DOI: 10.5846/stxb202012073118

张帆, 徐宁, 吴锋. 共享社会经济路径下中国 2020—2100 年碳排放预测研究. 生态学报, 2021, 41(24): 9691-9704.

Zhang F, Xu N, Wu F. Research on China's CO₂ emissions projections from 2020 to 2100 under the shared socioeconomic pathways. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9691-9704.

共享社会经济路径下中国 2020—2100 年碳排放预测研究

张 帆, 徐 宁, 吴 锋*

中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

摘要:碳排放和减碳经济代价研究日益受到学术界和决策者的关注, 中国政府做出的关于争取在 2060 年前实现碳中和的表态引起了国际社会的热议。在此背景下, 开展中国未来长时间序列碳排放的情景预测具有切实意义。基于可拓展的随机性环境影响评估模型 (STIRPAT) 评估了人口、经济和受教育程度对碳排放的影响, 对比历史数据并验证了碳排放预测模型的准确性, 结合共享社会经济路径 (SSPs) 情景的设定和模型参数, 预测了 5 种情景下中国 2020 年至 2100 年的碳排放轨迹及经济代价。结果表明: (1) 考虑碳排放达峰目标的实现, SSP3 情景是中国未来发展的最佳情景, 在此情景下, 中国有望提前三年实现碳排放达峰目标; (2) SSP3 情景可使中国年度总碳排放量和人均碳排放量处于相对其他四种情景的最低值, 但需要付出累积 GDP 下降 5.49% 至 8.80% 的代价; (3) 为完成在 2060 年前实现碳中和的承诺, 中国政府在未来的 40 年需面对 409.36—467.42 Gt 的碳中和量; (4) 2020 年中国的碳排放强度将会较 2005 年水平下降 40.52% 至 41.39%, 2030 年碳排放强度将会较 2005 年水平下降 59.64% 至 60.75%。5 种情境中, SSP5 情景是降低碳排放强度的最佳情景, 可最大程度地超额实现碳排放强度目标。未来, 受经济发展、人口增长等重要因素影响, 中国政府减碳压力将进一步加大。后疫情时代, 考虑到能源供应的减少和高科技产业的发展, 碳排放社会成本的上升将为中国创造一个使能源系统脱碳的机遇。中国应在“十四五”期间继续提升能源利用效率、升级产业结构、提倡低碳消费、实施隐含碳战略, 以尽快实现碳减排目标。

关键词:碳减排承诺; 碳排放预测; 共享社会经济路径; 可拓展的随机性环境影响评估模型

Research on China's CO₂ emissions projections from 2020 to 2100 under the shared socioeconomic pathways

ZHANG Fan, XU Ning, WU Feng*

Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Research on CO₂ emissions and the economic cost of carbon reduction has received increasing attention from academics and policy makers. The Chinese government's statement on striving to achieve carbon neutrality by 2060 has aroused the heated discussions in the international community. In this context, it is of practical significance to predict China's future long-term CO₂ emissions scenarios. Based on the Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology (STIRPAT) model, this paper evaluates the impacts of population, economy, and education on CO₂ emissions and verifies the accuracy of the CO₂ emission prediction model by comparing with historical data. Combined with the settings and model parameters of the Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios, this paper predicts China's CO₂ emission trajectory and economic costs from 2020 to 2100 under five scenarios. The results show that: (1) considering the

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFA0602502); 国家自然科学基金项目 (72004215)

收稿日期: 2020-12-07; 网络出版日期: 2021-08-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufeng@igsnrr.ac.cn

realization of the goal of reaching the peak of CO₂ emissions, the SSP3 scenario is the best scenario for China's future development. Under this scenario, China is expected to achieve the goal of reaching the peak of CO₂ emissions three years ahead of schedule. (2) The SSP3 scenario can keep China's annual total CO₂ emissions and per capita CO₂ emissions at the lowest levels relative to the other four scenarios, but at the cost of a cumulative GDP reduction of 5.49% to 8.80%. (3) To fulfill the commitment to achieve CO₂ emission neutrality by 2060, the Chinese government will need to face a CO₂ neutralization amount of 409.36 to 467.42 Gt over the next 40 years. (4) China's CO₂ emission intensity in 2020 will be 40.52% to 41.39% lower than the 2005 level, and the CO₂ emission intensity in 2030 will be 59.64% to 60.75% lower than the 2005 level. Among the five scenarios, the SSP5 scenario is the best scenario for reducing the CO₂ emission intensity, which can exceed the CO₂ emission intensity target to the maximum extent. In the future, the pressure of the Chinese government to reduce CO₂ emission will further increase which is affected by important factors such as economic development and population growth. In the post-epidemic era, considering the reduction of energy supply and the development of high-tech industry, the rising social cost of CO₂ emissions will create an opportunity for China to decarbonize the energy system. China should continue to improve energy efficiency, upgrade industrial structure, promote low-carbon consumption and implement implied carbon strategy during the 14th five-year Plan period, so as to achieve the CO₂ reduction target as soon as possible.

Key Words: CO₂ reduction commitment; CO₂ emission forecasting; shared socioeconomic pathways; STIRPAT model

近年来,二氧化碳排放、环境污染和全球变暖已成为威胁世界经济和社会可持续发展的重要因素。改革开放后,中国进入高速发展时期。由于能源利用效率和清洁技术的限制,这种发展模式持续增加能源消耗,能源自然成为中国发展的命脉^[1]。与之相关的直接后果是,2009 年中国成为世界上最大的温室气体排放国家^[2]。另外,数据显示中国 2015 年的碳排放约占全球总排放量的三分之一^[3]。

面对节能减排的紧迫任务,中国积极参与全球气候治理,展现负责任的大国形象。中国政府已经提出了碳减排目标的中长期发展计划。2015 年巴黎气候变化大会上,中国政府明确了“自主行动目标”即要在 2030 年左右实现国内碳排放达峰并争取尽早达峰,届时碳排放强度(CEI)要较 2005 年水平下降 60%—65%^[4]。国务院颁布的《节能减排综合工作计划》(2016—2020)明确要求提高能源利用效率,使碳排放强度较 2015 年水平下降 15%^[5]。2020 年 9 月,中国政府在七十五届联合国大会将已有目标和雄心进一步加强,提出将提高国家自主贡献力度,努力于 2060 年之前实现碳中和^[6]。实际行动上,近年来中国也针对能源消费结构的转变和产业结构的优化进行了系列的政策设计^[7-10],以期减少碳排放和由此产生的经济代价。

为了探究中国是否能够实现碳排放强度下降的承诺、是否有可能尽早达到碳排放峰值,学界有必要对中国碳排放的长期动态做出有据可依的精准预测。当前对碳排放的预测研究主要集中于讨论中国能否在 2020 年和 2030 年完成相应的碳减排承诺,但尚未完全深入到碳排放的长期、多情景预测。在为数不多关于碳排放动态预测的研究中,主要集中在碳强度下降、碳排放达峰和碳减排承诺等方面,基于情景的碳排放动态预测及经济代价评估略有缺乏。关于碳排放强度下降目标的研究,Zhang 等^[11]运用 LMDI 方法和情景分析做了碳预测研究,认为 2030 年碳排放强度下降 65%的目标完全可以实现;Cui 等^[12]的研究结果表明 2020 年和 2030 年恰好是碳排放强度下降目标上限和下限的实现节点,但中国的一系列碳排放承诺不能完全实现,强调了采取严格的碳排放价格限制的重要性;Sun 等^[13]发现中国有潜力将 2030 年的碳排放强度降低至 2005 年水平的 27.30%,并认为通过特定的情景假设可以实现峰值目标;Chen^[14]针对中国设计了一个能源供需模型和对应的两个未来情景,结果显示中国的碳排放会于 2025 年达到峰值。基于一个经济气候联合模型,Mi 等^[15]预测中国碳排放的峰值可能会出现在 2026 年。王珂珂等^[16]使用 WOA-ELM 模型对中国 2040 年之前的碳排放动态进行了预测,结果显示中国的碳排放将继续增加至 2031 年。基于绿色索罗模型,付喆等^[17]的研究揭示中国在加快减排技术进步的前提下可以在 2030 年实现碳排放达峰。除以上结果外,部分学者还认为中国做出

的碳减排承诺难以实现^[18-20]。总体来看,现有研究已经积累了与中国碳排放达峰或者减排相关的丰富成果,但研究结论并不一致,主要原因在于以历史数据为单一依据的碳排放预测常常难以反映未来社会的发展动向,与此形成对照的是,基于合理的、长期的发展情景设定开展预测研究会更加贴合未来碳排放的真实场景。

预测未来的碳排放情景是一个宏观、复杂的工作,应围绕情景和模型两个方面开展。现有研究很少考虑到气候政策实施和由此引发的未来社会经济发展的不确定性,这使得碳排放的预测工作充满挑战。本文试图通过 IPCC 发布的共享社会经济路径(SSPs)来为碳排放的多情景预测做出贡献。SSPs 是依据历史数据对社会多维度属性进行的未来预测^[21]。基于气候政策,SSP 设定了未来社会发展的 5 种不同情况,即 5 种 SSP 情景。值得一提的是,在新型冠状病毒(COVID-19)疫情在全球肆虐的大背景下,有必要讨论此次“黑天鹅事件”对中国发展和 SSPs 框架的影响。COVID-19 疫情的爆发对环境尤其是对碳排放造成了严重影响。由于实施有关疫情防控的封锁措施,当前世界上几乎所有国家的碳排放量均有所减少^[22]。尤其对于亚洲国家而言,其碳排放量减少程度十分显著^[23]。2019 年中国排放了约 140 亿吨二氧化碳;当中国因 COVID-19 疫情而实施封锁措施后,2020 年第一季度的碳排放量与 2019 年同期相比减少了 10.3%^[24]。参考 2008 年全球性金融危机,Wang 等探索了“黑天鹅事件”后人均能源消耗、能源结构、能源强度和对外贸易对碳排放变化的长期影响,为防止碳排放在 COVID-19 疫情后受经济恢复的刺激而再次飙升,倡导各国针对经济进行长期改革并努力实现绿色和低碳发展道路^[25]。COVID-19 疫情对全球碳排放存在短期冲击,由此造成的气候变化会促使全球气候政策进行一定程度的短期调整^[26];从自然环境的长期发展角度来看,此次疫情下全球气候的变化是微弱和短暂的,疫情对 SSP 框架设置合理性的挑战较为微弱,疫情后全球经济社会发展的轨迹与 5 种 SSP 情景原有的“故事线”不会存在显著偏差。基于模型获取对象间的作用机制是准确预测碳排放的关键步骤。换句话说,要想模拟碳排放的未来轨迹,就必须基于历史数据探明碳排放与影响因素间的关系。已经有多种方法被应用于预测碳排放,例如环境库兹涅兹曲线(EKC)^[27]、灰色模型^[28]、STIRPAT 模型^[29]和 LMDI 方法^[11]。以上方法中,由 Dietz 和 Rosa^[30]提出的 STIRPAT 模型可以实现对环境压力的随机估计。STIRPAT 模型不假设导致影响的驱动因素之间存在因果关系,相反,它将此类联系视为要检验的假设。此外,STIRPAT 模型鼓励将人口、富裕程度和技术以外的驱动因素视为环境影响的驱动因素^[31-32]。已有研究显示更大的人口规模通常会导致更多的碳排放^[33];人均 GDP 是预测碳排放的有效指标^[34];受教育程度不仅可以表征地区人类发展的素质,还可以反映技术的先进性^[35]。考虑到人口、经济和教育程度恰好是 SSPs 框架中关键的预测变量,结合 STIRPAT 模型原理可以构建碳排放的一种新颖的解释变量组。因此,对本研究而言,STIRPAT 模型具有良好的实用性和独特优势。

本文尝试基于 SSPs 的差异化设定,从历史趋势分析和未来情景模拟对中国碳排放的趋势及经济代价进行多情景预测。具体而言,本文通过样本内和样本外检验测试基于 SSPs 的模型的预测能力。样本内检验侧重于 1997 年至 2010 年的样本数据,而样本外检验则侧重于 2011 年至 2017 年期间。在确保模型具有高精度的前提下,完成了 5 个 SSP 情景的碳排放预测及经济代价评估。本研究的分析结果将为政府制订合理的碳减排目标和减排措施提供理论依据和决策参考。

1 研究方法和材料

1.1 共享社会经济路径

共享社会经济路径(SSPs)开发的目的在于评估气候变化的影响以及减轻不利社会影响的能力如何随社会经济驱动因素而变化的不确定性。SSPs 方案的制定取决于对社会经济发展、教育改善和人口增长的不同假设,旨在跨越一系列可供选择的未来。SSPs 与气候变化相关的物理过程脱钩,根据缓释和适应气候变化的挑战来定义每种路径。高缓释挑战被理解为对化石燃料的高度依赖以及对针对全球环境问题的低水平国际合作能力;高适应性挑战的特点是发展增长率低、人力资本投资少以及经济不平等加剧^[36-37]。表 1 展示了 5 种 SSP 情景有关缓释和适应的具体设定。

表 1 不同 SSP 情景的具体设定

Table 1 Specific settings for different SSP scenarios

情景 Scenario	缓释挑战 Mitigation challenges	适应挑战 Adaptation challenges	经济增长 Economic growth	人口增长 Population growth	教育程度 Education attainment
SSP1	低	低	高	低	高
SSP2	中	中	中	中	中
SSP3	高	高	低	高	低
SSP4	低	低	中	中	低
SSP5	高	低	高	低	高

SSP1: 可持续路径 Sustainability; SSP2: 中间路径 Middle of the road; SSP3: 区域竞争路径 Regional rivalry; SSP4: 不均衡路径 Inequality; SSP5: 化石燃料为主的路径 Fossil-fueled development

1.2 STIRPAT 分析

STIRPAT 的基础形式为:

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

式中, I 、 P 、 A 、 T 分别表示环境状况、人口、经济发展和技术创新。 b 、 c 、 d 分别为 3 个驱动因素的估计系数, a 为模型参数, e 为误差项。该模型是一个多变量非线性模型, 分别对其两端作对数化处理可以得到以下线性模型:

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

环境状况在本文中具体为碳排放。基于文献回顾, 本文分别使用总人口 (POP)、人均 GDP (PGDP) 和受过高等教育的人口 (EDU) 表征人口、富裕度和技术水平。为了更为准确地对中国碳排放的未来趋势进行预测, 需要对驱动因素框架进行扩展。对于环境库兹涅兹曲线 (EKC) 的存在性, 诸多研究已经以中国为对象探讨了这一话题, 但仍未形成统一结论^[38-40]。因此, 有必要对 EKC 在中国的存在性进行再检验, 具体而言, 本文将人均 GDP 的二次项纳入模型。综上, 本文建立的碳排放预测模型如下:

$$\ln CE = \ln a + b \ln POP + c_1 \ln PGDP + c_2 (\ln PGDP)^2 + d \ln EDU + \ln e \quad (3)$$

1.3 经济预测模型

本文使用 Cobb-Douglas 生产函数作为经济预测的基本工具, 该方法已被广泛地应用于全球和各国的经济研究^[41-43], 其表达式为:

$$Y(t) = K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} TFP(0) e^{\lambda t} \quad (4)$$

式中, Y 代表 GDP, L 、 K 和 TFP 分别代表劳动力、资本和全要素生产率。 α 代表弹性系数, λ 代表科技创新。对于 L , 本文使用 Leimbach 等^[44] 建立的劳动力投入计算框架进行计算。对于 K , 本文使用永续盘存法^[45] 对各省的物质资本存量进行计算。最后, 根据索罗经济增长模型计算得到 TFP 。为预测中国在不同情景下的社会发展状况, 需要基于 SSPs 框架对模型参数的未来发展情景进行假设。本文参考了 Leimbach 等^[44] 和姜彤等^[46] 的研究, 确定了相关参数。

1.4 数据源

本文进行实质性预测所需的数据可分为历史数据和预测数据两部分。

历史数据。碳排放数据来源于中国碳排放数据库 (CEADs)。考虑到 CEADs 记录的中国省级碳排放数据最早可追溯至 1997 年并且基于 SSPs 框架进行的变量预测始于 2010 年, 因此本文将历史数据的提取范围定位为 1997 年至 2010 年。由于缺失西藏的碳排放数据, 本文的基本研究单元是除西藏外的 30 个省份。人口和人均 GDP 数据来源于各省历年的统计年鉴。本文的历史数据将被应用于 STIRPAT 分析, 表 2 展示了变量的统计性结果。

预测数据。Chen 等^[47] 基于一个递归多维模型和 SSPs 框架构建了 2011 至 2100 年中国省级人口预测数据库。本文使用的人口预测数据来源于该数据库 (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4605713>)。除此之

外,为了进行经济预测,本文通过各省历年的统计年鉴获取了固定资本形成总额、居民消费物价指数和 GDP 等数据。

表 2 模型变量的统计性结果

Table 2 Statistical results of model variables

变量 Variable	均值 Mean	标准差 Standard deviation	极小值 Minimum	极大值 Maximum	单位 Unit	样本数 Sample size
CE	165.36	131.05	7.20	766.60	百万吨	420
POP	4259.22	2583.46	495.60	10441.00	万人	420
PGDP	16037.57	13874.75	2215.00	78989.00	元	420
EDU	224.90	156.57	9.96	857.62	万人	420

CE:碳排放 CO₂ emission; POP:总人口 Total population; PGDP:人均国内生产总值 Gross domestic product per capita; EDU:受过高等教育的人口 Population with a tertiary education

2 结果与分析

2.1 人口和经济预测结果

2.1.1 人口预测结果

基于以上分析,人口预测数据不仅被直接用作碳排放的预测因子,还参与了经济预测的过程。因此,检验人口预测数据的准确性对本研究而言至关重要。为了实现这一步骤,需要将人口预测结果与历史统计数据进行比较。用于比较的预测结果选取于与当前发展动向相近的 SSP2 情景,对比时段为 2011 年至 2017 年。

为了直观地评估预测的不确定性,本文选取了 3 种误差指标评判模型的预测效果(表 3)。从形式上看,量纲的设定标准会对平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)的绝对数值产生影响,平均绝对百分比误差(MAPE)是唯一的例外。参照 Pao 等^[48]设定的标准,MAPE 的结果可被划分为四类:高度准确的预测(0—10.00%)、良好的预测(10.00%—20.00%)、接近合理的预测(20.00%—50.00%)和不准确的预测(50.00%—100.00%)。表 3 中的 MAPE 值均小于 5%,表明本文使用的人口预测数据产品具有高度的准确性,这为准确预测经济的未来动态提供了先决条件。

表 3 有关人口预测的误差评价指标结果

Table 3 The error evaluation index results related to population forecasts

变量 Variable	MAE	RMSE	MAPE	单位 Unit	样本数 Sample size
POP	61.83	100.74	1.33%	万人	210
EDU	17.01	24.45	4.26%	万人	210

MAE:平均绝对误差 Mean absolute error; RMSE:均方根误差 Root mean square error; MAPE:平均绝对百分比误差 Mean absolute percentage error

2.1.2 经济预测结果

图 1 和图 2 分别为中国总 GDP 和人均 GDP 的预测结果。同样地,本文重点评估了经济预测的误差(表 4)。关注 MAPE 的结果,经济预测的准确性虽低于人口预测,但仍很好地模拟了现实情况。根据 MAPE,对各 SSP 情景下的总 GDP 和人均 GDP 分别设置 7.89%和 8.33%的误差范围。5 种 SSP 情景下,中国的总 GDP 均呈现上升趋势。从增长特点来看,SSP2 情景、SSP3 情景和 SSP5 情景近似,总 GDP 均呈现较为稳定的发展态势。SSP1 情景和 SSP4 情景较为接近,在 2050 年之后进入 GDP 增长的减缓期,总 GDP 分别趋向于 3.20×10^{14} 元和 2.50×10^{14} 元。在 SSP5 情景下,中国的人均 GDP 具有最高的水平,最低是 SSP3 情景。

图1 SSP1—SSP5 情景下中国总 GDP 预测结果

Fig.1 Forecast results of China's total GDP under SSP1—SSP5 scenarios

SSP1: 可持续路径 Sustainability; SSP2: 中间路径 Middle of the road; SSP3: 区域竞争路径 Regional rivalry; SSP4: 不均衡路径 Inequality; SSP5: 化石燃料为主的路径 Fossil-fueled development

表 4 有关经济预测的误差评价指标结果

Table 4 Error evaluation index results related to economic forecasts

变量 Variable	MAE	RMSE	MAPE	单位 Unit	样本数 Sample size
TGDP	1829.84	2783.65	7.89%	亿元	210
PGDP	4201.13	5580.95	8.33%	元	210

TGDP: 总国内生产总值 Total gross domestic product

国际应用系统分析研究所 (IIASA) 长期致力于研究全球环境尤其是气候变化, 其对国家尺度的人口和经济进行了长时间序列的预测。结合气体排放约束, IIASA 在各 SSP 情景下进一步设置了不同的“故事线”, 其结果被广泛用于全球社会经济发展的研究^[21,44,49]。选取 IIASA 数据库中 5 种 SSP 情景下基准设定的预测结果作为参考, 将本文中 2010 年至 2100 年人口和 GDP 总体结果与之进行对比分析。结果显示, 总人口和总 GDP 的 MAPE 平均值分别为 6.69% (SSP1: 5.57%; SSP2: 7.04%; SSP3: 7.70%; SSP4: 7.07%; SSP5: 6.08%) 和 7.01% (SSP1: 6.52%; SSP2: 5.40%; SSP3: 5.50%; SSP4: 8.28%; SSP5: 9.37%), 二者均处于“高度准确的预测”范围内。综上, 可以认为本文用于碳排放预测的人口和经济变量具有高度准确性。

图2 SSP1—SSP5 情景下中国人均 GDP 预测结果

Fig.2 Forecast results of China's per capita GDP under SSP1—SSP5 scenarios

2.2 碳排放预测模型

2.2.1 模型识别

为了评估每个因素对碳排放的作用方向和作用强度,本文基于历史数据进行模型回归(表5)。本文首先使用最小二乘回归(OLS)方法估算了1997年至2010年的基准模型。进一步,由于每个省的“省情”不同,可能遗漏了不随时间而变的变量,故尝试使用固定效应(FE)模型。FE模型的 F 检验值为114.85且通过1%水平的显著性检验,这一结果表明模型回归中存在个体效应。考虑到个体效应仍可能以随机效应(RE)的形式存在,故使用RE模型进一步测算模型。RE模型的LM检验值为1963.84且通过1%水平的显著性检验。综合以上结果,FE模型和RE模型均比OLS模型更加有效。最后,基于Hausman检验所得的 p 值为0.2693,无法拒绝原假设,即RE模型更加优越。因此,本研究将表5中RE模型对应的估计参数作为最终模型结果。

回归结果显示,本文选用的实质性解释变量对碳排放的作用效果均是显著的,相对而言受教育程度的显著性最“差”,但仍在5%的显著性水平上显著。具体来看,人口总规模的增长意味着更多的碳排放。中国在20世纪末和21世纪初这段时期的发展历程呈现出经济发展与碳排放的倒“U”型关系。受过高等教育的人口规模对碳排放产生了正向效应,这表明对于地区科技进步在过去作为一种推动力加剧了碳排放。

2.2.2 模型精度检验

本文试图通过样本内和样本外两种路径对模型精度进行检验。具体而言,基于RE模型的回归结果计算了1997年至2010年间的碳排放预测值并将其与历史数据进行比较。然后,为了验证模型对于“新”数据的解释能力,将模型参数代入中间路径(SSP2情景)下的人口和经济预测结果,由此得到2011年至2017年的碳排

放预测结果。

表 5 碳排放影响因素的模型结果
Table 5 Model results of factors affecting CO₂ emissions

变量 Variable	OLS 模型	FE 模型	RE 模型
lnPOP	0.5811 *** (11.09)	0.2310 (1.34)	0.6563 *** (7.89)
lnPGDP	1.5527 *** (2.88)	1.4922 *** (5.48)	1.9013 *** (8.24)
ln(PGDP) ²	-0.0629 ** (-2.22)	-0.0460 *** (-3.19)	-0.0685 *** (-5.66)
lnEDU	0.3089 *** (5.17)	0.0899 *** (2.94)	0.0754 ** (2.52)
常数	-10.4980 *** (-4.10)	-7.4602 *** (-3.17)	-12.6880 *** (-8.83)
R ²	0.8055	0.9075	0.9060
样本量 Sample size	420	420	420

OLS:普通最小二乘法 Ordinary least squares; FE:固定效应 Fixed effects; RE:随机效应 Random effects; * * *、* *、* 分别表示在 1%、5% 的显著性水平上显著; 括号内为 *t* 统计量

为了查看模型预测的更多细节,本文选取了各年度省级碳排放的中位数与实际值进行比较,结果见图 3。图 4 是碳排放的总体比较。类似 3.1 部分,本文使用误差指标对预测的准确性进行了评估,结果见表 6。结果显示,碳排放预测值与实际值之间存在一些偏差,预测的不确定性仍然存在。例如自 2007 年起,模型始终高估了中国的碳排放。但 1997 年至 2017 年的 MAPE 值很小,甚至没有超过 6%,表明模型的预测能力较为良好。更重要的是,针对样本外检验的误差指标结果显示模型面对“新”数据时的预测精度未受到严重损害,反而有所提高。因此,综合以上结果,本文构建的碳排放预测框架是精确可信的。

图 3 1997—2007 年中国碳排放的中位数水平比较

图 4 1997—2017 年中国碳排放的总体比较

Fig.3 Comparison of median levels of CO₂ emissions from 1997 to 2007

Fig.4 Overall comparison of CO₂ emissions from 1997 to 2017

表 6 针对碳排放预测的误差指标结果

Table 6 The result of the error index for the prediction of CO₂ emissions

检验 Test	MAE	RMSE	MAPE	单位 Unit	样本数 Sample size
样本内检验 In-sample test	0.23	0.25	5.42%	10 亿吨	420
样本外检验 Out-of-sample test	0.26	0.35	2.74%	10 亿吨	210
总体检验 Overall test	0.24	0.29	4.53%	10 亿吨	630

2.3 SSP1—SSP5 情景碳排放预测

本文将 RE 模型的估计系数分别代入不同 SSPs 情景的变量数据库进行估计。每个 SSP 情景数据库均涵盖了 2011 至 2100 年人口和经济数据的预测值。换句话说,对于同一指标而言,不同 SSP 情景的碳排放预测

结果差异从 2011 年开始出现。类似 2.1.2 部分,鉴于 2011 年到 2017 年的碳排放预测结果与实际值存在 2.74% 的不确定性偏差,有必要对每个情景设置基于碳排放估算结果的 2.74% 的误差上限和误差下限。图 5 展示了碳排放的年度结果。5 种 SSP 情景下中国碳排放的长期趋势是接近的,尽管它们处于不同的水平:随着时间的推移,中国的碳排放先上升至峰值点,而后下降。在 SSP3 情景下,中国的碳排放可以在 2029 年达到峰值点,其余情景均会不同程度地推迟峰值目标的实现。中国碳排放达峰最晚的情景为 SSP5,对应的时间为 2039 年。值得一提的是,联合国^[50]发布的预测结果显示中国的人口峰值年为 2027 年;直到 2025 年,能源供给才有可能满足持续增长的人口需求。换句话说,中国的碳排放不太可能于 2025 年之前达峰,本文对中国碳排放的预测和国际主流判断是一致的。

图 5 2010—2100 年中国碳排放状况预测

Fig.5 China's CO₂ emissions forecast from 2010 to 2100

以最晚峰值年为界,本文计算了不同情景下 2011 年至 2039 年的累积碳排放(图 6)。这一时期的累积碳排放存在关系:SSP3(298.07 Gt) < SSP2(307.83 Gt) < SSP4(310.61 Gt) < SSP5(312.04 Gt) < SSP1(314.49 Gt)。这表明,SSP3 情景不仅可以使中国尽早达到碳排放峰值,还可以尽可能地减少碳排放累积量。但是,提前实现碳排放达峰势必会对社会经济造成一定程度的影响。本文使用 2011 年至 2039 年的累积 GDP 表征不同情景下中国在这一时期的财富拥有状况(图 7)。5 种 SSP 情景下的累积 GDP 存在关系:SSP3(3128.33 万亿) < SSP2(3310.20 万亿) < SSP4(3364.01 万亿) < SSP5(3390.07 万亿) < SSP1(3430.29 万亿)。可以看出,不同情景的碳排放累积与 GDP 累积具有明显的对应关系。如果中国提前完成碳排放峰值目标即遵循 SSP3 情景发展,累积碳排放和累积 GDP 将会分别减少 3.17% 至 5.22% 和 5.49% 至 8.80%。

此前,中国未对 2030 年以后的碳排放情景做出约束性承诺。2020 年 9 月,中国政府在七十五届联合国大会一般性辩论上宣布要努力争取在 2060 年前实现碳中和。这项承诺远远超出了《巴黎协定》中的“2℃ 温

控目标”即全球在 2065 至 2070 年左右实现碳中和的要求,对全球气候治理将会起到关键的推动作用。为了分析碳排放达峰与碳中和之间潜在的权衡关系,本文估算了 5 种 SSP 情景下中国未来所要面对的碳中和任务。结果表明,5 种 SSP 情景下 2020 年至 2060 年中国累积碳排放存在关系:SSP3 (409.36 Gt) < SSP4 (443.48 Gt) < SSP2 (445.14 Gt) < SSP1 (461.98 Gt) < SSP5 (467.72 Gt)。鉴于此,SSP3 情景不仅能够使中国碳排放尽早达峰,还可使中国面临相对最小的碳中和任务。

图 6 以 2011 年为基期的中国累积碳排放

Fig.6 China's cumulative CO₂ emissions based on 2011

对于 SSP3 情景,中国的人均碳排在 2027 年达到 7.33 吨的峰值;SSP2 情景和 SSP4 情景均为 2038 年(分别为 7.88 吨和 8.11 吨);SSP1 情景为 2042 年(8.37 吨);SSP5 情景最晚,为 2065 年(8.58 吨)(图 8)。自 2018 年起,SSP3 情景的人均碳排放将始终处于所有情景中的最低水平。以 2060 年为例,SSP3 情景下的人均碳排放将比其他情景低 1.54 吨至 2.65 吨。

图 9 展示了中国碳排放强度的预测结果。5 种 SSP 情景下的碳排放强度发展趋势相近且差距并不悬殊。2021 年及之前,SSP5 情景的年度碳排放强度高于其他 4 种情景;自 2022 年起,SSP3 情景的年度碳排放强度跃升至首位并保持到最后。对于中国而言,SSP5 情景是降低碳排放强度的最佳方案,此情景自 2035 年起始终具有最低的碳排放强度水平。聚焦于关键年份的情况,

图 7 SSP1—SSP5 情景下中国累积 GDP

Fig.7 China's cumulative GDP under SSP1—SSP5 scenarios

图 8 SSP1—SSP5 情景下中国人均碳排放

Fig.8 China's per capita CO₂ emissions under SSP1—SSP5 scenarios

2020 年中国的碳排放强度将会较 2005 年水平下降 40.52% 至 41.39%; 2030 年碳排放强度将会较 2005 年水平下降 59.64% 至 60.75%, 其中, 除 SSP3 情景之外下降幅度均在 60% 以上。这意味着中国有潜力完成碳排放强度下降目标, 但需要进一步加强低碳发展政策的实施。从数值来看, 本文对于碳排放强度的预测结果与 Sun 等^[13]的发现相近; 在他们设立的 A1B2C2 情景中, 中国 2030 年的碳排放强度与 2005 水平相比将会下降 60% 左右。此外, 2052 年起, 5 种 SSP 情景下的碳排放强度均将降低至 0.50 吨/万元以下。

综上, SSP3 情景使中国在 2030 年前达到碳排放峰值的同时实现了更少的排放量; SSP3 情景使个体水平的碳排放在未来很长一段时间内保持在全部情景中的最低水平; SSP3 情景成为降低碳排放强度的最佳方案。当然, SSP3 情景并不完美, 相较于其他情景它会造成 5.49% 至 8.80% 的经济损失。但从环境保护的角度来看, 结合中国碳中和这一长远性目标, SSP3 情景是未来中国碳排放的最佳情景。

3 结论与讨论

为了树立负责任的大国形象、彰显大国责任和担当, 中国向国际社会就碳减排问题做出了一系列承诺。为了评估中国实现承诺的可能性, 本研究基于 STIRPAT 模型提出了一组预测碳排放的全新因子组合: 总人口, 人均 GDP 和受过高等教育的人口。然后, 考虑到共享社会经济路径框架对社会经济发展的假设, 对以上 3 个关键变量进行了预测。最后, 结合模型参数, 开展了中国碳排放的多情景预测及经济代价评估。结果显示, 在 SSP3 情景下, 中国的碳排放峰值将会在 2030 年之前出现且累积碳排放最少, 但要付出累积 GDP 下降

图9 SSP1—SSP5 情景下中国碳排放强度

Fig.9 China's CEI under SSP1—SSP5 scenarios

5.49%至8.80%的代价。此外,为了完成2060年之前实现碳中和的承诺,中国将在未来的40年里面面对409.36 Gt至467.72 Gt的碳中和量。未来,SSP3情景下的人均碳排放将显著低于其他情景。除SSP3情景外,其余4种SSP情景下中国均能在2030年实现碳排放强度下降目标,但SSP3情景更适合于长期性碳排放强度下降计划。综合研究结果和中国当前的经济发展阶段,本文建议遵循SSP3情景的发展路径,以求实现环境效益的最优化。

《巴黎协定》鼓励每个国家根据自身情况在2020年后应对气候变化,这与COVID-19疫情的产生和肆虐相呼应。与疫情有关的碳排放减少可能只是暂时的,例如Andreoni认为随着社会恢复正常的生产节奏和经济的刺激,能源消耗将激增,碳排放将急剧反弹^[51]。近年来,中国的经济增长趋势以及为调整经济结构和能源结构所做的一系列努力表明中国正朝着碳排放提前达峰的目标迈进。值得注意的一点,疫情期间低油价的状况可能会持续数年;随着碳排放能源供应的减少,加之对高科技产业的需求增加以及追求低耗能的生活方式,碳排放社会成本的上升将创造一个使能源系统脱碳的机遇。在后疫情时代,中国政府应抓住机遇,在“十四五”期间继续实施能源利用结构优化和产业结构升级,能效提高目标的设定应比“十三五”规划更为严格。具体而言,依据发展条件的不同,因地制宜地提出不同的碳减排目标,在保证经济与环境协调发展的同时,尽快完成减排目标。加快实现清洁能源结构是中国提前实现碳排放峰值目标的关键步骤,开发和引进太阳能和其他可再生能源,提高能源效率,促进资源的循环利用。同时,有必要加强产业结构调整的方向和速度,例如促进电子商务与零售业的逐步融合,加快运输基础设施的建设步伐。最后,需要积极而坚定地推行隐含碳战略,稳步推进跨国碳交易市场建设,全面提高地区参与碳交易能力,在实现降低碳强度目标的同时优化成本效益。

参考文献 (References):

- [1] Wang C, Zhan J Y, Bai Y P, Chu X, Zhang F. Measuring carbon emission performance of industrial sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China: a stochastic frontier approach. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 786-794.
- [2] Wang Z H, Huang W J, Chen Z F. The peak of CO₂ emissions in China: a new approach using survival models. *Energy Economics*, 2019, 81: 1099-1108.
- [3] Guan D B, Meng J, Reiner D M, Zhang N, Shan Y L, Mi Z F, Shao S, Liu Z, Zhang Q, Davis S J. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 551-555.
- [4] 陈怡, 田川, 曹颖, 刘强, 郑晓奇. 中国电力行业碳排放达峰及减排潜力分析. *气候变化研究进展*, 2020, 16(5): 632-640.
- [5] 平新乔, 郑梦圆, 曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化. *改革*, 2020, (11): 37-52.
- [6] 王鑫. 中国争取 2060 年前实现碳中和. *生态经济*, 2020, 36(12): 9-12.
- [7] 邓光耀, 韩君, 张忠杰. 产业结构升级、国际贸易和能源消费碳排放的动态演进. *软科学*, 2018, 32(4): 35-38, 48-48.
- [8] 刘赢时, 田银华. 我国产业结构调整对能源效率影响的研究——基于收敛性假说的检验. *湖南社会科学*, 2019, (4): 100-107.
- [9] 邹璇, 王盼. 产业结构调整与能源消费结构优化. *软科学*, 2019, 33(5): 11-16.
- [10] 潘苏楠, 李北伟, 聂洪光. 能源约束视角下中国经济可持续发展路径探究. *经济问题探索*, 2020, (2): 158-169.
- [11] Zhang C, Su B, Zhou K L, Yang S L. Decomposition analysis of China's CO₂ emissions (2000-2016) and scenario analysis of its carbon intensity targets in 2020 and 2030. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 432-442.
- [12] Cui L B, Li R J, Song M L, Zhu L. Can China achieve its 2030 energy development targets by fulfilling carbon intensity reduction commitments? *Energy Economics*, 2019, 83: 61-73.
- [13] Sun Z R, Liu Y D, Yu Y N. China's carbon emission peak pre-2030: exploring multi-scenario optimal low-carbon behaviors for China's regions. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 963-979.
- [14] Chen J H. An empirical study on china's energy supply-and-demand model considering carbon emission peak constraints in 2030. *Engineering*, 2017, 3(4): 512-517.
- [15] Mi Z F, Wei Y M, Wang B, Meng J, Liu Z, Shan Y L, Liu J R, Guan D B. Socioeconomic impact assessment of China's CO₂ emissions peak prior to 2030. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2227-2236.
- [16] 王珂珂, 牛东晓, 甄皓, 孙丽洁, 许晓敏. 基于 WOA-ELM 模型的中国碳排放预测研究. *生态经济*, 2020, 36(8): 20-27.
- [17] 付喆, 颜建晔, 孙艳梅, 何静. 基于绿色索罗模型的中国碳排放峰值预测. *华中师范大学学报: 人文社会科学版*, 2019, 58(5): 109-121.
- [18] 渠慎宁, 郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(12): 10-15.
- [19] Xu G Y, Schwarz P, Yang H L. Determining China's CO₂ emissions peak with a dynamic nonlinear artificial neural network approach and scenario analysis. *Energy Policy*, 2019, 128: 752-762.
- [20] Qi Y, Stern N, He J K, Lu J Q, Liu T L, King D, Wu T. The policy-driven peak and reduction of China's carbon emissions. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11: 65-71.
- [21] Böhmelt T. Employing the shared socioeconomic pathways to predict CO₂ emissions. *Environmental Science & Policy*, 2017, 75: 56-64.
- [22] Chakraborty I, Maity P. COVID-19 outbreak: Migration, effects on society, global environment and prevention. *Science of The Total Environment*, 2020, 728: 138882.
- [23] Dang H A H, Trinh T A. Does the COVID-19 lockdown improve global air quality? New cross-national evidence on its unintended consequences. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021, 105: 102401.
- [24] Han P F, Cai Q X, Oda T, Zeng N, Shan Y L, Lin X H, Liu D. Assessing the recent impact of COVID-19 on carbon emissions from China using domestic economic data. *Science of The Total Environment*, 2021, 750: 141688.
- [25] Wang Q, Wang S S. Preventing carbon emission retaliatory rebound post-COVID-19 requires expanding free trade and improving energy efficiency. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141158.
- [26] Shammi M, Bodrud-Doza M, Islam A R M T, Rahman M M. COVID-19 pandemic, socioeconomic crisis and human stress in resource-limited settings: a case from Bangladesh. *Heliyon*, 2020, 6: e04063.
- [27] Alam M M, Murad M W, Noman A H M, Ozturk I. Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: testing environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 466-479.
- [28] Li F F, Xu Z, Ma H. Can China achieve its CO₂ emissions peak by 2030? *Ecological Indicators*, 2018, 84: 337-344.
- [29] Fang K, Tang Y Q, Zhang Q F, Song J N, Wen Q, Sun H P, Ji C Y, Xu A Q. Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces. *Applied Energy*, 2019, 255: 113852.

- [30] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology. *Human Ecology Review*, 1994, 1: 277-300.
- [31] Vélez-Henao J A, Vivanco D F, Hernández-Riveros J A. Technological change and the rebound effect in the STIRPAT model: a critical view. *Energy Policy*, 2019, 129: 1372-1381.
- [32] 王博, 吴天航, 冯淑怡. 地方政府土地出让干预对区域工业碳排放影响的对比分析——以中国 8 大经济区为例. *地理科学进展*, 2020, 39(9): 1436-1446.
- [33] 王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素. *世界地理研究*, 2020, 29(3): 512-522.
- [34] 陶良虎, 胡雪蓓. 湖北省工业行业碳排放驱动因素分解——基于面板数据的实证分析. *生态经济*, 2019, 35(12): 31-37.
- [35] Bernauer T, Böhmelt T. National climate policies in international comparison: the climate change cooperation index. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 196-206.
- [36] O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman D S, van Ruijven B J, van Vuuren D P, Birkmann J, Kok K, Levy M, Solecki W. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169-180.
- [37] 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿. 共享社会经济路径 (SSPs) 的应用与展望. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 215-222.
- [38] 陈婕. 我国技术创新、碳排放与经济增长关联性研究. *统计与决策*, 2019, 35(22): 126-130.
- [39] 王菲, 杨雪, 田阳, 王思鹏. 基于 EKC 假说的碳排放与经济增长关系实证研究. *生态经济*, 2018, 34(10): 19-23.
- [40] Liu Y S, Zhou Y, Wu W X. Assessing the impact of population, income and technology on energy consumption and industrial pollutant emissions in China. *Applied Energy*, 2015, 155: 904-917.
- [41] 徐婷, 李祥云. 经济增长要素投入贡献率及其区域差异检验. *统计与决策*, 2019, 35(1): 155-158.
- [42] 田卫民. 通货膨胀与经济增长关系的实证分析. *统计与决策*, 2019, 35(6): 153-157.
- [43] Fullerton D, Ta C L. Environmental policy on the back of an envelope: a cobb-douglas model is not just a teaching tool. *Energy Economics*, 2019, 84(S1): 104447.
- [44] Leimbach M, Kriegler E, Roming N, Schwanitz J. Future growth patterns of world regions: a GDP scenario approach. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 215-225.
- [45] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. *经济研究*, 2004, (10): 35-44.
- [46] 姜彤, 赵晶, 曹丽格, 王艳君, 苏布达, 景丞, 王润, 高超. 共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 50-58.
- [47] Chen Y D, Guo F, Wang J C, Cai W J, Wang C, Wang K C. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 83.
- [48] Pao H T, Tsai C M. Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil. *Energy*, 2011, 36(5): 2450-2458.
- [49] Ke S, Lutz W. The human core of the shared socioeconomic pathways: population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 181-192.
- [50] Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. *World Population Prospects: the 2010 Revision*. New York: United Nations, 2011.
- [51] Andreoni V. Estimating the European CO₂ emissions change due to COVID-19 restrictions. *Science of The Total Environment*, 2021, 769: 145115.