

中国陆地生态系统碳汇发展的现状、问题及建议

董战峰¹, 毕粉粉¹, 冀云卿^{1,2}

1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012

2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083

摘要 分析了陆地生态系统碳汇相关问题的内涵与科学意义, 结合中国陆地生态系统碳汇和生物多样性领域的发展现状和问题, 从加快推进生态保护和修复重大工程、构建促进生态系统碳汇增量发展的科技支撑体系、加强生态碳汇的技术研发与能力建设、推进完善生态系统碳汇交易机制、加强碳中和与生物多样性保护统筹等方面, 提出了陆地生态系统碳汇促进碳中和目标实现的对策建议。

关键词 生态系统; 生物多样性保护; 陆地生态碳汇; 碳中和

陆地生态系统是自然界碳循环的主要部分, 中国以占世界 6.5% 的陆地面积贡献了全球陆地碳汇的 10%~31%, 表明中国陆地生态系统在全球陆地碳汇中发挥了重要作用^[1]。近 40 年来关于陆地生态系统碳汇在不同区域以及不同尺度上对调节气候变暖中的关键作用研究层出不穷, 主要聚焦于碳汇能力、碳汇分布以及变化和政策机制等方面。自 20 世纪 80 年代开始, 中国学者逐渐对生态系统碳循环的主要组分和相关参数开展了野外调查和监测, 并将研究范围从样点尺度扩展至区域和全国尺度^[2]。之后, 地面观测数据逐渐积累, 卫星遥感资

料、通量观测技术和各类模型逐渐被应用和发展, 推动了中国陆地生态系统碳循环多数据源、多手段的综合应用。近几年, 中国在森林、草原、湿地、农田等陆地生态系统的碳汇计算方法方面也逐渐趋于成熟, 主要包括模型模拟法、现场实测法、大气反演法、通量观测法等, 但不同方法对中国陆地生态系统碳储量和碳汇的估算结果依然存在较大的分歧与争议。

中国科协发布的 2021 年度人类社会发展十大科学问题中有关生态领域的一个科学问题是“如何在维持生态系统和保护生物多样性的同时构建陆

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-07-24

作者简介: 董战峰, 研究员, 研究方向为环境战略与管理、双碳战略与政策, 电子信箱: dongzf@caep.org.cn

引用格式: 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; doi:10.3981/j.issn.

1000-7857.2022.19.002

地生态碳汇,促进碳中和目标的实现?”。本研究基于此分析该问题的内涵与科学意义,结合中国陆地生态系统碳汇和生物多样性领域的发展现状和问题,对比不同研究和方法得到的中国陆地生态系统

碳汇大小,评述目前的研究进展及存在的问题,并提出增强陆地生态系统碳汇能力促进碳中和目标实现的对策建议(图1),以期为中国制定实现碳中和的相关政策提供参考。

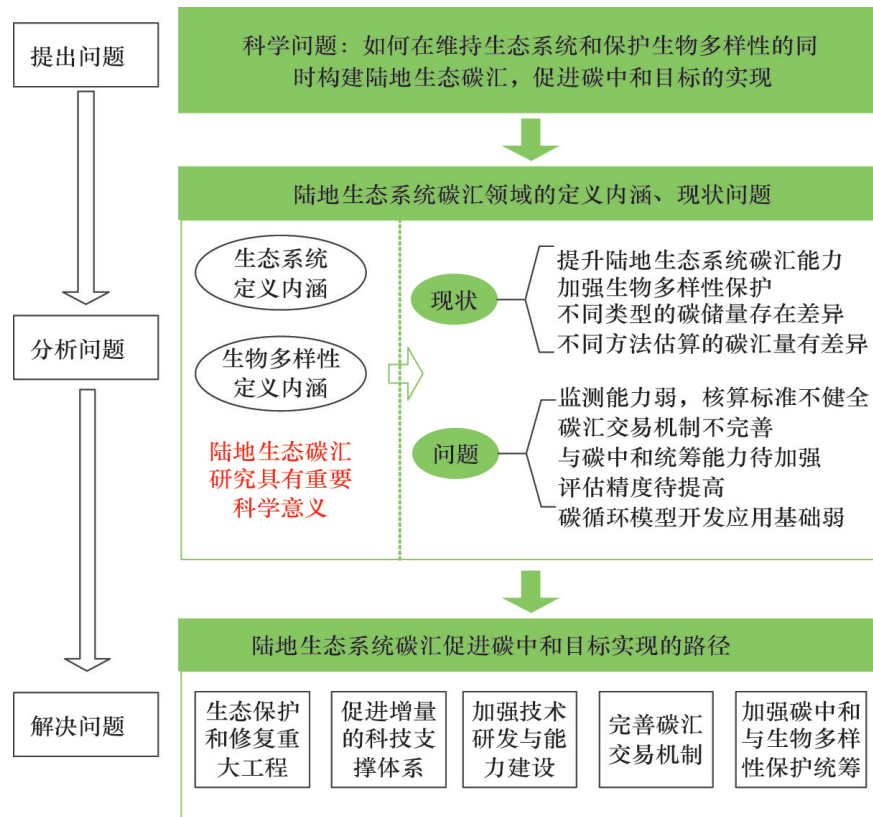


图1 陆地生态系统碳汇促进碳中和目标实现的研究框架

1 问题的内涵与科学意义

1.1 内涵

生态系统是由生物群落及其生存环境共同组成的动态平衡系统。按类型包括陆地的森林生态系统、草原生态系统、湿地生态系统、农田生态系统、荒漠生态系统和水域的淡水生态系统、河口生态系统、海洋生态系统等。生态系统都有固碳能力,增强陆地生态系统碳汇能力是减缓温室气体浓度上升、调节全球气候变暖的重要手段,也是实现中国碳中和目标的有效途径。其中陆地生态系统碳汇是“碳中和”“固碳端”的主要贡献者,在全球气候变化和“碳中和”背景下具有十分重要的作用。

生物多样性是生物及其环境形成的生态复合体,以及与此相关的各种生态过程的综合。通常包括动物、植物、微生物及其所拥有的基因,以及它们与其生存环境形成的复杂生态系统。2008年,世界银行发布的《生物多样性、气候变化和适应性:来自世界银行投资的基于自然的解决方案》,提出了以生物多样性和人类福祉为核心的基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)框架,强调了生物多样性保护对气候变化减缓与适应的重要性。

维持生态系统和保护生物多样性,构建陆地生态碳汇,促进实现碳中和目标是国际热点科学问题。“碳中和”的本质是化石燃料使用及土地利用变化导致的碳排放量与陆地和海洋生态系统吸收及

其他方式固存的碳量之间达到平衡的状态,即CO₂净排放为零^[3-4]。因此,实现“碳中和”需要两个关键过程:一是减少产业层面的碳排放,包括节能、增效、开发利用新能源等。二是增加温室气体吸收,包括碳捕获利用与封存(carbon capture utilization and storage, CCUS)等。其中,增强陆地碳汇被认为是缓解气候变化最为成熟的途径之一^[5-7]。加强对陆地生态系统及生物多样性的保护,提升生态系统碳汇功能,是抵消人类活动造成二氧化碳排放的基于自然的解决方案,是实现碳中和目标的重要手段。将NbS与基于技术的解决方案协调互补、共同推进,可以在可持续发展框架下推进碳中和进程,打造经济发展、助力能源安全、环境改善、减排二氧化碳协同治理和多方共赢局面。

1.2 科学意义与战略价值

21世纪后,中国化石能源使用量不断增大,大气中温室气体含量逐渐增加,导致中国于2006年超过美国成为全球第一排放大国^[8-9]。陆地生态系统在实现中国间接减排过程中发挥着极其重要的作用。2015年,联合国发布《2030年可持续发展议程》,首次单独提出陆地生态系统主题,联合国可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)陆地生态系统保护的总目标是:保护、恢复和促进可持续利用陆地生态系统,可持续地管理森林,防治荒漠化,制止和扭转土地退化,阻止生物多样性的丧失,并设定9个目标和13个识别指标。2020年,中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标,全面实现“双碳”目标,不仅要做好减法、全力推进碳排放减量,更要算好加法、着力提升碳汇增量、构建多层次的碳中和路径。随着可持续发展目标与“双碳”目标的提出,维持生态系统、保护生物多样性与构建陆地生态碳汇显现出一致性、引领性和挑战性。在此背景下,开展维持生态系统和保护生物多样性以及构建陆地生态碳汇探索研究,对于助力实现碳中和目标具有重要意义。陆地生态碳汇在固碳的同时,可为资源丰富地区带来经济收入,同时通过碳市场交易等方式,为应对气候变化做出贡献并实现其经济价值,将生态产品所蕴含的内在价值转化为经济效益、社会效益和生态效益。

2 陆地生态系统碳汇领域发展现状与问题

2.1 中国维持陆地生态系统和保护生物多样性的举措

党的十八大以来,中国创新开展了山水林田湖草系统性生态保护修复,生态保护的理念实现了从跟随到引领的历史性飞跃,自然生态保护实现了由弱到强的历史性跨越,生态状况实现了由局部改善到总体改善的历史性转折。

建立健全陆地生态系统保护的法律法规体系。经过多年的立法实践工作,中国已经建立了涵盖陆地生态系统保护主要方面的法律法规体系。一是重要的法律主要包括1984年《中华人民共和国森林法》、1985年《中华人民共和国草原法》、1986年《中华人民共和国土地管理法》、1988年《中华人民共和国野生动物保护法》、1989年《中华人民共和国环境保护法》、1991年《中华人民共和国水土保持法》、2001年《中华人民共和国防沙治沙法》、2021年《中华人民共和国湿地保护法》等;二是出台了大量的配套实施法规和管理办法等,主要包括1992年《中华人民共和国陆生野生动物保护实施条例》、1994年《中华人民共和国自然保护区条例》、1997年《中华人民共和国野生植物保护条例》、2000年《中华人民共和国森林法实施条例》、2004年《中华人民共和国退耕还林条例》、2011年《中华人民共和国国家级森林公园管理办法》、2013年《中华人民共和国湿地保护管理规定》等;三是对已出台的法律进行修订完善工作,如1998、2009年对《中华人民共和国森林法》进行了2次修正,强调了发挥森林蓄水保土、调节气候、改善环境的作用;2014年对《中华人民共和国环境保护法》进行修正,新增加了推进生态文明建设、促进经济社会可持续发展的内容^[10]。

显著提升陆地生态系统碳汇能力。近年来,中国大力推动国土绿化、退耕还林还草、湿地保护修复等工作,森林、草地、湿地等陆地生态系统碳汇能力得到显著提升。一是森林覆盖率显著提升。第九次全国森林资源清查数据显示,全国现有森林面

积 2.2 亿 hm^2 , 森林蓄积量 175.6 亿 m^3 , 实现了 30 年来连续保持面积、蓄积量的“双增长”, 成为全球森林资源增长最多、最快的国家。2010—2020 年, 全国造林总面积由 592.25 万 hm^2 增加到 677 万 hm^2 , 增加了 14.3%, 森林覆盖率由新中国成立之初的约 8% 提高到 2020 年的 23.04%。二是草原保护修复取得较好成效。实施以退牧还草为主体工程的草原生态建设, 2011—2018 年国家累计投入草原生态补奖资金 1326 亿元^[11]。2020 年, 中国落实草原禁牧 8200 万 hm^2 、草畜平衡 1.74 亿 hm^2 , 天然草原综合植被盖度达 56.1%, 天然草原鲜草总产量突破 11 亿 t。三是湿地保护修复持续强化。截至 2021 年, 中国指定 64 处国际重要湿地, 建立 602 处湿地自然保护区、1600 余处湿地公园和为数众多的湿地保护小区, 湿地保护率达 52.65%。

持续加强生物多样性保护。自 1992 年签署《生物多样性公约》后, 中国一直高度重视生物多样性保护的顶层设计和科学研究。一是强化生物多样性保护顶层设计。中国相继出台发布了 1989 年《国家重点保护野生动物名录》、1994 年《中国生物多样性保护行动计划》、1999 年《国家重点保护野生植物名录(第一批)》、2003 年《国家重点保护野生动物名录(调整部分)》等; 截至 2020 年底, 中国各类自然保护地已经有 1.18 万个, 国家级自然保护区有 474 个, 各类自然保护地的面积占到陆地国土面积的 18%, 提前实现联合国《生物多样性公约》“爱知目标”所确定的 17% 的目标要求。2021 年印发《关于进一步加强生物多样性保护的意見》, 切实推进生物多样性保护工作。二是加强生物多样性保护相关研究。自 20 世纪 60 年代起, 中国开展了全国范围内生物资源的调查、评估与监测研究, 建立了中国生态系统研究网络、中国生物多样性监测与研究网络和中国生物多样性观测网络等多个生物多样性和生态系统监测网络。随着国家经费投入的增加, 中国科学家在生物多样性的研究领域也不断扩展, 包括生物起源、生物多样性演化与维持、生态系统服务、全球变化响应机制、濒危机制等方面^[12-13], 国际影响力逐步提升, 相关研究也为生物多样性及濒危物种保护相关决策提供了强有力的

理论支撑。

2.2 中国陆地生态系统碳储量情况

不同陆地生态系统类型的碳储量存在差异。《2021—2026 年中国低碳经济行业发展潜力分析及投资战略规划咨询报告》显示: 森林是陆地生态系统中最大的碳库, 森林碳汇是实现“碳中和”目标的主要途径。由于采用的数据来源和估算方法等不同, 关于陆地生态系统类型碳储量的研究结果也存在较大差异。例如张颖等^[14]的研究表明: 不同时期中国森林碳汇量差异较大, 森林植被碳汇功能在显著增加(表 1), 前 10 多年的平均碳汇量为 $0.0507 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 后 10 年的均值为 $0.188 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 森林资源总碳储量由 1976 年的 12.51 Pg C 增加到 2018 年的 21.44 Pg C 。杨元合等^[15]的研究表明: 过去 70 年间中国森林生态系统逐步从碳源转变为碳汇, 且其碳汇强度逐渐增加; 中国草地生态系统碳储量在 17.3~59.5 Pg C , 灌丛生态系统碳储量在 10.0~32.5 Pg C , 湿地的土壤碳储量估算范围在 3.7~16.7 Pg C , 农田土壤碳储量在 11.8~13.0 Pg C (表 2)。

不同方法估算的陆地生态系统碳汇量存在差异。研究表明中国陆地生态系统碳汇强度呈现明显的空间异质性, 主要呈现“东、南部高, 西、北部低”的格局^[16-22]。基于“自下而上”方法(清查资料、

表 1 基于森林资源清查数据计算的
中国森林资源碳储量及其变化^[14]

时期 (年份)	森林单位面积蓄积 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量 / (Pg C)	碳汇量 / $(\text{Pg C} \cdot \text{a}^{-1})$
1973—1976	71.27	12.51	—
1977—1981	78.32	13.45	0.078
1984—1988	73.33	13.86	0.024
1989—1993	67.97	14.07	0.017
1994—1998	70.89	14.47	0.019
1999—2003	71.21	15.78	0.107
2004—2008	73.67	16.86	0.089
2009—2013	77.24	18.62	0.144
2013—2018	78.17	21.44	0.231
平均值	73.56	—	0.086

注: 各时期的碳储量指该时期期末时间点的碳储量, 如 1976 年的碳储量为 12.51 $\text{Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 1981 年的碳储量为 13.45 $\text{Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表2 不同陆地生态系统类型的碳储量比较情况^[15]

类型	面积 /10 ⁴ km ²	碳储量/Pg C			数据来源与方法
		植被	土壤	合计	
草地生态系统	167.0	0.6	16.7	17.3	过程模型
	281.3	1.4	24.0	25.4	“碳专项”调查数据
	394.9	3.2	56.3	59.5	过程模型
灌丛生态系统	178.0	0.9	9.1	10.0	文献数据整合
	217.0	0.2	11.8	12.0	过程模型
	186.0	8.0	24.5	32.5	文献数据整合
湿地生态系统	24.5	—	3.7	—	文献数据整合
	22.5	0.13~0.50	5.0~6.2	5.4~7.3*	第二次全国土壤普查+文献数据整合
	53.4	0.22	16.7	16.9	第二次全国湿地资源清查
农田生态系统	93.7		11.8		过程模型
	132.3		12.2		1:100万中国土壤数据库
	155.8		13.0		第二次全国土壤普查

注:*,包括水体碳库0.2~0.6 PgC。

通量观测以及陆地生物圈模型等)和“自上而下”方法(大气反演),中国学者评估分析了陆地生态系统的碳源汇特征^[23-29]。不同方法研究结果表明中国陆地生态系统呈现为显著的碳汇,但基于“自下而上”方法得到的碳汇强度普遍低于“自上而下”方法得到的结果,2000—2010年间中国陆地碳汇显著高于20世纪八九十年代的水平^[30-32]。杨元合等^[15]基于不同方法相结合的碳汇估算思路对现有研究结果进行整合,结果表明“自下而上”方法获得的1980年代至2010年代中国陆地碳汇中值为166.5 Tg C·a⁻¹(70~293.6 Tg C·a⁻¹;5%~95%分位数,下同);“自上而下”方法获得的碳汇中值为340.0 Tg C·a⁻¹(290~430 Tg C·a⁻¹),估算出中国陆地生态系统的碳汇强度为195~246(99~336) Tg C·a⁻¹。

2.3 陆地生态系统碳汇面临诸多挑战

当前,陆地生态系统碳汇工作存在监测能力薄弱、核算标准不健全、碳汇交易机制不完善、碳中和与生物多样性统筹能力待加强、评估精度待提高、碳循环模型的开发应用基础弱等突出问题,亟需加快推进解决,为顺利实现碳中和目标做好技术与能力建设储备。

从技术层面来看,一是生态系统碳汇监测能力需要提高。陆地生态系统碳汇的监测、核算和报告是应对气候变化的基础性工作,陆地生态系统复杂

性和多样性给碳排放和碳汇计量、估算工作带来困难和挑战。中国在土壤、湿地、荒漠等陆地生态系统领域的碳汇监测还处于起步阶段,基础数据较少,参数和模型需要建立^[33]。二是生态系统碳汇核算标准不统一。目前中国尚缺乏生态系统碳汇核算的统一规范技术指引,对于森林、草原、湿地等各类生态系统要素的碳汇核算方法依然缺乏共识,存在核算方法复杂、核算参数选择不统一、某些树种碳汇水平测算缺乏规范等问题,生态系统碳汇功能核算缺乏统一性与规范性。另外,缺乏关于人类社会经济活动等对生态系统碳汇影响的评价机制和实施机制,以及增强生态系统增汇潜力的政策措施。

从管理层面来看,一是生态系统碳汇交易机制不健全。中国碳汇交易市场在技术、程序、标准规范和社会参与度上仍面临一些突出问题,如准入标准不规范、产权体系不健全、融资渠道比较单一、交易主体之间责任不明确等问题影响碳汇交易的开展。中国经国家核证自愿减排量(Chinese certified emission reduction, CCER)备案的碳汇方法学偏少,真正能进行市场交易的只有林业碳汇项目,仅在2014年发布了《关于推进林业碳汇交易工作的指导意见》,在草原、湿地、海洋等方面尚无政策支持。中国森林碳汇交易市场尚未构建碳交易披露制度,信息披露内容不够充分,草原、湿地等陆地生态系统

的碳汇信息披露处于起步阶段。二是碳中和与生物多样性统筹能力有待加强。中国在大规模发展光伏发电、风能等对生态系统及生物多样性影响,以及保护生态系统及生物多样性对碳中和影响的研究方面都还比较有限,对相关工作的科技支撑相对较弱。应对气候变化与保护生物多样性的协同治理需要基于自然的解决方案,统筹资金、技术、标准和监管政策,然而中国这方面相关的研究尚不充分。

从发展方向来看,一是陆地生态碳汇评估精度有待进一步提高。目前对陆地生态系统碳汇大小、分布及其驱动因素的认识仍存在较大不确定性,生态碳汇的各种途径核算结果均存在方法上的不足,且评估结果差异较大,难以相互比对和校核^[34]。未来需扩大陆地生态系统调查与观测的时空范围和精度,加强对特定生态系统和碳循环组分的观测,推动微生物组学、碳同位素通量监测、近地面遥感等新的观测技术和手段在碳循环研究中的广泛应用。二是陆地生态系统碳循环模型的开发应用基础较薄弱。在全球陆地碳循环的前沿研究中,中国还没有一个拥有完全知识产权的碳循环模型,研究基础相对薄弱,开发人类-自然耦合生态系统碳循环模型以准确预测中国陆地生态系统的碳固存潜力至关重要。另外,中国陆地生态系统碳汇的稳定性相对较弱,目前的模型无法准确诊断生态系统碳汇对极端气候事件的响应,迫切需要在人-自然耦合生态系统过程模型中改善生态系统对极端气候事件和冻土冻融过程的响应。

3 陆地生态系统碳汇在实现碳中和目标中的建议

实施“碳中和”目标将是21世纪最大规模的人类有序活动,必将催生新的科学前沿。中国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、促进经济社会发展全面绿色低碳转型的关键时期,维持生态系统和保护生物多样性的同时,提升陆地生态系统碳汇增量是实现碳中和目标的关键举措之一。

3.1 加快推进生态保护和修复重大工程

深入贯彻落实《全国重要生态系统保护和修复重大

工程总体规划(2021—2035年)》,持续推进山水林田湖草沙系统保护修复与污染治理,通过推进天然林资源保护、退耕还林还草、湿地保护与恢复、防护林体系等重点生态工程建设,提升森林、草原、湿地的碳贮存和碳吸收能力。

充分利用废弃矿山、坡地、荒地等国土空间开展绿化,增加林草资源总量,提高森林、草原资源质量,提升固碳和储碳能力。积极探索基于自然的解决方案,实施生物多样性保护重大工程,提高生态系统的综合效益和整体功能。完善陆地生态系统保护和修复的重大工程投入机制,明确主要目标、重点任务以及明确相关价格、投资、金融、市场准入、人才等政策,推动实现生态系统固碳效能的最大化。

3.2 构建促进生态系统碳汇增量发展的科技支撑体系

在国家重大科研专项中设立和开展陆地生态碳汇研究与应用相关科技创新研究项目,开展国土空间规划、生态保护修复等的碳中和实现标准研究。进一步梳理和总结国际组织发布的国际通用碳排放与固碳量测算方法,明晰碳中和过程中存量与增量的科学关系,推动中国碳中和措施在国际框架中实施。开展陆地生态碳汇对实现“碳中和”目标贡献的相关研究,例如不同陆地生态系统碳素转化、驱动力及其时空分布规律等,尤其加强陆地生态碳汇格局、时间尺度、演化趋势等方面的重要基础科学研究,为中国实现“双碳”战略目标提供科技支撑。加强陆地生态系统应对气候变化的相应机制、减缓气候变化潜力和成本效益等方面的研究,以及与其他生态系统服务之间关系的研究^[35]。加强碳核算、碳生产、碳增长经营技术、碳投资与金融等涉碳相关科技人才培养,支撑引导和推动完善相关国际规则。

3.3 加强生态碳汇的技术研发与能力建设

研究制定不同类别生态系统碳汇核算技术规范。加快出台针对森林、草原、湿地等生态系统的碳汇价值核算标准,统一碳汇核算的技术规范。针对森林,考虑树种、林龄、所在区域光照、温度、降水和土壤等自然条件,制定统一的参数标准,设定规

范的核算方法;针对草原、湿地等按照不同草原和湿地类别,设定参数标准和核算方法。制定科学完整的陆地生态系统碳储量和碳汇核算方法,完善基础数据库和参数模型库,构建基于不同生态地理区域、不同生态系统类型的植被覆盖度、生物量、碳密度等关键指标和关键参数的数据集成平台,为全面掌握生态系统碳汇现状,将生态系统固碳能力纳入生态环境监管职能奠定数据基础。

建立健全生态系统碳汇监测体系。依托和拓展自然资源调查监测体系,制定不同陆地生态系统类型关键指标、关键技术参数的调查监测技术规范,将碳汇监测设备融入生态环境监测新型基础设施建设框架,建立国家级碳汇信息共享平台,融合多源数据、多尺度数据、多手段数据连通支撑碳汇研究,提高陆地生态系统碳汇评估精度。加快构建国家技术标准统筹、区域技术监督、地方推进落实、社会共同参与的生态系统碳汇监测网络,融合“自上而下”反演方法与高分辨率“自下而上”动态清单方法,实现人为源-汇变化的精细化监测,准确评估不同类型陆地生态系统的固碳现状、速率潜力及其在全球碳收支中的贡献^[36]。

建立健全生态系统固碳增汇风险管控机制。在全球气候变化和人类对自然干扰加剧的背景下,建立健全气候、植被、土壤性质以及土地利用等因素对生态系统碳库稳定性的跟踪监测机制,长时期持续开展生态系统碳汇增汇风险评估,动态了解影响生态系统碳库稳定性的有利和不利因素。构建生态系统增汇潜力评价模型,测算生态系统碳库的存量资源和增量资源对增汇潜力的贡献程度。模拟生态系统碳汇增长的演化发展趋势,分析生态系统增汇潜力的动力来源,为推动生态系统增汇提供决策参考。

3.4 推进完善生态系统碳汇交易机制

健全生态碳汇交易市场。探索建立生态系统碳汇交易的评估、登记、监测、交易、监管机制与完善途径,完善碳汇市场参与方的相关认证和注册制度,严格碳汇信用的审定和核查,确保参与市场交易各方获得期望收益。探索碳汇交易市场化模式与机制,探索生态环境导向的开发模式(ecology-ori-

ented development, EOD)、政府和社会资本合作(public-private partnership, PPP)等市场化碳汇服务市场化模式,推进政府和社会力量合作开展陆地生态碳汇增汇新模式。大力创新碳汇交易的金融产品与服务,完善陆地生态系统碳汇市场融资机制。探索不同区域、部门间的生态系统碳汇交易机制。对加入碳汇交易市场的企业实施碳汇信息披露制度,在企业环境信息披露年报中披露碳汇信息。

加快完善生态碳汇政策体系。研究制定森林、草原、湿地、海洋等方面的《碳汇项目开发指导意见》,赋予地方政府更多碳汇项目开发政策创新空间,加强对地方政策实施与创新实践的跟踪评估,及时将各地典型做法模式上升为国家碳汇项目支持政策。强化碳汇激励政策创新,加大金融政策对农田土壤和森林生态系统等碳汇产业的支持,鼓励发行碳中和债券,以草原土壤碳库和植被碳库等生态系统碳库的固碳能力为基础,因地制宜开发碳资产质押融资、碳汇指数保险等。探索构建碳汇价值与生物多样性保护、保护地及森林疗养等不可量化的生态服务相结合的开发保护方式。

强化生态碳汇支撑能力建设。加快建设全国统一的碳汇交易平台,将森林、草地、湿地、海洋等生态系统碳汇纳入统一的碳汇交易平台,并通过CCER碳汇项目推动全国碳汇交易平台衔接全国碳市场。因地制宜推进碳汇交易试点,重点在内蒙古、四川开展草原碳汇交易试点,在云南、黑龙江开展森林碳汇试点,在青海、湖北开展湿地碳汇交易试点,在山东、海南开展海洋碳汇交易试点。在特定高能耗行业,如电力、石化、供暖企业中集中设置碳排放监督岗位,对相关人员展开碳足迹测度和碳汇交易的专业培训。

3.5 加强碳中和与生物多样性保护统筹

通过对生物多样性的保护,寻找提高生态系统质量和稳定性、增加碳汇能力的有效方法,实现应对气候变化与保护生物多样性协同增效,形成生态系统韧性加强与生物多样性保护并进从而能够缓解气候变化的良性循环。将保护生态系统及生物多样性作为制定碳中和行动方案及实现应对气候变化自主贡献行动方案中的重要内容,也要把实现

碳中和目标作为保护生态系统及生物多样性工程中的重要内容,与基于自然的解决方案结合,增加生态系统碳汇。建立碳中和行动与生态系统生物多样性保护协同推进的产业发展政策、考核制度、资金机制、激励政策等。强化碳中和与保护生态系统与生物多样性的科技支撑,开展生态系统与生物多样性保护的碳中和评估研究,基于全生命周期的理念评估碳中和措施对生态系统生物多样性的影响,研究构建有利于保护生态系统与生物多样性的碳中和技术^[37]。加强微生物和气候变化相互影响、微生物群落对气候变化的作用和反馈机理、微生物多样性驱动陆地生态系统功能多样性等的研究,将微生物纳入碳中和行动的技术开发及相关政策和管理决策中。

4 结论

关于中国陆地生态系统碳汇相关研究表明:不同陆地生态系统类型的碳储量存在差异。森林生态系统是最大的碳库,森林资源总碳储量由1976年的12.51 Pg C增加到2018年的21.44 Pg C,草地生态系统碳储量为17.3~59.5 Pg C,灌丛生态系统碳储量在10.0~32.5 Pg C,湿地的土壤碳储量估算范围在3.7~16.7 Pg C,农田土壤碳储量为11.8~13.0 Pg C。中国陆地生态系统碳汇工作仍存在监测能力薄弱、核算标准不健全、碳汇交易机制不完善、碳中和与生物多样性统筹能力待加强、评估精度待提高、碳循环模型的开发应用基础弱等突出问题。未来发展方向和需要解决的关键科学问题需关注2个方面:一是需扩大陆地生态系统调查与观测的时空范围和精度,加强对特定生态系统和碳循环组分的观测,推动新的观测技术和手段在碳循环研究中的广泛应用。二是需加强生态系统碳循环模型的开发,建立人-自然耦合陆地生态系统碳循环过程模型提高陆地碳汇稳定性预测。

中国未来的陆地生态系统碳储量、固碳能力和固碳潜力的预估,以及生态碳汇提升行动方案的制定既是一个复杂的科学问题,又是一个涉及全局的经济社会长期发展和社会实践问题,本研究只是提

出了陆地生态系统碳汇在实现碳中和目标中的一些初步建议,更多的科学问题需要在实践中加以解决。

参考文献 (References)

- [1] Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(4): 641-651.
- [2] Yu G R, Li X R, Wang Q F, et al. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 97-109.
- [3] Rogel J J, Schaeffer M, Meinshausen M, et al. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(10): 105007.
- [4] IPCC. Global Warming of 1.5°C[R/OL]. [2022-05-30]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf.
- [5] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, et al. Natural climate solutions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(44): 11645-11650.
- [6] Qin Z C, Deng X, Griscom B, et al. Natural climate solutions for China: The last Mile to carbon neutrality[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(6): 889-895.
- [7] Qin Z C, Griscom B, Huang Y, et al. Delayed impact of natural climate solutions[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(2): 215-217.
- [8] Zheng T L, Zhu J L, Wang S P, et al. When will China achieve its carbon emission peak[J]. *National Science Review*, 2015, 3(1): 8-12.
- [9] 方精云, 王少鹏, 岳超, 等. 中国及全球碳排放——兼论碳排放与社会发展的关系[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [10] 孙若梅. 我国陆地生态系统保护成效与展望: 对标2030可持续发展议程目标[J]. *林业经济*, 2019, 41(10): 10-16.
- [11] 国家林业和草原局. 加强草原生态修复 筑牢生态安全屏障——访国家林业和草原局草原管理司副司长刘加文[EB/OL]. (2018-10-25)[2022-04-01]. <http://www.forestry.gov.cn/main/72/20181026/093146414949311.html>.
- [12] Mi X C, Feng G, Hu Y B, et al. The global significance of biodiversity science in China: An overview[J]. *National Science Review*, 2021, 8(7): nwab032.
- [13] Huang G P, Ping X G, Xu W H, et al. Wildlife conserva-

- tion and management in China: Achievements, challenges and perspectives[J]. *National Science Review*, 2021, 8(7): nwab042.
- [14] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(1): 38-47.
- [15] 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.
- [16] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [17] Tian H Q, Xu X F, Lu C Q, et al. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G2): G02011.
- [18] Ji J J, Huang M, Li K R. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 885-898.
- [19] Ge S D, Zhao S Q. Organic carbon storage change in China's urban landfills from 1978—2014[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(10): 104013.
- [20] Zhu X J, Yu G R, He H L, et al. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: Results from upscaling network observations[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 52-61.
- [21] Yao Y T, Li Z J, Wang T, et al. A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253-254: 84-93.
- [22] He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J]. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [23] Cao M K, Tao B, Li K R, et al. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [24] Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [25] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W, et al. Contribution of increasing CO₂ and climate change to the carbon cycle in China's ecosystems[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(1): G01018.
- [26] Jiang F, Wang H W, Chen J M, et al. Nested atmospheric inversion for the terrestrial carbon sources and sinks in China[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5311-5324.
- [27] Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijckx I T, et al. Net terrestrial CO₂ exchange over China during 2001-2010 estimated with an ensemble data assimilation system for atmospheric CO₂[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(6): 3500-3515.
- [28] Zhu X J, Yu G R, He H L, et al. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: Results from upscaling network observations[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 52-61.
- [29] Yang D X, Zhang H F, Liu Y, et al. Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using CarbonTracker-China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(8): 965-976.
- [30] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981 to 2000[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [31] Jiang F, Chen J M, Zhou L X, et al. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22130.
- [32] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [33] 蔡兆男, 成里京, 李婷婷, 等. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(5): 602-613.
- [34] 李双成. 生态碳汇市场刍议[J]. *当代贵州*, 2022(1): 79.
- [35] 王国胜, 孙涛, 咎国盛, 等. 陆地生态系统碳汇在实现“双碳”目标中的作用和建议[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(4): 13-19.
- [36] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 等. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [37] 欧阳海龙, 董实忠, 高素娟. 以生态碳汇助推碳中和的武汉 NbS 实践路径[J]. *长江技术经济*, 2021, 5(4): 38-44.

Current status, problems and suggestions of terrestrial ecosystems carbon sink in China

DONG Zhanfeng¹, BI Fenfen¹, JI Yunqing^{1,2}

1. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

2. University of Science and Technology Beijing, State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, Beijing 100083, China

Abstract This paper analyzes China's exploration and practice on the green development road since the 18th Communist Party of China National Congress, and points out that China has made great progress and remarkable achievements on green development, including economic structure, energy utilization, ecological environmental protection, green industry, life-style, institutional system and contribution to the global. In the future, China's green development should take carbon reduction as the key strategy, coordinate and promote the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction, optimize the development and protection pattern of territorial space, promote the high-quality development of energy, strengthen the innovation and application of key technologies, and continue to deepen the reform of ecological civilization system.

Keywords ecosystem; biodiversity conservation; terrestrial ecological carbon sink; carbon neutrality ●



(责任编辑 刘志远)