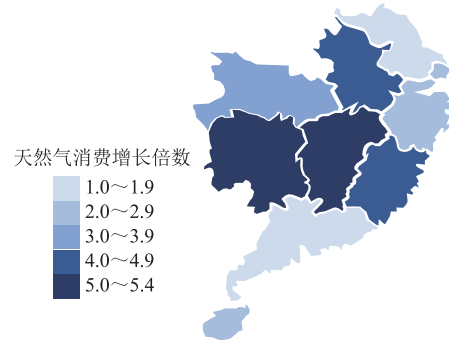


图8 中国南方部分省/直辖市天然气负荷预测气泡图(2030年)
Fig. 8 Bubble chart for prediction of natural gas load in some southern provinces(municipalities directly under the Central Government) of China (2030)



(a) 2030年相对于2021年绝对增量



(b) 2030年相对于2021年增长倍数

图9 中国南方部分省/直辖市2030年天然气消费预测图(GDP复合增长率为5%)

Fig. 9 Natural gas consumption prediction of some southern China's provinces (municipalities directly under the Central Government) in 2030 (GDP compound growth rate 5%)

国南方省/直辖市对天然气的需求旺盛,其未来天然气消费需求迅速增加,在GDP复合增长率为5%情景下,中国南方省/市在2030年天然气需求总量为 $3\ 155 \times 10^8\ m^3$,是2021年总量的2.5倍,绝对增量达到了 $1\ 898 \times 10^8\ m^3$ 。发达国家的发展历程印证了天然气在未来经济发展与节能减排中的重要作用。②以GDP复合增长率为5%的情景为研究对象,在南方省/直辖市中,绝对增量最大的为广东省与江苏省,其中广东省在2030年相较于2021年天然气消费增量达到 $271 \times 10^8\ m^3$,这主要是由于两个省份是目前中国第一、二经济大省,城市化进程与制造业的持续发展以及天然气调峰发电的需求推动了对天然气等清洁能源的大量需求。③靠近中部的内陆省市未来天然气的增长速率较快,其中湖南省复合增长率与增长倍数最快,分别达到了20.3%、5.3倍,其次为江西。这主要是由于该区域现有天然气消费水平相对较低,仍有较大发展空间。各情景下天然气需求的复合增长率均高于情景设定的GDP复合增长率,这表明随着经济的发展,天然气消费量将呈现更高倍率的增长;同时,由于南方地区天然气产量有限,需要国家与地方政府更加重视其

天然气基础设施建设,如加大管网投资,使其天然气未来需求得到及时满足。

综上,应用二元二次拟合方程进行天然气需求预测具有一定的优势及实际应用价值。该预测模型选取了GDP及一次能源消费量两个影响因素。一方面,两个影响因素的未来预测结果容易达成共识,避免了影响因素自身的取值难以预测的问题,提高了模型预测结果的可操作性;另一方面,该模型通过相对简洁的方程将两个相关因素与预测结果拟合在同一曲面,结果更具有直观性,同时还避免了模型影响因素过多而导致多元回归中的多重共线性因素之间的干扰问题。因此,计算得出的不同省/市天然气需求增长潜力差异,可以为区域天然气设施建设规划与投资策略分析提供参考。

5 结论

(1)基于二元二次曲面拟合回归分析方法,以各省/直辖市的GDP与一次能源消费量为自变量,通过数据挖掘可视化处理,建立了中国经济驱动型省级天然气消费负荷预测模型与市场三维坐标分析框架,结合对标分析的方法预测了不同GDP增速情景下的南方部分省/直辖市至2030年的天然气消费量。该曲面拟合模型只包含两个关键影响因素,易于进行三维坐标定位与可视化展示,避免了影响因素较多可能导致的多重共线性问题。这些因素的选取在一般定性分析中已有共识,增加了预测方法推广应用的可行性。

(2)基于中国南方部分省/直辖市与部分发达国家数据,对比得出2030年中国10个省/直辖市的天然气消费需求潜力。分析发现,基于GDP增长与一次能源消费需求两个关键维度的考量,天然气作为清洁能源体系的重要部分,在未来发展中需求旺盛。在GDP复合增长率为5%情景下,10个省/市在2030年天然气需求总量达到 $3\ 155\times 10^8\text{ m}^3$,是2021年消费总量的2.5倍;对于经济驱动型的省市,经济总量越大其未来天然气需求越大,其中广东省在2030年天然气消费增量最大达到 $271\times 10^8\text{ m}^3$;内陆省份受当前发展与消费水平的限制,未来将呈现较高的增速,尤其是湖南与江西两个省份复合增长率超过20%。

(3)作为清洁能源体系转型的“桥梁”,天然气在未来的经济发展与节能减排中发挥着关键作用。对于中国南方省/直辖市的天然气未来需求,沿海经济大省

受经济发展的快速推动,天然气需求的绝对增长潜力普遍较大,市场需求旺盛,且其自身产气水平有限,因此建议加大管道供应保障力度、充分利用LNG接收站等基础设施,以实现地区天然气供需平衡;内陆的省市由于目前天然气消费基数相对较低,随着未来经济发展能源需求增加与基础设施的完善,天然气需求可能增速较快,天然气市场可能仍处在较快速的变化过程中,市场投资潜力相对较大。

参考文献:

- [1] 王雅菲,周淑慧,李广. 基于天然气视角的“十四五”现代能源体系规划[J]. 国际石油经济, 2022, 30(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2022.04.001.
WANG Y F, ZHOU S H, LI G. Analysis of the 14th Five-Year modern energy system plan from natural gas perspective[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(4): 1-10.
- [2] 何东博,贾成业,位云生,郭建林,冀光,李易隆. 世界天然气产业形势与发展趋势[J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 1-12. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.11.001.
HE D B, JIA C Y, WEI Y S, GUO J L, JI G, LI Y L. Current situation and development trend of world natural gas industry[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 1-12.
- [3] 温泉,石小平,张利分,李蕾. 基于改进 Tent 映射的 APSO-LSTM 天然气需求量预测模型[J]. 油气储运, 2023, 42(6): 702-712. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.06.012.
WEN Q, SHI X P, ZHANG L F, LI L. APSO-LSTM model based on improved Tent mapping for natural gas demand forecasting[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(6): 702-712.
- [4] 徐博,金浩,向悦,段天宇,张愉. 中国“十四五”天然气消费趋势分析[J]. 世界石油工业, 2021, 28(1): 10-19.
XU B, JIN H, XIANG Y, DUAN T Y, ZHANG Y. Analysis of natural gas consumption trend in China during the 14th Five-Year Plan[J]. World Petroleum Industry, 2021, 28(1): 10-19.
- [5] 杜学平,吴江涛,柳梦琳. 中国天然气市场重心迁移定量分析[J]. 天然气技术与经济, 2021, 15(5): 45-51, 82. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2021.05.008.
DU X P, WU J T, LIU M L. Focus shift of China's natural-gas market[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2021, 15(5): 45-51, 82.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴——2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022: 277-278.

- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook: 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022: 277-278.
- [7] 安显章, 宫敬, 安旭. 俄罗斯天然气在东北地区的利用发展分析[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(3): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2020.03.010.
- AN Y X, GONG J, AN X. Analysis on the utilization and development of Russian natural gas in Northeast China[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2020, 49(3): 61-66.
- [8] 英国石油公司. BP世界能源统计年鉴 2021[M]. 伦敦: 英国石油公司, 2021: 7-8.
- BP. BP Statistical review of world energy (2021)[M]. London: BP, 2021: 7-8.
- [9] 李洪兵, 张吉军. 中国能源消费结构及天然气需求预测[J]. 生态经济, 2021, 37(8): 71-78.
- LI H B, ZHANG J J. China's energy consumption structure and forecast on natural gas demand[J]. Ecological Economy, 2021, 37(8): 71-78.
- [10] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告(2021)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021: 3-6.
- Oil and Gas Department of National Energy Administration, Resource and Environmental Policy Research Institute of the Development Research Center of the State Council, Oil and Gas Resources Strategic Research Center of the Ministry of Natural Resources. China natural gas development report (2021)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021: 3-6.
- [11] 肖进, 孙海燕, 刘敦虎, 曹瀚文, 汪寿阳. 基于GMDH混合模型的能源消费量预测研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(12): 158-166. DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2017.12.017.
- XIAO J, SUN H Y, LIU D H, CAO H W, WANG S Y. GMDH based hybrid model for China's energy consumption prediction[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(12): 158-166.
- [12] 田文才, 傅宗化, 周国峰, 乔伟彪. 基于WT+改进SSA-LSTM模型的短期天然气负荷预测算法[J]. 油气储运, 2023, 42(2): 231-240. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.02.013.
- TIAN W C, FU Z H, ZHOU G F, QIAO W B. Short-term natural gas load forecast algorithm based on WT+improved SSA-LSTM model[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(2): 231-240.
- [13] 叶志宏, 陈二龙. 基于残差灰色模型的天然气消费预测研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(9): 99-102. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2018.09.016.
- YE Z H, CHEN E L. Study on the prediction of natural gas consumption based on residual grey model[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(9): 99-102.
- [14] ZHU M F, WU Q L, WANG Y Q. Forecasting gas consumption based on a residual auto-regression model and Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(5): 546-552. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2019.05.011.
- [15] KHANI H, FARAG H E Z. An online-calibrated time series based model for day-ahead natural gas demand forecasting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2112-2123. DOI: 10.1109/TII.2018.2861390.
- [16] 穆献中, 李国昊. 基于系统动力学模型的中国天然气需求情景预测及影响因素研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2018, 10(1): 56-67. DOI: 10.3724/SP.J.1224.2018.00056.
- MU X Z, LI G H. Study on natural gas consumption forecast and influence factors in China based on system dynamics model[J]. Journal of Engineering Studies, 2018, 10(1): 56-67.
- [17] SZOPLIK J. Forecasting of natural gas consumption with artificial neural networks[J]. Energy, 2015, 85: 208-220. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.084.
- [18] 李哲, 张淑英. 基于多项式趋势面分析理论的天然气需求预测[J]. 资源与产业, 2008, 10(2): 105-107. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2464.2008.02.025.
- LI Z, ZHANG S Y. Prediction of natural gas demands based on multi-trend analysis[J]. Resources & Industries, 2008, 10(2): 105-107.
- [19] 李洪兵, 张吉军. 一种天然气需求量预测新模型及其在川渝地区的应用[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 167-175. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.018.
- LI H B, ZHANG J J. A new natural gas demand forecasting model and its application in the Sichuan-Chongqing area[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 167-175.
- [20] 杨义, 韩克江, 黄苏琦, 艾勇, 单蕾, 郭杰. 延边州天然气市场需求预测及供气方案[J]. 油气与新能源, 2019, 30(4): 1-4, 7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2970.2019.04.001.
- YANG Y, HAN K J, HUANG S Q, AI Y, SHAN L, GUO J. Forecast of natural gas market demand and gas supply scheme

(下转第 1200 页)

- LIU J, WANG Y B, CUI X T, CAO D J, JIA Y H. Combined prediction model of dam deformation based on EEMD-Attention-GRU[J]. Henan Science, 2022, 40(9): 1449-1455.
- [16] 任欢,王旭光.注意力机制综述[J].计算机应用,2021,41(增刊1): 1-6. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2020101634.
- REN H, WANG X G. Review of attention mechanism[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(S1): 1-6.
- [17] 朱张莉,饶元,吴渊,祁江楠,张钰.注意力机制在深度学习中的研究进展[J].中文信息学报,2019,33(6): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0077.2019.06.001.
- ZHU Z L, RAO Y, WU Y, QI J N, ZHANG Y. Research progress of attention mechanism in deep learning[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2019, 33(6): 1-11.
- [18] 吴莹莹,赵丽宁,袁志鑫,张灿.基于注意力机制的CNN-GRU船舶交通流预测模型[J].大连海事大学学报,2023,49(1): 75-84. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2023.01.008.
- WU Y Y, ZHAO L N, YUAN Z X, ZHANG C. CNN-GRU ship traffic flow prediction model based on attention mechanism[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(1): 75-84.
- [19] 黄伟建,李丹阳,黄远.基于深度学习的PM2.5浓度长期预测[J].计算机应用研究,2021,38(6): 1809-1814. DOI: 10.

19734/j.issn.1001-3695.2020.08.0254.

HUANG W J, LI D Y, HUANG Y. Long-term prediction of PM2.5 concentration based on deep learning[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(6): 1809-1814.

(收稿日期:2023-07-31; 修回日期:2023-08-14; 编辑:刘朝阳)

作者简介: 门嘉铖,男,1997年生,在读硕士生,2021年毕业于西安石油大学过程装备与控制工程专业,现主要从事长输天然气管网运行优化研究。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号西安石油大学雁塔校区,710065。电话:13501100167。Email: mm20212024@163.com

通信作者: 林红先,男,1978年生,讲师,2009年硕士毕业于西安石油大学化工过程机械专业,现主要从事长输油气管道工程相关技术的教学与科研工作。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号西安石油大学雁塔校区,710065。电话:15991735366。Email: linhongxian@xsyu.edu.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



(上接第1192页)

- for Yanbian prefecture[J]. Petroleum and New Energy, 2019, 30(4): 1-4, 7.
- [21] 秦步文,张吉军,李岚,曾谦,文静,韩咪. Shapley值在中国城市天然气需求量组合预测中的应用[J].天然气技术与经济, 2022, 16(2): 50-55. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2022.02.009.
- QIN B W, ZHANG J J, LI L, ZENG L, WEN J, HAN M. Application of Shapley value in the combination forecasting of city gas demand in China[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(2): 50-55.
- [22] 张吉军,李洪兵,孙逸林,韩咪.基于复合权重的天然气需求组合预测模型的构建[J].天然气技术与经济,2021,15(2): 57-63. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1132.2021.02.011.
- ZHANG J J, LI H B, SUN Y L, HAN M. Coweight-based combination forecast model of natural-gas demand and its application[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2021, 15(2): 57-63.
- [23] 王建良,李孛.中国东中西部地区天然气需求影响因素分析

及未来走势预测[J].天然气工业,2020,40(2): 149-158. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.018.

WANG J L, LI N. Influencing factors and future trends of natural gas demand in the eastern, central and western areas of China based on the grey model[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 149-158.

(收稿日期:2023-03-30; 修回日期:2023-06-29; 编辑:吴珮璐)

作者简介: 杜学平,男,1984年生,在读博士生,2010年硕士毕业于北京建筑工程学院供热供燃气通风及空调专业,现主要从事燃气规划、能源产业投资战略等专业方向的研究工作。地址:北京市朝阳区化工路59号院2号楼,100023。电话:010-56891719。Email: duxueping23@163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

