

引用格式:刘春梅,钱啸吟.“双碳”目标下中国能源消费碳排放量预测[J].资源科学, 2023, 45(10): 1931-1946. [Liu C M, Qian X Y. Prediction of carbon emissions from energy consumption in China under the “dual carbon” goal[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1931-1946.] DOI: 10.18402/resci.2023.10.02

# “双碳”目标下中国能源消费碳排放量预测

刘春梅,钱啸吟

(上海财经大学信息管理与工程学院,上海 200433)

**摘要:**【目的】面对“碳达峰、碳中和”全球性主题,预测与模拟中国能源消费碳排放量,探索碳达峰时间及碳中和可实现性,为促进减排目标的实现提供理论依据。【方法】本文运用碳排放系数法测算1986—2019年中国26种能源消费的碳排放量,从经济、社会、环境、能源、技术5个方面出发,建立了包含18个变量的能源消费碳排放影响因素指标体系,利用Lasso回归筛选出5个主要因素。运用3种机器学习方法和Lasso回归构建了支持向量机回归(SVR)、随机森林(RF)、BP神经网络和Lasso-SVR、Lasso-RF、Lasso-BP共6种碳排放量预测模型,基于均方误差(MSE)和平均绝对误差(MAE)对6种预测模型进行比较和分析。结合情景分析法设置新常态化情景、绿色低碳情景、2℃目标情景和1.5℃目标情景4种情景,选择最优预测模型对4种情景下中国2020—2060年的碳排放量进行模拟分析。【结果】研究显示:4种情景下,随着减排力度加强,中国碳达峰平台期逐渐缩短,平台期内碳达峰时间分别为2035、2029、2026、2025年,峰值分别为95.8亿、74.48亿、67.23亿、65.23亿tCO<sub>2</sub>e,2℃目标情景和1.5℃目标情景下中国能如期实现碳中和目标,4种情景均可能实现2℃升温目标,但前两种情景不能实现1.5℃升温目标。【结论】4种情景下中国能源消费碳达峰峰值和达峰时间不尽相同,实现碳中和的可能性也有所差别。为尽早实现“碳达峰、碳中和”目标,中国必须着力推动产业结构和能源结构优化,增加绿色资产投资,以技术进步助力减排事业发展。

**关键词:**能源消费;碳排放;预测;情景模拟;Lasso;支持向量机;随机森林;BP神经网络

DOI: 10.18402/resci.2023.10.02

## 1 引言

全球气候变化已成为人类发展面临的重大非传统安全挑战,在积极应对该挑战的过程中,碳达峰和碳中和意义重大。2020年9月,欧盟公布减排目标,宣布将在2050年成为世界第一个“碳中和”大陆;同年12月,中国承诺在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和;随后,日本、英国等世界主要经济体相继提出减排承诺。中国作为世界最大的碳排放国一直致力于减少碳排放,“十四五”规划指出:“未来中国经济将从高速发展转向高质量发展……实现单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低13.5%和18%”。因此,明确中国目前能源消费碳排放现状,分析影响碳排放的主要因素,预测未来碳排放趋势,对中国碳减排行动具有

深远意义。

随着“节能减排”成为全球共识,许多学者对能源消费碳排放量进行了研究,可梳理为以下4个方面:

(1)二氧化碳排放量的测算方法以碳排放因子法为主,排放源通常选取三大化石能源<sup>[1]</sup>,也有学者将其扩充到5种<sup>[2]</sup>、8种<sup>[3-6]</sup>和11种<sup>[7]</sup>,但是并没有包括所有碳排放源,且IPCC提供的碳排放系数未考虑世界各国能源种类和品质的差别,结合国内数据测算更符合国情。

(2)碳排放量影响因素方面,不同学者从不同角度来选取指标,涵盖了经济、社会、环境、能源、技术中的一个或者两个方面。①经济方面:经济增长是导致碳排放增加的主要动因,通常用人均GDP<sup>[8,9]</sup>、

收稿日期:2023-12-19,修订日期:2023-06-04

基金项目:教育部人文社会科学研究课题(22YJA790035)。

作者简介:刘春梅,女,黑龙江鹤岗人,博士,副教授,研究方向为低碳经济。E-mail: cmliu@mail.shufe.edu.cn

产业结构<sup>[4,5,8,10]</sup>和工业增加值<sup>[3,11]</sup>,产业结构多用第二产业占GDP比重<sup>[5,8,12]</sup>或第三产业占GDP比重<sup>[12]</sup>表示。②社会方面:人口规模增长和固定资产投资增加会导致能源消费需求增加,造成碳排放增加,指标选取以总人口<sup>[1,5,9]</sup>、人口密度<sup>[13]</sup>、城市化率<sup>[5,9,14]</sup>等为主,也有文献考虑每万人拥有公共汽车数量<sup>[12]</sup>、私人汽车拥有量<sup>[5]</sup>和固定资产投资<sup>[8]</sup>3个指标。③环境方面:碳中和要加大森林覆盖水平,进而吸收二氧化碳排放,代表性指标为森林覆盖率<sup>[5]</sup>。④能源方面:一方面,经济增长会导致二氧化碳排放量增加;另一方面,能源强度与能源结构调整有助于降低排放量,指标选取包括能源结构<sup>[5,9,15]</sup>、能源强度<sup>[1,5,9]</sup>、能源消费总量<sup>[5,16]</sup>和电力消费总量<sup>[5,16]</sup>,能源结构以煤炭消费占比<sup>[5,9]</sup>或其他化石能源消费占比<sup>[13]</sup>为主。⑤技术方面:技术创新会抑制碳排放,指标包括研究与开发经费投入强度(研发强度)<sup>[4]</sup>、技术市场成交额<sup>[17]</sup>、生活垃圾无害处理率<sup>[18]</sup>等。总体而言,多数文献仅考虑经济、社会、能源中的两个方面,较少考虑环境、技术等方面的因素。

(3)碳排放量预测方法主要有环境影响评估模型<sup>[1,8,19]</sup>、计量经济学模型<sup>[3]</sup>、灰色预测模型<sup>[20,21]</sup>、机器学习模型<sup>[2,5,10,12]</sup>以及包括系统动力学模型<sup>[4]</sup>、综合评估模型<sup>[14]</sup>和LMDI分解法<sup>[22]</sup>在内的其他方法。以IPAT<sup>[1]</sup>和STIRPAT<sup>[8,19]</sup>等为主的环境影响评估方法只能准确预测碳排放的线性部分,对非线性部分预测精度不高。为了提高预测精度,减少误差,有些学者运用如基于混频数据的ADL-MIDAS模型<sup>[3]</sup>等计量经济学模型进行预测,但计量经济学方法有内生性问题,适用于参数估计,非参数估计更适用机器学习算法;也有学者用灰色系统理论进行预测,如构建灰色滚动预测模型GM(1,1)<sup>[20]</sup>和混沌鲸鱼算法优化传统灰色模型<sup>[21]</sup>等。虽然这些模型提高了预测精度,但对非线性序列的拟合能力不如机器学习算法。近年来,一些学者将机器学习算法用于碳排放量预测,支持向量机(Support vector regression, SVR)<sup>[23]</sup>、BP神经网络(Back propagation neural network, BPNN)<sup>[2,5,17]</sup>和极限学习机(Extreme learning machine, ELM)<sup>[10]</sup>都有很好的预测效果。机器学习算法聚焦于SVR和BP神经网络,前者适合小数据集的研究,后者具有超强的非线性映射能力和自学

习自适应能力,但调参成本高、容易陷入局部最优解。随机森林(Random forest, RF)采用集成学习思想,其精度优于单个算法、不易陷入过拟合、具有较强抗噪性,但尚未见其用于碳排放量预测。基于碳排放数据的非线性特征,为了提高模型预测精度,多数学者将机器学习算法结合其他方法进行优化,如ARIMA-BP模型<sup>[2]</sup>、PSO-BP模型<sup>[16,17]</sup>、BP-LSTM模型<sup>[11]</sup>以及WOA-ELM预测模型<sup>[10]</sup>,但这些研究仅仅是对一种算法的优化,未能进行多种机器学习算法的比较研究。

(4)碳排放情景模拟研究主要从国家、区域和省市层面对碳达峰、碳中和实现的时间点和峰值进行预测。在国家层面,如从政策机制角度进行情景设置,在供给侧结构性改革情景下将在2029年实现碳达峰<sup>[14]</sup>;采取“自上而下”和“自下而上”相结合的方法,运用多模型拟合各部门和国家整体的碳排放路径,在不同情境下中国将在2020—2030年实现达峰,2050年之后实现碳中和<sup>[24]</sup>;在区域层面,运用系统动力学模型预测京津冀碳达峰时间,北京和天津能在2035年前实现达峰,但河北却难以实现<sup>[4]</sup>;省市层面,以能源强度为门限变量,建立门限-STIRPAT模型对6个超大城市碳达峰进行模拟,其碳达峰时间明显不同<sup>[8]</sup>。以上文献表明,有的研究认为碳达峰能在2030年前实现,有的则认为不能,但研究都以情景分析法为主,尽管情景设置视角不同,普遍具有较强主观性。

本文参考《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南》重新计算26种能源的碳排放因子,并利用其对1986—2019年中国能源消费碳排放量进行测算,使测算更精准;建立包含经济、社会、环境、能源、技术5个方面共18个变量的碳排放影响因素体系,运用Lasso回归筛选重要影响因素,既丰富和完善了指标体系,也使影响因素的筛选更准确;鉴于RF方法具有较强抗噪声能力,将RF引入碳排放量的预测,构建6种预测模型(SVR、BP、RF、Lasso-SVR、Lasso-BP、Lasso-RF),避免了以往预测模型的单一性,基于均方误差(Mean squared error, MSE)和平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)对6种模型进行比较评价,有利于选择合适的预测模型;依据国家十四五发展规划<sup>[25]</sup>、《2050年世界与中国能

2023年10月

源展望(2020版)》(以下简称《展望》)<sup>[26]</sup>、《国家创新驱动发展战略纲要》<sup>[27]</sup>、《中国制造2025》<sup>[28]</sup>、《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》<sup>[29]</sup>、《2030年前碳达峰行动方案》<sup>[30]</sup>、《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》<sup>[31]</sup>和《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》<sup>[32]</sup>等文献,对影响碳排放的关键指标因素设置不同增速,组合得到不同的情景模式,并对中国2020—2060年的碳排放量进行模拟,进而提出实现“双碳”目标的政策建议。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

能源的终端消费量、折标煤系数、单位热值含碳量以及碳氧化率数据用于计算中国历年能源消费碳排放量。其中,能源选取了《中国能源统计年鉴》中收录的26种能源,包括:原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、天然气和液化天然气,各能源终端消费量(实物量)来自《中国能源统计年鉴》能源平衡表;折标煤系数取自《综合能耗计算通则 GB/T 2589-2020》和《公共机构能源资源消费统计制度》;单位热值含碳量来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》和《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》;碳氧化率取自《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》。

碳排放影响因素指标体系中18个指标的统计数据及中国能源消费碳排放量数据用于筛选碳排放影响因素和预测未来碳排放量。数据来源于历年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国科技统计年鉴》和国家统计局官方数据,由于考察年份跨度较大,部分统计指标有少量数值缺失,本文采用插值法和移动平均法对其进行填充。

由于数据获取限制,本文研究期为1986—2019年<sup>①</sup>。统计全国数据时,因数据缺失未包含港澳台地区。

### 2.2 影响因素筛选方法和预测方法的选取

Lasso回归能对多维特征变量进行筛选,其通过构造惩罚函数对模型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被压缩至0,从而达到特征选择的目的。Lasso回归适应样本量较小但指标较多的情况,与本文数据特征相符,因此选取Lasso回归对影响二氧化碳排放量的因素进行筛选。

鉴于碳排放数据的非线性特征和小数据集,采用非线性拟合能力较好的机器学习算法,即SVR、RF和BP神经网络对二氧化碳排放量进行预测,并对3种方法进行比较分析。

### 2.3 碳排放量测算方法与概况描述

根据IPCC提供的碳排放因子法,二氧化碳排放量测算公式如下:

$$C_E = \sum_{i=1}^n E_i \times EF_{CO_2,i} \quad (1)$$

式中:  $C_E$  表示能源消费碳排放量(万t);  $E_i$  表示第*i*种能源的终端消费量(万t或亿m<sup>3</sup>);  $EF_{CO_2,i}$  表示第*i*种能源的二氧化碳排放系数(tCO<sub>2</sub>/t或tCO<sub>2</sub>/万m<sup>3</sup>)。

本文参照《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.0)版》对各类能源的二氧化碳排放系数进行计算,公式如下:

$$QDW_i = SCC_i \times 29307.6 \quad (2)$$

$$EF_{CO_2,i} = QDW_i \times UHVCC_i \times COR_i \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中:  $QDW_i$  表示第*i*种能源的低位发热量(kJ/kg或kJ/m<sup>3</sup>);  $SCC_i$  表示第*i*种能源的折标煤系数(kgce/kg或kgce/m<sup>3</sup>);  $UHVCC_i$  表示第*i*种能源的单位热值含碳量(t-C/TJ);  $COR_i$  表示第*i*种能源的氧化率(%);常数29307.6表示1kg标准煤的低位发热量;44/12表示碳和CO<sub>2</sub>的转换因子。本文测算的二氧化碳排放量单位为亿tCO<sub>2e</sub>,下文统称亿t。

根据公式(2)–(3)计算得到中国26种能源的碳排放系数如表1所示。代入公式(1)计算得到中国1986—2019年能源消费二氧化碳排放量,绘制柱状图见图1。为验证本文测算的二氧化碳排放量正确性,将测算结果与相关文献结果进行对比。IEA研

① 1986年之前的统计年鉴数据与之后的统计口径差别较大,故未考虑更早年份;截至本文写作时,2020年数据尚未全部公布,故以2019年为期末。

表1 26种能源的二氧化碳排放系数

Table 1 Carbon dioxide emission coefficient of 26 energy sources

能源类型	二氧化碳排放系数	能源类型	二氧化碳排放系数
原煤	1.9492	柴油	3.0997
洗精煤	2.3347	燃料油	3.1745
其他洗煤	1.2044	石脑油	3.1594
型煤	1.7178	润滑油	2.9789
焦炭	2.8639	石蜡	2.8746
焦炉煤气	8.8750	溶剂油	3.0903
高炉煤气	9.6864	石油沥青	3.0831
转炉煤气	14.3212	石油焦	3.1619
其他煤气	2.5803	液化石油气	3.1052
其他焦化产品	3.4022	炼厂干气	3.0119
原油	3.0240	其他石油制品	2.9487
汽油	2.9287	天然气	21.6486
煤油	3.0371	液化天然气	3.1829

究表明,能源消费碳排放量占总排放量的80%~90%,因此,本文将从相关文献计算的能源消费碳排放量<sup>[33,34]</sup>(方式一)和中国碳排放总量按80%为系数转换计算的能源碳排放量估计值<sup>[23,35,36]</sup>(方式二)两方面进行比较。考虑到数据可得性和研究年份不同导致的数据差异,本文以2013年为基准年进行比对。结果显示,以方式一测算的2013年能源消费碳排放量区间为[22.76, 93.00]亿t,按照方式二测算的区间为[31.20, 81.85]亿t。特别地,Li等<sup>[36]</sup>的研究中,2013年中国能源消费碳排放量为[57.6, 64.8]亿t,本文测算的2013年能源消费碳排放量为60.14亿t,在方式一和方式二的区间范围内,且与Li等<sup>[36]</sup>的结果相近,说明本文测算结果合理。

从图1可以看到,1986年以来,中国能源消费碳排放量总体呈持续增长趋势,其增速模式分为3个阶段:1986—2002年处于稳定发展阶段,碳排放量保持在20亿t左右;2003—2012年处于高速发展阶段,中国能源消费需求激增,导致碳排放量快速增长;2013—2019年处于缓慢回落阶段,中国能源消费呈现稳定回落态势,碳排放量稳定在60亿t上下。

3 预测模型构建与优化

3.1 影响因素分析

3.1.1 指标体系构建

通过对国内外相关文献的梳理和借鉴,构建了包含经济、社会、环境、能源、技术5个方面共18个指标(表2)的二氧化碳排放量影响因素指标体系。

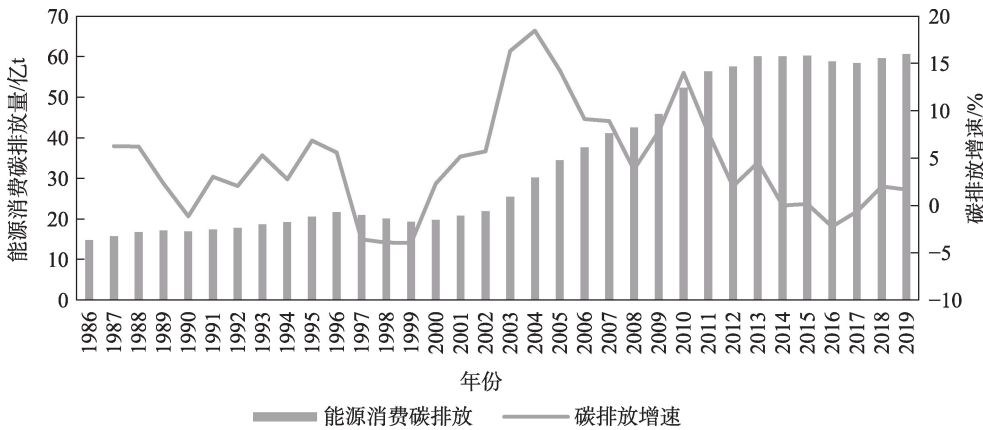


图1 1986—2019年中国能源消费碳排放量及增速趋势图

Figure 1 Energy consumption carbon emissions and growth trend in China, 1986–2019

2023年10月

表2 二氧化碳排放量影响因素指标体系

Table 2 Index system of influencing factors of carbon dioxide

emissions		
指标类别	变量名	单位
经济因素	人均GDP	元
	第二产业占GDP比重	%
	第三产业占GDP比重	%
	工业增加值占GDP比重	%
社会因素	总人口	万人
	城市化率	%
	私人汽车拥有量	万辆
	全社会固定资产投资	亿元
环境因素	森林覆盖率	%
能源因素	能源强度	万t标准煤/亿元
	能源消费总量	万t标准煤
	煤炭消费占比	%
	石油消费占比	%
	天然气消费占比	%
	电力消费总量	亿kWh
技术因素	研发强度	%(R&D经费占GDP比重)
	技术市场成交额	亿元
	生活垃圾无害处理率	%

### 3.1.2 影响因素筛选及指标的解释

将归一化后的数据导入R软件并使用Lasso回归对碳排放影响因素进行分析。通过 $k$ 折CV交叉验证( $k$ -fold Cross-validation)选取最优参数, CV残差图如图2所示。其中,横坐标为取对数后的Lasso回归参数 $\lambda$ ;纵坐标为不同 $\lambda$ 下Lasso回归模型的MSE(均方误差),即CV值,随着 $\lambda$ 不断增大,MSE也不断增大;上方横坐标表示取某一 $\lambda$ 值时筛选出的非零变量个数。左边虚线对应的 $\lambda$ 为 $min$ (使模

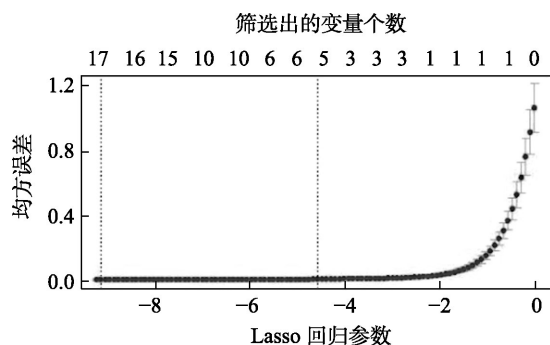


图2 Lasso回归CV残差图

Figure 2 Lasso regression coefficient of variation (CV) residuals

型MSE最小的 $\lambda$ 值),右边虚线对应的 $\lambda$ 为 $1se$ (在一定方差范围内,使筛选出的因素最少的 $\lambda$ 值)。由于 $min$ 保留了过多非零变量,对因素的筛选力度不够,本文选用 $1se$ 对应的 $\lambda$ 作为lasso回归的最优参数,即 $\lambda=0.0104$ 。最终筛选出5个显著变量:①第二产业占GDP比重。随着工业化的推进,第二产业特别是重工业成为经济发展的主要动力,以第二产业为主的产业结构与粗放的工业化模式形成了碳排放的主要动因,第二产业占GDP比重对碳排放量具有正向作用;②全社会固定资产投资。中国经济快速增长主要靠投资拉动,固定资产投资集中于第二产业,因此,固定资产投资对碳排放量具有正向作用;③能源消费总量。能源消费是中国碳排放的主要来源,也是影响二氧化碳排放量的主要因素,对碳排放量有正向作用;④石油消费占比。能源消费结构对二氧化碳排放量也有重要影响,实现“3060”目标除了看存量还要看增量,石油天然气分别占中国二氧化碳排放增量的40%左右。故而要尽早实现碳达峰,除控制煤炭增长还要关注油气消费,特别是石油消费<sup>[37]</sup>,因此,石油消费占比对碳排放量具有正向作用;⑤研发强度。国际上通用的衡量一个国家或者地区科技投入强度的重要指标,其在节能降碳技术投入的经费越高,越有助于降低二氧化碳排放量,对碳排放量具有负向作用。

### 3.2 碳排放预测模型的选取

为进一步探索中国未来能源消费碳排放发展趋势,依据3.1.1小节的指标体系和3.1.2小节筛选的5个影响因素,结合数据特点构建了SVR、RF、BP、Lasso-SVR、Lasso-RF和Lasso-BP模型,并对上述6种模型的预测效果进行比较分析。

#### 3.2.1 原始预测模型构建:SVR/RF/BP

选取1986—2019年18个影响因素的统计数据 and 碳排放量数据,分别构建SVR、RF和BP神经网络预测模型。

在SVR模型构建上,基于Python 3.7软件对模型进行训练和验证,其步骤如下:①数据标准化,使用 $z$ -score方法对原始数据进行无量纲化处理;②按照8:2比例将数据集随机划分为训练集和验证集;③训练模型,分别使用3种核函数(线性核函数、多项式核函数、径向基核函数)训练模型;④模型结果

评价,使用MSE和MAE(平均绝对误差)对预测效果进行评价。计算结果见表3。从表3可以看到,多项式核函数在两项指标上均未达到理想结果,而基于线性核函数和径向基核函数的SVR模型在预测结果上均表现良好,其中,线性核函数SVR模型在MSE和MAE上均略优于径向基核函数SVR;⑤模型确定,本文选择线性核函数作为最终核函数,建立基于线性核函数的SVR预测模型。

在RF模型构建上,本文利用Python 3.7软件自带的RandomForestRegressor方法构建RF模型,具体步骤同SVR模型。由于数据集相对较小,本文将森林中树的数量设置为10000,利用RF模型对测试集进行预测,得到预测值与真实值的MSE和MAE,见表4。

在BP神经网络模型构建上,采用keras框架搭建模型,数据预处理过程同上。模型搭建中,设置

训练次数为1000次,优化器选择“adam”,选用ReLU作为激活函数。利用训练好的BP模型预测测试样本,得到预测值与真实值的MSE和MAE(表4)。

3.2.2 Lasso 优化预测模型构建:Lasso-SVR/Lasso-RF/Lasso-BP

在原始预测模型的基础上,将3.1.2小节中Lasso回归筛选出的5个显著变量作为模型的投入变量,重新对3种预测模型进行训练,得到Lasso优化后的3种预测模型:Lasso-SVR、Lasso-RF和Lasso-BP。分别对3种优化预测模型进行验证,得到的验证结果见表5。

3.3 6种预测模型的比较及分析

对比3种方法优化前后的实际值与观测值(图3和图4)与6种模型的MSE和MAE(表6)可知:①从单个模型来看,以BP神经网络为例,经过Lasso回归对特征变量降维后,预测效果得到了大幅提升(图5),验证了lasso回归的重要性。结合表6,3种原始预测模型在优化后MSE和MAE降低,说明Lasso回归筛选变量对提高模型预测性能有较大作用;②RF优化前后的MSE和MAE均优于BP神经网络模型,仅次于SVR,说明RF能用于碳排放量预测;③Lasso-SVR的MSE最优,Lasso-RF则在MAE

表3 基于3种不同核函数的SVR预测误差评价表

Table 3 Support vector regression (SVR) prediction error evaluation based on three kernel functions

核函数类别	MSE	MAE
线性核函数	0.0068	0.0718
多项式核函数	0.4989	0.6144
径向基核函数	0.0108	0.0919

表4 SVR/RF/BP预测误差评价表

Table 4 Prediction error evaluation of support vector regression (SVR) / random forest (RF) / back propagation neural network (BP)

模型	MSE	MAE
SVR	0.0068	0.0718
RF	0.0100	0.0866
BP	0.0179	0.1165

表5 Lasso-SVR/Lasso-RF/Lasso-BP预测误差评价表

Table 5 Prediction error evaluation of Lasso-support vector regression (SVR) / Lasso-random forest (RF) / Lasso-back propagation neural network (BP)

模型	MSE	MAE
Lasso-SVR	0.0064	0.0698
Lasso-RF	0.0071	0.0630
Lasso-BP	0.0082	0.0778

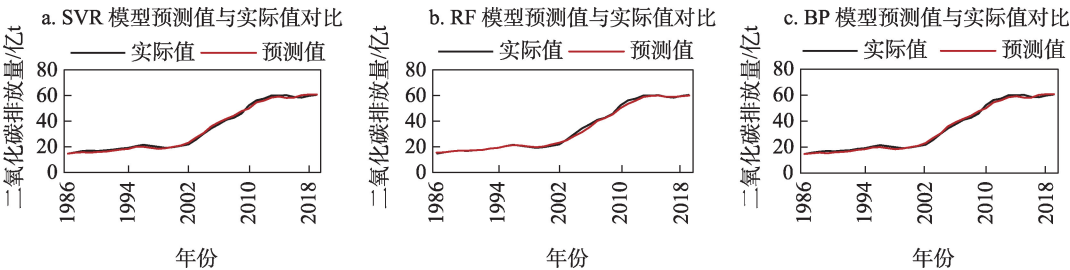


图3 1986—2019年SVR、RF和BP特征筛选前的实际值与预测值的对比图

Figure 3 Comparison between the actual values and the predicted values before feature selection of support vector regression (SVR), random forest (RF), and back propagation neural network (BP), 1986-2019

2023年10月

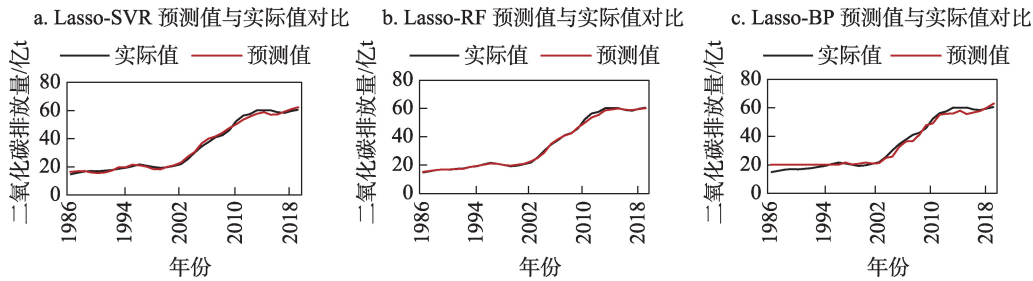


图4 1986—2019年SVR、RF和BP特征筛选后的实际值与预测值的对比图

Figure 4 Comparison between the actual values and the predicted values after feature selection of support vector regression (SVR), random forest (RF), and back propagation neural network (BP), 1986-2019

表6 不同预测模型预测误差对比统计表

Table 6 Comparison of prediction errors of different prediction models

模型	MSE	MAE
SVR	0.0068	0.0718
Lasso-SVR	0.0064	0.0698
RF	0.0100	0.0866
Lasso-RF	0.0071	0.0630
BP	0.0179	0.1165
Lasso-BP	0.0082	0.0778

上表现最优,本文以MSE作为首要评判标准,选择Lasso-SVR模型作为情景模拟的预测模型。

## 4 情景模拟与结果分析

### 4.1 情景设置与相关参数设置

#### 4.1.1 情景设置

情景模拟是预测碳排放量趋势的一种常用方法。为探讨不同政策和发展模式对中国未来二氧化碳排放的影响,本部分将参考各因素变化的历史值,依据碳达峰碳中和目标及引言部分提及的文献<sup>[25,27-29,32]</sup>,将情景设置为新常态化情景、绿色低碳情景、2℃目标情景和1.5℃目标情景4种情景。以

筛选出的5个影响因素作为情景设置指标。然后,利用前文训练好的Lasso-SVR预测模型,在4种情景模式下对中国2020—2060年的能源消费碳排放量进行预测,探究碳达峰、碳中和出现的时间点和峰值。4种情景描述如下。

(1)新常态化情景:新常态的主要特点是“从高速增长转为中高速增长”,此情景充分考虑各指标变化的历史值,以国民经济和社会发展第十四个五年规划为指导,在中高速经济增长情况下,保持现有发展速度、发展模式,探索能源消费二氧化碳排放量的变化趋势,基于此,将此情景设置为新常态化情景。

(2)绿色低碳情景:以新常态化情景为基础,依据《中美气候变化联合声明》和《巴黎协定》承诺,中国将经济增长速度调整为中速率,加大能源政策实施力度,积极实施节能减排,大力发展清洁能源,提高能源效率,单位GDP能耗和二氧化碳排放的降幅较大,基于此,将此情景设置为绿色低碳情景。

(3)2℃目标情景:以绿色低碳情景为基础,根据《巴黎协定》提出的“2℃温升目标”和IPCC评估

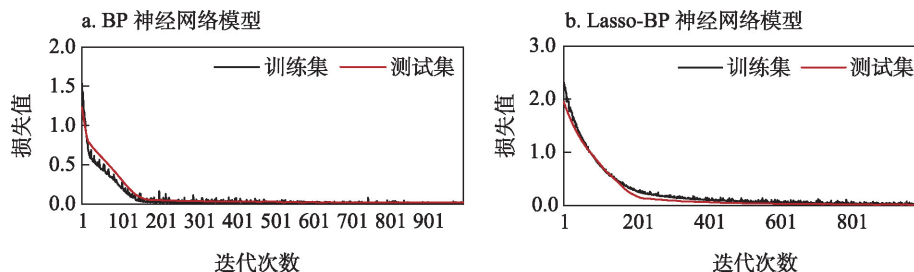


图5 BP神经网络模型和LASSO-BP模型损失值对比图

Figure 5 Comparison between loss values of the back propagation (BP) neural network model and the LASSO-BP model

报告,中国经济社会将进行深度绿色转型,进一步推动能源结构和产业结构优化,持续降低化石能源消费占比,更加注重研发和引进先进低碳技术,增加低碳技术投资,提高能源利用效率,确保碳达峰、碳中和如期实现,基于此,将此情景设置为2℃目标情景。

(4)1.5℃目标情景:以2℃目标情景为基础,根据《IPCC全球升温1.5℃特别报告》评估结果,中国能源消费总量控制、能源体系去碳化步伐进一步加快,各领域减排措施更加有力,经济社会结构调整更迅速,技术层面更依赖可再生能源、核能和负碳排放技术,基于此,将此情景设置为1.5℃目标情景。

#### 4.1.2 相关参数设置

##### (1)第二产业占GDP比重

1986—2020年,中国产业结构已由“二三一”(27.1:44.0:28.9)转变为“三二一”(7.7:37.8:54.5),但第三产业占比(54.5%)仍低于美国(81.5%)、英国(80.91%)等发达国家,表明中国产业结构仍有较大优化空间。由边际效应递减理论可知,第二产业占比下降时降速将逐渐放缓。2019年中国第二产业占比较2018年增速为-2.77%。有学者<sup>[38]</sup>提出“中国在2035年前后有望成为中等发达国家”,第二产业占比将在2035年前后低于30%,以此为参考设定新常态化情景如下:2019年为基准年,2020—2025年、2026—2030年、2031—2040年、2041—2050年、2051—2060年第二产业占比增速分别为:-2.0%、-1.5%、-1.0%、-0.5%、-0.1%。借鉴已有文献<sup>[16]</sup>,绿色低碳情景下第二产业占比增速设定为在新常态情景基础上下调0.5%。参考发达国家产业结构现状和国务院提出的制造业发展目标<sup>[28]</sup>,在绿色低碳情景基础上分别下调0.5%和1%设定2℃目标情景和1.5℃目标情景下第二产业占比情况,以实现2050年、2045年前后第二产业占比达到目前发达国

家前列的目标,增速参数详见表7。

##### (2)全社会固定资产投资

根据统计数据,中国1986—2019年全社会固定资产投资总额平稳增长,但近几年增速开始下滑,2010—2022年全社会固定资产投资增速年均下降1.275%。由于建筑业、制造业等占社会固定资产投资的大头,结合第二产业占GDP比重和边际效应递减,中国全社会固定资产投资也将在2035年前后由增转降,2035年前后降速较快,随后降速放缓。根据历史数据,2016—2019年平均增速为6.06%,2019年为5.1%。2019年1月—2022年1月,根据国家发展改革委数据,除了疫情期间投资增速大幅变化外,增速仍维持在5%~6%<sup>[39]</sup>。基于此,设定2019—2025年中国社会固定资产投资整体增速围绕6%波动,2026—2030年增速缓慢降低,2031年起增速由正转负,然后固定资产投资快速下降,至2051年逐渐放缓。

因此,本文设定新常态化情景下,2020—2025年、2026—2030年、2031—2040年、2041—2050年和2051—2060年全社会固定投资增速分别为6.5%、3.5%、-1.0%、-1.5%和-0.5%。以此为基础,2020—2030年下调1%、2030—2060年下调2%,设定绿色低碳情景下的增速。2℃和1.5℃情景下,高碳排放行业产能下降导致的相关行业固定资产减少抵消绿色投资进程加快,以及部分行业研究结果显示2021—2030年全社会固定资产投资增长呈“倒U型”变化,2021年和2030年新增固定资产投资均为约0.6万亿<sup>[40]</sup>,此后固定资产投资加速下滑。故而在绿色低碳情景基础上,2020—2050年、2051—2060年分别下调1.5%和2%设定2℃目标情景;2020—2030年、2031—2050年、2051—2060年分别下调3.5%、2.5%和3%设定1.5℃目标情景,详见表8。

##### (3)能源消费总量

表7 2020—2060年中国第二产业占GDP比重增速参数(%)

Table 7 Growth parameters of GDP proportion of secondary industry in China, 2020—2060 (%)

年份	2020—2025年	2026—2030年	2031—2040年	2041—2050年	2051—2060年
新常态化情景	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50	-0.10
绿色低碳情景	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00	-0.50
2℃目标情景	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50	-1.00
1.5℃目标情景	-3.50	-3.00	-2.50	-2.00	-1.50

2023年10月

《展望》预测在“碳中和”背景下,中国一次能源需求将在2035年前后达峰,峰值约56亿tce。此外,《展望》中指出2021—2030年、2031—2040年和2041—2050年能源消费量年均增速分别为1.4%、-0.04%和-0.5%。姜克隽<sup>[41]</sup>认为2021—2030年终端能源消费总量增速在0.7%~1.4%区间内,为中国未来能源消费总量变化指明了空间。

基于此,本文设定新常态化情景如下:2020—2025年、2026—2035年、2036—2040年、2041—2050年和2051—2060年年均增速分别为1.4%、0.7%、-0.1%、-0.5%和-1.0%。在此基础上,下调增长率设定绿色低碳情景下的能源消费增速。参考相关文件<sup>[30,32]</sup>提出的单位GDP能耗目标以及相关文献预测的GDP和GDP能耗增速<sup>[42-45]</sup>,在绿色低碳情景基础上上浮0.5%设定2℃目标情景;同时,实现1.5℃温控目标需要降低能源消费至2010年的65.1%,且随着“30·60”时间节点迫近,减排力度会加大<sup>[46]</sup>,故而在绿色低碳情景基础上上浮0.3%设定1.5℃目标情景。以此为基础,设定2035—2060年能源消费增速,详见表9。

#### (4) 石油消费占比

根据统计数据,中国石油消费占比一直在16%~22%范围内波动。根据相关文件<sup>[25,26,29]</sup>,中国未来能源结构调整方向为降低煤炭消费,稳定石油消费,提高天然气等清洁能源消费占比,2050年煤炭占比降至17%,天然气上升至15%,石油保持在20%

左右,2060年非化石能源占比上升至80%以上,结合相关研究<sup>[24]</sup>,未来石油消费占比将下降至更低水平并保持稳定。2℃目标情景和1.5℃目标情景都属于深度脱碳情景,石油消费占比下调的比例更大。

基于此,本文设定新常态化情景下中国未来石油消费占比将围绕20%波动(19%~21%),以此为基础向下浮动2%得到绿色低碳情景的石油消费占比。考虑到中国政策重点在于降低煤炭在能源消费中的比重<sup>[32]</sup>,当煤炭消费降低时,部分必须使用化石能源的消费场景会被石油和天然气取代。故而随着化石能源消费占比下降,石油消费占比下降幅度将缩小,波动范围也缩小,以新常态化情景为基础,分别向下浮动3%、4%,波动范围缩小至1%设定2℃目标情景和1.5℃目标情景的石油消费占比,详见表10。

#### (5) 研发强度

从国内来看,“三步走”战略要求中国在2030年前R&D经费占比达到2.8%<sup>[26]</sup>;从国际上看,中国目前研发强度(2.23%)仍低于发达国家平均水平(2.5%~4.9%),故而中国未来仍要提高R&D占比。根据参考文献<sup>[28]</sup>,2025年中国综合指数将接近日本、德国实现工业化时的制造强国水平,进入制造业强国第二方阵。2035年中国将列居第二方阵前列,2045—2050年中国综合指数将略高于第二方阵,进入第一方阵。OECD数据显示,美国、欧盟等

表8 2020—2060年中国全社会固定资产投资增速参数(%)

Table 8 Growth parameters of total social fixed investment in China, 2020—2060 (%)

年份	2020—2025年	2026—2030年	2031—2040年	2041—2050年	2051—2060年
新常态化情景	6.50	3.50	-1.00	-1.50	-0.50
绿色低碳情景	5.50	2.50	-3.00	-3.50	-2.50
2℃目标情景	4.00	1.00	-4.50	-5.00	-4.50
1.5℃目标情景	2.00	-1.00	-5.50	-6.00	-5.50

表9 中国2020—2060年能源消费总量增速参数(%)

Table 9 Growth parameters of total energy consumption in China, 2020—2060 (%)

年份	2020—2025年	2026—2035年	2036—2040年	2041—2050年	2051—2060年
新常态化情景	1.40	0.70	-0.10	-0.50	-1.00
绿色低碳情景	1.00	-0.04	-3.50	-4.00	-3.50
2℃目标情景	0.85	-3.50	-6.00	-6.50	-6.00
1.5℃目标情景	0.70	-4.50	-6.50	-6.80	-6.50

表10 2020—2060年中国石油消费占比参数 (%)

Table 10 Parameters of China's oil consumption share, 2020—2060 (%)

年份	2020—2060年
新常态化情景	19~21
绿色低碳情景	17~19
2℃目标情景	17~18
1.5℃目标情景	16~17

发达国家的研发强度均呈现高速增长态势,2007年后增速逐渐放缓。

基于此,本文设定新常态化情景如下:2020—2030年、2031—2040年、2041—2050年和2051—2060年增速分别为2.3%、2.5%、1.5%和1.0%。在此基础上,2020—2040年分别上调0.3%、0.33%和0.36%,2041—2060年则均上浮0.3%,据此设置绿色低碳情景、2℃目标情景和1.5℃目标情景增速,以实现2045—2050年研发强度位居第一梯队的目标,增速详见表11。

## 4.2 情景模拟及分析

### 4.2.1 情景模拟

根据表7—11中5个因素的增速参数,计算得到4种情景下中国2020—2060年第二产业占GDP比重、全社会固定资产投资、能源消费总量、石油消费占比和研发强度数据。以中国1986—2019年数据对Lasso-SVR模型进行训练,运用训练好的模型对中国未来能源消费碳排放量进行预测,得到结果如表12和图6所示。

### 4.2.2 情景分析

根据表12和图6的预测结果,汇总4种情景下碳达峰时间点和峰值结果见表13。根据表12、13以及图6所示预测结果,从以下4个方面进行分析:

首先,就碳达峰而言,4种情景下中国未来能源消费碳排放量均呈现较为明显的倒“U”型曲线,即碳排放量先以逐年降低的增长率缓慢上升,达到峰

值后经过一段时间的平台期,转而逐年下降,这与前人研究结论相一致<sup>[41]</sup>。4种情景下,碳达峰平台期分别为:2034—2040年、2029—2034年、2023—2027年以及2021—2025年。平台期内,峰值分别出现于2035年、2030年、2026年、2025年,说明随着减排力度加大,碳达峰平台期逐渐缩短,峰值更早出现。此外,相较于新常态化情景,其他3种情景下碳达峰时间分别提前了5年、9年和10年,峰值降低了22.32亿、28.57亿和30.57亿t。除新常态化情景外,其他3种情景达到了“2030年前实现碳达峰”的目标,1.5℃情景在2025年实现达峰,说明低碳发展战略对实现“双碳”目标具有促进作用,且减排力度越大,“双碳”目标越早实现。

其次,就碳中和而言,中国计划于2060年实现碳中和,根据本文预测,4种情景下2060年中国能源消费碳排放量仍在27亿t以上,其原因如下:①本文预测结果不包含负碳排放技术的影响。根据相关文献<sup>[24,45,46]</sup>,不考虑负碳排的抵消效应时,2℃情景下2060年能源消费碳排放量预测区间为[14.4, 38.8]亿t,1.5℃情景下为[8, 25]亿t,与本文预测结果相近。②即使能源体系仍存在正碳排,在纳入负碳排技术后仍有机会实现净零排放。根据相关预测,2060年负碳排技术可以吸收的二氧化碳排放量为[13.1, 43.2]亿t<sup>[41,42,44]</sup>,且能源基金会<sup>[42]</sup>报告表明:2060年能够实现零碳排目标的碳排放区间为[0, 37]亿t。本文的预测结果与此相符,说明考虑负碳排技术后,中国在2℃目标情景和1.5℃目标情景下能够在2050—2060年实现零排放。

再次,就累计排放量而言,2℃目标和1.5℃目标要求全球碳排放累计量控制在一定范围内。根据本文预测,2011—2050年4种情景累计碳排放量分别为3250.87亿、2577.68亿、2219.14亿、2032.73亿t。根据相关文献<sup>[47,48]</sup>,在各种责任分担方法下

表11 中国2020—2060年研发强度增速参数 (%)

Table 11 Growth parameters of R&amp;D intensity in China, 2020—2060 (%)

年份	2020—2030年	2031—2040年	2041—2050年	2051—2060年
新常态化情景	2.30	2.50	1.50	1.00
绿色低碳情景	2.60	2.80	1.80	1.30
2℃目标情景	2.63	2.83	1.80	1.30
1.5℃目标情景	2.66	2.86	1.80	1.30

2023年10月

表 12 2020—2060 年中国能源消费碳排放量预测结果 (亿 t)

Table 12 Forecast results of China's carbon emissions from energy consumption, 2020-2060 (100 million tons)

年份	新常态化情景	绿色低碳情景	2℃目标情景	1.5℃目标情景	年份	新常态化情景	绿色低碳情景	2℃目标情景	1.5℃目标情景
2020	66.32	65.62	65.55	65.12	2041	93.87	63.83	46.82	38.62
2021	69.77	66.28	65.56	65.05	2042	93.74	61.07	45.67	37.14
2022	73.25	67.70	66.09	64.63	2043	91.44	60.31	43.56	36.20
2023	73.92	68.38	66.19	64.61	2044	90.87	59.72	42.62	35.36
2024	76.77	69.72	66.59	65.10	2045	90.23	58.89	42.09	33.99
2025	81.50	71.29	66.87	65.23	2046	89.16	58.33	40.38	33.34
2026	83.24	72.12	67.23	62.96	2047	88.43	56.03	39.71	32.15
2027	85.23	71.93	66.37	61.85	2048	87.96	55.28	38.60	32.22
2028	87.40	71.68	65.47	59.66	2049	86.55	54.17	38.00	31.73
2029	89.90	72.77	65.07	57.99	2050	85.44	53.45	37.90	31.43
2030	91.55	73.48	63.45	56.94	2051	85.80	53.17	37.02	30.93
2031	91.76	72.70	61.62	54.64	2052	85.06	53.46	36.62	29.63
2032	92.53	73.04	60.12	53.02	2053	85.21	53.25	35.74	29.13
2033	93.70	72.49	58.52	50.91	2054	85.60	51.79	35.65	29.12
2034	95.27	70.60	57.14	48.62	2055	85.33	51.33	35.40	29.36
2035	95.80	71.13	55.76	47.96	2056	84.46	52.39	35.30	28.79
2036	94.68	70.11	54.00	45.34	2057	83.21	52.10	34.49	28.27
2037	94.44	66.83	52.27	44.38	2058	84.31	52.26	34.90	27.89
2038	94.78	67.05	50.25	42.71	2059	83.23	50.85	33.86	28.31
2039	94.50	65.00	49.64	41.50	2060	82.68	49.78	33.71	27.58
2040	94.70	64.53	47.88	40.12					

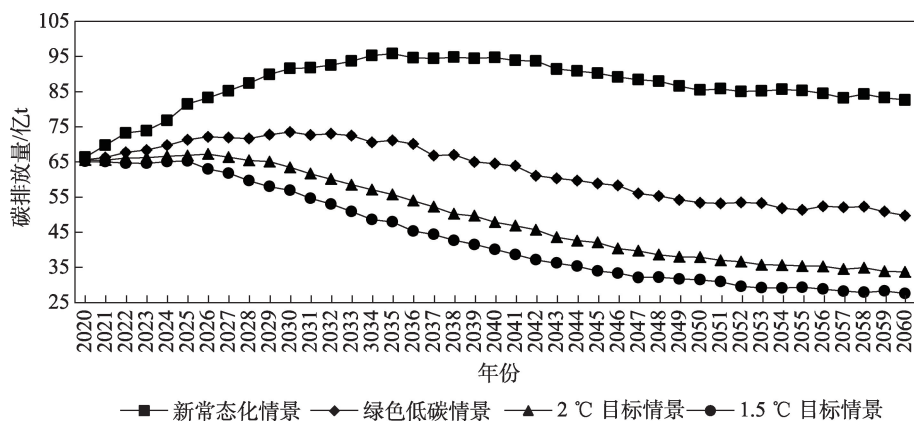


图 6 2020—2060 年中国能源消费碳排放量预测

Figure 6 Forecast results of China's carbon emissions from energy consumption, 2020-2060

2℃目标下 2011—2050 年中国碳排放预算为 1500 亿~4400 亿 t, 1.5℃目标下为 750 亿~2500 亿 t。以此为参照, 4 种情景都能够实现 2℃温升目标, 新常态化情景和绿色低碳情景无法实现 1.5℃目标。考虑到不同责任分配方案下中国碳预算不同<sup>[48]</sup>, 2℃目

标情景只满足 1.5℃目标下责任方案的碳预算, 说明 2℃目标情景碳排放量虽在 1.5℃碳预算范围内, 但实现 1.5℃温控目标的概率较低, 若要实现全球 1.5℃温控目标, 仍需要强力的减排手段。

最后, 就发展趋势而言, 随着净零排放目标实

表 13 2020—2060 年中国能源消费碳排放达峰时间及峰值

Table 13 Peak time and peak value of carbon emissions from energy consumption in China, 2020-2060

发展情景	碳达峰时间	峰值/亿 t
新常态化情景	2035 年	95.80
绿色低碳情景	2030 年	73.48
2℃目标情景	2026 年	67.23
1.5℃目标情景	2025 年	65.23

现越来越接近,碳排放量下降速度也越缓慢,这与能源基金会<sup>[42]</sup>的预测相吻合,原因是越早达峰峰值越低,政策更容易通过平稳过渡实现碳中和,且随着碳减排逐渐深入,减排阻力越大,降低了减排速度。

## 5 结论、政策建议与讨论

### 5.1 结论

本文以 1986—2019 年中国统计数据为基础,运用碳排放因子法测算了中国能源消费碳排放量,构建了包含经济、社会、环境、能源、技术 5 个方面共 18 个指标的二氧化碳排放影响因素指标体系,运用 Lasso 回归筛选出 5 个显著变量。基于历史碳排放数据构建 SVR、RF、BP 和 Lasso-SVR、Lasso-RF、Lasso-BP 预测模型,结合情景分析法对中国 2020—2060 年的碳排放情况进行模拟,进而提出碳减排政策建议。得出如下结论:

(1) 中国 1986—2019 年能源消费碳排放主要经历了平稳增速、高速增长和缓慢回落 3 个阶段。

(2) 第二产业占 GDP 比重、全社会固定资产投资、能源消费总量、石油消费占比和研发强度是影响能源消费碳排放的重要因素。

(3) SVR、RF、BP3 种模型都可以用于碳排放预测,经 Lasso 回归优化后 3 种模型的预测效果明显提高,其中 Lasso-SVR 预测效果最优。

(4) 分别对新常态化情景、绿色低碳情景、2℃目标情景和 1.5℃目标情景进行模拟,碳达峰时间分别出现在 2035 年、2030 年、2026 年、2025 年,峰值分别为 95.8 亿、74.48 亿、67.23 亿、65.23 亿 t。4 种模拟结果比较,除了新常态化情景,其他 3 种情景都实现了“碳达峰”目标,但只有 2℃目标情景和 1.5℃目标情景可以实现“碳中和”目标,4 种情景均能够实现 2℃温升目标,但 1.5℃目标情景实现 1.5℃温升

目标的可能性更高。

### 5.2 政策建议

为了实现“碳达峰、碳中和”目标,必须从优化产业结构、提高固定资产的准入门槛、减少能源消费总量及化石能源的占比、提高研发强度入手。

(1) 调整产业结构,减少第二产业占 GDP 比重,提高第三产业发展水平,如加快调整落后产能,控制高耗能、强污染产业发展,鼓励新能源及可再生能源和高端制造业发展。

(2) 提高投资的环境准入门槛,使投资更多地用于促进绿色技术进步,如增加固定资产在高端制造、节能环保、清洁能源、清洁生产、生态环境和基础设施绿色升级产业的投资。

(3) 降低能源消耗总量,优化能源消费结构,提高能源利用效率。一方面,推动中国高能耗产业由主要依赖化石能源向依靠清洁能源转变,减少能源消费总量,降低中国 GDP 增长对于能源消费的依赖;另一方面,降低化石能源在能源消费结构中的比例,提高清洁能源与可再生能源的占比,严格控制化石能源的使用,扩大清洁能源适用范围。

(4) 继续加大技术创新投入,提高研发强度。技术创新对碳排放有显著的抑制作用。要积极加大对清洁能源、绿色制造、绿色建筑、绿色交通等产业及绿色低碳技术、负碳排放技术(CCS/CCUS)项目的金融支持力度,更好地发挥科技水平在节能减排方面的作用。

### 5.3 讨论

本文没有对不同城市和地区的碳达峰、碳中和进行探索,无法因地制宜地对各地区提供有效的减排建议,有待未来进一步完善;另外,RF 和 BP 神经网络都可以用于碳排放量预测,由于数据获得性的限制没有得到大体量数据集进行训练,预测效果未达到最好,后续可以考虑采用混频数据进行研究。

### 参考文献(References):

- [1] 杜强,陈乔,陆宁. 基于改进 IPAT 模型的中国未来碳排放预测[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2294-2302. [Du Q, Chen Q, Lu N. Forecast of China's carbon emissions based on modified IPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2294-2302.]
- [2] 赵成柏,毛春梅. 基于 ARIMA 和 BP 神经网络组合模型的我国

2023年10月

- 碳排放强度预测[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6): 665–671. [Zhao C B, Mao C M. Forecast of intensity of carbon emission to China based on BP Neural Network and ARIMA combined model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(6): 665–671.]
- [3] 赫永达, 文红, 孙传旺. “十四五”期间我国碳排放总量及其结构预测: 基于混频数据 ADL-MIDAS 模型[J]. 经济问题, 2021, (4): 31–40. [He Y D, Wen H, Sun C W. Forecasting China's total carbon emission and its structure in the 14th Five-Year Plan: Based on Mixed-frequency ADL-MIDAS Model[J]. On Economic Problems, 2021, (4): 31–40.]
- [4] 韩楠, 罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277–1288. [Han N, Luo X Y. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1277–1288.]
- [5] Liu X D, Meng X R, Wang X Q. Carbon emissions prediction of Jiangsu Province based on Lasso-BP Neural Network combined model[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, DOI: 10.1088/1755-1315/769/2/022017.
- [6] 岳立, 曹雨暄, 王宇. 能源政策的区域碳减排效应[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1105–1118. [Yue L, Cao Y X, Wang Y. Effect of energy policies on regional carbon emission reduction[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1105–1118.]
- [7] 喻霞, 王原. 基于碳排放情景模拟的上海市产业低碳化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 10–13. [Yu X, Wang Y. Industrial low-carbon research based on scenario simulation of carbon emission in Shanghai[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(2): 10–13.]
- [8] 王勇, 许子易, 张亚新. 中国超大城市碳排放达峰的影响因素及组合情景预测: 基于门限-STIRPAT 模型的研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4284–4292. [Wang Y, Xu Z Y, Zhang Y X. Influencing factors and combined scenario prediction of carbon emission peaks in megacities in China: Based on Threshold-STIRPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4284–4292.]
- [9] 胡茂峰, 郑义彬, 李宇涵. 多情景下湖北省交通运输碳排放峰值预测研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 464–472. [Hu M F, Zheng Y B, Li Y H. Forecasting of transport carbon emission peak in Hubei Province under multiple scenarios[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 464–472.]
- [10] 王珂珂, 牛东晓, 甄皓, 等. 基于 WOA-ELM 模型的中国碳排放预测研究[J]. 生态经济, 2020, 36(8): 20–27. [Wang K K, Niu D X, Zhen H, et al. Forecast of carbon emissions in China based on WOA-ELM model[J]. Ecological Economy, 2020, 36(8): 20–27.]
- [11] 胡剑波, 赵魁, 杨苑翰. 中国工业碳排放达峰预测及控制因素研究: 基于 BP-LSTM 神经网络模型的实证分析[J]. 贵州社会科学, 2021, (9): 135–146. [Hu J B, Zhao K, Yang Y H. Research on China's industrial carbon emission peak prediction and controlling factors: An empirical analysis based on BP-LSTM Neural Network model[J]. Guizhou Social Sciences, 2021, (9): 135–146.]
- [12] 唐赛, 付杰文, 武俊丽. 中国典型城市碳排放影响因素分析[J]. 统计与决策, 2021, 37(23): 59–63. [Tang S, Fu J W, Wu J L. Analysis of influencing factors of carbon emissions in typical cities in China[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(23): 59–63.]
- [13] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2021, 40(12): 1999–2010. [Wang R, Zhang H, Qiang W L, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization[J]. Progress in Geography, 2021, 40(12): 1999–2010.]
- [14] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 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 J K, Li Y C, Cai W G. Simulating China's carbon emission peak path under different scenarios based on RICE-LEAP model[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 639–651.]
- [15] 王兆峰, 杜瑶瑶. 基于 SBM-DEA 模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 797–806. [Wang Z F, Du Y Y. Spatial-temporal differences and influencing factors of carbon emission efficiency in Hunan Province based on SBM-DEA model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(5): 797–806.]
- [16] 范德成, 张修凡. 基于 PSO-BP 神经网络模型的中国碳排放情景预测及低碳发展路径研究[J]. 中外能源, 2021, 26(8): 11–19. [Fan D C, Zhang X F. Scenario prediction of China's carbon emissions based on PSO-BP Neural Network model and research on low carbon development path[J]. Sino-Global Energy, 2021, 26(8): 11–19.]
- [17] 段福梅. 中国二氧化碳排放峰值的情景预测及达峰特征: 基于粒子群优化算法的 BP 神经网络分析[J]. 东北财经大学学报, 2018, (5): 19–27. [Duan F M. Scenario prognostics and characteristics of China's carbon dioxide emissions peak: A BP Neural Network analysis based on particle swarm optimization[J]. Journal of Dongbei University of Finance and Economics, 2018, (5): 19–27.]
- [18] 张辉斌. 基于机器学习算法的湖南省低碳经济发展分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020. [Zhang H B. Analysis of Low-Carbon Economic Development in Hunan Province Based on Machine Learning Algorithm[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.]
- [19] 周迪, 罗东权. 绿色税收视角下产业结构变迁对中国碳排放的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 693–709. [Zhou D, Luo D Q. Green taxation, industrial structure transformation, and carbon emissions reduction[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 693–709.]

- [20] Zhou W H, Zeng B, Wang J Z, et al. Forecasting Chinese carbon emissions using a novel grey rolling prediction model[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, DOI: 10.1016/j.chaos.2021.110968.
- [21] Gao M, Yang H, Xiao Q, et al. A novel method for carbon emission forecasting based on Gompertz's law and fractional grey model: Evidence from American industrial sector[J]. *Renewable Energy*, 2022, 181: 803–819.
- [22] 姜宛贝, 刘卫东. 中国经济空间格局演变及其 CO<sub>2</sub> 排放效应[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 722–732. [Jiang W B, Liu W D. Effect of change of the spatial pattern of economic activities on CO<sub>2</sub> emissions in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 722–732.]
- [23] 宋杰鲲. 基于支持向量回归机的中国碳排放预测模型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1): 182–187. [Song J K. China's carbon emissions prediction model based on support vector regression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(1): 182–187.]
- [24] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(11): 1–25. [Project Comprehensive Report Writing Group. A comprehensive report on China's Long-term low-carbon development strategy and transformation path[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(11): 1–25.]
- [25] 全国人民代表大会. 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]. (2021-03-13) [2023-09-09]. <http://www.npc.gov.cn/npc/kgfb/202103/bf13037b5d2d4a398652ed253cea8eb1.shtml>. [The National People's Congress of the People's Republic of China. Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-range Objectives for 2035 [EB/OL]. (2021-03-13) [2023-09-09]. <http://www.npc.gov.cn/npc/kgfb/202103/bf13037b5d2d4a398652ed253cea8eb1.shtml>.]
- [26] 中国石油经济技术研究院. 2025年世界与中国能源展望(2020版)[R/OL]. (2020-12-17) [2023-09-09]. [https://mp.weixin.qq.com/s/JgKcSy59g\\_KYbNROqhHAHg](https://mp.weixin.qq.com/s/JgKcSy59g_KYbNROqhHAHg). [China Petroleum Institute of Economics and Technology. Energy Outlook of the World and China in 2050 (2020)[R/OL]. (2020-12-17) [2023-09-09]. [https://mp.weixin.qq.com/s/JgKcSy59g\\_KYbNROqhHAHg](https://mp.weixin.qq.com/s/JgKcSy59g_KYbNROqhHAHg).]
- [27] 国务院. 国家创新驱动发展战略纲要[EB/OL]. (2016-05-19) [2023-09-09]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5076961.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5076961.htm). [The State Council. Outline of the National Strategy of Innovation-driven Development Background Briefing[EB/OL]. (2016-05-19) [2023-09-09]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content\\_5076961.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5076961.htm).]
- [28] 国务院. 中国制造2025[EB/OL]. (2015-05-19) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm). [The State Council. Made in China 2025[N/OL]. (2015-05-19) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).]
- [29] 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[EB/OL]. (2021-09-22) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm). [The CPC Central Committee, The State Council. Opinion on Fully, Accurately and Comprehensively Implementing the New Development Concepts to Achieve Carbon Peak and Carbon Neutrality[EB/OL]. (2021-09-22) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).]
- [30] 国务院. 关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm). [The State Council. Notice of the State Council on Issuing an Action Plan for Carbon Peaking Before 2030[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm).]
- [31] 中华人民共和国科学技术部. 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》的通知[R/OL]. (2022-06-24) [2023-09-09]. [https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxi-fenlei/fdzdkgkr/qtwj/qtwj2022/202208/t20220817\\_181986.html](https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxi-fenlei/fdzdkgkr/qtwj/qtwj2022/202208/t20220817_181986.html). [Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. The Ministry of Science and Technology and Nine Other Departments on the Issuance of the "Science and Technology Support Carbon Peak Carbon Neutral Implementation Plan (2022–2030)" Notice[R/OL]. (2022-06-24) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).]
- [32] 中华人民共和国中央人民政府. 两部门印发《能源生产和消费革命战略(2016–2030)》[EB/OL]. (2017-04-25) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content\\_5230568.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm). [Central Government of the People's Republic of China. The Two Departments Issued the Strategy of Energy Production and Consumption Revolution (2016–2030) [EB/OL]. (2017-04-25) [2023-09-09]. [https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content\\_5230568.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm).]
- [33] Wang Z X, Ye D J. Forecasting Chinese carbon emissions from fossil energy consumption using non-linear grey multivariable models [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 600–612.
- [34] 陈喜阳, 周程, 王田. 多情景视角下中国能源消费和碳达峰路径[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5464–5477. [Chen X Y, Zhou C, Wang T. China's energy consumption and carbon peak path under different scenarios[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5464–5477.]
- [35] Z S, Meng, H Wang, B N Wang et al. Empirical analysis of carbon emission accounting and influencing factors of energy consumption in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, DOI: 10.3390/ijerph15112467.
- [36] Li H Y, Lin X Y, Li Z Q. Intelligent Prediction Model of Emissions

2023年10月

- based on Whale Algorithm Optimized BP Neural Network[C]. Marseille: 2022 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS), 2022.
- [37] 全国能源信息平台. 控制石油消费或成碳达峰加速器[N/OL]. (2020-12-30) [2023-09-09]. <https://www.163.com/dy/article/FV4N30T005509P99.html>. [National Energy Information Platform. Control Oil Consumption or Carbon Peak Accelerator[N/OL]. (2020-12-30) [2023-09-09]. <https://www.163.com/dy/article/FV4N30T005509P99.html>.]
- [38] 范剑平. 今年中国GDP增速预计8%左右 2035年前后有望成中等发达国家[N/OL]. (2021-12-19) [2023-09-09]. <https://finance.sina.com.cn/china/2021-12-19/doc-ikyakumx5167215.shtml>. [Fan J P. China's GDP Growth Rate Is Expected to Be around 8% This Year, and It Is Expected to Become a Moderately Developed Country around 2035[N/OL]. (2021-12-19) [2023-09-09]. <https://finance.sina.com.cn/china/2021-12-19/doc-ikyakumx5167215.shtml>.]
- [39] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2022年全国固定资产投资增速[EB/OL]. (2023-1-30) [2023-09-09]. [https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/ssjj/202301/t20230130\\_1347720\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/ssjj/202301/t20230130_1347720_ext.html). [National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Growth Rate of National Fixed Asset Investment in 2022 [EB/OL]. (2023-01-30) [2023-09-09]. [https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/ssjj/202301/t20230130\\_1347720\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/ssjj/202301/t20230130_1347720_ext.html).]
- [40] 李超. 碳中和带来哪些需求变化? 碳中和系列研究(三)[R]. 上海: 浙商证券研究所, 2021. [Li C. What Changes in Demand Will Carbon Neutrality Bring? Carbon Neutrality Series Research (III)[R]. Shanghai: Zheshang Securities Research Institute, 2021.]
- [41] 姜克隽. 一个强有力的2050碳减排目标将非常有利于中国的社会经济发展[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 103-106. [Jiang K J. An ambitious CO<sub>2</sub> mitigation target will bring much benefit to China's social economy development[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1): 103-106]
- [42] 能源基金会. 中国碳中和综合报告 2020: 中国现代化的新征程: “十四五”到碳中和的新增长故事[R/OL]. (2020-12-10) [2023-09-09]. [https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/Full-Report\\_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality\\_ZH.pdf](https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/Full-Report_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality_ZH.pdf). [Energy Foundation. China Carbon Neutral Synthesis Report 2020: China's New Journey to Modernization: The 14th Five-Year Plan to a New Growth Story of Carbon Neutrality[R/OL]. (2020-12-10) [2023-09-09]. [https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/Full-Report\\_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality\\_ZH.pdf](https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-lceg-20201210/Full-Report_Synthesis-Report-2020-on-Chinas-Carbon-Neutrality_ZH.pdf).]
- [43] IEA. 中国能源体系碳中和路线图[R/OL]. (2021-09) [2023-09-09]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh,License:CCBY4.0>. [IEA. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China [R/OL]. (2021-09) [2023-09-09]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh,License:CCBY4.0>.]
- [44] 段宏波, 汪寿阳. 中国的挑战: 全球温控目标从2℃到1.5℃的战略调整[J]. 管理世界, 2019, 35(10): 50-63. [Duan H B, Wang S Y. From 2℃ to 1.5℃: China's challenges to attain the global warming-limit targets[J]. Journal of Management World, 2019, 35 (10): 50-63.]
- [45] IEA. Net Zero by 2050[R/OL]. (2021-05) [2023-09-09]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050,License:CCBY4.0>.
- [46] BCG. 中国气候路径报告: 承前继后、坚定前行[R/OL]. (2020-10) [2023-09-09]. <https://pdf.bcgpublications.cn/pdfs/114.pdf>. [BCG. China's Climate Path Report: Build on the Past and Move Forward Firmly[R/OL]. (2020-10) [2023-09-09]. <https://pdf.bcgpublications.cn/pdfs/114.pdf>.]
- [47] 王克, 刘芳名, 尹明健, 等. 1.5℃温升目标下中国碳排放路径研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 7-17. [Wang K, Liu F M, Yin M J, et al. Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5℃ target[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 7-17.]
- [48] 崔学勤, 王克, 邹骥. 2℃和1.5℃目标对中国国家自主贡献和长期排放路径的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 1-7. [Cui X Q, Wang K, Zou J. Impact of 2℃ and 1.5℃ target to INDC and long-term emissions pathway of China[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 1-7.]

# Prediction of carbon emissions from energy consumption in China under the “dual carbon” goal

LIU Chunmei, QIAN Xiaoyin

(School of Information Management & Engineering, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** [Objective] Facing the global issue of “carbon peak and carbon neutrality”, this study aimed to predict and simulate carbon emissions from energy consumption, explore the feasibility of carbon peaking and carbon neutrality time, and provide theoretical basis for promoting emission reduction. [Methods] In this study, the carbon emission coefficient method was used to calculate the carbon emissions from energy consumption in China from 1986 to 2019. Considering factors from the five aspects of economy, society, environment, energy, and technology, an indicator system including 18 variables was established, and five main factors were screened out by Lasso regression. Based on three machine learning methods and Lasso regression, six carbon emission prediction models including support vector regression (SVR), random forest (RF), back propagation neural network (BP), Lasso-SVR, Lasso-RF, and Lasso-BP were constructed. The models were evaluated based on the mean squared error (MSE) and mean average error (MAE). Combined with the scenario analysis method to set four scenarios of new normalization, green low-carbon, 2 °C target, and 1.5 °C target, the best prediction model was selected to simulate and analyze China’s energy consumption carbon emissions from 2020 to 2060 under the four scenarios. [Results] Under the four scenarios, with the intensification of emission reduction efforts, China’s carbon peaking platform period is shortened. The time points of carbon peak during the platform period in China are 2035, 2030, 2026, and 2025 respectively, and the peak values are 9.580, 7.448, 6.723 and 6.523 Gt CO<sub>2</sub>e. Under the 2 °C and 1.5 °C scenarios, China can achieve carbon neutrality as scheduled. Under all four scenarios China may achieve the 2 °C temperature rise target, but under the first two scenarios China will not achieve the 1.5 °C target. [Conclusion] Under the four scenarios, the peak value and peak time of China’s energy consumption carbon emissions are different, and the possibility of achieving carbon neutrality is also different. In order to achieve the goals of carbon peak and carbon neutrality as soon as possible, China must promote the optimization of industrial structure and energy system structure, increase investment in green assets, and help the development of emission reduction with technological progress.

**Key words:** energy consumption; carbon emission; prediction; scenario simulation; Lasso; SVR; RF; BPNN