

共享社会经济路径下中国碳中和路径预测

刘泽森¹, 黄贤金^{1,2}, 卢学鹤³, 李升峰¹, 漆信贤¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 自然资源部碳中和与国土空间优化重点实验室, 南京 210023; 3. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 苏州 215101)

摘要: 科学地预测和分析不同情景下中国碳中和路径有助于碳中和目标的合理推进, 但当前研究仍缺少结合碳源—汇变化趋势的综合性分析与应用国际耦合模式情景的系统性分析。本文运用 WITCH 综合评估模型与 IBIS 植被动态模型模拟了各共享社会经济路径情景下 21 世纪中国碳源—汇路径, 对中国碳中和时间及路径进行预测分析。研究发现: ① 中国碳汇逐年值存在 3~4 a 的周期性波动。RCP6.0 气候情景下中国碳汇总量均值稳定在约 0.30 Gt C/a; RCP2.6 气候情景下中国碳汇总量均值呈下降趋势, 到 2065—2100 年下降至约 0.18 Gt C/a。② 中国碳排放总量受到世界经济社会发展路径与政策强度的共同影响, 在中高强度减排政策下中国碳排放均在 2025—2030 年达峰后呈下降趋势, 其中 SSP1/SSP4—高强度碳减排政策情景下碳排放将在 2060 年降至约 0.30 Gt C/a 并实现碳中和目标。③ 基于典型碳中和情景的路径研究, 实现碳中和目标应积极促进清洁能源技术进步与应用, 推进非电力能源向电力能源转变, 推广生物质能源及 CCS 技术, 并积极倡导电动汽车的发展。

关键词: 共享社会经济路径; 碳中和; 碳汇; 碳排放; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202209004

1 引言

气候变化是当今人类面临的重大挑战, 人类活动所引起的温室气体增加是毫无疑问的, 并使得全球地表温度上升了约 1.0~2.0 °C^[1]。为了应对气候变化, 2015 年 12 月的《巴黎协定》明确了 21 世纪末将全球升温控制在不超过工业化前 2 °C 的目标, 并将 1.5 °C 温控目标确立为应对气候变化的长期努力方向。作为负责任的大国, 中国长期积极参与和引领全球气候变化治理, 将温室气体减排任务纳入五年规划与 2035 年远景目标, 提前和超额完成了 2020 年气候行动目标^①。为了更好地应对气候变化、为全球碳减排做出更大贡献, 中国在第七十五届联合国大会一般性辩论及气候雄心峰会上承诺在 2060 年前实现碳中和。科学地预测和分析不同气候变化、国际经济环境与科技进步情景下碳源碳汇的时空变化及碳中和路径, 是制定符合中国自身特点的碳源—汇调控目标、合理推进碳中和进程的关键。

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(71921003) [Foundation: Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.71921003]

作者简介: 刘泽森(1997-), 男, 山东青岛人, 博士生, 主要从事碳排放效应模拟研究。

E-mail: dz1927005@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 黄贤金(1968-), 男, 江苏扬中人, 博士, 教授, 研究方向为土地利用与规划、土地经济与政策、资源环境经济学等。E-mail: hxj369@nju.edu.cn

① 生态环境部. 生态环境部举办积极应对气候变化政策吹风会. (2021-09-14). http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/28/content_5547836.htm.

国家层面的碳中和行动^[2]推动了学术界对碳中和的研究,其研究方向涵盖了碳中和的概念^[3]、政策^[4-7]、产业转型需求^[8-12]、工程设计^[13-14]和碳中和技术^[8, 15-16]等方面。从研究情景预设来看,国际上当前普遍采用第六阶段耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)所提出的共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)进行碳排放和碳中和情景研究^[17],其研究覆盖面广且内容丰富,涉及能源—土地利用—碳排放的全球宏观测算^[18-19]、不同情景下的气候影响与适应^[20-21]、情景改进^[22]和在社会经济方面的其他扩展^[23-24]等方面。国内当前研究多仍基于CMIP5所提出的代表性浓度途径(Representative Concentration Pathway, RCP)情景开展研究,部分学者分析了特定的共享社会经济路径情景^[25]或自定义的政策经济情景^[26-27]下的中国碳中和路径,但缺少对所有共享社会经济路径情景下中国碳中和路径的系统性分析。从研究方法来看,国际上针对碳中和所包含的碳排放及碳汇路径研究均构建了较多成熟的模型,针对世界碳排放路径模拟所建立的综合评估模型包括AIM、GCAM、IMAGE、MESSAGE、REMIND和WITCH等^[19]。国内研究除使用上述模型外,也使用针对中国地区建立的碳排放综合模型^[27]或简化模型^[28]对中国碳排放及碳中和路径进行分析。但当前对中国碳中和路径的研究普遍停留在碳排放预测分析,缺少结合中国碳汇预测数据的综合性预测分析。

本文基于共享社会经济路径下的人口及经济预测数据、代表性浓度途径下的气象数据等基础数据,使用集成生物圈模拟器(Integrated Biosphere Simulator, IBIS)模型模拟了不同代表性浓度路径下的中国碳汇时序变化,使用WITCH(World Induced Technical Change Hybrid)模型模拟了不同共享社会经济路径与政策情景下的中国碳排放路径,藉此预测中国不同情景下碳中和路径,分析不同情景下碳排放路径与碳中和时间表。相较已有中国碳中和路径研究,本文运用更加全面的共享社会经济路径与政策情景,并综合碳汇变化趋势综合分析中国碳中和发展路径。期冀研究结果对中国及各产业经济投资、能源转型和碳减排目标的政策制定提供一定的参考。

2 研究方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 共享社会经济模型 共享社会经济模型描述了21世纪世界和世界大区域层面社会和自然系统演变的可能替代趋势。其将国际经济社会发展简化为缓解气候变化的挑战与适应气候变化的挑战两个维度,前者指将使任何特定气候目标和气候缓解政策变得更容易或更难的挑战,主要包括人口增长率、经济增长、土地使用、能源结构等;后者指暴露于气候变化所引起风险的人群的敏感性,主要包括适应技术选择的可用性、相关机构的有效性以及人类和财政资源等。根据两种挑战的高低将未来世界划分为5种不同的情景(表1)。共享社会经济模型仅作为综合情景描述的起点,国家的社会经济政策仍会对情景产生影响。

2.1.2 基于生态过程模型的碳汇模拟方法 净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)为正值时,表示生态系统为碳汇,反之则为碳源。模型模拟方法能够在在大尺度上逐像元估算NEP,针对世界碳汇模拟所建立的动态植被模型包括HYBRID、IBIS、LPJ、SDGVM、TRIFFID和VECODE等^[29]。

本文选取集成生物圈模拟器IBIS对中国NEP进行预测分析,该模型是由美国威斯康

表1 SSP各情景总体说明
Tab.1 General description of SSP scenarios

情景名称	适应挑战难度	缓解挑战难度	SSPs情景下中国发展路径
SSP1	低	低	迅速的技术变革、经济全球化促进了经济发展与低碳能源技术发展，具有能源强度低、环保意识强与可再生能源大规模应用的特点。
SSP2	中	中	遵循当前经济社会与技术发展趋势路径，内外部条件均偏向折中。
SSP3	高	高	缓慢的技术进步、经济逆全球化阻碍了经济发展与低碳能源技术发展，具有能源强度高、传统能源淘汰速度慢的特点。
SSP4	高	低	较快的技术变革与经济逆全球化使经济发展速度中等，低碳能源技术发展与应用仍然较快但不及SSP1情景。
SSP5	低	高	在经济全球化与人力资本高投资的驱动下经济快速发展，但低碳能源发展速度缓慢，具有能源强度高、传统能源持续大规模应用的特点。

星大学全球环境与可持续发展中心的Foley等于1996年开发的综合的陆地生物圈模型，属于新一代动态植被模型^[30-31]。

2.1.3 基于综合评估模型的碳排放模拟方法 碳排放综合评估需要综合考虑气候系统、能源系统和经济系统之间的关系，使用系统建模的方法对全球气候变化、能源产出消费、经济生产之间的相互作用进行分析。因此需要使用综合评估模型，即使用基于建模系统物理特性而进行输入条件假设的计算模型，对碳排放路径进行模拟与分析。

由于CMIP6针对世界碳排放路径模拟所建立的综合评估模型^[19]中仅WITCH与AIM模型将中国作为单独的一个区域进行研究，本文采用开源的WITCH模型对不同情景下的碳排放进行综合评估，该模型由欧洲经济与环境研究所（European Institute on Economics and the Environment, EIEE）维护和开发，是一种自上而下的混合经济模型，并包含中等复杂度的能源部门^[32]。

2.2 数据来源

碳排放计算中所使用的中国碳排放数据获取自中国碳核算数据库（Carbon Emission Accounts & Datasets, CEADs）^[33]。中国共享社会经济路径下的人口经济数据获取自南京信息工程大学灾害风险管理研究院发布的数据集^[34-35]，该数据集考虑了中国生育政策变化所带来的影响，相较国际应用系统分析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA）的预测结果，中国具有更高的人口出生率及相应更高的经济总量。

碳汇计算中所使用的植被类型数据、土壤数据、地形数据分别获取自中国1:400万植被数据^[36]、中国1:100万数字化土壤数据^[37]与SRTM version3.0的DEM数据。未来不同代表性浓度途径下的气象数据获取自CMIP5发布的BNU-ESM气候预测数据集^[38]。

3 结果分析

3.1 基于生态过程模型的碳汇模拟

本文以经过站点验证的基于IBIS模型的全球1970—2009年植被生态过程模拟为模型参数基础^[39-40]，利用现状气象数据模拟2000—2015年中国NEP数据进行验证（受数据限制2016—2100年使用预测数据集），并分别基于RCP2.6（代表全球能够有效减缓气候变化）与RCP6.0（代表全球气候变化按原有路径发展）下的气候预测数据，模拟了2016—2100年中国NEP数据，以表征生态系统的碳汇能力。

由于中国实测的NEP数据站点较少，有关IBIS模拟结果的验证采用中国部分通量站

点年 GPP 数据进行验证^[41]。将用于验证的 2003—2005 年站点通量数据叠加到 IBIS 模型对应年份的 GPP 图层上进行对比分析,发现除禹城站农田生态系统的实测值与模拟值相差较大外,其他 9 个站点模拟结果较好 ($R^2 = 0.70$)。

尽管本文的预测结果与部分学者所模拟的中国地区 NEP 结果接近^[42-43],但低于部分植被生态过程模拟^[44]与大气反演^[45]所预测的 NEP 结果,对碳汇的低估可能使得碳汇在碳中和中的贡献占比进一步下降并推后所预测的碳中和年份。

为减少由于气象条件波动引起的模拟结果波动,分别采用逐年值和 10 年滑动平均值显示 2000—2100 年生态系统碳汇量(即 NEP)的变化情况(图 1)。在两种情景下,中国生态系统碳汇总量逐年值均呈现出以 3~4 a 为周期的波动周期,这与相关学者对中国碳汇的研究结果一致^[46],实际是受到气候(尤其是降水)的年际波动小周期的影响^[47];10 a 滑动平均值则呈现大体 20~25 a 的变化周期。

在 RCP2.6 情景下,由于土壤呼吸碳源的影响,中国碳汇总量整体呈下降趋势。2035 年前,中国碳汇总量均值约 0.3 Gt C/a,除 2026 年碳汇为负值外,波动范围为 0.2~0.4 Gt C/a;2035—2065 年碳汇总量波动幅度加大至 -0.1~0.6 Gt C/a,均值下降至约 0.23 Gt C/a;2065 后碳汇总值波动幅度收窄至 0~0.4 Gt C/a,均值进一步下降至约 0.18 Gt C/a。

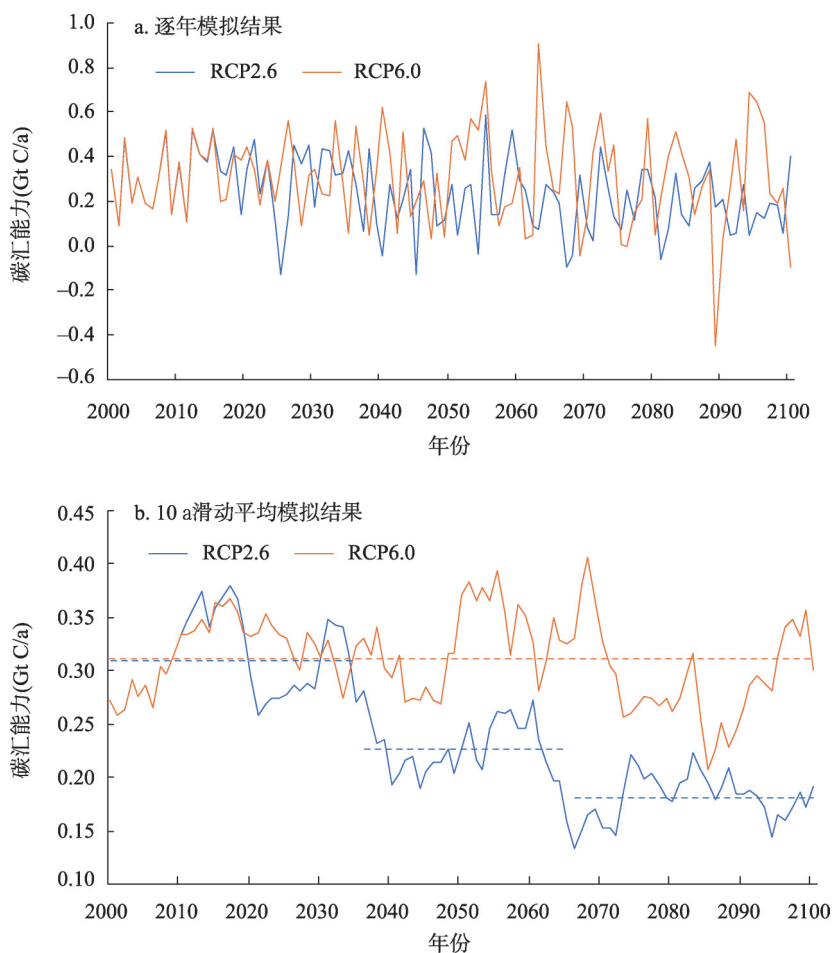


图 1 2000—2100 年中国碳汇能力模拟结果

Fig. 1 Simulation results of China's carbon sink capacity from 2000 to 2100

在RCP6.0情景下，中国碳汇总量未呈现出显著的变化趋势，碳汇总量均值约为0.31 Gt C/a。随气候变化的加剧，碳汇的波动幅度也逐渐加大，2030年前波动幅度为0.1~0.5 Gt C/a，后在2030—2055年波动幅度为0~0.6 Gt C/a，2055年后在极端年份也出现碳汇总量低于-0.4 Gt C/a或高于0.9 Gt C/a的情况。

3.2 基于综合评估模型的碳排放模拟

本文以Riahi等^[19]和Bauer等^[48]的各SSPs下能源与技术参数为基础，以考虑人口政策变化的中国人口经济增长预测作为修正，使用WITCH模型模拟了2005—2100年中国碳排放。

WITCH模型中使用碳税对国家或地区的碳减排政策强度进行量化替代，认为在碳减排政策会通过提高单位碳排放成本的方式促进能源效率提高和能源转型。本文中除基础情景外，分别设置了中、高两种碳减排政策强度对应SSP2下的RCP3.4与RCP2.6碳排放总辐射强迫，其他SSP下相同碳减排政策强度的总辐射强迫如表2所示。

基于共享社会经济路径及所设定的碳减排政策强度情景对中国社会经济及能源进行模拟，并使用人均消费量表征不同情景对社会福利的影响（图2）。外部经济环境较好的SSP1和SSP5情景具有较高的人均消费量增长，SSP3受到经济逆全球化与技术进步缓慢的影响人均消费量最低。不同共享社会经济路径下碳减排政策对社会福利的影响存在差异性，在高碳减排政策下，受到低清洁能源技术与低人均社会福利影响SSP3情景2060年社会福利损失达13.5%，清洁能源技术发展速度最快的SSP1情景2060年社会福利损失仅为约6.6%，其他情景2060年社会福利损失约为8.5%~9%。

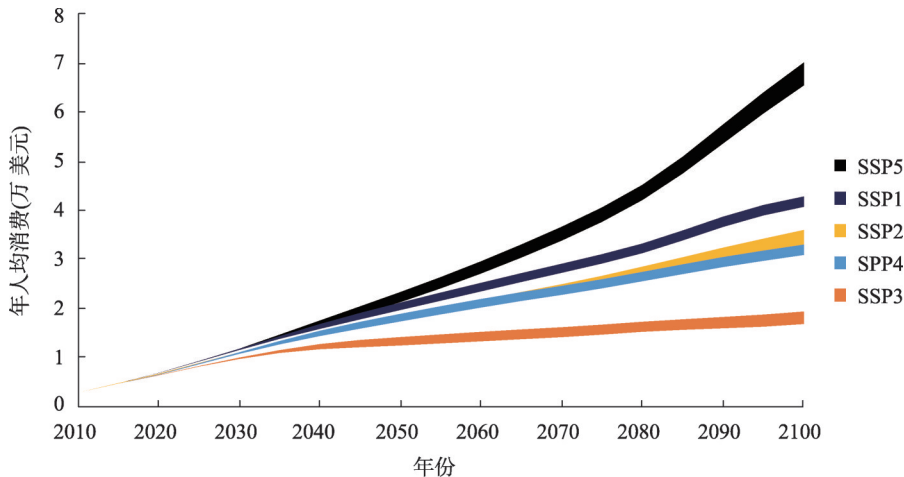
使用标准碳（包括二氧化碳与甲烷）表征不同情景下中国碳排放强度及主要碳减排措施贡献（图3）。在基线情景下，除清洁能源技术进步较快

表2 不同情景下总辐射强迫

Tab. 2 Total radiation forcing under different scenarios

碳减排政策强度	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
无	约4.5	4.5~6.0	4.5~6.0	约4.5	约6.0
中	2.6~3.4	3.4	2.6~3.4	2.6~3.4	3.4~4.5
高	1.9~2.6	2.6	1.9~2.6	1.9~2.6	2.6~3.4

注：假定全世界各国或地区采用相同强度的碳减排政策，若仅中国采取碳减排政策，则高强度碳减排政策下辐射强迫较基线仅下降约5%~10%。



注：单位采用2005年美元不变价。

图2 2010—2100年中国不同共享社会经济路径下的年人均消费

Fig. 2 China's annual per capita consumption from 2000 to 2100 under different shared social economic paths

的 SSP1 和 SSP4 情景下中国碳排放将在 2025 年前后达峰外, SSP2 情景中国碳排放将在 2025—2030 年达峰后持平, SSP3 和 SSP5 情景中国碳排放呈长期增长趋势, 在 2060 年最高达约 3.9 Gt C/a (SSP3 情景), 至 21 世纪末最高达约 5 Gt C/a (SSP3 情景)。

在中等碳减排政策情景下, 各社会经济情景下中国均将于 2025—2030 年实现碳达峰, 并通过碳捕获与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 措施的逐渐应用、能源结构改善和能源强度的下降使中国碳排放持续下降。其中 SSP1 与 SSP4 情景下中国 2060 年碳排放将削减至约 0.60 Gt C/a, 至 21 世纪末接近实现碳的零排放; 其他情景下中国 2060 年碳排放将削减至约 1.0 Gt C/a, 至 21 世纪末缓慢下降至约 0.48~0.69 Gt C/a。

高强度碳减排政策情景下, 能源强度的下降、能源结构的改善与 2035 年前后开始较大规模应用的 CCS 措施使中国碳排放将在 2025—2030 年达峰后迅速下降。其中 SSP1 和 SSP4 情景下, 中国于 2060 年即可达到约 0.30 Gt C/a 的碳排放, 并依靠生物质能碳捕集与封存 (BECCS) 技术^[49-50]在 2090 年后实现碳的零排放与负排放。其他社会经济情景下中国碳排放下降速度则较慢, 在 2060 年普遍仅下降至约 0.54~0.80 Gt C/a, 在 21 世纪末下降至约 0.30 Gt C/a。

综合以上情景, 仅 SSP1 和 SSP4 情景在高强度碳减排政策下能够于 2060 年达到约 0.30 Gt C/a 的碳排放强度, 经济全球化所带来的技术传播与进步使人均社会福利与总社会福利更高的 SSP1 情景具有更快的碳减排速度。

3.3 基于碳源碳汇的碳中和分析

基于对不同 RCP 情景下中国碳汇总量与不同 SSP 及政策情景下的碳排放的预测分析, 对中国不同情景下碳排放—碳汇路径进行表征 (图 4)。

在基线情景 (即无减排政策) 下, 中国在 21 世纪将难以实现碳中和目标。实施中高强度碳减排政策时, 在 SSP1 或 SSP4 情景下, 中国将在 2075 (RCP6.0 气候路径下)—2085 年 (RCP2.6 气候路径下) 实现碳中和目标; 而在 SSP2、SSP3 和 SSP5 情景下中国将难以实现碳中和目标。

实施高强度碳减排政策时, 中国碳中和目标实现年份受到所处气候路径的影响较大: RCP2.6 气候路径下, SSP1 和 SSP4 情景中国将在 2060 年近似实现碳中和目标 (碳汇使用滑动 10 a 均值情况下, 净碳排放量为 0.02~0.03 Gt C/a; 碳汇使用逐年值情况下, 已实现碳中和目标), 其他 SSP 情景中国将难以实现碳中和目标; RCP6.0 气候路径下, SSP1 和 SSP4 情景中国将在 2055 年实现碳中和目标, SSP2、SSP3 和 SSP5 情景中国将分别在 2095 年、2080 年、2100 年实现碳中和目标。

基于对不同情景下碳排放—碳汇变化路径的分析, 选取能够实现 2060 年碳中和目标的 SSP1~SSP4 的高强度碳减排政策作为典型碳中和情景, 通过分析情景下分行业能源使用表征其碳中和路径 (图 5)。

在清洁能源技术发展速度快且碳减排政策强度高的情景下, 总能源使用在 2025 前后达到约 25.6×10^{12} ~ 27.8×10^{12} kWh/a 后随能源使用效率的提高总体呈缓慢下降状态, 至 2060 年总能源使用量较峰值下降约 5%。分行业来看, 2030 年后非电力能源使用^②逐渐被电力能源使用所替代, 至 2060 年非电力能源使用较峰值下降约 20%, 交通运输业能源使用^③在 2035 年左右达峰后呈缓慢下降趋势。分情景来看, SSP4 情景能源使用量略高于 SSP1 情景, 但总体变化趋势二者较为相似, 以下采取 SSP4 情景对分行业能源使用进行分析。

② 不含交通运输业能源使用。

③ 电动车辆能源使用在表征交通运输业能源使用时被包含, 实际碳排放计算中仅计入电力能源使用。

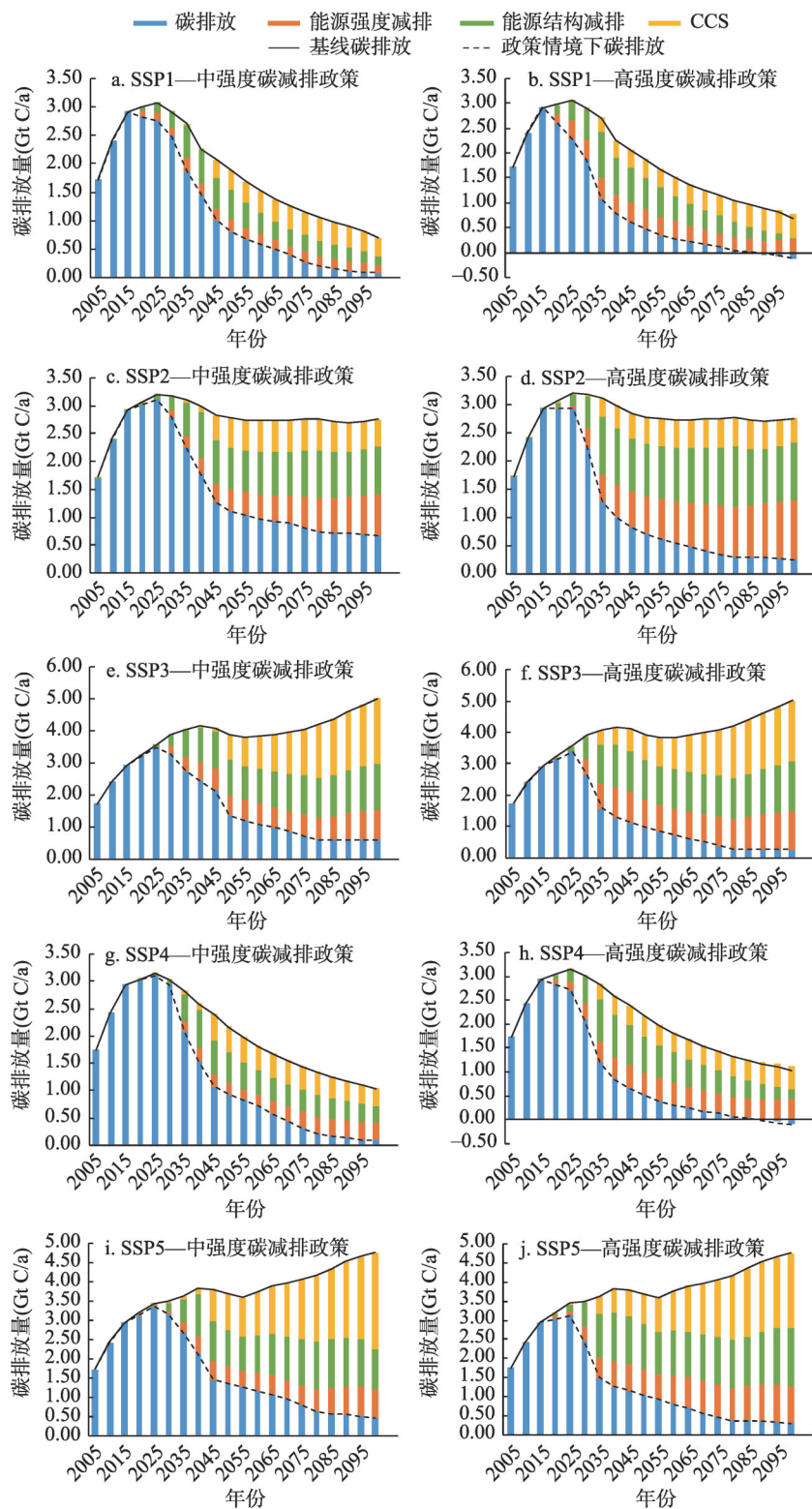


图3 不同情景下中国碳排放及碳减排贡献

Fig. 3 China's carbon emission and contribution to carbon emission reduction under different scenarios

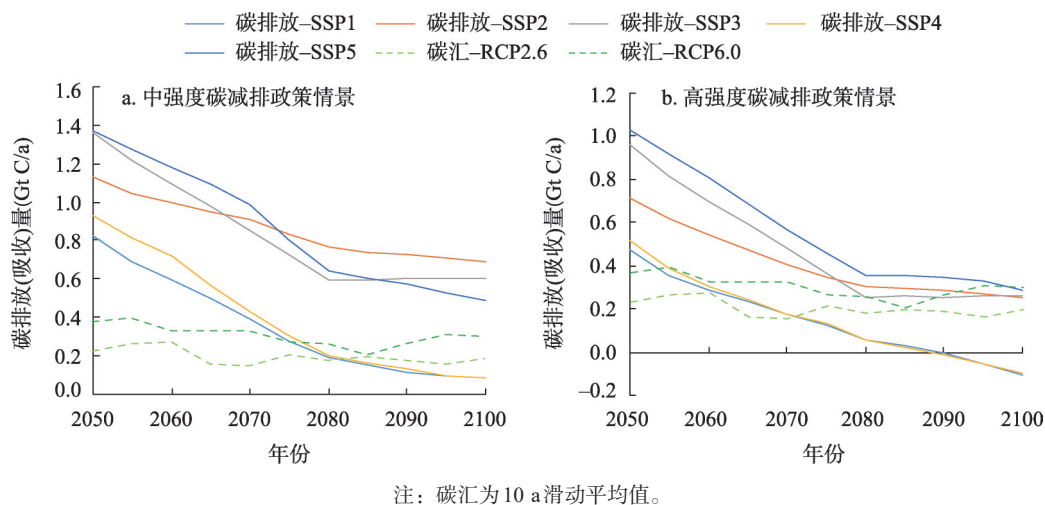


图4 不同情景下碳排放—碳汇变化路径

Fig. 4 Carbon emission-sink change paths under different scenarios

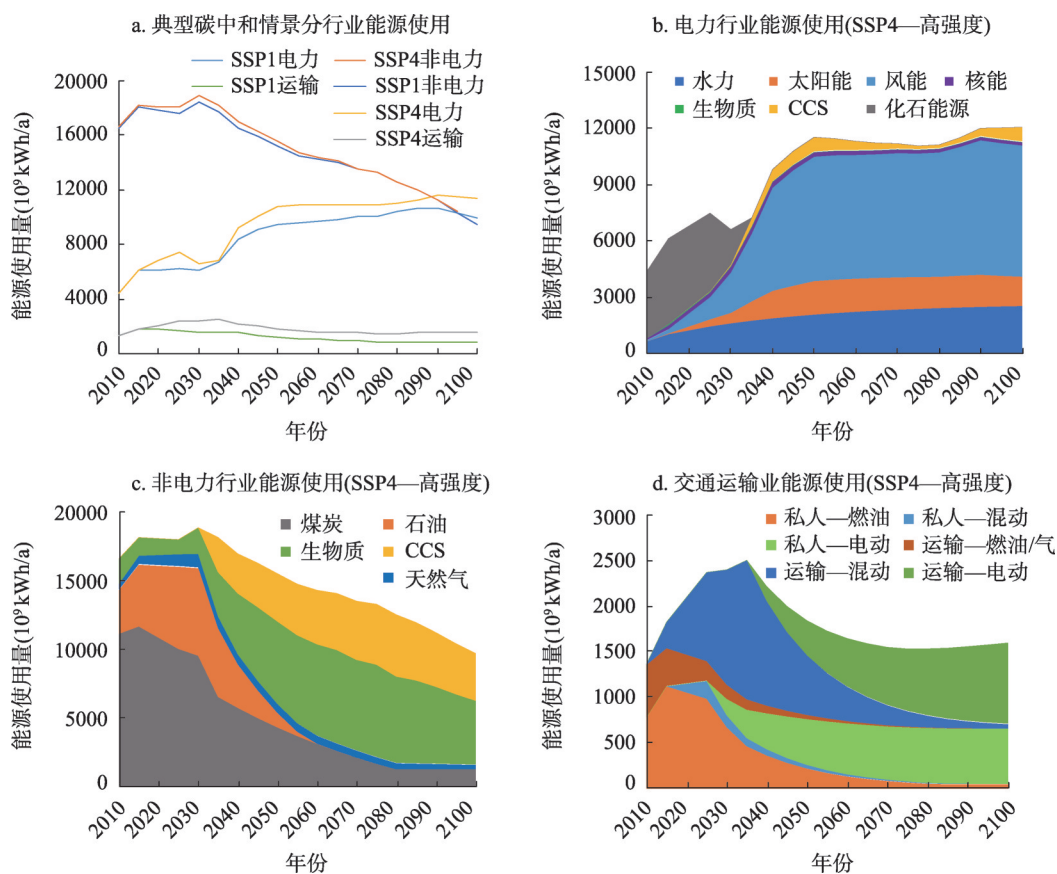


图5 典型碳中和情景下分行业能源使用量

Fig. 5 Energy use by industry under typical carbon neutralization scenarios

电力行业能源使用中, 2025年后清洁能源迅速替代化石能源使用, 至2060年清洁能源发电量占总发电量的约95%。太阳能与水力发电受土地潜力限制^[51]与开发成本^[52]影响在2045年分别达到约 1.6×10^{12} kWh/a与 2.0×10^{12} kWh/a后增长缓慢。风力发电逐步成为中国最主要的发电方式, 这与相关电力能源发展研究预测相一致^[53-54], 本文模拟预测风力发电量在2060年达 6.5×10^{12} kWh/a, 占总发电量的约60%。化石能源与生物质能源发电在2030年后逐步被对应的CCS技术所取代以减少其碳排放。

非电力行业能源使用中, 2030年后化石能源快速应用CCS技术或转型为生物质能源, 至2060年不使用CCS技术的化石能源仅占总能源使用的约25%。生物质能源中, 传统生物质能源在2025年前后被其他化石能源完全替代, 现代生物质能源在2025年后快速发展并逐步替代石油的燃料作用, 在2060年占非电力能源消费的约45%。CCS技术主要应用于传统煤炭供能领域, 至2060年约 3.9×10^{12} kWh/a的煤炭供能使用CCS技术并吸收了约0.4 Gt C/a的碳排放。

交通运输业能源使用中, 总体呈现出燃油—混合动力—纯电动的三阶段逐步过渡趋势。私人纯电动车辆在2025年后快速增长并逐步替代燃油与混动车辆, 至2060年其能源使用占私人车辆的约72%。运输车辆在高碳税的驱动下则首先由燃油转向混合动力能源, 预计在相关技术突破后逐步转向纯电动能源车辆运输。

4 结论与对策建议

本文结果主要包括以下3个方面: ① 基于1970—2009年世界植被系统模拟结果、2000—2015年中国植被系统通量验证结果和气候分情景预测数据, 运用IBIS植被动态模型模拟了2000—2100年中国生态系统碳汇量; ② 基于中国碳排放历史数据和人口经济分情景预测数据, 运用WITCH综合评估模型模拟了2005—2100年中国不同情景下的碳排放量; ③ 基于模拟的碳汇与碳排放量, 分析了中国不同情景下的碳中和时间及4个典型情景下各省的碳中和时间。主要得出如下结论:

(1) 2000—2100年中国碳汇总量在一定区间范围内波动。主要表现在: ① 碳汇逐年值受气候小周期影响呈现出以3~4 a为周期的波动周期, 10 a滑动平均值则呈现大体20~25 a的变化周期。② RCP6.0气候情景下中国碳汇总量均值稳定在约0.30 Gt C/a, 但碳汇波动幅度随时序逐渐增大; 在RCP2.6气候情景下中国碳汇总量均值呈下降趋势, 其中2065—2100年碳汇总量均值下降至约0.18 Gt C/a。

(2) 2005—2100年中国碳排放总量受到世界经济社会发展路径与政策强度的共同影响。在中强度和高强度减排政策下, 中国碳排放在各情景下均在达峰后呈下降趋势, 2040年前主要碳减排动力为能源结构的优化, 2040年后则能源强度降低和CCS措施应用对碳减排的贡献逐渐提高。

(3) 中国碳中和时间表受到经济、政策、气候情景的共同影响。在SSP1和SSP4情景下, 中国通过实施高强度碳减排政策有望于2055 (RCP6.0气候情景)—2060年 (RCP2.6气候情景) 实现碳中和目标。

(4) 多种对策共同推进有助于确保中国在2060年前实现碳中和。要确保中国在2060年前实现碳中和, 应在保持经济社会高质量发展的状态下积极采取市场、行政、法律等多种对策和手段, 促进清洁能源技术的进步与应用, 从而达到SSP1或SSP4的预设技术目标。同时需要采取强有力的政策措施, 积极推进非电力能源向电力能源转变, 大力发

展风电和光伏产业,合理推进生物质能源及化石能源 CCS 技术的大规模应用,并积极倡导电动汽车的发展。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, in press.
- [2] Deng Mingjun, Luo Wenbing, Yin Lijuan. A systematic review of international theory, research and practice on carbon neutrality. *Resources Science*, 2013, 35(5): 1084-1094. [邓明君, 罗文兵, 尹立娟. 国外碳中和理论与实践发展述评. *资源科学*, 2013, 35(5): 1084-1094.]
- [3] Deng Xu, Xie Jun, Teng Fei. What is carbon neutrality? *Climate Change Research*, 2021, 17(1): 107-113. [邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.]
- [4] Davidson M, Karplus V J, Zhang D, et al. Policies and institutions to support carbon neutrality in China by 2060. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2021, 10(2): 7-24.
- [5] Wang C, Shi Y, Zhang L, et al. The policy effects and influence mechanism of China's carbon emissions trading scheme. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, 14(12): 2101-2114.
- [6] Wang Can, Zhang Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 58-64. [王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 58-64.]
- [7] Tang Lanping, Ke Xinli, Zheng Weiwei. Scenario analysis on the impacts of cropland balance of occupation and compensation on carbon storage. *Journal of Land Economics*, 2020(2): 76-93. [唐兰萍, 柯新利, 郑伟伟. 耕地占补平衡对碳储量影响的情景分析. *土地经济研究*, 2020(2): 76-93.]
- [8] Li Y N, Lan S, Ryberg M, et al. A quantitative roadmap for China towards carbon neutrality in 2060 using methanol and ammonia as energy carriers. *iScience*, 2021, 24(6): 102513. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102513.
- [9] Zhang Zhenye, Hu Shanying, Jin Yong. China achieving carbon neutral in 2060, fossil energy to fossil resource era. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(6): 1-5. [张臻烨, 胡山鹰, 金涌. 2060 中国碳中和: 化石能源转向化石资源时代. *现代化工*, 2021, 41(6): 1-5.]
- [10] Zhang R S, Hanaoka T. Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060: Provincial disparities in energy systems, CO₂ emissions, and cost effectiveness. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 170: 105622. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105622.
- [11] Sun Xudong, Zhang Leixin, Zhang Bo. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality. *China Mining Magazine*, 2021, 30(2): 1-6. [孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究. *中国矿业*, 2021, 30(2): 1-6.]
- [12] Cheng Ziteng, Shen Yue. Low-carbon economy research under the new urbanization: Taking liuzhou as an example. *Journal of Land Economics*, 2014(2): 141-150. [程子腾, 沈悦. 新型城镇化下柳州市低碳发展研究. *土地经济研究*, 2014(2): 141-150.]
- [13] Weng Y W, Cai W J, Wang C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060. *Applied Energy*, 2021, 299: 117263. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117263.
- [14] Hao Xiaodi, Wei Jing, Cao Yali. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(24): 1-6. [郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例: Sheboygan 污水处理厂. *中国给水排水*, 2014, 30(24): 1-6.]
- [15] Wang Can, Cong Jianhui, Wang Ke, et al. Research on China's technology lists for addressing climate change. *China Population Resources and Environment*, 2021, 31(3): 1-12. [王灿, 丛建辉, 王克, 等. 中国应对气候变化技术清单研究. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(3): 1-12.]
- [16] Zhang Xian. The application prospect of CCUS in China under the target of carbon neutrality. *China Sustainability Tribune*, 2020(12): 22-24. [张贤. 碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景. *可持续发展经济导刊*, 2020(12): 22-24.]
- [17] O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, et al. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 2014, 122(3): 387-400.
- [18] O'Neill B C, Carter T R, Ebi K, et al. Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1074-1084.
- [19] Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and

- greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 2017, 42: 153-168.
- [20] Graham N T, Davies E G R, Hejazi M I, et al. Water sector assumptions for the shared socioeconomic pathways in an integrated modeling framework. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6423-6440.
- [21] Chowdhury S, Dey S, Smith K R. Ambient PM_{2.5} exposure and expected premature mortality to 2100 in India under climate change scenarios. *Nature Communications*, 2018, 9: 318. DOI: 10.1038/s41467-017-02755-y.
- [22] Rosa I M D, Purvis A, Alkemade R, et al. Challenges in producing policy-relevant global scenarios of biodiversity and ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00886. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00886.
- [23] Terama E, Clarke E, Rounsevell M D A, et al. Modelling population structure in the context of urban land use change in Europe. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(3): 667-677.
- [24] Hallegatte S, Rozenberg J. Climate change through a poverty lens. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 250-256.
- [25] Cai Bofeng, Cao Libin, Lei Yu, et al. China's carbon emission pathway under the carbon neutrality target. *China Population Resources and Environment*, 2021, 31(1): 7-14. [蔡博峰, 曹丽斌, 雷宇, 等. 中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(1): 7-14.]
- [26] Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*, 2021, 8(12). DOI: 10.1093/nsr/nwab078.
- [27] Yu Binying, Zhao Guangpu, An Runying, et al. Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(2): 17-24. [余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(2): 17-24.]
- [28] Zhang Fan, Xu Ning, Wu Feng. Research on China's CO₂ missions programs from 2020 to 2100 under the Shared Socioeconomics Pathways. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9691-9704. [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.]
- [29] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 357-373.
- [30] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [31] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [32] Bosetti V, Carraro C, Galeotti M, et al. WITCH: A world induced technical change hybrid model. *Energy Journal*, 2006 (Special Issue 2): 13-37.
- [33] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016-2017. *Scientific Data*, 2020, 7: 54. DOI: 10.1038/s41597-020-0393-y.
- [34] Jing C, Tao H, Jiang T, et al. Population, urbanization and economic scenarios over the Belt and Road region under the Shared Socioeconomic Pathways. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(1): 68-84.
- [35] Huang J L, Qin D H, Jiang T, et al. Effect of fertility policy changes on the population structure and economy of China: From the perspective of the shared socioeconomic pathways. *Earth's Future*, 2019, 7(3): 250-265.
- [36] Hou Xueyu. China 1:4 Million Vegetation Map. Beijing: China Map Publishing House, 1979. [侯学煜. 中国1:400万植被图. 北京: 地图出版社, 1979.]
- [37] Liu Julan. 1:1 Million Soil Map of the People's Republic of China. Beijing: China Publishing Yearbook, 1995. [刘菊兰. 中华人民共和国1:100万土壤图. 北京: 中国出版年鉴社, 1995.]
- [38] Ji D, Wang L, Feng J, et al. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(5): 2039-2064.
- [39] Lu Xuehe. IBIS model simulation of the impact of nitrogen deposition on the carbon budget of global terrestrial ecosystems [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. [卢学鹤. 氮沉降对全球陆地生态系统碳收支影响的IBIS模型模拟[D]. 南京: 南京大学, 2014.]
- [40] Huang Xianjin, Zhang Xiuying, Lu Xuehe, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 2995-3006. [黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [41] Yu Guirui, Fu Yuling, Sun Xiaomin, et al. Research progress and development ideas of the China Terrestrial Ecosystem Flux Observation and Research Network (ChinaFLUX). *Science China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(Suppl.1): 1-21. [于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路. 中

- 国科学D辑: 地球科学, 2006, 36(Suppl.1): 1-21.]
- [42] Jiang F, Chen J M, Zhou L, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22130. DOI: 10.1038/srep22130.
- [43] Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijkx I T, et al. Net terrestrial CO₂ exchange over China during 2001-2010 estimated with an ensemble data assimilation system for atmospheric CO₂. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2014, 119(6): 3500-3515.
- [44] Wang T, Lin X, Peng S, et al. Multimodel projections and uncertainties of net ecosystem production in China over the twenty-first century. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(34): 4681-4691.
- [45] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 588(7837): 720-723.
- [46] Yu L, Gu F X, Huang M, et al. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on net primary productivity and carbon balance in China's terrestrial ecosystems. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2849. DOI: 10.3390/su12072849.
- [47] Yang Yanzheng, Ma Yuandan, Jiang Hong, et al. Evaluating the carbon budget pattern of Chinese terrestrial ecosystem from 1960 to 2006 using Integrated Biosphere Simulator. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3911-3922. [杨延征, 马元丹, 江洪, 等. 基于IBIS模型的1960—2006年中国陆地生态系统碳收支格局研究. *生态学报*, 2016, 36(13): 3911-3922.]
- [48] Bauer N, Calvin K, Emmerling J, et al. Shared socio-economic pathways of the energy sector: Quantifying the narratives. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 2017, 42: 316-330.
- [49] Fan Jingli, Li Jia, Yan Shuiping, et al. Application potential analysis for bioenergy carbon capture and storage technology in China. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(1): 7-17. [樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析. *热力发电*, 2021, 50(1): 7-17.]
- [50] Gao Hua. Research on global CCS technology status and application prospect. *Coal Economic Research*, 2020, 40(5): 33-38. [高华. 全球碳捕集与封存(CCS)技术现状及应用前景. *煤炭经济研究*, 2020, 40(5): 33-38.]
- [51] Pietzcker R C, Stetter D, Manger S, et al. Using the sun to decarbonize the power sector: The economic potential of photovoltaics and concentrating solar power. *Applied Energy*, 2014, 135: 704-720.
- [52] Ma Huiling, Chen Dayu. Analysis on current situation and problems of hydropower development in China and the suggestions. *Water Power*, 2017, 43(12): 76-78. [马会领, 陈大宇. 对我国水电发展现状、问题的浅析和建议. *水力发电*, 2017, 43(12): 76-78.]
- [53] Wu Yun, Yu Biying, Zou Ying, et al. The path of low-carbon transformation in China's power sector under the vision of carbon neutrality. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2021, 13(3): 48-55. [吴娜, 余碧莹, 邹颖, 等. 碳中和愿景下电力部门低碳转型路径研究. *中国环境管理*, 2021, 13(3): 48-55.]
- [54] Wang Qia. Forecast of China's wind power installed capacity and corresponding CO₂ reduction from 2020 to 2060. *Ecological Economy*, 2021, 37(7): 13-21. [王恰. 2020—2060年中国风电装机规模及其CO₂减排预测. *生态经济*, 2021, 37(7): 13-21.]

China's carbon neutrality path prediction under the shared social economic paths

LIU Zemiao¹, HUANG Xianjin^{1,2}, LU Xuehe³, LI Shengfeng¹, QI Xinxian¹

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Laboratory of Carbon Neutralization and Territory Space Planning, Nanjing 210023, China;

3. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou 215101, Jiangsu, China)

Abstract: Scientifically predicting and analyzing China's carbon neutrality pathways under different scenarios is helpful for the reasonable advancement of carbon neutrality goals, but there has been limited comprehensive analysis that combines carbon emission-sink change trend and a systematic analysis that uses international scenarios for climate change research. Our research simulates China's carbon emission-sink paths in the 21st century under the shared social economic paths, with the usage of WITCH integrated assessment model and IBIS vegetation dynamic model. We also predict and analyze the timetable and paths of China's carbon neutralization. We find that: (1) China's carbon aggregates show that there is a 3-4 year cyclical fluctuation. Under the RCP6.0 climate scenario, China's average carbon sinks are stable at about 0.30 Gt C/a. Under the RCP2.6 climate scenario, the amount shows a downward trend, and it is predicted to drop to about 0.18 Gt C/a in 2065-2100. (2) China's carbon emissions are jointly affected by world's economic and social development path and policy intensity. Under medium or high intensity emission reduction policies, China's carbon emissions will show a downward trend after reaching the peak in 2025-2030, and under SSP1 or SSP4 with high intensity carbon emission reduction policy, carbon emissions will be reduced to about 0.30 Gt C/a in 2060 and achieve the goal of carbon neutrality. (3) The research of pathways based on typical carbon neutral scenarios finds that, it is required to actively promote the progress and application of clean energy technology, the transformation of non-electric energy to electric energy, the popularity of biomass energy and CCS technology, and advocate the development of electric vehicles in order to realize carbon neutrality goals.

Keywords: shared social economic paths; carbon neutrality; carbon sink; carbon emissions; China