

江苏省制造业碳达峰最优路径研究

金继红, 辛晓静

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2025年10月17日; 录用日期: 2025年10月31日; 发布日期: 2025年11月28日

摘要

《中国制造2025》试点城市群的江苏省作为中国制造业的重地, 其制造业碳达峰最优路径研究, 对于全国“双碳”目标的实现具有重要示范意义。基于2002、2007、2012、2017年江苏省投入产出表, 利用投入产出分析方法准确测度15个制造业的完全碳排放量。《江苏省碳达峰实施方案》中提出希望金属冶炼及压延加工品、非金属矿物制品、化学产品、纺织服装鞋帽及其羽绒制品力争率先达峰, 因此本文以这五个制造业部门作为研究对象。在此基础上构建STIRPAT模型, 并结合岭回归方法识别碳排放的关键驱动因素, 包括就业人数、人均产值、能源结构、能源利用效率和完全碳排放强度。通过构建四类发展路径模式, 预测制造业各部门未来实现碳达峰的最优路径。研究得出, 不同部门碳达峰进程差异显著: 轻工类行业纺织服装鞋帽与羽绒制品、造纸印刷和文教体育用品在绿色发展路径下可于2030年前实现碳达峰且累计排放最低。高碳排放行业如金属冶炼和压延加工品、非金属矿物制品及化学产品需依赖技术突破路径, 实现峰值和累计排放最小化。不同部门碳达峰进程呈明显分化特征, 因此制定分部门、分路径的差异化减排策略对于实现江苏制造业整体低碳转型具有重要指导意义。

关键词

制造业, 碳达峰最优路径, 投入产出分析, STIRPAT模型, 情景模拟

Research on the Optimal Pathway for Carbon Peak in Jiangsu's Manufacturing Industry

Jihong Jin, Xiaojing Xin

Glorious Sun School of Business & Management, Donghua University, Shanghai

Received: October 17, 2025; accepted: October 31, 2025; published: November 28, 2025

Abstract

As one of the pilot city clusters for *Made in China 2025*, Jiangsu Province—being a major hub of

China's manufacturing industry—holds significant demonstrative value for achieving the national “dual carbon” goals. Based on the 2002, 2007, 2012, and 2017 input-output tables of Jiangsu Province, this study employs the input-output analysis method to accurately measure the total carbon emissions of 15 manufacturing sectors. On this basis, a STIRPAT model is constructed and combined with ridge regression to identify the key drivers of carbon emissions, including employment, per capita output value, energy structure, energy utilization efficiency, and total carbon emission intensity. Through four development pathway scenarios, the study forecasts the optimal pathways for different manufacturing sectors to achieve carbon peaking in the future. The results show significant heterogeneity in the carbon peaking timelines across sectors: petroleum refining, coking and nuclear fuel processing, chemical products, textiles, and apparel, leather, and down products are expected to peak before 2030; transportation equipment, metal products, and communication equipment, computers, and other electronic products are projected to peak after 2030; whereas non-metallic mineral products, electrical machinery and equipment, and six other sectors may still face challenges in peaking before 2040. Based on a trade-off analysis between cumulative carbon emissions and carbon peaking time, differentiated optimal pathways are proposed: petroleum refining, coking and nuclear fuel processing, chemical products, transportation equipment, metal products, communication equipment, computers and other electronic products, wood processing and furniture, non-metallic mineral products, food and tobacco, and electrical machinery and equipment are more suitable for the “green development” pathway; metal smelting and rolling processing, general and special equipment, instruments and meters, paper printing, and cultural, educational, and sports goods show better emission reduction performance under the “baseline” pathway; while textiles and apparel, leather, and down products, as well as textiles, rely on the “technological breakthrough” pathway to achieve carbon peaking.

Keywords

Manufacturing Industry, Optimal Carbon Peaking Pathway, Input-Output Analysis, STIRPAT Model, Scenario Simulation

Copyright © 2025 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

为深入推进生态文明建设与绿色低碳转型,我国自2020年9月在第七十五届联合国大会上正式提出“双碳”目标以来,实现碳达峰与碳中和已上升为国家战略。制造业作为能源消费与碳排放核心领域,其低碳转型是实现“双碳”目标的关键所在。《“十四五”规划》和中央经济工作会议提出要“保持制造业比重基本稳定”。因此,“减产限产”并非可持续减碳之策,亟需在保障合理能源利用的前提下,探索科学可行的碳达峰路径。

实现制造业碳达峰需厘清其碳排放的关键驱动因素与演化趋势。研究表明,人口规模、经济富裕程度、能源结构、能源效率等因素显著影响碳排放。丁唯佳[1]等指出技术进步可抑制制造业碳排放。Xu与Lin [2]发现能源强度变化对碳排放增速具有约束作用。张丽峰[3]等强调能源结构转型的重要性。Lenzen [4]通过投入产出分析揭示了制造业的间接碳排放特征。郭朝先[5]等则证实工业产值扩张对碳排放增长的显著拉动效应。

近年来,碳排放路径预测逐渐采用情景模拟与动态建模相结合的范式。宋鹏[6]等基于LEAP模型发现重庆市可在绿色情景下2030年前达峰。王勇[7]等通过拓展STIRPAT模型指出不同排放强度路径下工

业达峰时间差异显著。赵金辉[8]等利用 Lasso-BP 神经网络模拟河南省碳达峰路径, 强调能源消费与产业结构的关键作用。

然而, 现有研究仍存在不足: 一是多聚焦全国或省域整体预测, 缺乏对制造业细分部门的深入研究, 限制了政策制定的针对性; 二是多采用直接碳排放测算, 忽视部门间投入产出关联的间接排放放大效应, 易低估高关联度部门的碳排放水平。为此, 本文引入完全碳排放概念, 结合 IPCC 方法与投入产出模型, 全面反映制造业碳排放特征。

江苏省作为制造业大省, 2024 年工业增加值达 4.93 万亿元, 占全国 12.18%, 制造业比重超 37%。其能源结构对碳排放影响显著。2023 年《江苏省工业领域及重点部门碳达峰实施方案》提出金属冶炼、非金属矿物制品、化学产品、纺织服装等重点部门率先达峰。基于此, 本文以江苏省重点制造业为对象, 利用投入产出分析法测算完全碳排放量, 构建 STIRPAT 模型并结合岭回归识别关键驱动因素, 设计四种情景模拟预测碳排放演变趋势, 识别最优达峰路径, 为江苏及全国制造业分部门碳达峰政策制定提供参考。

2. 研究模型与数据来源

2.1. 完全碳排放量测算

常用的碳排放量测算是 IPCC 法、投入产出法和因素分解法等。但 IPCC 法算出的碳排放是直接碳排放量。然而, 产业各部门间投入产出关联密切, 一个部门的生产活动不仅产生自身的直接碳排放, 还会通过供应链引发其他相关部门的直接或间接碳排放。为了更准确地把握各部门在整个经济系统中的碳排放量, 需要计算完全碳排放量。完全碳排放包含直接碳排放和间接碳排放。因此本文利用投入产出分析法, 测算制造业各部门的完全碳排放量。

1) 直接碳排放量测算, 具体采用杨君[9]提出的油品分摊改进法, 参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》和杨绍华[10]等的研究方法, 如式(1)测算 2002 年至 2017 年江苏省制造业的碳排放量。

$$CE = \sum C_i = \sum E_i \times NVC_i \times CEF_i \times COF_i \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中, CE 为制造业所消耗的煤炭类能源产生的碳排放量; i 为制造业能源消耗种类, 包括原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、其他煤气等七种能源; C_i 和 E_i 分别为第 i 种能源的碳排放量和能源消耗量; NVC_i 、 CEF_i 和 COF_i 分别为第 i 种能源的平均低位发热值、单位热值含碳量和碳氧化率。

2) 完全碳排放量测算, 运用江苏省 2002、2007、2012、2017 年的投入产出表, 利用投入产出分析法的里昂惕夫逆矩阵, 如式(2)计算包含直接和间接诱发的制造业各部门的 2002、2007、2012、2017 年的完全碳排放量。

$$TC = F \times (I - A)^{-1} \times Y \quad (2)$$

其中 A 是直接消耗系数矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

矩阵中元素 $a_{ij} = x_{ij} / X_j$ 表示, 第 j 部门每单位产出对第 i 部门产品的直接消耗量, 按照投入产出表, F 是直接碳排放系数, 即某部门的直接碳排放量与其总产出的比值, Y 是最终需求即消费、投资、

出口等。

2.2. STIRPAT 模型

可拓展随机性的环境影响评估模型 STIRPAT 模型是 IPAT 模型的演变,是由 Dietz 等[11]提出,该模型填补了 Kaya 恒等式和 IPAT 模型的不足[12],被广泛应用于定量分析环境变化的影响因素,通过增减变量来提高模型的分析与解释能力。其标准形式为式(3)

$$I = aP^b A^c T^d e \quad (3)$$

式中 I 、 P 、 A 、 T 分别表示碳排放量、人口、富裕度和技术水平, a 是模型系数, b 、 c 、 d 是需要估计的指数, e 是误差项,将模型(3)分别取对数后,可以得到式(4)

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (4)$$

根据江苏省制造业碳排放的现状特点,结合众多学者运用 STTRPAT 模型分析碳排放的影响因素,选取制造业就业人数、人均制造业产值、能源消费结构、能源利用效率、碳排放强度等五项因素作为自变量,输出变量为江苏省制造业完全碳排放量,模型如式(5)

$$TC = \beta_0 \ln A + \beta_1 (\ln A)^2 + \beta_2 \ln P + \beta_3 \ln ES + \beta_4 \ln TS + \beta_5 \ln EE + \ln e \quad (5)$$

式中 TC 是制造业各部门完全碳排放量, P 是制造业各部门的就业人数, A 是经济活动效应指数即人均制造业产值,用制造业产值与制造业就业人数比值表示, ES 为能源结构,用能源消耗中的煤炭占比表示, TS 是完全碳排放强度即完全碳排放量与总产出的比值表示, EE 为技术水平即能源利用效率,用单位产出的能源消耗量表示。

2.3. 数据来源

本研究的制造业能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴(2002~2017)》,折标准煤系数和平均低位发热量依据《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》及《江苏省统计年鉴》相关能源数据确定。制造业各部门的产值与就业人口数据取自《中国工业统计年鉴(2001~2018)》。为消除价格因素影响,所有产值均按 2010 年不变价格折算。依据《国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)》并结合投入产出表部门口径,对相关数据进行了匹配与整合,构建可比价投入产出表。

投入产出表作为连接生产、需求与能源环境核算的重要工具,我国通常在每逢“2”“7”年编制基本表,在“0”“5”年编制延长表,省级行政区亦同步编制地区表。由于江苏省 2022 年投入产出表尚未公布,本研究选取 2002、2007、2012 与 2017 年江苏省现价投入产出表为基础数据。原始表含 42 个部门,因分类标准与能源数据口径不完全一致,参考《国民经济行业分类(GB/T 4754-2017)》进行合并重构,最终选取金属冶炼和压延加工品、非金属矿物制品、化学工业、纺织服装及皮革制品、造纸印刷和文教体育用品等五个重点部门作为研究对象。

3. STIRPAT 模型实证结论与分析

3.1. 江苏省制造业碳排放测度

图 1 显示了 2002~2021 年江苏省制造业完全碳排放总量与强度的变化趋势。总体来看,碳排放总量经历了“快速上升-高位波动-逐步回落”的过程:由 2002 年的 8466 万吨增至 2014 年的 108,867 万吨,年均增幅约 13.8%,随后在高位波动中于 2019 年降至 47,552 万吨。2020、2021 年虽回升至 73,637 万吨和 72,496 万吨,但仍低于 2014~2016 年的峰值。这表明江苏制造业在“十五”至“十二五”期间的扩张推动了碳排放上升,而“十三五”后期节能减排和产业调整政策逐步显效,碳排放增长得到抑制。

制造业碳排放强度总体呈下降趋势, 由 2002 年的 0.76 t/万元降至 2021 年的 0.58 t/万元, 显示单位产值能效提升与技术进步成效。然而在 2007、2012~2016 及 2020 年出现阶段性反弹: 2007 年受钢铁和建材投资扩张影响, 2012~2016 年因火电占比上升与高耗能产能集中释放, 2020 年则受公共卫生事件影响, 经济复苏带动重工业生产恢复, 导致短期反弹。

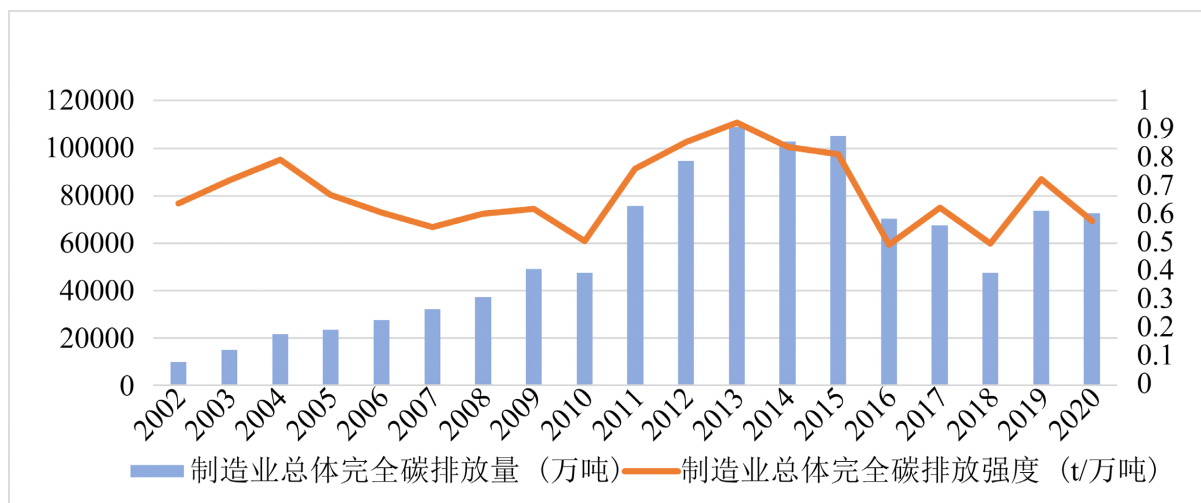


Figure 1. Trends of total carbon emissions and total carbon emission intensity in Jiangsu Province's manufacturing sector from 2002 to 2017

图 1. 2002~2017 年江苏省制造业完全碳排放量与完全碳排放强度的变化趋势

表 1 表 2 反映了 2002~2021 年江苏制造业各部门碳排放强度的演变。整体上, 2007 年前多数部门强度较高且波动明显, 2008 年后逐步下降趋稳, 2011 年后降幅更为显著, 体现节能减排政策与产业结构优化的成效。但部分高碳部门在 2012~2016 年间仍出现反弹, 表明能源结构刚性与产能释放效应依然存在。

从部门差异看, 江苏制造业呈明显分层特征。高碳部门包括非金属矿物制品、金属冶炼与压延加工品、石油炼焦、化学产品等, 长期依赖煤炭等高碳能源, 生产过程高温高耗能。以 2014 年为例, 金属冶炼与压延加工碳强度为 3.15 吨/万元, 是食品烟草加工的近 30 倍。尽管 2017 年后有所下降, 但受技术瓶颈与路径锁定制约, 整体水平仍高。中碳部门如金属制品、装备制造、电气机械、交通设备制造等, 碳强度多在 1.0~1.5 吨/万元之间, 波动较大但具备较高的节能改造潜力, 是未来减排的重点领域。低碳部门包括食品烟草、纺织服装及皮革制品、文体用品、通信设备与电子仪器制造等, 碳强度长期低于 1.0 吨/万元, 尤其通信设备与仪器制造维持在 0.3~0.8 之间, 成为制造业整体碳强度下降的重要支撑, 其增长更多依赖技术与资本投入, 体现出明显的绿色发展特征。

3.2. STIRPAT 模型回归拟合度结果

分别对每个部门各个变量进行 Pearson 相关性分析和方差膨胀因子(VIF)的检验, 结果显示多个变量相关系数大于 0.9, 存在高相关性。通过 VIF 检验, 多个影响因素 VIF 大于 10, 说明多个变量之间存在多重共线性问题。为了避免这个问题, 基于拓展的 STIRPAT 模型, 通过岭回归分析, 对碳排放与各影响因素之间进行拟合度分析。岭回归分析法可以通过在自变量标准化矩阵的主对角线上加入非负因子的方法消除多重共线性对分析结果的干扰, 从而使回归结果的有效性得到显著提升。表 3 所示 5 个重点制造业部门的标准化岭回归方程结果。

Table 1. Complete carbon emission intensity across various manufacturing sectors, 2002~2021 (Part 1)
表 1. 2002~2021 年制造业各部门完全碳排放强度(上)

	食品和烟草	纺织品	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	木材加工品和家具	造纸印刷和文教体育用品	石油炼焦产品和核燃料加工	化学产品	非金属矿物制品
2002	0.22	0.28	0.20	0.46	0.51	0.35	0.49	1.03
2003	0.20	0.26	0.18	0.41	0.51	0.31	0.47	0.96
2004	0.24	0.30	0.21	0.46	0.54	0.33	0.54	1.09
2005	0.23	0.26	0.18	0.39	0.48	0.33	0.46	1.01
2006	0.20	0.18	0.13	0.29	0.39	0.27	0.29	0.86
2007	0.20	0.16	0.14	0.25	0.40	0.23	0.23	0.83
2008	0.19	0.16	0.13	0.22	0.36	0.28	0.24	0.68
2009	0.17	0.15	0.13	0.22	0.34	0.30	0.21	0.64
2010	0.16	0.14	0.12	0.20	0.31	0.21	0.22	0.55
2011	0.11	0.12	0.10	0.17	0.27	0.17	0.14	0.46
2012	0.09	0.14	0.09	0.30	0.32	0.15	0.15	0.30
2013	0.11	0.14	0.10	0.32	0.32	0.13	0.16	0.32
2014	0.11	0.14	0.10	0.33	0.32	0.12	0.16	0.34
2015	0.09	0.13	0.09	0.30	0.29	0.12	0.14	0.33
2016	0.09	0.12	0.09	0.29	0.28	0.06	0.14	0.32
2017	0.08	0.09	0.07	0.10	0.28	0.05	0.12	0.30
2018	0.09	0.11	0.08	0.14	0.32	0.05	0.17	0.33
2019	0.11	0.12	0.10	0.17	0.27	0.17	0.14	0.46
2020	0.06	0.12	0.09	0.15	0.36	0.07	0.16	0.33
2021	0.05	0.09	0.07	0.13	0.28	0.05	0.13	0.25

*注：碳排放强度单位：吨/万元。

Table 2. Complete carbon emission intensity across various manufacturing sectors, 2002~2021 (Part 2)
表 2. 2002~2021 年制造业各部门完全碳排放强度(下)

	金属冶炼和压延加工	金属制品	通用专用设备	交通运输设备	电气机械和器材	通信设备、计算机和其他电子设备	仪器仪表
2002	3.04	1.12	0.73	0.82	0.73	0.32	0.36
2003	2.29	0.86	0.58	0.64	0.58	0.26	0.32
2004	2.34	0.89	0.62	0.68	0.61	0.28	0.35
2005	2.73	1.01	0.70	0.76	0.67	0.29	0.33
2006	2.32	0.84	0.58	0.63	0.54	0.23	0.24
2007	1.67	0.88	0.71	0.49	0.72	0.27	0.32
2008	1.51	0.79	0.63	0.44	0.65	0.25	0.29
2009	1.73	0.89	0.71	0.50	0.74	0.27	0.31
2010	1.86	0.94	0.74	0.52	0.78	0.27	0.32

续表

2011	1.55	0.79	0.64	0.43	0.65	0.22	0.26
2012	2.59	1.21	1.14	1.16	1.16	0.48	0.92
2013	2.92	1.36	1.27	1.30	1.31	0.54	1.04
2014	3.15	1.47	1.36	1.40	1.41	0.57	1.12
2015	2.82	1.32	1.22	1.26	1.27	0.52	1.00
2016	2.74	1.28	1.19	1.22	1.23	0.50	0.97
2017	1.90	0.90	0.55	0.43	0.70	0.29	0.31
2018	2.23	1.06	0.65	0.51	0.83	0.34	0.37
2019	1.55	0.79	0.64	0.43	0.65	0.22	0.26
2020	2.45	1.16	0.74	0.57	0.91	0.37	0.41
2021	1.91	0.90	0.58	0.45	0.71	0.29	0.32

*注：碳排放强度单位：吨/万元。

Table 3. Ridge regression coefficients of manufacturing sectors and model tests**表 3.** 制造业各部门岭回归系数及模型检验

部门	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	K	R ²	P
金属冶炼和压延加工品	0.990	-0.219	0.601	-0.204	0.295	0.474	0.033	0.942	0.000
造纸印刷和文教体育用品	0.287	0.400	0.435	0.076	0.285	0.060	0.028	0.991	0.000
非金属矿物制品	0.152	0.134	0.079	0.033	-0.179	-0.136	4.977	0.934	0.000
纺织服装鞋帽及其皮革羽绒制品	0.445	0.286	0.269	-0.050	0.437	0.116	0.066	0.967	0.000
化学产品	0.705	-0.130	0.235	0.001	0.432	-0.052	0.005	0.987	0.000

由回归结果可知，各部门模型的 R²均超过 95%，且 P 值接近 0，表明拟合效果良好。

人均制造业产值系数 β_0 与制造业就业人数系数 β_2 普遍为正，说明经济扩张与劳动力增长仍与碳排放正相关，制造业尚未实现脱钩。随着经济持续增长与居民生活水平提升，能源需求不断攀升。就业扩大亦推动产能释放，加剧了能源消耗与碳排放。

人均产值平方项系数 β_1 的正负差异反映了各行业碳排放与经济增长的阶段性特征，呈现出环境库兹涅茨曲线规律。金属冶炼和化学产品行业 β_1 为负，表明其已进入技术效应主导阶段，节能减排技术与环保约束抵消了扩张带来的排放增长。而非金属矿物、纺织和造纸等行业 β_1 为正，仍处于高碳增长阶段，规模效应占主导，绿色技术渗透率低，减排潜力尚未释放。这种异质性反映出不同部门在产业链位置与技术路径上的差异。重化工业处于上游、工艺复杂且能源依赖度高，技术改造带来的边际减排更显著。而中下游加工行业市场竞争激烈、利润率低，绿色投资动力不足。

能源结构系数 β_3 在重化工业中为负，而在轻工业中为正，说明清洁能源替代已在部分高碳行业初见成效，如钢铁电炉炼钢、化工清洁生产等降低了碳排放。然而多数行业仍以煤电为主，能源结构调整带来的碳减排效应有限，甚至存在结构惯性。需进一步提升可再生能源在工业终端消费中的比重，推动电气化、气化与可再生能源替代。

碳排放强度系数 β_4 在非金属矿物制品业为负，而在其他部门为正，表明碳强度下降在高耗能行业减排中作用显著。江苏在水泥、玻璃等行业推行余热发电与替代燃料技术，显著降低单位产值排放。然而

轻工业碳强度改善有限, 仍随产值增长而上升。这反映出技术创新与节能改造的不均衡性, 未来应强化绿色标准约束, 推动中小企业节能升级。

能源强度系数 β_5 显示, 不同行业在能效改善上的边际作用差异显著。非金属矿物与化学产品的 β_5 为负, 说明能效提升对减排起到抑制作用。但金属冶炼行业 β_5 高 0.474, 表明其能耗与排放高度耦合, 存在明显的“能效回弹效应”——即能效提升虽降低单位能耗, 却刺激产出扩张, 从而抵消部分减排成果。为避免此效应, 应在能效政策中引入总量控制与碳定价机制, 防止“节能-再膨胀”循环。

总体而言, 江苏制造业碳排放驱动因素呈显著异质性, 这源于部门间工艺流程、技术成熟度与市场结构差异。因此需结合不同部门的实际情况采取差异化的低碳政策和碳达峰最优路径。

3.3. 模型验证

为进一步确保该岭回归模型能否有效预测江苏省未来的碳排放量情况, 论文将 2002~2021 年江苏省各变量的基础数据代入岭回归结果, 计算得到各年份碳排放量预测值, 并将其与实际值进行对比, 有较好的拟合度。金属冶炼、化学工业、非金属矿物制品、纺织服装业、造纸印刷业分别能达到 0.878、0.985、0.913、0.965、0.988 的拟合度, 可以用于之后碳排放的预测。

4. 江苏省制造业未来碳排放趋势分析

4.1. 情景和参数设定

为科学预测未来碳排放变化趋势, 本文采用情景分析法进行模拟。根据制造业就业人数、人均产值、能源结构、碳排放强度、能源利用效率等五项关键因素的低、中、高三种变化率档位, 构建不同情景路径, 以反映政策力度与发展差异。预测期为 2022~2050 年, 并划分为六个阶段(2022~2025, 2026~2030, 2031~2035, 2036~2040, 2041~2045, 2046~2050), 以考察不同阶段的动态特征。各部门参数设定以历史数据为基准, 结合江苏省发展规划与技术进步趋势, 并参考杨学新[14]、单葆国[15]、王红平[16]、Xu[17]等学者的研究。以下以金属冶炼及压延加工业为例说明。

1) 就业人数变化率: 2002~2016 年该行业就业年均增速 7.62%, 但近五年降为-8.26%, 主要因产能压减、自动化与环保约束。结合“十四五”规划“高质量就业”目标, 未来就业预计小幅收缩后趋稳。本文设 2017~2021 年年均增速-8.26%为中速情景, 同时参考王红平[16]的研究做法, 低速和高速分别为-7.26%、-9.26%, 并每阶段递减 0.5%, 体现转型期的渐进调整。

2) 人均产值变化率: “十四五”规划提出到 2035 年人均 GDP 较 2020 年翻番。虽然制造业比重下降, 但技术进步将支撑人均产值稳步增长。2017~2021 年该行业年均增速为 15.99%, 据此设高、中、低三情景分别为 15.99%、14.99%、13.99%, 并每阶段递减 1%, 反映增长放缓与结构调整趋势。

3) 能源结构变化率: 2017~2021 年煤炭占比年均下降 5.37%, 根据中国石油经济研究院发布的《2050 年世界能源展望》[18]报告, 中国煤炭消费量将快速下降。此外, 全球能源互联网合作组织发布的《中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望》[19]报告中指出, 中国的煤炭消费总量预计 2025 年、2030 年分别降至 27.6 亿吨和 25 亿吨。结合 Xu 等[17]研究。设中速情景下 2022~2025 年继续以-5.37%下降, 之后每阶段加快 0.5 个百分点; 低速与高速分别为-4.37%、-6.37%, 体现不同政策强度。

4) 碳排放强度变化率: 依据国家“十四五”与“十五五”减排目标及江苏规划, 结合近五年行业碳强度年均下降-8.7%的趋势, 设中速情景下 2022~2025 年下降-7.7%, 每阶段下降速度减少 0.2 个百分点; 低速和高速分别为-7.7%、-9.7%, 反映技术进步与政策约束差异。

5) 能源利用效率变化率: “十三五”期间单位工业增加值能耗降幅 26.7%, 显示节能成效显著。“十四五”规划提出加快节能改造与绿色转型。近五年能源利用效率改善率为-2.85%, 本文以此为低速情景,

参考何乐天[20]研究，中速与高速分别为-3.38%、-3.85%，并假设各阶段改善幅度递增 3%，体现政策与技术协同提升的长期趋势。

根据各影响因素的低、中、高的变化率，参考廖祖君[21]、胡西武[22]的情景路径结合江苏省的具体情况设定 4 种情景路径模拟(表 4)。

Table 4. Scenario setting for the change rates of influencing factors of carbon emissions from metal smelting and pressing products in Jiangsu Province

表 4. 江苏省金属冶炼和压延加工品碳排放各影响因素变化率设定

变化率	时间	变化率设置				
		P	A	ES	TS	EE
低	2022~2025 年	-7.26%	13.99%	-4.37%	-7.70%	-2.85%
	2026~2030 年	-7.76%	12.99%	-3.87%	-7.90%	0.15%
	2031~2035 年	-8.26%	11.99%	-3.37%	-8.10%	3.15%
	2036~2040 年	-8.76%	10.99%	-2.87%	-8.30%	6.15%
	2041~2045 年	-9.26%	9.99%	-2.37%	-8.50%	9.15%
	2046~2050 年	-9.76%	8.99%	-1.87%	-8.70%	12.15%
中	2022~2025 年	-8.26%	14.99%	-5.37%	-8.70%	-3.38%
	2026~2030 年	-8.76%	13.99%	-4.87%	-8.90%	-0.38%
	2031~2035 年	-9.26%	12.99%	-4.37%	-9.10%	2.62%
	2036~2040 年	-9.76%	11.99%	-3.87%	-9.30%	5.62%
	2041~2045 年	-10.26%	10.99%	-3.37%	-9.50%	8.62%
	2046~2050 年	-10.76%	9.99%	-2.87%	-9.70%	11.62%
高	2022~2025 年	-9.26%	15.99%	-6.37%	-9.70%	-3.85%
	2026~2030 年	-9.76%	14.99%	-5.87%	-9.90%	-0.85%
	2031~2035 年	-10.26%	13.99%	-5.37%	-10.10%	2.15%
	2036~2040 年	-10.76%	12.99%	-4.87%	-10.30%	5.15%
	2041~2045 年	-11.26%	11.99%	-4.37%	-10.50%	8.15%
	2046~2050 年	-11.76%	10.99%	-3.87%	-10.70%	11.15%

第一种情景是基准情景，在该情景下各影响因素的变化率均选择中增长模式下的变化率。

第二种情景是绿色发展情景，采用绿色低碳的经济发展方式，以实现“双碳”为最终目标设定能源环境约束性指标，在该情景下制造业就业人数、制造业人均产值、碳排放强度设置中速发展，能源结构和能源利用效率得到大幅改善，设置高速发展速度。

第三种是技术突破情景，节能减排效果显现最直接、最有效的是推进技术创新，特别是低碳与节能的技术突破。在绿色发展情景设定基础上，碳排放强度大幅度降低，同时人均产值也会大幅提高。但能源结构随着技术突破会改变，但改变速度，需要一定的时间缓冲。

第四种情景是粗放式发展情景，该情景反映了江苏省以经济发展为主要目标，相对粗放的发展方式，快速的经济增长将不可避免地导致其能源消耗高，环境污染大。在该情景下制造业人均产值、制造业就业人数设定高速，能源结构、碳排放强度、能源利用效率设定低速(表 5)。

Table.5. Scenario simulation of carbon emissions in Jiangsu’s manufacturing sector
表 5. 江苏省制造业碳排放情景模拟

情景组合	具体设置				
	A	P	ES	TS	EE
基准情景(S1)	中	中	中	中	中
绿色发展情景(S2)	中	中	高	高	中
技术突破情景(S3)	高	中	中	高	高
粗放情景(S5)	高	高	低	低	低

4.2. 5 个重点制造业部门的碳排放达峰路径分析

4.2.1. 总体情况

由于 2022 年江苏省投入产出表尚未公开，而完全碳排放量需通过投入产出法计算获得，因此

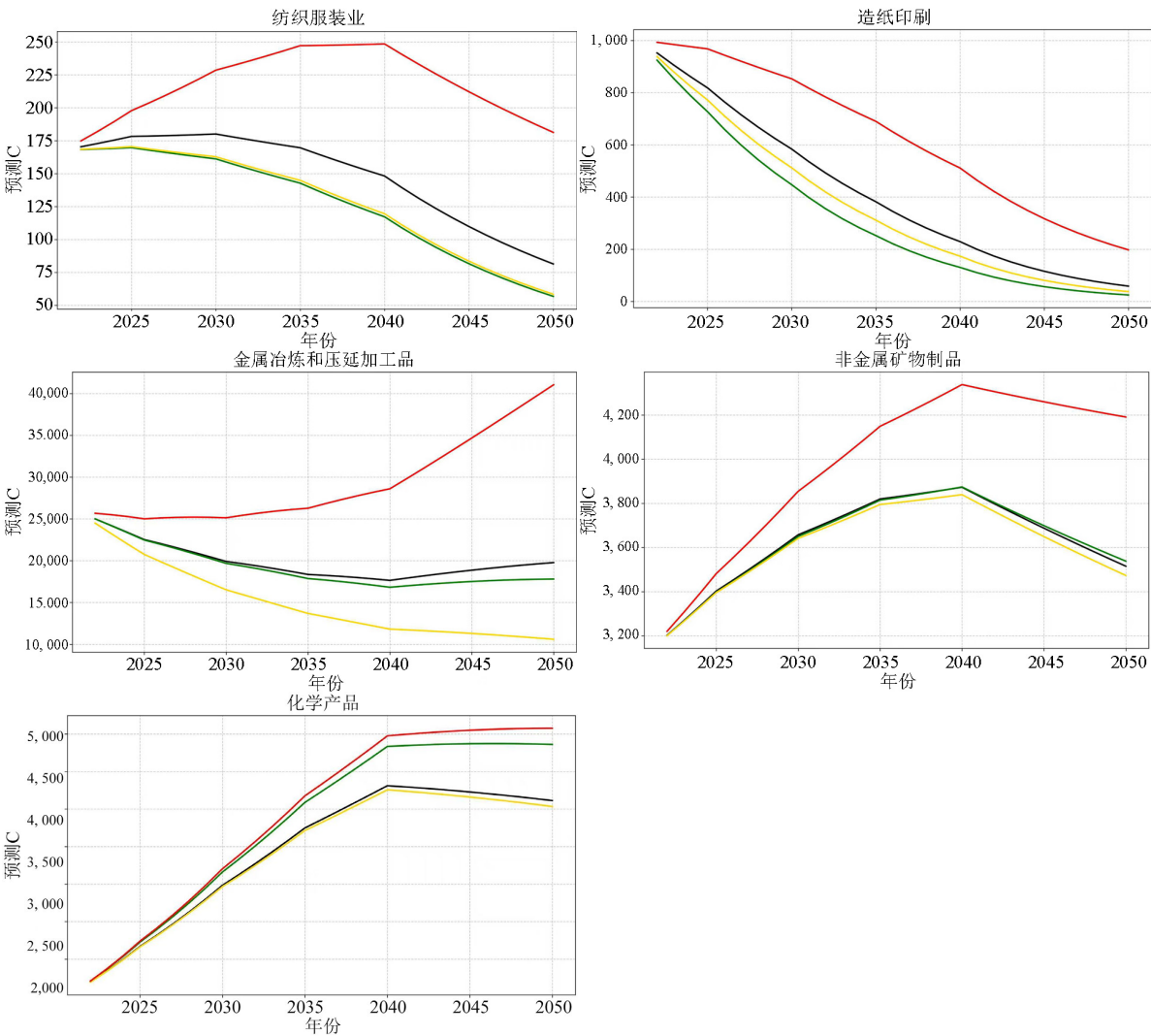


Figure 2. Scenario projection of carbon emissions for key manufacturing sectors,, 2022~2050
图 2. 重点制造业部门 2022~2050 年碳排放量情景预测

2022~2024 年暂无法测算实际数据, 本文采用情景分析法进行预测。图 2 展示了基于 STIRPAT 模型模拟的 2022~2040 年五个重点制造业部门在四种情景路径下的完全碳排放变化趋势。总体来看, 粗放发展情景下碳排放水平显著高于其他情景。由于各情景下正负驱动因素并存, 制造业部门间碳排放变化趋势呈现一定复杂性, 部分部门在基准情景下的排放量甚至低于绿色发展路径, 表明制造业碳排放变化不仅受宏观经济增长影响, 还受到技术进步、结构优化及政策调控等多重因素的交互作用。

4.2.2. 不同路径下部门的达峰进程与减排潜力分析

在基准情景下, 江苏省制造业内部碳排放差异显著。纺织服装鞋帽及其羽绒制品业、造纸印刷及文教体育用品业由于碳排放基数较低、能源结构优化明显, 预计可于 2030 年前实现碳达峰, 其中前者峰值为 1.72 百万吨, 后者碳排放呈持续下降趋势。非金属矿物制品业与化学产品业预计于 2030~2040 年间达峰, 峰值分别为 38.73 百万吨和 43.11 百万吨, 其减排进程相对滞后, 体现出高能耗行业对技术进步的依赖性较强。金属冶炼及压延加工业碳排放呈“先降后升”特征, 未能实现达峰, 主要原因在于该行业减排主要依赖产能压缩和末端治理措施, 核心生产环节缺乏实质性技术变革。

在绿色发展路径下, 轻工业部门表现出较强的减排潜力。纺织服装鞋帽及其羽绒制品业与造纸印刷及文教体育用品业均在 2030 年前达峰, 前者峰值为 1.69 百万吨, 较基准情景更低且达峰时间提前。非金属矿物制品业于 2030~2040 年间达峰(38.74 百万吨), 化学产品业则在 2040 年后达峰(48.73 百万吨)。尽管绿色路径可部分抵消经济增长带来的排放增量, 但高排放行业受工艺过程排放刚性约束, 减排潜力有限。金属冶炼及压延加工业仍未实现达峰, 表现为缓慢回升趋势, 反映出其高碳工艺占比大、再生资源利用率不足。

在技术突破路径下, 节能降碳技术应用显著促进减排。纺织服装鞋帽及其羽绒制品业与造纸印刷及文教体育用品业预计 2030 年前达峰, 前者峰值为 1.70 万吨, 后者呈持续下降趋势。非金属矿物制品业于 2030~2040 年间达峰(38.39 百万吨), 化学产品业于 2040 年后达峰(41.37 百万吨)。虽然技术创新能够一定程度上缓解排放增长压力, 但工艺过程排放刚性较强, 减排空间仍受限制。金属冶炼及压延加工业碳排放虽持续下降, 但未能实现达峰, 显示该行业在生产流程和能源利用结构上的高碳依赖尚未根本改变。

在粗放发展路径下, 整体碳排放水平最高、达峰时间最晚。造纸印刷及文教体育用品业可于 2030 年前达峰, 纺织服装鞋帽及其羽绒制品业和非金属矿物制品业则推迟至 2040 年左右, 峰值分别为 1.9 百万吨和 43.38 百万吨, 显著高于其他情景。化学产品业与金属冶炼及压延加工业在 2040 年后仍未达峰, 排放持续攀升, 表明在高能耗、高排放的发展模式下, 行业扩张效应显著超过减排效应, 碳排放控制难度显著加大。

4.2.3. 各部门最优达峰路径选择分析

我国虽然承诺在 2030 年前实现碳达峰, 但省级各部门如何实现这一宏伟目标仍缺乏具体依据。需要指出的是, 单纯追求达峰时间可能导致累计排放量增加。本质上, 将全球温度升高控制在 2 摄氏度以内的目标取决于累计排放量而非碳达峰时间。尽快实现碳达峰是为了控制累计排放这一最终目标。本文所界定的“最优路径”需满足双重标准: 一是时间约束, 即确保 2030 年前实现碳达峰; 二是总量约束, 即在达峰前实现累计碳排放量的最小化。这一界定逻辑源于全球气候目标的本质要求, 即控制累计碳排放量以防止全球温升。因而, 实现 2030 年达峰并非终点, 而是达成长期碳排放预算控制的手段。两者的协同优化, 才是构建制造业碳达峰路径的关键点。根据制造业各部门的碳达峰时间和最优路径将制造业各部门划分为四大类。

1) 纺织服装鞋帽及其羽绒制品和造纸印刷及文教体育用品行业均能在绿色发展路径下于 2030 年前实现碳达峰。以纺织服装鞋帽及其羽绒制品行业为例, 其碳达峰时间明显早于基准和高速发展情景, 2022~2030 年累计排放量较基准路径减少约 12.53%, 峰值排放量控制在 1.69 百万吨。这主要得益于再生纤维推广和节能工艺的大规模应用, 使行业在保持产值增长的同时实现单位能耗显著下降。造纸印刷及文教体育用品行业同样体现出绿色路径的优势。其排放下降主要源于废纸回收体系的完善和清洁能源使

用比例的提升。虽然在其他路径下该行业排放量也呈下降趋势，但绿色路径能在 2030 年前进一步减少累计排放，减排效果更为显著，因此被界定为该行业的最优路径。

2) 金属冶炼和压延加工业作为典型的高排放行业，其排放演变呈现出明显的路径分化特征。在技术突破路径下，该行业碳排放自 2020 年后保持持续下降趋势，预计可在 2030 年前实现碳达峰。虽然到 2050 年排放量仍高达 7090 万吨，但 2022~2030 年累计排放量控制在 16.9 亿吨以内，相较基准路径减少约 18.2%。这种优势主要得益于氢冶金、电炉炼钢等低碳工艺的推广，以及废钢利用率的提高。相比之下，基准路径下的减排效果明显不足：该行业虽在 2025 年前后出现短暂下降，但由于技术进步滞后，后期随着产能释放与经济需求增长，碳排放呈现先降后升的趋势，其峰值排放量比技术突破路径高出约 126.83 万吨。尤其是在粗放发展路径下，碳排放反弹最为明显，到 2030 年甚至超过 2020 年水平，上升幅度达到 1.3%，成为全国制造业碳达峰进程中的潜在风险点。因此，推动技术突破不仅是金属冶炼和压延加工业实现 2030 年前碳达峰的最优路径，也是避免行业陷入“反弹陷阱”的关键。

3) 非金属矿物制品在不同路径下的达峰时间和峰值排放量差异显著。在技术突破路径下，该行业可于 2030~2040 年间实现碳达峰，峰值为 38.39 百万吨，显著低于其他路径。相比之下，基准路径与绿色路径也能在同期实现碳达峰，但峰值分别为 38.72 百万吨和 38.74 百万吨，高于技术突破路径，显示其减排潜力有限。而在粗放发展路径下，碳达峰要推迟至 2040 年以后，峰值高达 43.37 百万吨，比技术突破路径高出约 5 百万吨。这种差异主要源于低碳工艺和资源替代的应用程度不同。技术突破路径下，低熟料水泥推广、窑炉余热回收和碳捕集利用(技术的应用显著降低了单位排放。绿色发展路径虽引入节能和清洁能源，但受限于技术渗透率不足，减排效果有限。粗放发展路径下，由于基础设施建设需求增长以及水泥生产中熟料占比维持在较高水平，导致碳排放长期处于高位因此。该行业的最优路径依赖于技术突破的加速推进。

4) 化学产品的碳排放路径呈现出明显的分化特征。总体上，该行业在多种路径下都要到 2040 年之后才能实现碳达峰，但不同路径的峰值水平与累计排放量差异显著。技术突破路径下，该行业的碳达峰排放量最低，为 42.40 百万吨，累计碳排放量也处于最小水平，显示出明显的减排优势。相比之下，基准路径和绿色发展路径虽然同样在 2040 年后实现碳达峰，但峰值分别为 43.11 百万吨和 48.73 百万吨，排放水平高于技术突破路径。尤其是绿色发展路径，其峰值排放量比技术突破路径高出约 15%，反映出化工行业单纯依赖节能与能源替代的效果有限。在粗放发展路径下，该行业碳排放持续攀升，并未在 2040 年实现达峰，2050 年排放量甚至达到 50.78 百万吨，较技术突破路径高出近 20%。这一趋势表明，如果缺乏前沿技术的突破与应用，化学产品行业不仅难以提前达峰，还可能成为制造业整体碳减排的拖累。化学产品碳排放在不同路径下碳排放特征具有差异性的根本原因在于整个过程排放占比高，只有通过技术突破如电解制氢、CCUS 和生物基原料才能有效降低峰值排放和累计排放(表 6)。

Table 6. Optimal pathway for carbon peaking in Jiangsu Province’s manufacturing sector
表 6. 江苏省制造业碳达峰最优路径

碳达峰时间	碳达峰最优路径	制造业部门	碳达峰量
2030 年前	绿色发展路径	纺织服装鞋帽及其羽绒制品	1.70 万吨
2030 年前	绿色发展路径	造纸印刷及文教体育用	持续下降
2030 年前	技术突破路径	金属冶炼和压延加工品	持续下降
2030~2040 年	技术突破路径	非金属矿物制品	38.39 百万吨
2040 年后	技术突破路径	化学产品	42.56 百万吨

5. 结论与建议

5.1. 研究结论

本文基于 STIRPAT 模型, 结合完全碳排放测算与多情景模拟, 系统分析了江苏省五个重点制造业部门在 2022~2040 年的碳排放演变及达峰路径。主要结论如下。

5.1.1. 碳达峰时间呈行业分层特征

轻工类行业如纺织服装鞋帽及羽绒制品、造纸印刷及文教体育用品在绿色发展路径下可于 2030 年前实现达峰。高碳排放行业如金属冶炼与压延加工品、非金属矿物制品、化学产品达峰时间较晚, 尤其在粗放发展路径下峰值排放高、达峰时间推迟, 凸显行业间碳排放异质性。

5.1.2. 驱动因素作用存在显著异质性

就业规模、人均产值、能源结构、能源效率和碳排放强度等变量对碳排放的影响差异明显。轻工类行业能通过单位能耗降低和清洁能源替代实现减排。高能耗行业中, 能源效率提升可能伴随产能扩张, 形成反弹效应。

5.1.3. 各部门的最优路径

轻工类部门纺织服装鞋帽及羽绒制品、造纸印刷及文教体育用品在绿色发展路径下达峰时间最早且累计碳排放最低, 而高碳排放部门非金属矿物制品、金属冶炼与压延加工品、化学产品则需依赖技术突破路径, 通过低碳工艺与前沿技术实现碳达峰并最大化减排潜力。

5.2. 政策建议

针对不同类型产业在碳达峰进程中的差异, 应建立分层分类的减排策略体系, 精准匹配政策工具。对于绿色路径优势型行业, 如轻工类部门, 包括纺织服装鞋帽及羽绒制品、造纸印刷及文教体育用品等, 应重点推进能源结构优化, 加大可再生能源和清洁能源的替代比例, 并完善绿色生产标准和供应链管理, 以确保行业在保持产值增长的同时实现低碳转型。对于技术突破路径依赖型行业, 如金属冶炼与压延加工品、非金属矿物制品和化学产品, 应加大技术改造与研发支持力度, 推动核心低碳技术的应用, 例如氢冶金、电炉炼钢、低熟料水泥工艺和碳捕集利用等前沿技术, 同时利用国际绿色贸易规则和市场激励机制倒逼产业升级, 以实现峰值碳排放和累计排放量的有效控制。对于存在排放反弹风险或高碳路径依赖的部门, 应提前布局低碳工艺改造和需求侧管理, 防止产能扩张带来的碳排放增加。同时, 应强化碳交易市场和碳金融工具的协同作用, 建立健全碳排放监测、报告与核查体系, 为精准施策提供实时数据支撑, 推动江苏制造业整体向低碳、高效和可持续方向转型。

参考文献

- [1] 丁唯佳, 吴先华, 孙宁, 等. 基于 STIRPAT 模型的我国制造业碳排放影响因素研究[J]. 数理统计与管理, 2012, 31(3): 499-506.
- [2] Xu, B. and Lin, B. (2016) Reducing Carbon Dioxide Emissions in China's Manufacturing Industry: A Dynamic Vector Autoregression Approach. *Journal of Cleaner Production*, **131**, 594-606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.129>
- [3] 张丽峰. 我国部门结构、能源结构和碳排放关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5): 1-7.
- [4] Lenzen, M. (1998) Primary Energy and Greenhouse Gases Embodied in Australian Final Consumption: An Input-Output Analysis. *Energy Policy*, **26**, 495-506. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(98\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(98)00012-3)
- [5] 郭朝先. 部门结构变动对中国碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 15-20.
- [6] 宋鹏, 张慧敏, 毛显强. 面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1446-1455.
- [7] 王勇, 毕莹, 王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10):

- 131-140.
- [8] 赵金辉, 李景顺, 王潘乐, 等. 基于 Lasso-BP 神经网络模型的河南省碳达峰路径研究[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 151-156, 164.
- [9] 杨君. 中国交通运输业碳排放测度及减排路径研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 江西财经大学, 2022
- [10] 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.
- [11] Dietz, T. and Rosa, E.A. (1994) Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology. *Human Ecology Review*, **1**, 277-300.
- [12] 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)
- [13] 中华人民共和国国家统计局统计设计管理司. 国民经济部门分类 GB/T4754-2017 [M]. 北京: 国家统计局统计设计管理司, 2017.
- [14] 杨学新. 基于 IPSO-BP 神经网络模型的江西省工业碳排放预测研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [15] 单葆国, 姚力, 张成龙, 等. 中国能源消费碳排放达峰情景预测: 基于 STIRPAT 扩展模型[J/OL]. 环境科学, 2025, 46(7): 4052-4064.
- [16] 王红平, 杨建州. 基于扩展 STIRPAT 模型的广东省造纸工业碳排放情景预测[J/OL]. 环境科学, 2025, 46(9): 5535-5542.
- [17] Xu, G., Schwarz, P. and Yang, H. (2019) Determining China's CO₂ Emissions Peak with a Dynamic Nonlinear Artificial Neural Network Approach and Scenario Analysis. *Energy Policy*, **128**, 752-762. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.058>
- [18] 中国石油经济技术研究院. 2050 年世界与中国能源展望(2020 版) [R]. 研究报告, 中国石油经济技术研究院, 2020.
- [19] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[R]. 研究报告, 全球能源互联网发展合作组织 2021.
- [20] 何乐天, 杨泳琪, 李蓉, 等. 基于 STIRPAT 模型的黑龙江省工业碳排放情景分析与峰值预测[J]. 资源与产业, 2024, 26(1): 162-172.
- [21] 廖祖君, 张剑宇, 陈诗薇. 碳排放影响因素及达峰路径研究——基于四川省的分析[J]. 软科学, 2023, 37(9): 95-101.
- [22] 胡西武, 黄蕾, 李毅. 应对气候变化下的青藏高原碳脱钩水平测度及碳达峰路径选择——以青海省为例[J]. 青海社会科学, 2021(5): 43-54.