

基于WOA-ELM的上海市交通碳排放测算及情景分析

顾越阳, 李程*

上海工程技术大学航空运输学院, 上海

收稿日期: 2023年10月10日; 录用日期: 2023年11月18日; 发布日期: 2023年11月24日

摘要

本研究旨在评估上海市交通部门碳排放能否在2030年前实现碳达峰目标。首先, 本研究通过STIRPAT模型筛选出9项指标作为上海市交通碳排放影响因素, 随后基于WOA-ELM算法构建了碳排放预测模型, 并以1995~2019年上海市交通碳排放相关数据为基础数据, 使用MATLAB软件搭建模型, 对上海市2020~2040年的交通碳排放量进行预测。通过与岭回归、传统ELM模型的预测结果对比, 本研究提出的碳排放预测模型具有较高的准确性, 同时设置各特征值变化率组合, 提出5种情景, 运用情景分析法对上海市2040年前的交通碳排放量做出预测, 最终得出结论: 上海交通需要平衡经济与交通发展、在能源结构方面持续创新、指定完善的减排政策。

关键词

碳排放预测, 情景分析, STIRPAT模型, 鲸鱼优化算法, 极限学习机

Measurement and Scenario Analysis of Shanghai's Transport Carbon Emissions Based on WOA-ELM

Yueyang Gu, Cheng Li*

College of Air Transport, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Oct. 10th, 2023; accepted: Nov. 18th, 2023; published: Nov. 24th, 2023

Abstract

This study aims to assess whether Shanghai's transportation sector can achieve peak carbon

*通讯作者。

emissions before 2030. Firstly, the research identifies nine indicators as influencing factors for Shanghai's transportation carbon emissions using the STIRPAT model. Subsequently, a carbon emissions prediction model based on the WOA-ELM algorithm is constructed, utilizing data related to Shanghai's transportation carbon emissions from 1995 to 2019. The MATLAB software is used to build the model and predict transportation carbon emissions in Shanghai from 2020 to 2040. By comparing the prediction results with ridge regression and traditional ELM models, the carbon emissions prediction model proposed in this study demonstrates high accuracy. Various combinations of eigenvalue change rates are set, and five scenarios are proposed. Scenario analysis is employed to forecast transportation carbon emissions in Shanghai up to 2040. The final conclusion drawn is that Shanghai's transportation sector needs to balance economic and transportation development, continue to innovate in terms of energy structure, and implement sound emission reduction policies.

Keywords

Carbon Emission Prediction, Scenario Analysis, STIRPAT Model, Whale Optimization Algorithm, Extreme Learning Machine

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

从 1824 年傅里叶(Joseph Fourier)首次阐释了气候变化的观点开始, 有关全球变暖的科学研究已有近 200 年历史[1]。为毫不动摇地直面由全球变暖引发的旱灾、海平面上升甚至各种复杂疾病等挑战, 中国提出“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的“双碳”目标。其中交通运输是全球温室气体排放的重要来源之一, 尤其是城市交通, 交通运输业的碳排放量约占全国终端碳排放量的 15%, 面临较大的碳减排压力[2] [3]。

在现有碳排放研究中, 主要以地区碳排放总量研究为主, 由大到小涉及国家级、省级、地区级等不同层面。此外研究也极为宽泛, 以各类不同行业作为切入点, 其中还囊括了经济、社会、环境等各个方面。目前国内常用的碳排放预测模型有趋势外推法[4]、环境库兹涅茨曲线[5]等传统统计学方法; 经典模型、组合模型等创新方法例如系统动力学[6]、神经网络模型[7]、投入产出模型[8]、灰色预测模型、可拓展的随机性的环境影响评估模型(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology STIRPAT)等[9]。国家层面上, 刘建翠[10]利用线性回归评估中国未来交通运输业的节约能源效率, 评估结果仍存在一定的局限性。朱长征等[11]在设置各主要影响因素增长水平的基础上, 利用岭回归构建碳排放预测模型。周银香和李蒙娟[12]基于 IEA 统计, 由运输方式建立交通碳排放测算模型并与国际 IEA 口径进行对比。区域层面上, 范育洁等[13]基于改进的 STIRPAT 模型, 利用岭回归对西北五省区交通碳排放量进行了测算。刘云龙等[14]构建了一个微分博弈模型, 研究了碳中和约束下跨区域交通运输碳排放消减机制。陈静[15]探讨上海市城市发展及其相应的交通碳排放问题, 科学考察交通碳排放的影响因素, 对碳减排具有重要的指导意义。卞利花和吉敏全[16]利用 STIRPAT 模型定量分析青海经济发展水平, 通过设置基准情景预测未来的碳排放量。武翠芳等[17]使用“自上而下”的碳排放计算方法, 并用 STIRPAT 模型确定影响甘肃省污染的各种因素。

上海是世界上最大的城市之一, 中国的经济中心, 也是中国交通最发达的城市之一, 研究上海交通产生的碳排放对中国交通规划、城市建设等具有代表性意义。2021年, 上海市人民政府出台的《上海市生态环境保护“十四五”规划》明确指出, 加强绿色高效交通运输体系建设, 到2025年碳排放总量提前达峰。所以研究上海城市交通碳排放现状, 推测未来不同情景下上海交通碳排放增量、碳排放结构是非常有必要的。为此, 全文根据IPCC“自上而下”法从1995~2019年的实际情况出发, 深入研究上海市交通碳排放问题, 并计算交通碳排放量数据。本文选择STIRPAT模型研究上海碳排放影响因素, 选择人口数量、城镇化水平、人均GDP、机动车保有量、旅客周转量、货物周转量、能源强度、能源结构、碳排放强度作为上海市的交通碳排放影响因素, 通过建立一个基于鲸鱼算法的改进极限学习机模型用以预测碳排放量, 运用模型描绘出上海未来交通碳排放的趋势, 并根据未来经济、社会和科技发展轨迹发展预设情景, 推论并总结一些有价值的建议, 以期有关政府机构的决策提供较为有力的参考。

2. 模型基础

2.1. 基于STIRPAT模型的碳排放影响因素

IPAT模型是一种有效的能源经济研究工具, 可以有效地预测碳排放量, York等[18]提出的STIRPAT模型, 是一种全新的、更加灵活、更加有效的模型, 标准表达式如下:

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (1)$$

在式中, I 、 P 、 A 、 T 分别代表环境影响、人口、经济发展水平和技术进步; a 是常数项, b 、 c 、 d 则是需要估计的参数; e 是一个误差项。对式(2)等号两边同时取自然对数, 得:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (2)$$

式中因变量为 $\ln I$, 自变量为 $\ln P$ 、 $\ln A$ 、 $\ln T$, 常数项为 $\ln a$, 误差项为 $\ln e$ 。

STIRPAT模型延续了IPAT的乘积结构, 为了更准确地对上海市未来交通碳排放量的趋势进行预测, 根据上海市发展变化特点以及上海交通能源消耗特点, 扩展后的STIRPAT模型表达式为:

$$C = \alpha P^{\beta_1} A^{\beta_2} PT^{\beta_3} GT^{\beta_4} VEH^{\beta_5} T^{\beta_6} IS^{\beta_7} ES^{\beta_8} U^{\beta_9} \varepsilon \quad (4)$$

在实际分析中, 我们通常会将式(4)的左右部分取对数, 并用降幂的方法来计算:

$$\ln C = \ln \alpha + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln PT + \beta_4 \ln GT + \beta_5 \ln VEH + \beta_6 \ln T + \beta_7 \ln IS + \beta_8 \ln ES + \beta_9 \ln U + \ln \varepsilon \quad (5)$$

式中: C 表示交通运输碳排放量; α 是常数; P 表示总人口; A 表示人均GDP; PT 表示客运周转量; GT 表示货运周转量; VEH 表示民用汽车拥有量; T 表示碳排放强度; IS 表示能源强度; ES 表示能源利用结构; U 代表着城市化的程度; ε 则是一个随机的扰动因素。根据弹性系数理论, 回归方程中的系数实际上揭示的是因变量和自变量之间的弹性联系, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 、 β_6 、 β_7 、 β_8 、 β_9 为弹性系数, 维持其他自变量不变, 当 P 、 A 、 PT 、 GT 、 VEH 、 T 、 IS 、 ES 、 U 变化1%时, 分别引起 C 的 $\beta_1\%$ 、 $\beta_2\%$ 、 $\beta_3\%$ 、 $\beta_4\%$ 、 $\beta_5\%$ 、 $\beta_6\%$ 、 $\beta_7\%$ 、 $\beta_8\%$ 、 $\beta_9\%$ 的变化。

2.2. 极限学习机的基本原理

极限学习机(extreme learning machine, ELM)由于学习速度快、泛化性能好, 在许多领域得到了广泛应用。ELM的主要特点是输入层与隐含层间的连接权值和隐含层神经元的阈值是随机生成的, 改变隐含层神经元的个数可以训练迭代至全局最优解, 极限学习机结构的示意图如图1所示:

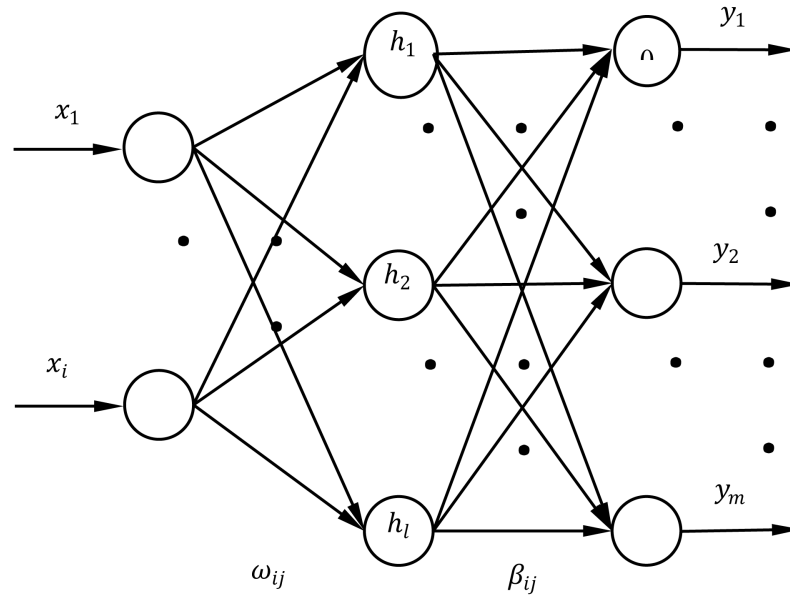


Figure 1. Schematic of the extreme learning machine
图 1. 极限学习机示意图

在图 1 中，从左侧进入 x_i 为输入数据量，假设神经元输入层个数为 i ，隐含层神经元个数为 1 ，输出层神经元个数为 m ，则单隐含层神经网络输入数据 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]^T$ ，若给定 p 个样本 (x_i, t_i) ，期望输出量为 $t_i = [t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im}]^T$ ；随后为随机生成的隐含层所有参数，具体有输入层与隐含层间的连接权值 ω_{ij} 和隐含层的阈 h_j ； β_{ij} 表示输出权重，是连接隐含层与输出层间的桥梁[19]。

2.3. 鲸鱼优化算法的基本原理

鲸鱼的捕食方式之一就是使用气泡网，他们通过沿圆形或“9”字形路径产生独特的气泡来完成的，由此特殊的捕食行为启发而来的鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是一种较新的启发式算法，其行为如图 2 所示。



Figure 2. Bubble net feeding behaviour of humpback whales
图 2. 座头鲸的气泡网捕食行为

气泡网捕食行为是一种特殊的捕食技术，它可以让座头鲸在搜索空间的同时快速定位目标猎物，并

且可以根据当前的情况, 迅速调整自身的行动路线, 以达到最优的捕食效果。在定义了最佳搜索路径之后, 其他搜索路径使座头鲸更新位置, 趋向于最佳搜索路径, 具体数学模型描述为:

$$D_1 = |CX^*(t) - L(t)| \quad (6)$$

$$L(t+1) = L^*(t) - AD_1 \quad (7)$$

式中: 当前迭代次数 t 影响座头鲸的坐标向量 $L(t)$, 下一次迭代即 $t+1$ 的目标向量 $L(t+1)$, 座头鲸坐标向量的当前最优解 $L^*(t)$ 如果不是全局最优解, 则需要继续迭代, 直到达到更优解。

3. 碳排放模型构建

3.1. 上海交通能源结构

由于各类一次性化石能源消耗, 产生了以 CO_2 为主的温室气体, 确定交通能源结构是测算交通碳排放量的第一步。《2022 年度上海市综合交通发展年度报告》中指出, 公共交通分担率回升, 客流较去年快速恢复, 货物运输量快速增长。上海的交通方式非常多元化主要交通方式所涉及到的能源主要有原煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油[20]。上海的交通运输业虽然主要依赖于化石燃料, 但是在推广新能源和清洁能源方面也取得了一些进展。《2022 年上海绿色交通发展年度报告》中指出 2022 年上海新能源汽车年度推广量为 33.6 万辆, 较去年相比增长 32%, 累计推广总量约 101.4 万辆, 道路运输行业新能源格局基本形成, 所以电力也是上海交通运输能源结构中不可或缺的一部分。

3.2. 碳排放影响因素

由于本文研究的对象是交通领域的碳排放, 大量文献表明不管是地区、工业、建筑还是交通多个领域人口数量、人均 GDP 和碳排放量均呈现很强的相关性, 因此首选人口数量、人均 GDP 这两个因素。城镇化会使大量人口聚集, 导致交通压力变大, 与交通碳排放影响关系密切, 同时通过梳理文献选择城镇化水平、机动车保有量、旅客周转量、货物周转量作为影响因素。技术水平也从侧面反映了上海的经济水平, 能源结构表现了上海在技术方面为低碳所做的准备, 能源强度和碳排放强度能够衡量的经济发展过程中对能源的利用效率, 可以量化在经济发展中对能源利用是否高效。结合交通碳排放研究的文献和以上分析结果, 梳理本文所涉及的交通碳排放的影响因素如表 1 所示。

Table 1. Sorting out the factors affecting transport carbon emissions

表 1. 交通碳排放影响因素梳理

碳排放影响因素	碳排放影响指标	本研究中含义	文献
人口因素	人口数量	上海地区年末户籍人口总量	文献[10] [12] [16] [20] [21] [22] [23] [24] [26]
	城镇化水平	城市人口与总人口的比值	文献[16] [19] [20] [22] [24] [26]
财富因素	人均 GDP	上海市生产总值与上海地区年末户籍人口总量的比值	文献[10] [16] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26]
	机动车保有量	上海地区民用汽车保有量	文献[16] [21] [22]
	旅客周转量	上海地区旅客周转量	文献[10] [16] [21] [26]
	货物周转量	上海地区货物周转量	文献[10] [16] [21] [26]

Continued

	能源结构	上海地区生清洁能源消费占有能源消费比例	文献[23] [25]
技术水平	能源强度	上海地区生能源消耗量与上海地区生产总值的比值	文献[12] [16] [20] [21] [22] [23] [25]
	碳排放强度	上海地区交通运输行业碳排放总量与上海市生产总值的比值	文献[16] [23] [24] [25] [26]

3.3. 碳排放预测模型构建

通过前述基础模型介绍, 以下是本文 WOA-ELM 预测模型的构建思路。

(1) 根据上述交通碳排放影响因素, 利用改进的 STIRPAT 模型, 将其处理为交通碳排放预测模型的输入数据集。

(2) 通过采用 WOA 算法, 可以有效地抑制 ELM 模型产生局部最优解, 并且通过不断地调整网络输入权重和隐藏层阈值, 从而获得更加准确的预测结果。

(3) 模型构建完成后需要进行精度检验, 根据数据集使用适合的误差指标, 并对比不同模型的预测精度与预测误差。

(4) 模型各参数确定后需要对未来进行预测, 通过情景分析设定五种情景进行讨论, 对上海未来的交通碳排放进行预测。

(5) 总结所得数据、情景分析结果以及模型特征并提出建议。

通过文献对比分析, 在进行碳排放预测可以采用以下四种不同的参量来衡量模型的准确性: 均方根差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分误差 MAPE (mean absolute percentage error)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)及决定系数 R^2 , 本文选择这四种评价预测模型效果的指标, 这 4 种误差指标的计算方法如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x'_i - x_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x'_i - x_i| \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - \bar{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (11)$$

式中: x_i 表示预测对象的真实值, 单位是碳排放量(万吨); x'_i 表示预测对象的预测值; \bar{x}_i 表示预测对象实际均值; n 表示数据量。

4. 实证分析

4.1. 数据来源

交通碳排放总量计算方面, 原煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、电力 7 种主要能源使用量来源为国家统计局网站上海地区数据。

指标计算方面本文使用的人口数量、人均 GDP、城市化率数据均取自《上海统计年鉴》，但由于上海自 2016 年取消上海农业户口与非农业户口性质区分，统一为居民户口，所以城市化率根据国家城市化进程和历年上海城市化进程预测得到；旅客周转量、货物周转量、机动车保有量、碳排放强度、能源强度、能源利用结构来自于《中国能源统计年鉴》与国家统计局网站，各类能源平均低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率均参考《公共机构能源资源消费统计调查制度》。

4.2. 交通碳排放测算

交通碳排放总量只能通过相应的核算方法进行测算，鉴于上文分析的上海交通能源结构，以及可以收集到的各类数据，本文采用的交通碳排放量测算方式为碳排放系数法，具体计算方式参考《IPCC 国家温室气体清单指南》(2006)，采用“自上而下”法来计算上海交通碳排放量，将收集到的能源折算成标准煤消耗量，然后乘上各类能源的碳排放系数，以此推测出交通碳排放量，具体的测算计算如下：

$$C = \sum_i C_i = \sum_i E_i \times F_i \tag{12}$$

$$\sum_i F_i = CV_i \times ALV_i \times CF_i \times COF_i \times \frac{44}{12} \tag{13}$$

式中： i 代表上文提及的 7 种能源种类； C 表示交通部门二氧化碳排放总量； C_i 表示第 i 种能源消费产生的二氧化碳量； E_i 表示第 i 种能源的消费量； F_i 表示第 i 种能源的碳排放系数； CV_i 表示单位热值含碳量； ALV_i 表示平均低位发热量； CF_i 表示折标准煤系数； COF_i 表示碳氧化率；44/12 是碳与二氧化碳的分子量。电力能源消耗的计算较为特殊，电力折标准煤系数为 0.1229 kgce/(kW·h)。本文在选择影响因素时，同时使用皮尔逊矩相关系数检测其与碳排放量的线性相关性。皮尔逊相关分析是一种统计方法，用于评估两个连续变量之间线性关系的强度和方向，相关系数的绝对值越接近 1，则该特征与碳排放量的相关性越强。如图 3 所示，以上所选因素与交通碳排放量的皮尔逊相关系数绝对值都大于 0.80，接近 1，可得本文所选择的影响因素与交通碳排放量之间存在较强的线性相关性。

年份	P	A	VEH	PT	GT	U	IS	
年份	1	0.994	0.975	0.955	0.973	0.97	0.973	-0.974
P	0.994	1	0.976	0.952	0.97	0.965	0.975	-0.964
A	0.975	0.976	1	0.995	0.992	0.926	0.92	-0.907
VEH	0.955	0.952	0.995	1	0.989	0.898	0.883	-0.871
PT	0.973	0.97	0.992	0.989	1	0.915	0.922	-0.908
GT	0.97	0.965	0.926	0.898	0.915	1	0.973	-0.963
U	0.973	0.975	0.92	0.883	0.922	0.973	1	-0.981
IS	-0.974	-0.964	-0.907	-0.871	-0.908	-0.963	-0.981	1
ES	0.98	0.975	0.928	0.901	0.931	0.967	0.982	-0.982
T	-0.973	-0.966	-0.909	-0.872	-0.909	-0.964	-0.984	0.998
C	0.947	0.952	0.87	0.828	0.871	0.949	0.98	-0.972

Figure 3. Heat map of Pearson's correlation coefficient

图 3. 皮尔逊相关系数热力图

4.3. 碳排放预测模型效果检验

交通运输碳排放及其影响因素由于单位不同且数量级差别很大，为了消除数据之间的数量级差，必须进行归一化处理后才能作为组合预测模型的输入参数。归一化处理就是把数值转化为[0, 1]之间的数，

具体处理方法如下:

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

式中: 归一化之后的数据 x_i^* 通过计算得到, x_i 是初始输入数据, x_{\max} 是序列中最大的数值, x_{\min} 是序列中最小的数值。

本文选取 9 个交通碳排放影响因素作为输入, 交通碳排放总量作为输出, 具体实现平台为 MATLAB。为了测试组合预测模型的拟合效果, 本文选择 1995~2014 年的历史数据作为预测模型的训练集。为了检验模型的预测精度, 本文选择 2015~2019 年的历史数据作为测试集。

在回归预测领域, 有较多文献都将岭回归作为主要预测模型。岭回归本质上是由最小二乘法改进得到的, 可以有效地处理在碳排放预测中的多重共线性问题, 但是岭回归有参数选择敏感、解释性差等弊端, 在处理较多数据、复杂度较高的模型时会增加模型的偏差。本文使用岭回归、传统 ELM 作为对照, 用三种不同的模型对 2015~2019 年上海市交通碳排放量进行预测, 在岭回归预测中根据方差扩大因子法确定 K 值为 0.08; ELM 及 WOA-ELM 选择的输入层神经元数目为 9, 隐含层神经元数目设定为 300, 输出层神经元数目为 1, 激活函数为 Mish 函数, 该函数由 Leaky_relu 函数的基础上改进而来, 以下是 Mish 函数的函数关系式:

$$\text{Mish} = x \times \tanh(\ln(1 + e^x)) \quad (15)$$

将这 3 种算法分别多次运行求得预测结果的平均值, 得到 2015~2019 年上海交通碳排放量的预测结果及不同模型的上海交通碳排放量预测结果如图 4 所示。

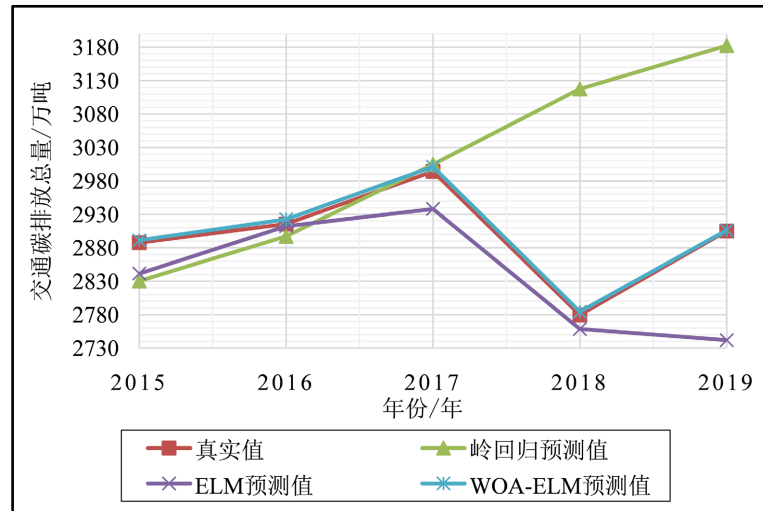


Figure 4. Comparison of prediction results of ridge regression, ELM, and WOA-ELM models
图 4. 岭回归、ELM、WOA-ELM 模型预测结果对比

由图 4 可以直接观察到各个模型对于碳排放量的预测量, 可以看出各模型预测效果由高到低为 WOA-ELM > ELM > 岭回归。表 2 列出了在预测交通碳排放量时本文所用模型的误差指标, 其中 RMSE、MAPE 和 MAE 是数值越小精度越高, R^2 则数值是越接近 1 精度越高。由表 2 明显可见预测精度由高到低为 WOA-ELM > ELM > 岭回归, 表示本文 WOA-ELM 模型在预测交通碳排放总量时误差最小, 对于交通碳排放总量的预测较为准确, 精度较传统方法有较大的提升。

Table 2. Results of the calculation of error indicators**表 2.** 误差指标计算结果

误差指标	岭回归	ELM	WOA-ELM
RMSE	0.0662	0.0348	0.0008
MAPE	0.1958	0.0861	0.0026
MAE	0.0471	0.0283	0.0006
R ²	0.9750	1.1212	0.9990

5. 上海交通碳排放未来情景评估

5.1. 碳排放影响因素情景设定

情景设定需结合中国宏观发展规划、上海本地发展规划, 由政策和发展方向判定碳排放影响因素的变化趋势, 本文将结合时事, 精准体现未来上海宏观数据的变化。

为设定不同情景, 预测各条件下上海市碳排放量因素及总量的变化趋势以及达峰时间和峰值, 本文使用优化后的情景分析法设定上海市各特征的变化速率。以 2025 年为初始年, 将 2025~2040 年按每 5 年划分为一个时间段, 采用等差的方式设定每个时间段初始时间 5 个特征的低、中、高 3 个档位的变化率, 并根据特征变化速率的不同组合形式建立 5 个不同的发展情景。本文中, 需要确定的宏观指标有人口总量、人均 GDP、机动车保有量、旅客周转量、货物周转量、能源强度、能源利用结构。

(1) 人口数量设置。根据上海第七次人口普查数据, 2010~2020 年增长率为 0.8% [27], 其中 2015~2019 年增长率仅为 0.13%, 人口增长率较大幅度放缓; 上海市城市总体规划(2017~2035 年)中提到, 2035 年常住人口规模应控制在 2500 万人左右; 由此计算出 2019~2035 年均变化率应该控制在 0.185% 左右。综上所述本文的人口数量情景在 2025 年开始低速增长率为 0.16%、中速增长率为 0.18%、高速增长率为 0.20%。由于人口数量增长率放缓, 每年各增长率将下降 0.002%。

(2) 人均 GDP 设置。上海市十五届人大六次会议提出, 2022 年上海市全市生产总值预期目标增加 5.5% 左右; 由图 5 可知, 受新冠疫情影响, 经济发展增速放缓, GDP 增长率出现较大波动, 为近几年来最低点, 而后再恢复但总体呈降低趋势, 考虑疫情已经放开但对地区的影响是持续性的, 所以将适当调整人均 GDP 增速, 稳住经济发展。综上所述本文的人均 GDP 设置在 2025 年开始低速增长率为 5%、中速增长率为 6%、高速增长率为 7%, 每年各增长率将下降 0.1%。

(3) 民用汽车保有量设置。《上海市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》, 其中提出到 2025 年本地新能源汽车产值占汽车行业比重达到 35% 以上, 而本文无法详细区分新能源车与传统燃油车的交通碳排放量差异, 所以增长率由历史数据推测得出。如图 6 可以发现汽车保有量增速放缓而且趋于平稳, 样本数据增长率最小值为 0.9%, 但大部分都要达到 8% 以上, 综上所述的民用汽车保有量设置在 2025 年开始低速增长率为 2%、中速增长率为 5%、高速增长率为 8%。

(4) 旅客、货物周转量设置。上海市城市总体规划(2017~2035 年)中提到, 上海市未来几年将推进构建由铁路、城市轨道、公交系统等构成的多模式公共交通系统, 在多元化的城市交通环境下交通运输效率得到了提升, 随之交通碳排放也将逐年提高。由图 7 和图 8, 由计算可得 2015~2019 年旅客周转量年均增长率为 4.2%, 货物周转量年均增长率为 6.2%。疫情对旅客周转量有较大的影响, 但随着恢复运输客运量立马回升, 综合近几年的增长规律, 本文的旅客周转量的设置低速增长率为 2%、中速增长率为 4%、高速增长率为 6%, 每年各增长率将下降 0.02%; 货物周转量的设置低速增长率为 6%、中速增长率为 8%、高速增长率分别为 10%, 每年各增长率将下降 0.02%。

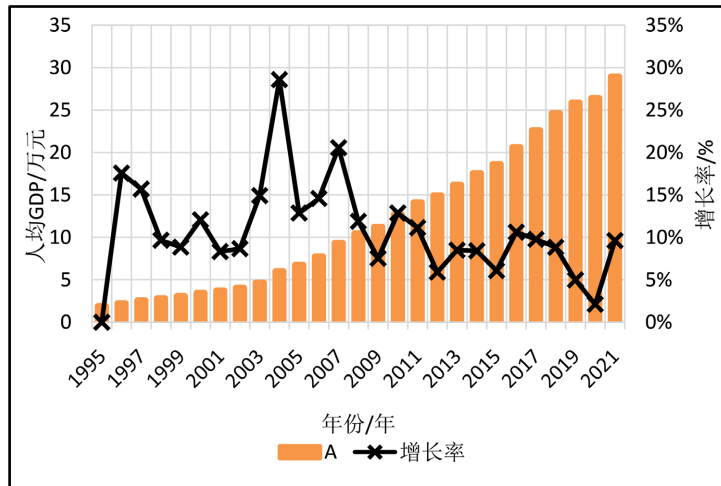


Figure 5. Historical GDP per capita data and growth rate trends
图 5. 历史人均 GDP 数据及增长率走势图

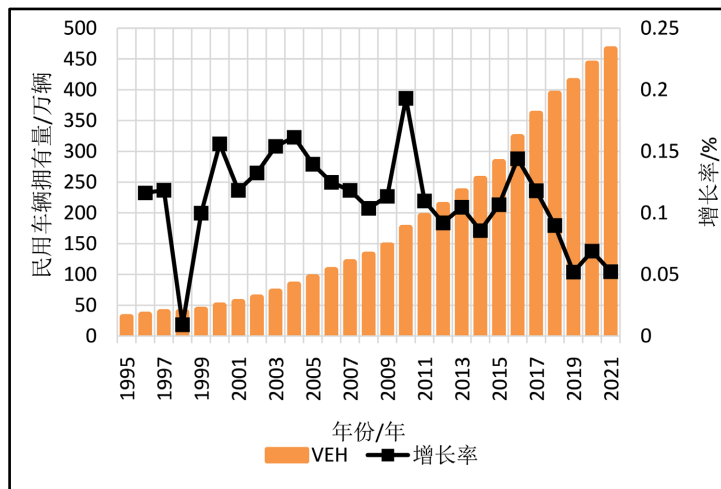


Figure 6. Historical civilian vehicle ownership data and growth rate trend
图 6. 历史民用汽车保有量数据及增长率走势图

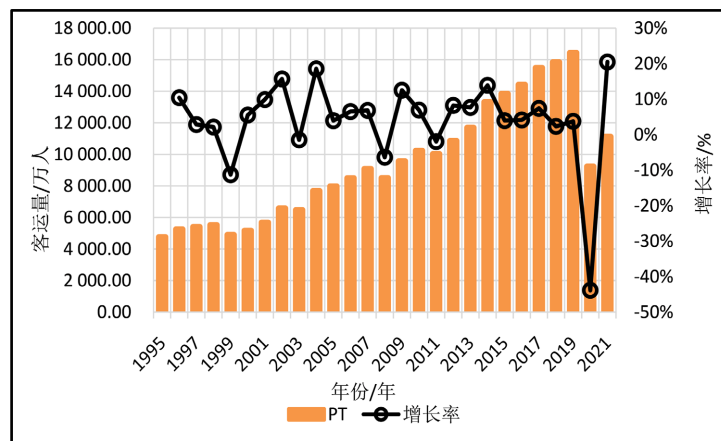


Figure 7. Historical passenger turnover data and growth rate chart
图 7. 历史旅客周转量数据及增长率走势图

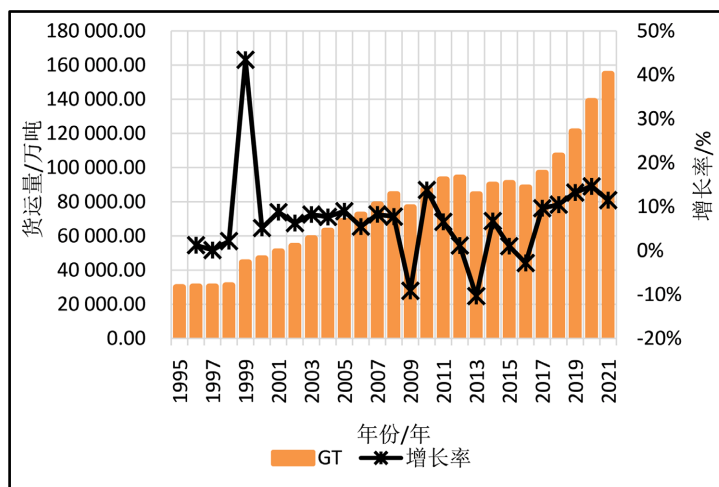


Figure 8. Historical cargo turnover data and growth rate chart
图 8. 历史货物周转量数据及增长率走势图

(5) 能源强度设置。上海市“十四五”规划中明确将创新放在现代化建设的全球核心地位, 由此体现创新是未来上海的重要发展规划, 而且将长期予以支持。通过计算可得 2015~2019 年能源强度年均增长率为-5.8%, 由图 9 可以看出能源强度增速摇摆但较为稳定, 虽然疫情对科技创新驱动影响较大, 但是由于政府持续对创新发展给予支持, 综上本文的能源强度设置在 2025 年开始低速增长率为-7%、中速增长率为-5%、高速增长率为-3%, 每年各增长率将增加-0.1%。

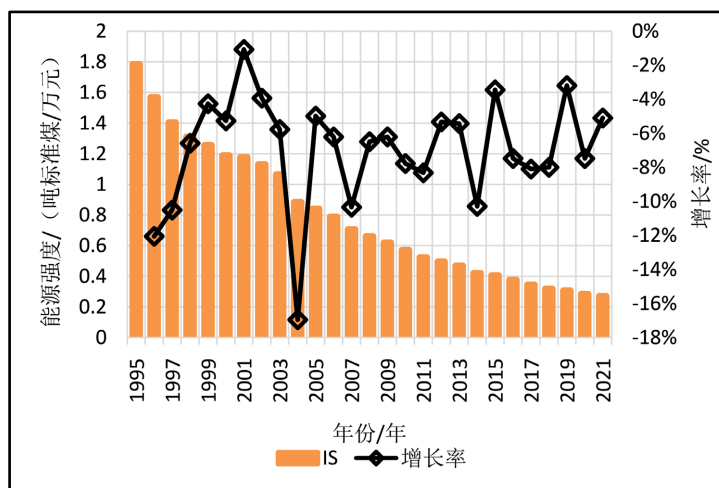


Figure 9. Historical energy intensity data and growth rate trends
图 9. 历史能源强度数据及增长率走势图

(6) 能源利用结构设置。上海市城市总体规划(2017~2035 年)中提到将全面降低碳排放, 合理优化能源结构, 大幅度提高清洁能源占能源消费的比例, 让太阳能、风能、潮汐能、浅层地温能等可再生能源占一次能源供应的比例进一步提高。通过已有数据计算, 2015~2019 年能源结构年均增长率为 0.8%, 由图 10 能源利用结构增长率较 2019 年已恢复增长, 疫情对能源利用结构的影响不直观, 与政府政策及科学发展关系较大, 综上本文的能源利用结构设置低速增长率为-1%、中速增长率为 1%、高速增长率为 3%, 每年各增长率将增加 0.1%。

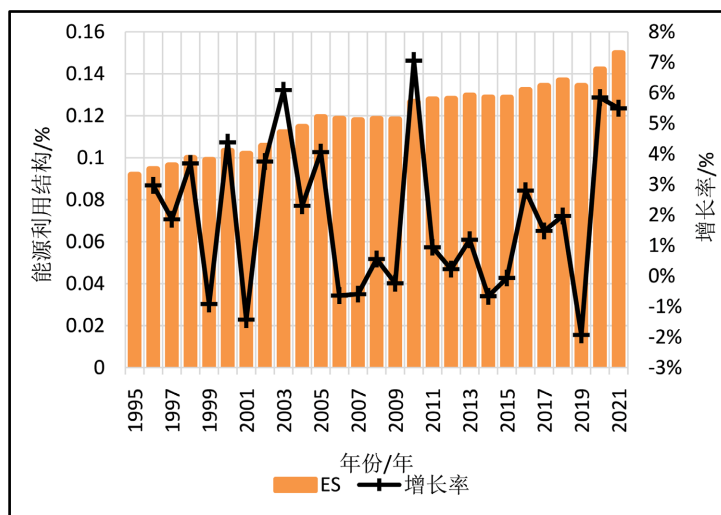


Figure 10. Historical energy use structure data and growth rate trends
图 10. 历史能源利用结构数据及增长率走势图

5.2. 碳排放影响因素情景模拟

通过上文讨论确定的各个特征不同变化速率, 为预测上海市 2025~2040 年交通碳排放达峰时间及对应的碳排放量, 本文构建 5 种不同情景进行预测。

C1 情景: 全局低碳发展。根据《上海市生态环境保护“十四五”规划》[28], “十四五”期间上海市持续推动能源、工业等结构调整, 大力践行绿色低碳生活方式。若坚持实施高效低碳措施, 随之则会影响经济发展水平, 大力推动新能源汽车、新能源公共交通也会改变出行方式, 研究前沿科技优化能源利用结构, 设置 C1 情景各特征均选择低变化率。

C2 情景: 节能减排发展。“十三五”规划期间的生态优先、绿色发展之路, 本情景下上海市将继续调整能源结构, 强化资源配置, 降低能源强度。能源结构调整优化可以在把握经济增长的同时减少交通碳排放, 设置 C2 情景能源强度、能源结构、民用汽车保有量、旅客、货运周转量选取低变化率, 人口、人均 GDP 基础特征保持中等变化率。

C3 情景: 基准平稳发展。分析“十三五”规划成果以及上海市自身因素的变化趋势, 上海市经济增长已经从高速向中高速增长阶段转换。在保持原有政策的基础上, 不再考虑特殊的减排措施, 经济稳步增高、能源稳步优化, 设置 C3 情景各特征均选择中等变化率。

C4 情景: 综合理想发展。本情景强调对能源使用量的严格控制, 通过新能源建设, 大力提升清洁能源的使用比例, 优化能源利用结构。同时, 我们要尽可能地保证上海市的经济发展质量和速度, 平衡经济增长与碳排放减少之间的关系, 实现两者的和谐发展, 以塑造一个宜居的城市。设置 C4 情景能源强度、能源结构选择低变化率, 人口选择中变化率, 其余特征均选择高变化率。

C5 情景: 自由提升发展。本情景则为高速发展情景, 经济为发展的重心, 不控制汽车保有量的规模。由此带来的影响则是不注重环境问题和气候变化, 不注重能源优化与能源消耗量, 致使环境保护为经济发展让步, 设置 C5 情景各特征变化率均选择高变化率。

5.3. 碳排放预测结果分析

由于能源数据最新只有 2019 年, 但是影响因素数据已更新至 2022 年, 本文 2022~2025 年数据特征变化率根据各情景 2025 年所设定的初始变化率为准, 从 2022 年至 2025 年每年增长率固定不做调整。

经计算得到上海市未来的交通碳排放达峰时间及峰值如图 11 所示, 各情景模式的交通碳排放量趋势不尽相同, 数据为每五年取一个特征点, 表明以上情景都能在 2035 年前达峰, 但达峰时间和峰值有很大差距。

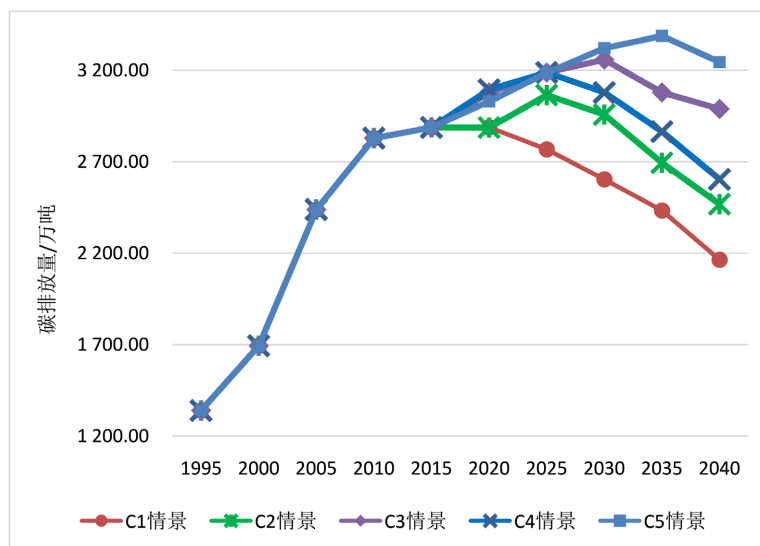


Figure 11. Projections of total carbon emissions by scenario, 1995~2040
图 11. 1995~2040 年各情景碳排放总量预测图

C1 情景: 全局低碳发展使得此情景达峰时间最早, 在 2021 年即完成达峰, 峰值为 2888.75 万吨。

C2 情景: 节能减排的同时平衡发展使得碳排放量在 2024 年达峰, 峰值为 2886.90 万吨。C1 情景和 C2 情景都可完成上海市交通部门在 2025 年前达峰的目标, 但达峰时间相差 3 年。

C3 情景: 平稳发展使得碳排放量较 C2 情景延后 5 年, 即 2030 年达峰, 峰值为 3258.14 万吨。C3 情景表示若不针对节能减排实行相应政策, 上海市交通部门无法实现在 2025 年前达峰, 但能完成在 2030 年前达峰。

C4 情景: 理想发展使得碳排放量于 2028 年达峰, 峰值为 3188.75 万吨。较 C1 情景达峰时间晚了 7 年, 相峰值高出 300 万吨, 但较 C3 情景提前两年。若只从能源优化的角度入手, 上海市交通部门无法在 2025 年前达峰, 若想实现早日达峰的目标, 需制定放缓 GDP 增速、优化公共交通、减缓民用汽车保有量等政策。

C5 情景: 自由提升发展, 达峰时间将最晚于 2035 年达峰, 峰值最高达到 3388.16 万吨, 比 C1 情景高出 17.29%。若无任何节能减排措施、继续牺牲环境发展经济的情形, 上海市交通部门无法按期完成国家碳达峰目标。因此, 为实现碳达峰的目标, 上海市对于交通部门与城市的发展必须要做出相应规划, 如新能源汽车、新能源公共交通等领域, 还需精确把控能源利用结构、优化能源强度等, 设立合理的碳减排目标。

通过前文的讨论, C1 情景与 C2 情景能满足上海市交通部门 2025 年前实现碳达峰的目标。为应对全球气候变化, C1 情景虽然实现碳达峰的速度最快、达峰峰值最小, 在降低温室气体排放压力上较为明显, 但是这种情景将节能减排、低碳发展为主要目标, 牺牲了经济发展、社会发展。上海作为国际经济中心、科技创新中心、交通运输多元化代表城市和国际化大都市的自身城市定位, 交通运输业的发展、经济发展与节能环保都需要统筹兼顾, 所以要以环保发展为主, 控制能源消耗、能源利用结构为辅。因此兼顾经济发展的 C2 情景更适合作为上海未来一段时间发展的首选方案。

6. 结论与建议

6.1. 结论

本文得到以下结论:

(1) 本文提出的预测模型有极小误差指标值, 在碳排放预测精度上较岭回归预测和传统的 ELM 模型有较大优势, 而且此模型不仅可用于交通碳排放预测, 也可应用于其他多特征输入单输出的预测模型。

(2) 针对上海市未来的交通碳排放量趋势设计的 5 种不同情景, 只有 C1 情景和 C2 情景能满足上海市交通部门 2025 年前实现碳达峰的目标。为了有效地减少碳排放, 交通部门应该采取更加积极的措施, 如优化能源利用结构、推广新能源出行方式, 以期尽快达到碳排放峰值, 并采取有效的措施来应对全球气候变暖的挑战。

6.2. 建议

根据上述研究结论, 针对上海市交通部门碳达峰的影响因素提出以下政策建议:

(1) 优化经济与交通运输的关系。经济是影响碳排放的关键因素之一, 交通运输系统对经济的影响是深远的, 它在经济发展和社会进步中起着至关重要的作用。交通运输系统可以促进贸易、连接市场、提高生产效率、促进地区发展等等。因此应把握关键因素, 促进经济高质量增长, 持续优化人口结构和人口布局。

(2) 能源强度和能源利用结构需持续创新。据《上海市先进制造业发展“十四五”规划》指出, 到 2025 年, 上海新能源汽车年产量超过 120 万辆, 产业规模突破 3 500 亿元。应尽快实现以清洁能源为主的能源消费结构, 不断改善能源结构, 增加清洁能源使用比例, 大力推广清洁能源, 减少对化石能源的依赖; 改进公共交通系统建设, 提高交通运输效率, 促进绿色低碳交通方式的形成。

(3) 政策引导是节能减排的重要路径。以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导, 深入贯彻习近平生态文明思想, 紧紧围绕“五个中心”和生态之城建设目标, 逐步完善充电桩、加氢站布局; 优化完善能耗双控制度, 合理确定各区能耗强度降低目标; 健全制度标准, 针对交通运输建立健全有利于绿色低碳循环发展的制度体系。

6.3. 总结

本文首先利用扩展的 STIRPAT 模型梳理影响碳排放的主要因素, 确定影响交通碳排放的宏观指标。随后构建了一种具有较高预测精度的 WOA-ELM 预测模型, 通过对比 2015~2019 年不同模型交通碳排放总量的预测结果和误差指标, 证明了 WOA-ELM 较其他模型能够更为准确地描述未来发展状况。最后进行情景分析, 对上海 2025~2040 年的交通碳排放进行预测, 设定 5 种不同的情景进行分析。分析上海市交通碳排放对于其他城市而言有重要的借鉴意义, 由情景设计可知作为国际化大都市节能减排的方法至关重要。上海应继续积极发展科技创新, 为“双碳”目标提供思路与经验, 并持续优化城市交通运输方式, 与各地区分享案例, 推动低碳技术、低碳出行方式, 全国碳达峰、碳中和目标出一份力。

基金项目

上海高校市级重点课程项目“统计学”(s202108002)。

参考文献

- [1] 牟砚堂, 柯遵科. 全球变暖的科学共识与美国公众的误解探析[J]. 自然辩证法研究, 2022, 38(11): 64-70.
- [2] 刘青春, 赵培雄, 袁玉娟, 等. 碳中和目标下城市绿色交通体系构建研究——以济南市为例[J]. 环境保护, 2021,

49(增刊 2): 33-39.

- [3] 吴俊, 蔡云鹏. “碳达峰、碳中和”目标下交通运输转型发展对策思考[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(85): 33-36.
- [4] 董聪, 董秀成, 蒋庆哲, 等. 《巴黎协定》背景下中国碳排放情景预测——基于 BP 神经网络模型[J]. 生态经济, 2018(2): 18-23.
- [5] 廉勇. 经济层次与环境污染: 基于碳排放的环境库兹涅茨曲线研究[J]. 统计与决策, 2021, 37(20): 146-150.
- [6] 刘菁, 赵静云. 基于系统动力学的建筑碳排放预测研究[J]. 科技管理研究, 2018(9): 219-226.
- [7] 仇国芳, 蔡卓珉. 基于粗糙集-神经网络方法的陕西省碳排放预测研究[J]. 生态经济, 2019(10): 25-30.
- [8] 王磊. 基于投入产出模型的天津市碳排放预测研究[J]. 生态经济, 2014(1): 52-56.
- [9] 张军莉, 刘丽萍. 国内区域碳排放预测模型应用综述[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(4): 15-21.
- [10] 刘建翠. 中国交通运输部门节能潜力和碳排放预测[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 640-646.
- [11] 朱长征, 杨莎, 刘鹏博, 等. 中国交通运输业碳达峰时间预测研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 291-299.
- [12] 周银香, 李蒙娟. 基于 IEA 统计视角的我国交通碳排放测度与修正[J]. 绿色科技, 2017(12): 264-268+273.
- [13] 范育洁, 曲建升, 张洪芬, 等. 西北五省区交通碳排放现状及影响因素研究[J]. 生态经济, 2019, 35(9): 32-37+67.
- [14] 刘云龙, 陈蕾羽, 黄承锋. 碳中和约束下跨区域交通运输碳排放协同消减研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(4): 19-23+33.
- [15] 陈静. 上海市交通碳排放量与城市发展的关系研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 102-105.
- [16] 卞利花, 吉敏全. 青海交通碳排放影响因素及预测研究[J]. 生态经济, 2019, 35(2): 35-39+100.
- [17] 武翠芳, 熊金辉, 吴万才, 等. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省交通碳排放测算及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 826-834.
- [18] York, R., Rosa, E.A. and Dietz, T. (2003) STIRPAT, IPAT and ImpACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. *Ecological Economics*, **46**, 351-365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- [19] 林涛, 蔡睿琪, 张丽, 等. 基于 IBA-KELM 的风电功率区间预测方法[J]. 可再生能源, 2018(7): 1092-1097.
- [20] 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.
- [21] Zhang, H., Kong, X. and Ren, C.X. (2019) Influencing Factors and Forecast of Carbon Emissions from Transportation-Taking Shandong Province as an Example. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **300**, Article ID: 032063. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/3/032063>
- [22] Achour, H. and Belloumi, M. (2016) Decomposing the Influencing Factors of Energy Consumption in Tunisian Transportation Sector Using the LMDI Method. *Transport Policy*, **52**, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.07.008>
- [23] 杨绍华, 张宇泉, 耿涌. 基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4817-4826.
- [24] 王泳璇, 张觉丹, 丁哲, 等. 不同经济水平地区交通碳排放影响因素研究[J]. 生态经济, 2017, 33(12): 28-33+40.
- [25] Yang, T., Pan, Y., Yang, Y., et al. (2017) CO₂ Emissions in China's Building Sector through 2050: A Scenario Analysis Based on a Bottom-Up Model. *Energy*, **128**, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.098>
- [26] 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.
- [27] 上海市人民政府. 上海市第七次全国人口普查主要数据情况[N/OL]. 2021-05-19. <https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20210518/001a0cef127c499eb381fa8dc3208e95.html>, 2021-12-20.
- [28] 潘栋, 李楠, 李锋, 等. 基于能源碳排放预测的中国东部地区达峰策略制定[J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 1142-1152.