

气候变化下中国碳中和的实现路径

杨海峰^{1,2}, 苏布达^{1,2}, 王东方¹, 姜涵¹, 姜汕¹, 姜彤^{1,2*}

1. 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 南京 210044

2. 南京信息工程大学气候与环境治理研究院, 南京 210044

摘要 基于中国碳收支不平衡现状与特征, 提出了迈向碳中和进程的路径框架, 探讨了能源系统碳减排和生态系统碳增汇的具体实施途径, 并指出要强化气候变化下减排增汇与经济社会的协同关系。

关键词 气候变化; 碳中和; 碳减排; 碳增汇; 经济社会

人类活动排放温室气体是全球气候变暖的主要原因。2021年全球CO₂排放量反弹了4.8%, 达到34.9 Gt, 是1965年的3倍^[1]。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第6次评估报告, 到2040年世界陆地和海洋的平均表面温度将比工业化前水平高出约1.5°C, 并强调应对气候变化的紧迫性^[2]。从1992、1997年签署《联合国气候变化框架》《京都协议书》到2015年的《巴黎协定》, 联合国在解决全球气候变暖问题的目标与行动上逐渐深入。《巴黎协定》就21世纪末全球气温升高不超过2°C, 且要向控制在1.5°C之内努力达成政治共识, 并指出全球到21世纪下半叶应实现温室气体净零排放。2020年9月22日, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话, 提出“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策

和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和。”因此, 实现碳中和目标已成为应对气候变化的发展共识与战略选择。

碳中和目标涵盖能源、工业、建筑、交通、生态等重点部门, 涉及政府、社会组织、企业、社区、个人等多元利益主体。中国作为最大的发展中国家和碳排放大国, 面临着降碳幅度更大、时间节点更为紧迫的严峻挑战^[3]。按照2030和2060的时间节点, 中国碳中和的实现过程可以大致分解为达峰平台期、深度脱碳期和源汇中和期3个阶段^[4], 需要多领域、多主体严格实施减排增汇方案, 聚焦碳中和目标下的气候变化协同与适应, 对现行经济社会体系进行一场广泛而深刻的系统性变革^[5]。学界也对中国碳中和的科学内涵^[6]、影响贡献^[7]、逻辑框架^[8-9]、

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 国家自然科学基金委员会-联合国环境署合作研究项目(42261144002); 南京信息工程大学人才启动经费资助项目(1523142301012)

作者简介: 杨海峰, 讲师, 研究方向为气候变化与可持续发展、碳排放影响评估, 电子信箱: haitun_feng@nuist.edu.cn; 姜彤(通信作者), 教授, 研究方向为气候变化对社会经济影响和风险评估, 电子信箱: jiangtong@nuist.edu.cn

引用格式: 杨海峰, 苏布达, 王东方, 等. 气候变化下中国碳中和的实现路径[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 6-12; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.001

实现路径^[10]、政策机制^[11]等做出了系列解读与探讨,但总体缺乏系统性,并且关于气候变化下的碳中和实现路径认知不足。笔者立足降碳、扩绿和增长协同推进的系统理念,总结中国碳中和实现路径的总体框架,并根据框架提出助力碳中和的多途径措施。

1 碳中和实现路径总体框架

人类活动对碳循环有着重大影响,由碳源与碳汇2类过程共同作用形成,主要体现在化石能源利用、土地利用方式转变、生态系统固碳等方面。从全球碳循环的源-汇量分布来看(图1)^[12],全球每年碳排放量大约86%来自化石燃料燃烧,14%由土地利用变化造成,化石能源利用碳排放强度日益上升。人为排放CO₂中大致有54%被自然过程吸收固定,其中31%由陆地生态系统完成,23%由海洋生态系统完成^[13]。剩余的18.4 Gt排放到大气中,导致大气CO₂浓度持续增加。2020年,中国能源相关CO₂排放(含工业过程)约为11.3 Gt,电力、供热、工业、建筑、交通是重点排放部门,而陆地生态系统和海洋生态系统的碳吸收总量仅约为1.40 Gt(表1)。

碳中和本质为碳排放量与碳吸收量相抵消,实现CO₂净零排放。我国碳收支现状极度不平衡,缺口达到近10 Gt,面临着巨大的挑战和限制。碳减排和碳增汇是迈向碳中和进程的2个关键着力点,

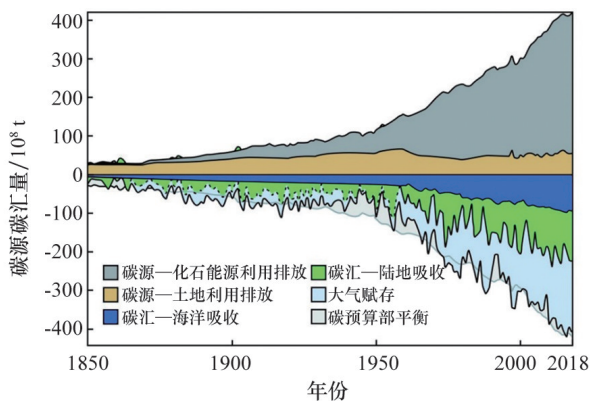


图1 全球碳循环系统源-汇量分布

表1 2020年中国碳排放量与碳吸收量分布

类别	领域	CO ₂ /Gt
碳排放	电力	3.93
	供热	0.66
	工业	3.71
	建筑	0.70
	交通	1.22
	农业	0.11
	其他	0.98
碳吸收	陆地碳汇	0.93
	海洋碳汇	0.46

需要在重点与潜力领域开展一系列变革型实践,通过能源替代、产业优化、效率提升、技术固碳、社会治理等途径实现能源系统深度降碳,采取稳定基础、拓展空间、生态修复、开发潜力、机制构建等措施提升生态系统碳汇能力(图2)。同时碳中和目标是一项长期任务,在有序推进过程中要切实保障经济社会高质量发展,嵌入气候变化情景分析方法,科学评估减排增汇效应,制定碳中和路线图与任务表,寻求与经济社会协同发展的最优解。

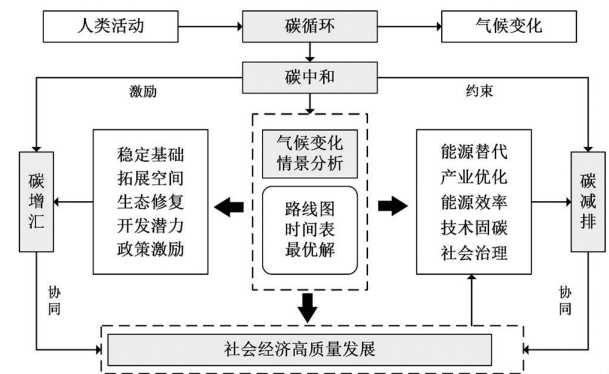


图2 碳中和实现路径总体框架

2 能源系统碳减排实施路径

中国近88%的CO₂排放来自能源系统,需要通过能源替代、节能减排、技术固碳、社会治理等途径实现自身全方位、深度转型(图3)。2030年前经历较短平台期,能源系统CO₂排放量维持在10.3 Gt/a;到2035年,CO₂排放量降为8.6 Gt/a;到2050年,CO₂

排放量快速下降到 2.3 Gt/a; 到 2060 年, CO₂ 排放量将控制在 1.0 Gt/a 以下^[14-15]。

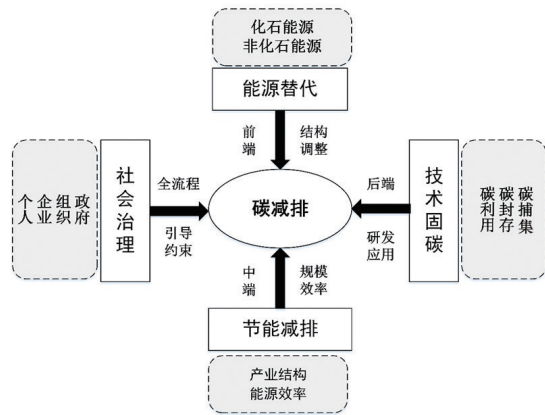


图3 能源系统碳减排实施路径框架

1) 前端能源替代, 优化能源结构。降低化石能源、高比例发展非化石能源是能源系统碳减排的根本措施, 总体贡献能达到约 44%。能源结构一般会经历从煤炭为主到油气为主, 再到非化石能源为主的发展阶段。2022 年, 全球能源结构仍以化石燃料为主, 占全球能源消费总量的 82.3%。其中, 煤炭 24.4%、石油 31.0%、天然气 26.9%, 正从油气为主迈向新能源为主。2022 年, 中国煤炭消费量占比高达 56.2%, 能源结构仍以煤炭为主, 应加快化石能源与非化石能源协调互补, 推动能源结构从以煤炭为主向以非化石能源为主逐步实现, 促进能源结构向绿色、多元、安全、高效转型。在中国未来能源结构转型的初期阶段, 要提升天然气在转型过程的中间桥梁作用^[16]; 在中期阶段, 使太阳能、风能、水能、核能、生物质能等可再生能源成为主力军, 通过不同技术转化成电能, 广泛应用于电力、热力、交通等领域, 缓解能源供给侧压力; 在后期阶段, 充分开发绿色氢能潜力, 统筹推进氢能制造、储存运输、使用全产业链的建设^[17]。根据世界氢能协会与麦肯锡公司的最新研究结果, 到 2050 年全球绿色氢能对碳减排贡献率会达到 20% 以上, 累计削减 CO₂ 排放量 80 Gt^[18]。

2) 中端节能减排, 优化产业结构、提升能源利用效率。产业结构优化可以从源头控制能源碳排

放需求总量。从 2020 年煤炭、原油及制品和天然气在三次产业的碳流情况来看, 第二产业的 CO₂ 排放量占碳排放总量的 75% 以上, 是当前产业结构调整重点与主攻方向。针对钢铁、有色金属、石化化工、建材、交通、建筑等重点高碳行业和领域, 应以绿色转型为目标导向, 合理控制煤制油气产能规模, 加快发展新一代生物、新能源、新材料、绿色环保以及航空、海洋装备等战略新兴产业。同时可以在能源产品的生产、储存、运输、利用、维护、回收等过程中提升生产效率和资源利用效率, 例如, 采用化石燃料的沸腾床燃烧、酸化压裂、催化燃烧等技术和储能新装备, 降低单位产出的 CO₂ 排放量。

3) 后端技术固碳, 强化研发并降低成本。技术固碳指在 CO₂ 排放后, 通过碳捕集利用与封存 (carbon capture, utilization, and storage, CCUS) 技术手段增加碳存储。当前中国碳捕集能力仅为全球的 1/10, 利用与封存能力比例更小, CCUS 技术研发需求紧迫^[19]。未来需超前部署与研发固碳技术, 碳利用可以通过矿化手段将 CO₂ 融入混凝土、化学手段合成氢、生物手段用于促进植物生长等, 碳捕集与封存技术重点关注点源 CCUS 技术、生物质能碳捕集与封存技术、直接空气碳捕获与封存技术等。另外, 技术固碳具有较高成本和风险^[20], 当前成本大约为 500~600 元/t CO₂, 需要通过技术改造实现 40~155 元/t CO₂ 的吸收, 并降低捕集、运输、利用与封存等环节可能出现的环境风险^[21]。

4) 促进社会治理全过程参与。社会治理促使政府、组织机构、企业、个人等多元利益主体共同参与, 通过明确权责、强化协同与合作、制定规范标准等途径实现公共利益最大化^[22]。在碳减排的社会治理当中, 政府与社会组织充分发挥规范引导作用, 通过立法、机制构建、宣传教育, 如绿色金融、碳税政策、碳交易机制、“个人碳减排账户”等, 引导企业与个人向低碳生产生活方式转型; 企业层面严格落实政策管理要求, 将碳中和战略导向纳入企业发展规划, 推动高碳行业的能源结构和产业结构转型升级, 为个人消费者提供绿色产品; 个人层面推广使用“个人碳减排账户”, 培育低碳消费与绿色出行的理念偏好, 反向引导企业绿色生产。

3 生态系统碳增汇实施路径

生态系统碳汇能力提升潜力巨大,相关测算结果表明在多种途径作用下,到2060年我国生态系统碳汇总量有望达到2.0~2.5 Gt/a,对碳中和的贡献在60%以上^[23]。碳增汇途径主要包括稳定现有碳汇基础、拓展生态系统空间、开展生态修复工程、开发海洋碳汇潜力、建立碳汇政策机制等(图4)。

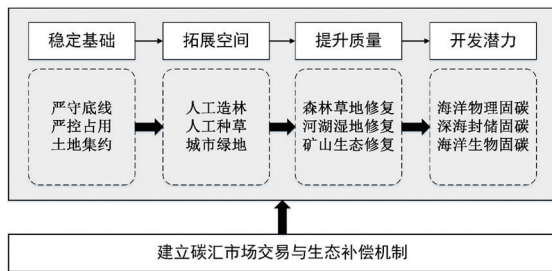


图4 生态系统碳增汇实施路径框架

1) 稳定现有碳汇基础。人类活动侵占生态空间是造成生态系统碳汇变化的重要驱动因素。1980—2020年,中国人均生态空间盈余/赤字从0.16 hm²减少至-1.06 hm²^[24]。在开展碳增汇行动前,最为关键的是遏制生态空间占用趋势。通过强化国土空间规划和用途管控^[25],严守生态保护红线,严控新增建设用地规模,防止重要生态功能区被人类活动占用,确保面积不减少、生态服务性质不改变,稳定森林、草原、土壤、岩溶、湿地、海洋等生态系统的固碳作用^[26]。

2) 拓展生态系统空间。在巩固生态系统碳汇能力基础上,通过增加城市绿化面积、推进人工造林、人工种草等方式拓展生态空间范围。2022年我国完成造林383万hm²,近10年累计完成造林6400万hm²,成为同期全球森林资源增长最多国家^[27]。今后应持续开展人工造林工程,因地制宜选用适生优良树种,使森林面积与碳汇量持续增加;草原碳总储量占我国陆地生态系统的16.7%,年碳汇潜力为773.2 Tg C^[28]。但目前关于草原碳汇的认识不足,应完善草原碳增汇顶层设计,开展多形式多途径的人工种草工程;城市绿地同样具有不可或缺的重要碳汇价值,通过系统布局城市绿地、构建

绿道网络体系、选用高碳汇能力植物、优化植物群落结构等措施合理增加城市绿地碳汇容量^[29]。

3) 开展生态修复工程。在碳增汇规模效应衰减后,需注重碳汇的质量效应,由“扩大生态系统面积为主”转向“提升单位面积生态系统固碳能力为主”,针对典型生态脆弱区和敏感区,秉持山水林田湖草共同修复理念,实施生态修复重大工程。国务院颁布的《2030前碳达峰行动方案》提出,要精准提升森林质量,提高草原综合植被盖度,加强河湖与湿地保护修复,提升红树林、海床草、盐沼等固碳能力,开展历史遗留矿山生态环境治理。

4) 开发海洋碳汇潜力。海洋碳储量能达到陆地的近20倍、大气的50倍,是重要的气候调节器^[30]。我国拥有长达1.8万km的海岸线与300万km²的海洋国土面积,蕴含碳汇价值巨大^[31]。未来需加强海洋碳汇机制分析,开展海洋碳汇核算研究^[32],通过海洋物理固碳、深海封储固碳、海洋生物固碳等途径,不断挖掘海洋碳汇扩增潜力。

5) 建立碳汇政策机制。在生态系统碳汇数量质量提升、潜力开发过程中,需要建立碳汇市场交易与生态补偿机制^[33]。碳汇市场交易与生态补偿机制本质是一种经济调节工具,主要通过政府宏观调控与市场配置去助力碳汇价值的转化与实现,提升自然生态本底和自然恢复力。目前存在核算困难、交易市场认可度低、转移分配不清等现实问题,应让政府、企业、个人等多元利益主体广泛参与,推进森林、草地、耕地、湿地等自然资源的碳汇定价^[34],构建基于不同自然资源类型和国土空间的多层次生态补偿机制实现体系,将碳汇变成“可量化、可交易、可转移、可持续”的生态产品。

4 强化气候变化下经济社会协同效应

碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,国家/地区的碳中和目标实现不仅要立足资源禀赋与发展阶段等基础条件,提出符合实际且切实可行的目标任务和时间表。而且要在减排增汇进程中切实保障经济社会高质量发展,逐步降低经

济社会增长对高耗能高排放发展路径的依赖。以往多关注历史人口、经济、产业、土地、能源等因素对于碳排放的影响作用,而应用国际耦合情景系统评估经济社会与减排增汇的协同效应研究较为缺乏。基于未来气候变化的情景模式,如何科学开展气候变化下的碳源/碳汇和经济社会预估研究,揭示2类子系统的动态耦合协调关系成为关注的热点议题。

2010年IPCC提出了共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs),包括可持续路径、中间路径、区域竞争路径、不均衡路径和以传统化石燃料为主的发展路径,可以定性描述未来世界在人口增长、经济发展、技术进步、环境条件、政府管理、全球化等方面的主要特征假设^[35]。结合SSPs情景,利用相关模型方法模拟与预估人口、经济、土地、能源系统碳排放、生态系统碳汇等成为重要趋势^[36-38]。在SSPs与人口经济的预估研究中,SSP1~5对人口经济预估参数化方案进行了详细设置,如人口增速、生育率、死亡率、迁移率等人口参数和经济增长率、科技增长率、收敛速度、国际贸易等经济参数,利用PDE模型、Cobb-Douglas模型等可以研发全球或国家尺度上的逐年高分辨率格点化数据集^[39-41]。在SSPs与土地利用预估研究中,SSP1~5描述了土地利用变化对农业和工业需求的响应,并据此设定了全球化、环境、贸易、生产率、土地需求等多视角全方位的方案^[42],结合FLUS模型、Markov模型等进行土地利用模拟。在SSPs与能源要素预估研究中,SSP1~5对能源技术进步、新能源出现、未来化石能源及其替代品的成本和可用性等进行假设^[43],利用情景参数设定、系统动力学等对能源需求和供应进行定量化模拟。在SSPs与碳汇预估研究中,通过考虑CO₂浓度、气候要素、土地覆盖等变量,利用遥感估算模型对生态系统碳汇重要指示性指标进行评估^[44]。可见SSPs应用覆盖广且内容丰富,已在全球或国家尺度上的经济社会要素预估中广泛应用。未来需结合SSPs设置人口、经济、土地、能源、碳汇的参数化方案,利用相关模型方法研制适用于区域实际情况的高分辨率格点化数据集(图5),强化气候变化情景下减排增汇与经济

社会的协同效应分析,为满足高质量发展需求和实现碳中和目标寻求最优解。

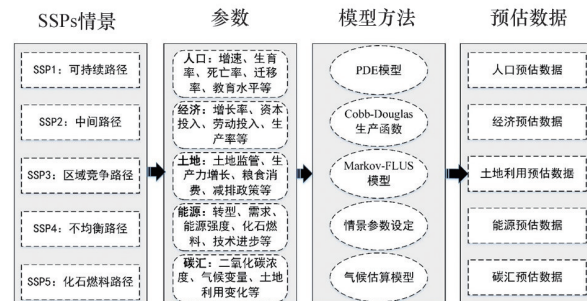


图5 SSPs情景下的经济社会、碳源/碳汇预估

5 结论

碳中和作为应对气候变化新形势下的国家重大战略部署,是全方位、宽领域的复杂系统工程,涉及到多学科内部各个环节的深度交流。我国碳中和历程任重道远,需要以能源系统碳减排和生态系统碳增汇为重要突破口,多途径严格实施绿色低碳转型方案才可能如期实现。能源系统碳减排可以从前端、中段和后端持续发力,在全流程中完善社会治理体系。前端能源替代,高比例发展可再生能源;中端节能减排,优化产业结构并提升能源利用效率;后端技术固碳,发展碳利用、碳捕集与碳封存技术。生态系统碳增汇按稳定基础、拓展空间、提升质量、开发潜力的侧重点稳步推进,并建立碳汇市场交易与生态补偿机制,激励碳汇价值转化与实现。另外,未来研究要强化气候变化下减排增汇与经济社会发展的协调效应分析,应用国际耦合情景开展精准量化评估,明确高质量发展路线图、时间表和任务书。

参考文献(References)

- [1] Liu Z, Deng Z, Davis S J, et al. Monitoring global carbon emissions in 2021[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(4): 217-219.
- [2] IPCC. Climate change 2021: The Physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

- [3] 顾恬玮, 彭建. 基于自然的碳达峰、碳中和解决方案: 关键议题[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3384-3391.
- [4] 柴麒敏. 美丽中国愿景下我国碳达峰、碳中和战略的实施路径研究[J]. 环境保护, 2022, 50(6): 21-25.
- [5] 谢伏瞻, 庄国泰, 巢清尘, 等. 应对气候变化报告(2021): 碳达峰碳中和专辑[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2021: 1-2.
- [6] 袁佳双, 张永香. 气候变化科学与碳中和[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(9): 47-52.
- [7] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [8] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 等. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1137-1147.
- [9] 熊素, 罗蓉. “双碳”目标下中国农业绿色发展: 理论框架、困境审视及破局之道[J]. 农村经济, 2023(2): 106-115.
- [10] 周健, 李晓源, 邓一荣. 碳中和实践进展、实现路径与展望[J]. 环境监测管理与技术, 2023, 35(2): 8-11.
- [11] 谭迎春, 郭雯, 樊杰, 等. 碳达峰、碳中和政策框架与技术创新政策研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 435-443.
- [12] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [13] 丁仲礼. 深入理解碳中和的基本逻辑和技术需求[J]. 时事报告: 党委中心组学习, 2022(4): 18.
- [14] 柴麒敏, 徐华清. 基于IAMC模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 37-46.
- [15] Chai Q M, Fu S, Wen X Y, et al. Modeling the implementation of NDCs and the scenarios below 2°C for the Belt and Road countries[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1-11.
- [16] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
- [17] 曹文凯, 朱信钊, 陈记豪, 等. 碳中和目标时代绿色氢能发展技术路线研究[J/OL]. [2023-05-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230428.1852.002.html>.
- [18] Hydrogen Council and McKinsey Company. Hydrogen insights 2023[R]. Brussels: Hydrogen Council, 2023.
- [19] 黄晶. 碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展的几点研判[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 100.
- [20] 邓一荣, 汪永红, 赵岩杰, 等. 碳中和背景下二氧化碳封存研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 429-439.
- [21] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
- [22] 庄贵阳, 窦晓铭, 魏鸣昕. 碳达峰碳中和的学理阐释与路径分析[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2022, 50(1): 57-68.
- [23] 谢高地. 论我国生态系统碳汇能力及其提升途径[J]. 环境保护, 2023, 51(3): 12-16.
- [24] 2020年后我国将进入生态环境的“拐点性”修复期[EB/OL]. [2023-8-28]. <http://www.sic.gov.cn/News/455/6984.htm>.
- [25] 林坚, 赵晔. “双碳”目标下的国土空间规划及用途管控[J]. 科技导报, 2022, 40(6): 12-19.
- [26] 宋猛, 刘伯恩. 区域生态系统碳汇能力评价与提升路径——以宁夏回族自治区为例[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(8): 73-79.
- [27] 全国绿化委员会办公室. 2022年中国国土绿化状况公报[J]. 国土绿化, 2022(3): 6-11.
- [28] 赵金龙, 刘永杰, 韩丰泽. 碳达峰、碳中和目标下草原增汇路径的思考[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1273-1280.
- [29] 刘颂, 张浩鹏. 多尺度城市绿地碳汇实现机理及途径研究进展[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 55-59.
- [30] 范振林. 开发蓝色碳汇助力实现碳中和[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 12-18.
- [31] 孙国茂, 魏震昊. 海洋碳汇对实现碳中和目标的作用与意义——一个与海洋碳汇理论框架相关研究的文献综述[J]. 中国海洋经济, 2022, 7(2): 101-128.
- [32] 贺义雄, 王燕炜, 谢素美, 等. 我国海洋碳汇研究进展——基于CNKI(2006—2021年)的文献分析[J]. 海洋经济, 2022, 12(4): 1-16.
- [33] 曹港程, 沈金生. 海洋牧场碳汇资源生态补偿标准[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3153-3166.
- [34] 董战峰, 毕粉粉, 冀云卿. 中国陆地生态系统碳汇发展的现状、问题及建议[J]. 科技导报, 2022, 40(19): 15-24.
- [35] 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[J]. Global Environmental Change-human and Policy Dimensions, 2017, 42: 153-168.
- [36] Guivarch C, Rozenberg J, Schweizer V, et al. The diversity of socio-economic pathways and CO₂ emissions scenarios: Insights from the investigation of a scenarios da-

- tabase[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80: 336–353.
- [37] Wang Y, Wang A Q, Zhai J Q, et al. Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5°C and 2.0°C warming[J]. *Nature Communication*, 2019, 10: 3376.
- [38] 景丞, 姜彤, 苏布达, 等. 共享社会经济路径在土地利用、能源与碳排放研究的应用[J]. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 397–413.
- [39] 姜彤, 赵晶, 景丞, 等. IPCC 共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(2): 128–137.
- [40] 潘金玉, 苏布达, 王艳君, 等. 共享社会经济路径(SSPs)下 2020—2050 年中国分产业产值时空变化[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(6): 725–737.
- [41] Chen Y D, Guo F, Wang J C, et al. Provincial and grid-
- ded population projection for China under shared socio-economic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 83.
- [42] Popp A, Calvin K, Fujimori S, et al. Land-use futures in the shared socio-economic pathways[J]. *Global Environmental Change—human and Policy Dimensions*, 2017, 42: 331–345.
- [43] Levesque A, Pietzcker R C, Baumstark L, et al. How much energy will buildings consume in 2100? A global perspective within a scenario framework[J]. *Energy*, 2018, 148: 514–527.
- [44] Qiu H, Hao D L, Zeng Y L, et al. Global and northern-high-latitude net ecosystem production in the 21st century from CMIP6 experiments[J]. *Earth System Dynamics*, 2023, 14(1): 1–16.

Reflections on China's carbon neutral pathway under climate change

YANG Haifeng^{1,2}, SU Buda^{1,2}, WANG Dongfang¹, JIANG Han¹, JIANG Shan¹, JIANG Tong^{1,2*}

1. Institute for Disaster Risk Management, School of Geographic Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. Research Institute of Climatic and Environmental Governance, Nanjing 210044, China

Abstract Carbon neutrality is a global consensus for climate change mitigation and adaptation and an important strategic choice for sustainable economic and social development. Achieving carbon neutrality is arduous and time-critical, and carbon emission reduction and carbon sequestration initiatives must be systematically implemented in critical areas. Based on the current situation and characteristics of China's carbon imbalance, we summarize and propose a pathway framework for moving toward carbon neutrality, discuss the specific implementation pathways for carbon emission reduction in energy systems and carbon sink enhancement in ecosystems, and point out that we should strengthen research on the synergistic relationship between emission reduction and sink enhancement and socio-economic development under climate change, aiming to help China achieve the goal of carbon neutrality scientifically and steadily.

Keywords climate change; carbon neutrality; carbon emission reduction; carbon sink enhancement; socio-economic ●



(责任编辑 卫夏雯)