

基于改进 BP 神经网络的民航二氧化碳排放预测研究

张培文^{1,2}, 罗雨南¹, 杜亚倩³, 周枝峰¹

(1. 中国民用航空飞行学院经济与管理学院, 四川 618307; 2. 成都低空经济高质量发展研究中心, 四川 610100; 3. 中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 四川 618307)

摘要: 为实现民航业碳中和目标, 以 1996-2019 年的指标数据为样本, 构建基于改进麻雀算法优化的 BP 神经网络模型 (ISSA-BP), 并设置冻结、基准、渐进改进、替代和技术突破 5 种情景, 对民航 CO₂ 排放量的未来趋势进行预测。研究表明, ISSA-BP 模型的平均绝对百分比误差降至 1.7382%, 拟合优度达 0.9999, 有效克服了局部收敛问题。多情景模拟表明, 即使在未来最优减排情景下, 中国民航业仍需削减 58%-62% 的 CO₂ 排放量方能实现碳中和。研究据此提出综合减排路径, 包括提升可持续航空燃料占比至 70%、提高燃油效率以及加强碳汇补偿等措施。研究成果为民航业精准预测碳排放和制定低碳转型策略提供了科学依据。

关键词: 民航业; CO₂ 排放预测; 改进的 BP 神经网络; 情景分析; 碳减排潜力

中图分类号: U8

文献标识码: A

Prediction of Civil Aviation Carbon Dioxide Emission Based on Improved BP Neural Network

Zhang Peiwen^{1,2}, Luo Yunan¹, Du Yaqian³, Zhou Zhifeng¹

(1. School of Economics and Management, Civil Aviation Flight University of China, Sichuan 618307, China; 2. Chengdu Low altitude Economy High quality Development Research Center, Sichuan 610100, China; 3. School of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Sichuan 618307, China)

Abstract: To support civil aviation carbon neutrality, this study develops an Improved Sparrow Search Algorithm-optimized BP neural network (ISSA-BP) model using 1996–2019 data. Five scenarios—Freeze, Baseline, Gradual Improvement, Substitution, and Technological Breakthrough—are simulated to forecast future CO₂ emissions. Results show the ISSA-BP model achieves a MAPE of 1.7382% and R² of 0.9999, effectively avoiding local convergence. Simulations indicate that even under the optimal scenario, China's aviation sector must reduce CO₂ emissions by 58%–62% to reach carbon neutrality. An integrated reduction pathway is proposed, including raising sustainable aviation fuel use to 70%, improving fuel efficiency, and enhancing carbon sinks. This study provides a scientific basis for aviation emission prediction and low-carbon strategy formulation.

Key words: Aviation industry; CO₂ emissions prediction; Improved BP neural network; Scenario analysis; Carbon reduction potential

温室气体排放导致的全球气候变暖已成为当前国际社会面临的严峻挑战^[1]。为应对这一挑战, 各国共同签署了包括《巴黎协定》在内的多项减排协议, 标志着全球气候治理进入新阶段^[2]。作为全球减排的关键主体, 中国于 2020 年正式提出“双碳”战略目标, 即力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和^[3]。在交通运输部门中, 航空业碳排放占比持续攀升, 从 2000 年的 5% 增长至 2019 年的 10%, 预计将成为未来能源消费与 CO₂ 排放的重要增长源^[4]。尽管航空运输在国际经贸往来中具有不可替代的作用^[5], 但其发展也带来了显著的环境压力。2010-2019 年间, 国际航空业温室气体排放年均增速达 3.4%^[6], 国际航空运输协会数据显示, 2023 年全球客运量已恢复至疫情前水平的 94.1%, 未来 20 年客运需求预计年均增长 3.75%^[7]。

现有民航碳排放研究主要集中在排放核算^[8,9]、影响因素识别^[10-12]、减排潜力评估^[13,14]以及排放趋势预测^[15-18]等方面。在

收稿日期: 2025-11-14

¹基金项目: 国家自然科学基金 (项目编号: U2033213); 中央高校基本科研业务费专项资金 (项目编号: J2023-040, 24CAFUC04021); 中国民航管理干部学院民航数据治理与决策优化重点实验室 (项目编号: CAMICCADGDO-2025-01-01)

预测方法上,传统模型如蒙特卡罗模拟^[15,16]、回归分析^[17]和 ARIMA 模型^[18]等,虽在早期研究中得到广泛应用,但在处理复杂的非线性问题时存在一定局限。随着人工智能技术的发展,神经网络方法逐渐成为碳排放预测的重要工具。2011年,宋等首次将 BP 神经网络用于我国碳排放预测^[19]。此后, Yang 等结合蒙特卡罗模拟与 BP 神经网络预测民航 CO₂排放,支持行业“双碳”目标实现^[20]。Wang 等构建 ARIMA-BP 混合模型,在无疫情情景下对多国碳排放进行高精度模拟^[21]。Zhao 等提出混合数据集和反向传播神经网络(MIDAS-BP)混合模型,验证其在短期与长期排放预测中的适用性^[22]。

然而,传统 BP 神经网络仍存在易陷入局部最优和收敛速度较慢的问题。为此,本文提出基于改进麻雀搜索算法优化的 BP 神经网络模型(ISSA-BP),通过优化超参数提升预测精度与稳健性。本研究主要开展以下工作:构建并验证 ISSA-BP 模型,通过对比实验证明其优越性;建立多情景动态模拟框架,评估不同政策与技术措施对排放趋势的影响;基于模拟结果量化减排潜力与可行路径,为实现民航净零排放提供科学依据。

1 指标体系构建

为准确预测民航 CO₂排放并支撑多情景分析,本文在借鉴 Liu 等基于国际民航组织(ICAO)减排框架的研究基础上,选取运输收入(Y)、运输强度(TI)和能源消耗强度(EI)作为 ISSA-BP 神经网络模型的输入变量,将能源消费量作为模型预测输出,以反映不同情景下 CO₂排放系数的变化影响^[15]。具体变量说明见表 1。

表 1 民航 CO₂ 排放影响因素分析指标体系

Table 1 Index system for analysis of factors influencing CO₂ emission from civil aviation

ICAO 减排框架	变量名称	变量符号	指标含义	单位
基于市场的减排措施	运输收入	Y	反应民航运输规模	亿元
运营改进	运输强度	TI	反应民航运营能力(单位收入的周转量)	百万吨公里/亿元
飞机技术进步	能源消耗强度	EI	反映技术进步水平(单位周转量的能耗)	公斤/吨公里
可持续替代燃料	CO ₂ 排放系数	EC	映可持续替代燃料使用情况(单位能耗排放)	kgCO ₂ /kg

2 基于 ISSA-BP 神经网络的民航 CO₂ 排放预测模型

为提升民航 CO₂排放预测精度,本文提出一种基于改进麻雀搜索算法优化的 BP 神经网络(ISSA-BP)模型。该模型利用 ISSA 优化 BP 网络的权值与偏置,以克服传统 BP 易陷入局部最优、收敛慢等问题。

2.1 传统的麻雀搜索算法

麻雀搜索算法是一种模拟麻雀觅食与反捕食行为的群体智能优化算法^[23]。算法将麻雀分为发现者、跟随者与侦探者三类角色,分别按以下规则更新位置:

发现者的位置迭代如式(1)所示:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \exp\left(\frac{-i}{\alpha \text{iter}_{\max}}\right), R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + QL, R_2 \geq ST \end{cases} \quad (1)$$

跟随者位置迭代式如式(2):

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{t^2}\right), i > \frac{N}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \times A^+ \times L, \text{other} \end{cases} \quad (2)$$

侦探者位置迭代式如式(3):

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + b \times |X_{i,j}^t - X_{best}^t|, f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \times \left(\frac{|X_{i,j}^t - X_{worst}^t|}{(f_i - f_w) + e} \right), f_i = f_g \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_2 为预警值, ST 为安全阈值, X_{best} 与 X_{worst} 分别为全局最优和最差位置, f_i , f_g , f_w 分别为个体、全局最优及最差适应度。

2.2 改进策略

近年来, 群体智能优化算法 (如 SSA、WOA、PSO 等) 因其适应性强、鲁棒性高及可扩展性好, 在超参数优化中得到了广泛应用^[24]。为提高民航 CO₂ 排放预测的稳定性与泛化能力, 本文引入麻雀搜索算法 (SSA) 对 BP 神经网络的权值与偏置进行全局优化。该算法具有参数少、收敛快且易于实现的优势^[23], 但在接近最优解时易因种群多样性下降而陷入局部最优。为此, 本文结合吕鑫等提出的 Tent 混沌映射进行种群初始化^[25], 并融入自适应 t 分布变异策略^[26], 以增强全局搜索能力与收敛性能, 从而更好地适配民航数据非线性、时序依赖及多变量耦合的复杂特性。

(1) Tent 映射

Tent 映射定义为:

$$x_{n+1} = \begin{cases} rx_n, 0 \leq x_n < 0.5 \\ r(1-x_n), 0.5 \leq x_n < 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, r 是控制系统行为的参数, 取 $r=1$ 时系统呈现完全混沌行为, 有助于保持种群多样性。

(2) 自适应 t 分布变异

以迭代次数 $iter$ 为自由度参数, 对麻雀位置进行扰动, 具体式如下:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + X_i^t t(iter) \quad (5)$$

式(7)中, X_i^{t+1} 为扰动后麻雀位置, X_i^t 为麻雀 i 第 t 次迭代时位置。该变异在迭代初期类似柯西分布, 增强全局探索; 在后期趋近高斯分布, 提升局部开发能力, 从而平衡搜索效率与收敛速度。

2.3 民航 CO₂ 排放预测模型

基于 ISSA-BP 神经网络的民航 CO₂ 排放预测模型的构建流程如图 1 所示, 其具体步骤归纳如下:

(1) 模型输入与数据预处理: 选取运输收入、运输强度及能源消耗强度三个指标作为输入变量, 数据经归一化处理后按 8:2 的比例划分为训练集与测试集。

(2) 确定网络结构: 采用黄金分割法与误差最小化原则, 确定隐含层节点数为 7, 形成 3-7-1 的网络拓扑结构。

(3) 种群初始化与适应度评估: 采用 Tent 混沌映射初始化麻雀种群, 按适应度值排序并设置前 20% 个体为发现者, 其余为跟随者。

(4) 位置更新与变异: 根据 SSA 算法规则迭代更新发现者、跟随者及侦察者位置, 并在满足随机条件时执行自适应 t 分布变异。

(5) 参数优化与网络训练: 输出最优权重与偏置后, 训练 BP 神经网络, 以均方误差 (MSE) 作为误差函数, 逐轮优化网络参数直至收敛。

(6) 排放预测: 利用优化后的模型进行民航 CO₂ 排放预测。

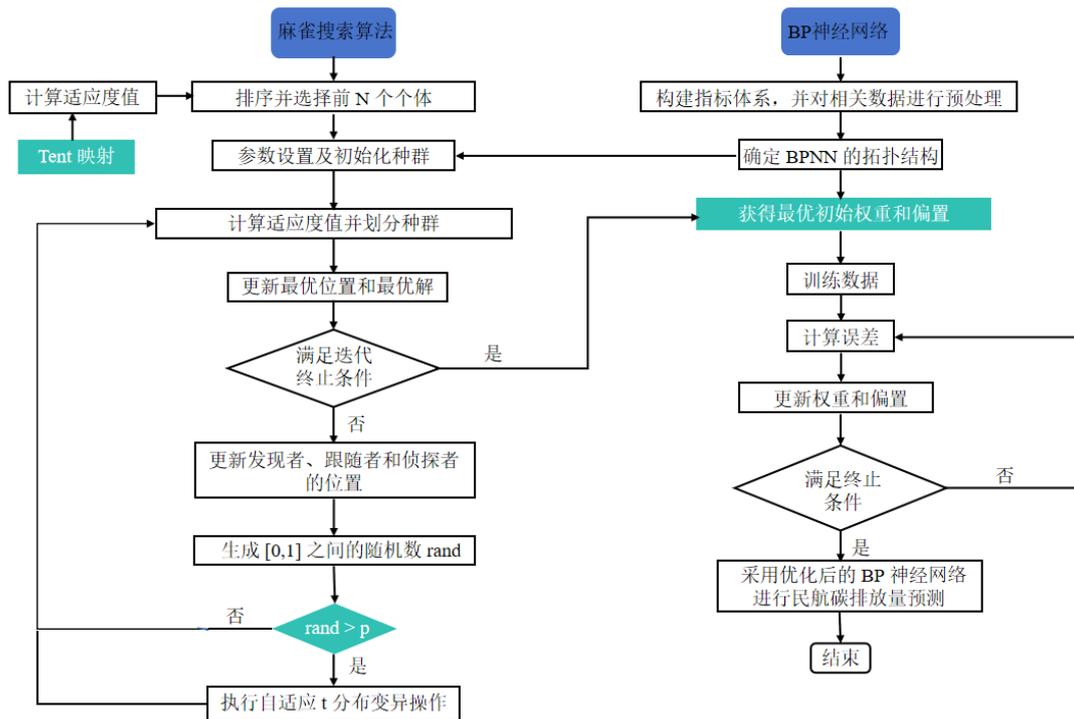


图 1 基于 ISSA-BP 模型的民航 CO₂ 排放预测过程

Fig. 1 Process for predicting civil aviation CO₂ emissions via the ISSA-BP model

3 实例分析

本文基于构建的 ISSA-BP 神经网络预测模型，结合民航 CO₂排放关键影响因素，开展多情景预测与减排路径分析。

3.1 数据描述

参考 Zhou 等^[27]的研究，采用“自上而下”方法计算民航 CO₂排放量，假定排放完全来源于航空煤油燃烧。计算公式如(10)所示：

$$C = \sum_i EC_i \times HV_i \times EF_i \quad (6)$$

式中： C 为 CO₂排放量总量 (t)， EC_i 为第 i 类燃料的消耗量 (t)， HV_i 为净热值 (GJ/t)， EF_i 为排放系数 (t/GJ)。利用该式计算中国民航业 1996-2023 年的 CO₂排放量。根据 IPCC(2006)的报告，喷气煤油的净热值为 44.1 GJ/t，排放系数为 71.9 kg/GJ。

本文所用数据均来源于《中国民用航空统计数据》和《中国民用航空统计汇编》(CAAC, 1996–2023)。相关变量的统计描述见表 2。

表 2 相关变量的统计说明

Table 2 Statistical descriptions of the relevant variables

变量	符号	单位	平均值	标准差	最大值	最小值
CO ₂ 排放量	C	百万吨	45.88	32.52	116.95	9.54
能源消耗量	E	百万吨	14.47	10.26	36.89	3.01
运输收入	Y	亿元	2395.32	1770.18	6018.37	433.88
运输强度	TI	RTK/亿元	20.07	1.93	24.92	16.77
能源消耗强度	EI	百万吨/百万吨公里	0.33	0.04	0.41	0.28
CO ₂ 排放系数	EC	kgCO ₂ /kg		3.17		

3.2 模型预测结果对比分析

为综合评估模型性能,本研究采用决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、均方误差(MSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)五项指标,将ISSA-BP与WOA-BP、PSO-BP、SSA-BP、BP、SVM及ISSA-SVM等模型进行对比分析。

3.2.1 预测性能与稳定性检验

ISSA-BP模型在各项指标上均表现最优,如表3所示,其MAE、RMSE、MSE与MAPE分别为0.0841、0.0911、0.0083和1.7382%,显著优于其他对比模型,表明ISSA算法有效提升了BP网络的预测精度与鲁棒性。在训练效率方面,引入优化算法后训练时间增加,但ISSA-BP的综合效率得分仍维持在C级,体现了精度与效率的合理权衡。为进一步验证模型稳定性,对7种模型进行30次独立重复实验并进行方差分析,如表4所示,结果显示,ISSA-BP与ISSA-SVM的p值均大于0.05,表明其具有较好的稳定性。其中ISSA-BP的变异系数最低,为8.74%,进一步证明其在精度与稳定性方面的综合优势。

表3 各模型的性能评价指标结果

Table 3 Performance evaluation index results of each model

模型	R^2	MAE	RMSE	MSE	MAPE(%)	训练耗时(秒)	综合效率得分	精度-效率等级
ISSA-BP	0.9999	0.0841	0.0911	0.0083	1.7382	108.2	1.88	C
WOA-BP	0.9874	0.5880	0.7322	0.5361	10.7700	92.4	9.95	E
PSO-BP	0.9971	0.3224	0.4675	0.2186	1.9000	99.6	1.89	C
SSA-BP	0.9771	0.5745	0.7029	0.4940	13.6290	65.8	8.97	E
BP	0.9450	1.5201	2.2000	4.8402	10.3200	18.3	1.89	C
SVM	0.9453	1.6920	2.3992	5.7559	19.0200	12.5	2.38	D
ISSA-SVM	0.9934	0.6607	0.8352	0.6975	7.6300	34.7	2.65	D

注:综合效率得分 = $MAPE \times \text{训练耗时} / 100$,得分越低综合性能越好;等级划分:A(<0.5), B($0.5-1.0$), C($1.0-2.0$), D($2.0-10.0$), E(>10.0)。

表4 不同模型30次重复实验ANOVA分析结果

Table 4 ANOVA analysis results of 30 repeated experiments with different models

模型	MAPE(%)	变异系数(%)	p值	统计显著性
ISSA-BP	1.7382	8.74	0.3012	ns
WOA-BP	10.7700	13.97	0.0281	*
PSO-BP	1.9000	14.00	0.0298	*
SSA-BP	13.6290	14.01	0.0219	*
BP	10.3200	14.03	0.0172	*
SVM	19.0200	15.01	0.0065	**
ISSA-SVM	7.6300	12.99	0.1154	ns

注: $p > 0.05$ 表示稳定性好 (ns); $*p < 0.05$, $**p < 0.01$; 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

3.2.2 模型泛化能力验证

为评估模型的泛化能力,设计了时序外推实验,将数据划分为训练集(1996–2014年)和独立测试集(2015–2019年)。表5结果显示,ISSA-BP在训练集与测试集上均表现优异,测试集MAPE为1.8256%,且 R^2 保持极高,表明模型具有良好的泛化性能,未出现过拟合现象。从图2的预测曲线也进一步表明,ISSA-BP的预测值与实际值高度吻合,进一步印证了其优秀的泛化性能与预测稳定性。

表 5 ISSA-BP 模型时序外推实验结果

Table 5 Experimental Results of Time Series Extrapolation of ISSA-BP Model

数据集	样本数	R ²	MAE	RMSE	MSE	MAPE(%)
训练集 (1996-2014)	19	0.9999	0.0447	0.0742	0.0055	0.3208
测试集 (2015-2019)	5	0.9996	0.0840	0.0911	0.0083	1.8256

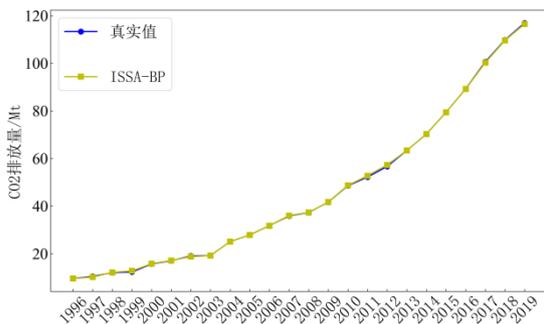
3.2.3 算法简化可能性讨论

为探讨模型简化可行性，提出仅采用 Tent 映射初始化的简化方案 (Tent-BP)。由表 6 可知，该方案训练时间显著降低至 37.80 秒，但预测精度下降 (MAPE=4.15%)，综合效率得分仍处于 C 级，说明 ISSA 优化流程对维持高预测精度具有关键作用。

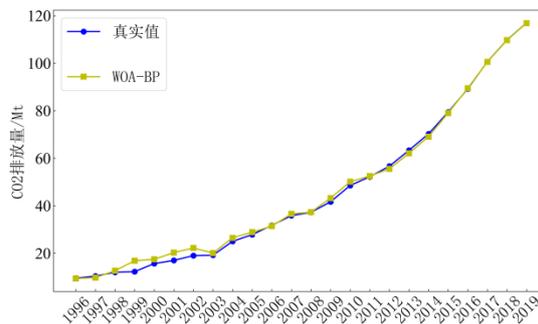
表 6 ISSA-BP 与简化方案性能对比

Table 6 Comparison of Simplified Scheme and ISSA-BP Performance

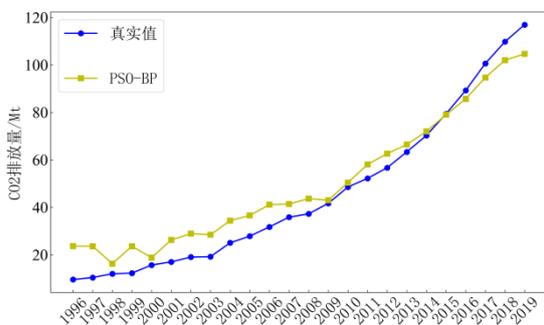
模型	MAPE(%)	训练耗时(秒)	综合效率得分	精度-效率等级	复杂度比例
ISSA-BP	1.7382	108.2	1.88	C	100%
Tent-BP	4.1500	37.80	1.57	C	25%



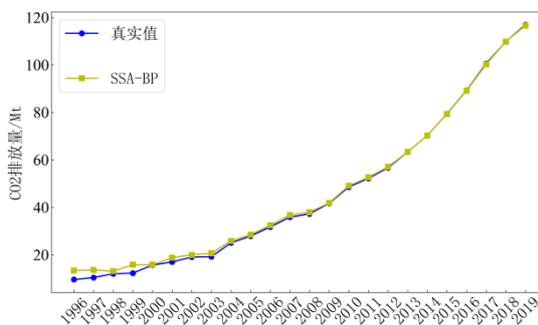
(a) ISSA-BP



(b) WOA-BP



(c) PSO-BP



(d) SSA-BP

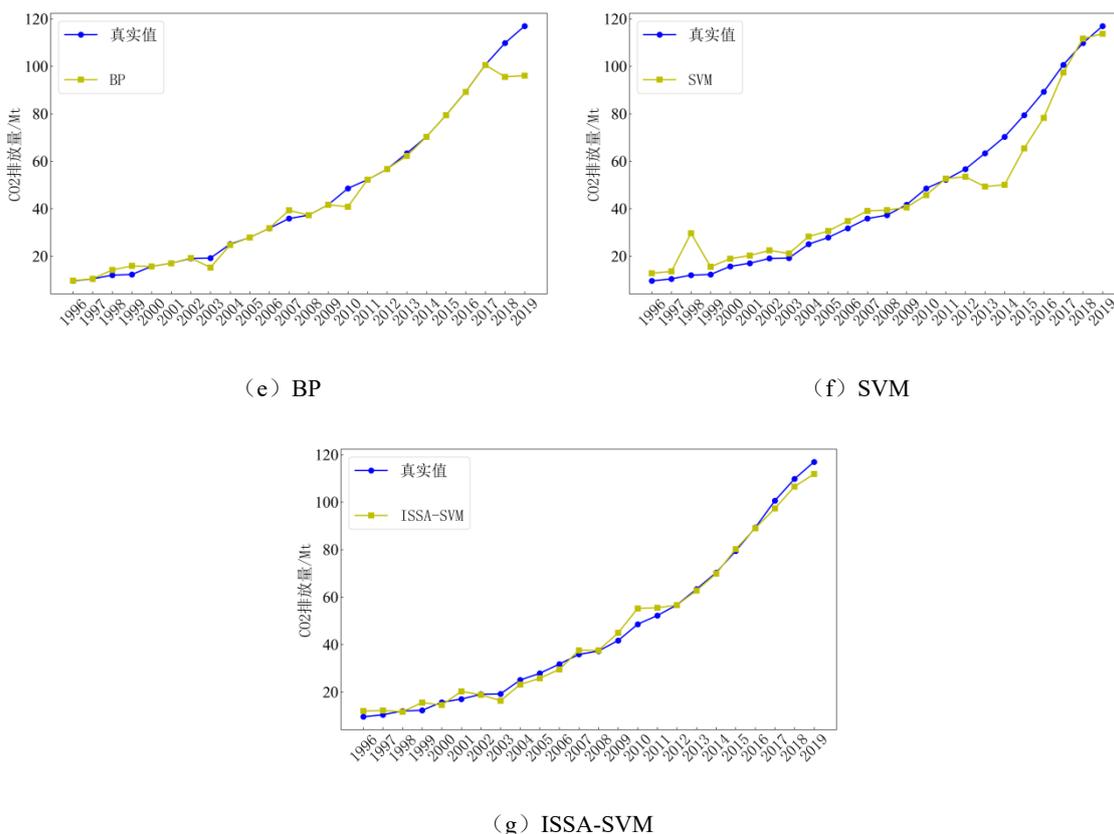


图 2 各模型的预测结果对比

Fig. 2 Prediction results of each model

3.3 碳排放未来趋势及减排潜力

3.3.1 情景设置

为预测 2024—2050 年中国民航业 CO₂排放趋势并探索减排路径，本文基于历史排放演变、相关政策文件^[7,28-30]，并参考既有研究成果^[15,20,27]，设定了五种情景：冻结情景、渐进改进情景、基准情景、替代情景与技术突破情景（均考虑了 COVID-19 对民航业的冲击），详见表 7。各情景在需求增长、运营效率、技术更新及可持续航空燃料（SAF）应用等方面具有不同假设，具体见表 8。

表 7 不同情景主要参数的区别

Table 7 Differences in main parameters across scenarios

情景	政策维度	需求	运营改进	飞机技术进步	SAF 应用（2050 年）
冻结情景	无新增气候政策	稳步增长	不改进	传统技术，不进步	0%
基准情景	现有减排政策	稳步增长	操作改善，基建 2050 实现	传统技术，更新慢	10%
渐进改进情景	现有减排政策	稳步增长	操作改善，基建 2050 实现	革命技术，更新快	65%
替代情景	SAF 产业扶持	有所放缓	操作高效，基建 2035 实现	传统技术，更新快	65%
技术突破情景	零碳技术研发激励	有所放缓	操作高效，基建 2035 实现	革命技术，更新快	65%

表 8 不同情景中各因素的平均年增长率设置 (%)

情景假设		2024-2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050
冻结情景	Y	6	6	5	5	4	4
	TI	2	1.5	1	0.5	0.5	0.5
	EI	0	0	0	0	0	0
基准情景	Y	6	6	5	5	4	4
	TI	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5
	EI	-0.3	-0.4	-0.68	-0.96	-1.16	-1.5
渐进改进情景	Y	6	6	5	5	4	4
	TI	1.5	1	1	0.5	0.5	0.5
	EI	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-4
替代情景	Y	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	TI	1.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	EI	-0.5	-0.8	-1	-1.5	-2	-2.5
技术突破情景	Y	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	TI	1.5	1	0.5	0.5	0.5	1
	EI	-1	-1.5	-2	-2.5	-3	-4

3.3.2 中国民航业碳排放未来趋势

本研究基于 1996—2023 年数据（剔除 2020—2022 年异常值），采用 ISSA-BP 神经网络模型对 2024—2050 年中国民航业 CO₂排放趋势进行多情景预测。结果显示，不同情景下的碳排放路径差异显著：冻结情景下，2050 年排放将达 219.22 Mt，较 2019 年增长 102.27 Mt；基准情景下，排放将于 2042 年达峰（约 207.17 Mt），但后续减排有限；渐进改进情景下，通过氢能飞机渗透率推动 2040 年达峰（133.95 Mt），但减排幅度仍然有限；替代情景中，SAF 的规模化应用推动排放于 2030 年达峰（129.49 Mt），2050 年降至 76.21 Mt；技术突破情景下，2050 年排放可进一步降至 70.64 Mt，趋近零排放水平。研究表明，中国民航业应构建“运营优化-燃料替代-技术突破”协同的低碳路径，短期着力提升运营效率与 SAF 应用，中长期加速氢能及电动飞机等颠覆性技术突破。

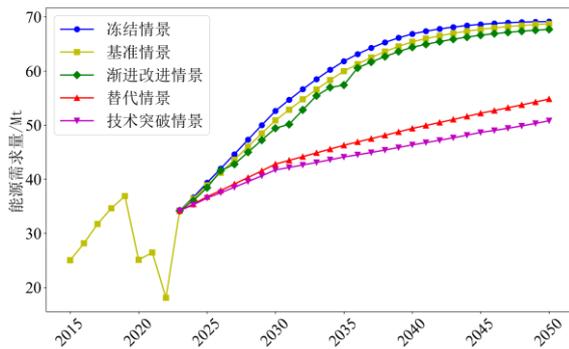


图 4 不同情景下中国民航的能源需求

Fig. 4 Energy demand for civil aviation in China under various scenarios

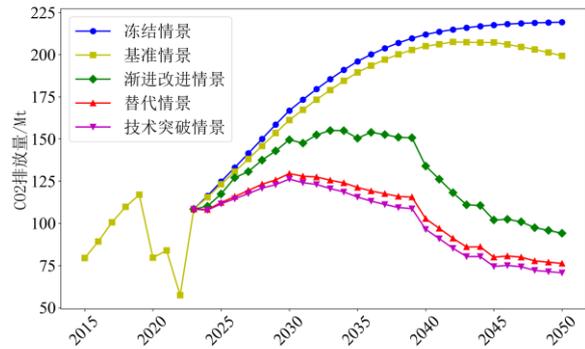


图 5 不同情景下中国民航的 CO₂排放量

Fig. 5 Carbon dioxide emissions for civil aviation in China under various scenarios

3.3.3 碳减排潜力和净零路径

为实现国家“双碳”目标，中国民航业需在 2050 年将 CO₂排放控制在 136 Mt；而依据 IEA 基于全球航空排放占比的测算，更为严格的排放上限为 30 Mt^[41]。如表 9 所示，本研究情景分析结果表明，若维持基准情景，2050 年排放将达 199.29

Mt, 需减排 63.29 Mt。技术突破情景虽可实现行业最大自身减排潜力, 但其排放量仍为 70.64 Mt, 与国际目标相比仍存在 40.64 Mt 的缺口, 还需削减 58%-62%的 CO₂排放量才能实现碳中和。

表 9 2050 年各情景排放指标与减排潜力对比

Table 9 Comparison of emission indicators and emission reduction potential for various scenarios in 2050

情景	2050 年排放量 (Mt)	相对于 2019 年 减排比例 (%)	行业自身减排潜 力 (Mt)	碳中和缺口 (国家目标, ≤136 Mt)	碳中和缺口 (国际目标, ≤30 Mt)
冻结情景	219.22	-87.44 (即增长 87.44%)	-19.93	83.22	189.22
基准情景	199.29	-70.40	0	63.29	169.29
渐进改进情景	94.09	19.55	105.2	0 (已达标)	64.09
替代情景	76.21	34.83	123.08	0	46.21
技术突破情景	70.64	39.6	128.65	0	40.64

为实现上述减排目标, 建议采取以下综合路径: 在需求侧引导高铁等低碳交通方式发展, 缓解民航排放增长; 在技术侧加大氢能飞机等颠覆性技术研发与推广, 持续提升运营与燃油效率; 在燃料侧扩大可持续航空燃料 (SAF) 应用比例, 力争 2050 年超过 70%; 在管理侧完善政策激励与能效标准, 并建立碳汇等外部抵消机制, 以实现剩余排放的中和。通过上述系统性举措, 中国民航业可在支撑国家“双碳”战略的同时, 为全球航空净零排放做出贡献。

4 结论

本研究针对民航 CO₂排放问题, 建立了 ISSA-BP 预测模型, 并基于多情景模拟分析其未来趋势与减排路径。主要结论如下:

1) 提出的 ISSA-BP 模型在 CO₂排放预测中表现优异。通过改进麻雀算法优化 BP 网络超参数, 显著提高了模型预测精度 (MAPE=1.17382%) 与稳健性 (R²=0.99997), 有效避免了传统 BP 模型易陷入局部最优及收敛慢的问题, 适用于民航排放的复杂非线性预测。

2) 基于该模型的情景分析表明, 在基准情景下, 2050 年中国民航 CO₂排放将达 199.29 Mt, 需减排约 63.29 Mt 才能满足国家碳达峰要求; 即使在技术突破情景下, 排放量仍高于国际航空减排目标所对应的中国排放空间上限 (≤30 Mt), 存在约 40.64 Mt 的碳中和缺口。

3) 为实现行业碳中和目标, 需采取综合性措施: 适度引导高铁替代部分民航需求、持续提升运营与燃油效率、大幅推广可持续航空燃料 (SAF) 使用比例, 并对无法消除的剩余排放通过碳汇等方式进行外部抵消。

4) 本研究仍存在一定局限: 样本数据基于全国层面时序数据, 未来可扩展至省级或航司层面; ISSA 算法在全局搜索与收敛速度上仍有提升空间, 后续可结合其他启发式策略进一步优化模型性能。

参考文献

- [1] ROMANELLO M, WHITMEE S, MULCAHY E, *et al.* Further delays in tackling greenhouse gas emissions at COP28 will be an act of negligence[J]. *The Lancet*, 2023, 402(10417): 2055-2057.
- [2] NISBET E G, FISHER R E, LOWRY D, *et al.* Methane Mitigation: Methods to Reduce Emissions, on the Path to the Paris Agreement[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(1): e2019RG000675.
- [3] 李政, 张东杰, 潘玲颖, 等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(11): 905-909.
Li Z, Zhang D J, Pang L Y, *et al.* Low-Carbon Transition of Chinas Energy Sector and Suggestions with the Carbon-Peak and Carbon-Neutrality Target[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2021, 41(11): 905-909.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
National Bureau of Statistics of China. (2024). *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press.
- [5] BRASSEUR G P, GUPTA M. Impact of Aviation on Climate: Research Priorities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(4): 461-464.
- [6] ZHANG F, GRAHAM D J. Air transport and economic growth: a review of the impact mechanism and causal relationships[J]. *Transport Reviews*, 2020,

40(4): 506-528.

- [7] Comac, 2023. Market Forecast Annual Report: 2024-2043.[EB/OL]. 2023.
- [8] 朱佳琳, 胡荣, 张军峰, 等. 中国航空器碳排放测算与演化特征研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(3): 558-563.
ZHU J L, HU R, ZHANG J F, *et al.* Research on the Measurement and Evolution Characteristics of Aircraft Carbon Emissions in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(3): 558-563.
- [9] 肖毅, 段铁城. 民航运输飞机碳排放计算方法[J]. 科技视界, 2021(10): 44-46.
XIAO Y, DUAN T C. Calculation Method for Carbon Emissions from Civil Aviation Transport Aircraft[J]. Science & Technology Vision, 2021(10): 44-46.
- [10] LIU X, HANG Y, WANG Q, *et al.* Drivers of civil aviation carbon emission change: A two-stage efficiency-oriented decomposition approach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 89: 102612.
- [11] 宋文, 胡荣, 曾雯, 等. 机场航空器碳排放演化特征及影响因素分解 [J]. 华东交通大学学报, 2022, 39 (02): 53-61.
- [12] YUE X, BYRNE J. Identifying the determinants of carbon emissions of individual airlines around the world[J]. Journal of Air Transport Management, 2024, 115: 102521.
- [13] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412-3424.
XU J H, WANG K. Medium- and long-term carbon emission forecast and technological emission reduction potential analysis China's civil aviation industry[J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3412-3424.
- [14] 田利军, 徐森雨. 基于系统动力学模型的中国民航脱碳路径研究[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(4): 454-464.
TIAN L J, XU S Y. Study on the decarbonization path of Chinese civil aviation based on a system dynamic model [J]. Climate Change Research, 2024, 20 (4): 454-464.
- [15] LIU X, HANG Y, WANG Q, *et al.* Flying into the future: A scenario-based analysis of carbon emissions from China's civil aviation[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 85: 101793.
- [16] CHAO H, AGUSDINATA D B, DELAURENTIS D, *et al.* Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options: Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 75: 42-56.
- [17] YU J, SHAO C, XUE C, *et al.* China's aircraft-related CO₂ emissions: Decomposition analysis, decoupling status, and future trends[J]. Energy Policy, 2020, 138: 111215.
- [18] YANG H, O'CONNELL J F. Short-term carbon emissions forecast for aviation industry in Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 122734.
- [19] 宋杰鲲, 张宇. 基于 BP 神经网络的我国碳排放情景预测[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(17): 4108-4111.
SONG J k, ZHANG Y. Scenario prediction of carbon emissions in China based on BP neural network [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11 (17): 4108-4111
- [20] YANG L, HU Y J, WANG H, *et al.* Uncertainty quantification of CO₂ emissions from China's civil aviation industry to 2050[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 336: 117624.
- [21] WANG Q, LI S, LI R, *et al.* Underestimated impact of the COVID-19 on carbon emission reduction in developing countries – A novel assessment based on scenario analysis[J]. Environmental Research, 2022, 204: 111990.
- [22] ZHAO X, HAN M, DING L, *et al.* Forecasting carbon dioxide emissions based on a hybrid of mixed data sampling regression model and back propagation neural network in the USA[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(3): 2899-2910.
- [23] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [24] Li Y, Wang S, Chen Q, *et al.* Comparative study of several new swarm intelligence optimization algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(22): 1-12.
- [25] 吕鑫, 慕晓冬, 张钧, 等. 混沌麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1712-1720.
LYU X, MU X D, ZHANG J, *et al.* Chaos sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8) : 1712-1720.
- [26] 唐延强, 李成海, 宋亚飞, 等. 自适应变异麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 681-692.
TANG Y Q, LI C H, SONG Y F, *et al.* Adaptive mutation sparrow search optimization algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 681-692.

- [27] ZHOU W, WANG T, YU Y, *et al.* Scenario analysis of CO₂ emissions from China's civil aviation industry through 2030[J]. *Applied Energy*, 2016, 175: 100-108.
- [28] 中国民用航空局. 十四五民用航空发展规划[EB/OL]. 2021.
Civil Aviation Administration of China (CAAC). Civil aviation development plan for the 14th Five-Year Plan [EB/OL].2021.
- [29] “十四五”民航绿色发展专项规划[EB/OL]. 2021.
Special Plan for Green Development of Civil Aviation during the 14th Five-Year Plan Period [EB/OL]. 2021.
- [30] 中国民用航空局. 2022 中国民航绿色发展政策与行动[EB/OL]. 2022.
Civil Aviation Administration of China (CAAC). 2022 China civil aviation green development policies and actions [EB/OL]. 2022.



通信作者: 张培文(1985—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 先后作为主研人员参与国家自然科学基金项目 3 项, 主持/参与省部级科研项目 10 余项, 参与中国民用航空局、飞机制造商、航空公司等单位的科研项目近 20 项, 申请专利 3 项(发明专利 1 项, 实用新型专利 2 项), 获得 5 次省部级科技成果奖, 在国内外重要学术期刊发表学术论文 40 余篇(其中 SSCI/SCI/CSSCI/EI 检索和北大核心论文 20 篇)。研究方向为民航碳减排, 民航运输系统优化。E-mail: zhangpeiwen@cafuc.edu.cn