

DOI: 10.5846/stxb202204020842

刘坤, 张慧, 孔令辉, 乔亚军, 胡梦甜. 陆地生态系统碳汇评估方法研究进展. 生态学报, 2023, 43(10): 4294-4307.

Liu K, Zhang H, Kong L H, Qiao Y J, Hu M T. An overview of terrestrial ecosystem carbon sink assessment methods towards achieving carbon neutrality in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4294-4307.

陆地生态系统碳汇评估方法研究进展

刘 坤¹, 张 慧^{1,2,*}, 孔令辉¹, 乔亚军¹, 胡梦甜¹

¹ 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

² 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 地理与遥感学院, 南京 210044

摘要:“碳中和”是我国作出的一项重大的国家战略决策, 陆地生态系统碳汇作为碳增汇的重要组成部分, 在碳中和目标实现的过程中发挥着重要的作用。但当前基于不同观测数据和方法的陆地碳汇计算仍有很大的不确定性, 为了全面了解陆地生态系统碳汇分布特征, 提高陆地生态系统碳汇评估的准确性, 梳理了近年来关于陆地生态系统碳汇评估的国内外研究进展, 从“自下而上”和“自上而下”两类途径阐述了陆地生态系统碳汇评估的主要方法(样地清查法、涡度相关法、模型模拟法和碳同化反演法)的主要原理和特征, 优势和缺陷, 及在不同尺度碳汇研究中的应用, 并从土地利用/覆盖变化、气候因素(大气 CO₂ 浓度、氮沉降)、环境因素(太阳辐射、温度、降水)等因素阐述了陆地系统碳汇主要驱动因子; 分析了我国陆地生态系统碳汇的主要特征及时空变化趋势, 并从人类活动(生态工程)和环境因素阐述了我国陆地生态系统碳汇的驱动因素; 最后, 展望了新的监测手段和评估方法在提升陆地生态系统碳汇评估精度中的作用, 从而更好的服务于我国“碳中和”的长远目标。

关键词: 陆地生态系统; 碳汇; “碳中和”; 评估方法

An overview of terrestrial ecosystem carbon sink assessment methods towards achieving carbon neutrality in China

LIU Kun¹, ZHANG Hui^{1,2,*}, KONG Linghui¹, QIAO Yajun¹, HU Mengtian¹

¹ Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

² Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Terrestrial ecosystem carbon sink is an important component of carbon sink in China, which plays a key role in carbon peaking and carbon neutrality goals achievement. However, there is large uncertainty in estimating terrestrial ecosystem carbon sink due to different types of observation data and assessment methods. To better understand the characteristics of terrestrial ecosystem carbon cycle and improve the accuracy of carbon sink estimation, this review summarized major research progresses in terrestrial carbon sink estimation in China and around the world, and introduced the advantages and disadvantages of major assessment methods (field inventory, eddy covariance method, ecological modelling, and the atmospheric flux inversion method) from bottom-up and top-down ways. Besides, this review clarified major spatial and temporal patterns and change trend, and analyzed the main driving factors of carbon sink from the perspective of land-use/land-cover, climate factors (CO₂ concentration and N deposition), and environmental factors (solar radiation, temperature, and precipitation). Besides, this paper analyzed the main characteristics and temporal and spatial trends of carbon sinks in terrestrial ecosystems in China, and expounded the driving factors of terrestrial ecosystems carbon sinks in China from the perspective of human activities (ecological projects) and environmental factors. On this basis, this

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX230405, GYZX220103); 黑龙江省生态环境保护科研项目(HST2022ZC005)

收稿日期: 2022-04-02; **采用日期:** 2023-03-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghui@nies.org

review expected the application of new means and methods for improving carbon sink estimation precision and for better serving long-term goal of carbon neutral.

Key Words: terrestrial ecosystem; carbon sink; carbon neutral; assessment method

自工业革命以来,人类对化石燃料的消耗,导致 CO₂等温室气体被大量释放,大气中 CO₂浓度从 1750 年约 278 μmol/mol 增加到 2021 年 11 月的 415.01 μmol/mol (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>),从 2006 年开始中国取代美国成为世界上最大的 CO₂排放国^[1],2020 年的碳排放量约为 10.7 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g = 10 亿 t) CO₂当量,占同年全球排放量的 31%^[2],未来中国实现碳中和所需的碳减排压力远超过世界上其他任何一个发达国家^[3]。为此,2020 年我国提出:“二氧化碳排放力争在 2030 年达到峰值,2060 年实现碳中和目标”,这不仅是实现我国自身可持续发展的需求,也是展现我国作为负责任大国的作为和担当。减少 CO₂排放和增加碳汇是最主要的两种实现“碳中和”目标的手段,而碳汇增加的重点在于提高生态系统的质量和稳定性,巩固提升生态系统的碳汇能力。

生态系统碳循环根据排放和吸收之间的关系可以分为碳源和碳汇,其中碳源表示生态系统的排放量大于吸收量,而碳汇则表示生态系统的吸收量大于排放量。根据最新的生态系统碳汇的定义:“生态系统碳汇是指不同生态系统相关关联共同对于全球生态系统碳平衡的作用,不仅包括传统的植树造林、增加绿化面积等措施对于碳吸收的贡献,也包括草原、湿地、海洋等生态系统吸收大气中二氧化碳的过程,同时也涵盖土壤、永久性冻土固定的碳储量”^[4]。中国陆地生态系统占全球陆地面积的 6.4%,其净 CO₂的吸收量占全球吸收量的 10%—30%,是全球和区域碳循环及其模式研究的重点地区。根据预测,在 2060 年中国陆地生态系统碳汇潜力将达到 0.36 Pg C/a,抵消的同期化石燃料燃烧和工业活动导致的碳排放的比例将达到 43%^[5]。因此,在中国开展陆地生态系统碳汇研究不仅是改进生态系统管理、保障生态安全的急迫需求,同时也为实现“碳中和”目标路线图和时间表提供科学基础^[6]。

近年来,随着科技水平的进步,适用于不同时空尺度的碳汇水平观测技术和碳汇强度评估方法不断地得到发展和完善。在全球尺度和中国尺度的陆地生态系统碳汇评估研究中,国内外发表了大量的基于不同估算方法的文章(表 1),根据数据的来源及模型方法的原理可以将陆地生态系统碳汇方法分为“自下而上”(bottom-up)和“自上而下”(top-down)两类^[17]。“自下而上”方法利用地面调查数据、气象观测数据,使用模型方法模拟区域或全球陆地生态系统碳汇,主要包括地表植被生物量和土壤碳的地面调查与清查方法、涡度相关法、生态过程模型等方法^[22]。常用的模型包括通过温度、降水等气候因子,海拔、坡度、坡向、经纬度等地理因子与植被生物量、蓄积量之间的关系来估算陆地生态系统生产力的经验模型^[23—24];通过考虑植被生长与光能利用效率(光合有效辐射)以及植被内部生理生态过程(光合作用、呼吸作用等)来估算陆地生态系统尺度生产力的生态过程模型^[25]。“自上而下”方法主要利用碳同化反演技术,基于不同平台的(地基平台、航空遥感平台、卫星遥感)大气温室气体浓度观测,结合气象场数据和大气辐射传输模型计算陆地生态系统碳汇强度^[12,26],常用的方法有基于大气 CO₂浓度的碳同化方法以及卫星遥感数据反演方法^[27]。

本文根据生态系统碳汇评估的“自下而上”和“自上而下”两种途径,分析讨论不同方法在陆地生态系统碳汇估算中的应用、以及各方法的优势及缺陷,阐明主要驱动因子对陆地生态系统碳汇的影响;总结中国陆地生态系统的碳汇特征及主要影响因素,最后,基于目前研究存在的挑战,展望了新的理论、方法和技术手段在陆地生态系统碳汇研究中的应用,为更准确的估算陆地生态系统碳汇、更好的支撑国家碳中和行动方案的制定和实施提供参考。

1 “自下而上”碳汇估算方法

1.1 样地清查法

利用清查法评估陆地生态系统的研究包括多个方面:基于生物量组分的碳汇估算,生态系统各组分碳汇

表 1 全球尺度和中国区域尺度陆地生态系统碳汇强度估计

Table 1 Estimation of carbon sink of terrestrial ecosystem in China and around the world

序号 No.	研究区域 Region	模型方法 Method	碳汇强度/(Pg C/a) Carbon sink	研究时期 Period	参考文献 References
1	全球	“自下而上”	2.8	1948—2009	[7]
2			1.1±0.8(森林碳汇)	1990—2007	[8]
3			1.6±0.5	1995—2014	[9]
4			3.0±0.8	2007—2016	[10]
5		“自上而下”	1.4±0.8	1991—1997	[11]
6			2.3±0.9	1995—2014	[9]
7			1.7±0.2	1996—2007	[12]
8			2.22	2010—2015	[13]
9	中国	“自下而上”	0.177±0.073	1980—1999	[14]
10			0.179	1961—2005	[15]
11			0.224±0.141	1990—2009	[16]
12			0.33	2006—2009	[17]
13			0.966	2001—2010	[18]
14			1.11±0.38	2010—2016	[19]
15		“自上而下”	0.35±0.33	1996—2005	[14]
16			0.27±0.507	1990—2009	[16]
17			0.33	2001—2010	[20]
18			0.83±0.47	2010—2015	[21]
19			0.66±0.52	2010—2016	[19]

水平评估,陆地生态系统碳汇强度的评估和碳汇强度的变化趋势。郭兆迪等根据中国多期森林资源清查数据,按照不同森林类型分别统计天然林、人工林、经济林和竹林的面积和蓄积数据,利用生物量转换因子法计算了中国 1977—2008 年间森林生物量的碳汇情况,得到天然林和人工林(63.3 Tg C/a(1 Tg = 10¹² g))、经济林(4.0 Tg C/a)和竹林(2.9 Tg C/a)的年平均碳汇^[9]。方精云等根据清查数据估算了 1981—2000 年间中国陆地生态系统各组分(森林、草地、灌木丛、农作物、土壤)碳汇,认为森林生态系统的森林生物量、地表凋落物、木质残体和土壤有机碳等组分整体表现出明显的碳汇,并肯定了我国植树造林、人工林面积增加对生态系统碳汇的重要贡献^[28—29]。由全球变化研究国家重大科学研究计划项目经费支持的研究结果表明:2004—2008 年间中国森林凋落物碳和木质残体的碳储量为(925±54) Tg,1988—2008 年,森林凋落物碳和木质残体的年平均碳汇为(925±54) Tg C/a^[30]。在对陆地生态系统碳汇潜力预测上,刘迎春等基于国家林业和草原局第一至六次森林资源清查数据,采用蓄积量—生物量转换方程,探讨了在基线情景下(气候条件、干扰情况、管理方式、森林面积、树种组成情况不变)2000—2200 年森林碳储量变化^[31];Zhang 等在基于森林生物量碳密度恒定的情况下,探讨了 2000—2025 年间在“退耕还林还草”环境保护政策引导下,森林和草地面积增加条件下陆地生态系统碳汇变化^[32]。Pan 等通过收集全球不同地区的森林调查数据以及历史观测数据,估算了全球森林在 1990—2007 年间碳汇强度变化,前十年(1990—1999)的全球净森林碳汇强度为(1.0±0.8) Pg C/a,后期(2000—2007)的碳汇强度略高于前十年为(1.2±0.8) Pg C/a^[16]。基于样地清查法的陆地生态系统碳汇评估方法明确、技术简单,可以直接获得最为准确和可靠的数据。但陆地生态系统具有较高的空间异质性,需要较广的空间范围和较为精确的采样精度,一般都需要靠抽样方法进行总体精度控制,工作量大,耗时长,而且样地清查法没有考虑陆地生态系统的全部类型,该方法多侧重于森林、草地生态系统等占比较高的生态系统,对于灌丛、湿地、荒漠、冻土、城市等生态系统的观测数据则较少,如中科院实施的“碳专项”项目耗时 5 年在全国也仅调查了 14371 个调查样方(森林样方 7800 个,草地样方 4030 个,灌丛样方 1200 个,农田样方 1341 个),且并未涵盖所有的陆地生态系统^[33]。此外,基于样地清查法的碳汇通常基于碳储量的年变化量计算得到,碳储量的年变化量远远小于陆地生态系统的碳储量,碳汇测定误差较大;同时该方法没有考虑生态系统内的土壤呼吸、水蚀、风蚀等因素造成的碳的横向转移过程。

1.2 涡度相关方法

涡度相关法是基于微气象理论的目前唯一能直接测量大气与植被冠层及土壤间物质循环和能量交换的观测技术^[34],实现了生态系统尺度的温室气体交换、能量平衡和生产力等功能与过程涉及的生态现象观察、生态要素观测、生态系统功能变化观测的融合^[35]。目前全球通量观测网络联盟(FLUXNET)建立起 900 多个观测样点,形成全球性和区域性的覆盖不同气候带和植被区系的通量观测网络,包括美国通量网、欧洲通量网、亚洲通量网、中国通量网等共 42 个国家、23 个区域性通量研究网络^[36]。中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)于 2002 年建成,截止目前拥有 80 多个台站,包括森林、草地、农田、湿地、荒漠、水域生态系统^[37],通过应用微气象法进行生态系统 CO₂和水热通量长期定位观测的关键技术,为全球碳平衡与全球变化研究提供中国典型陆地生态系统碳、水汽、氮通量的长期观测数据。

通过构建区域、国家及全球尺度的通量观测网络,可以研究不同时间尺度和空间尺度的陆地生态系统碳汇强度。Fu 等通过借助欧洲中期天气预报中心(ECMWF)1979—2013 年间的 CO₂通量观测数据,并结合地面植被数据定量分析了此间北半球、南半球和全球尺度的陆地生态系统 NEP(Net ecosystem productivity)长期趋势与年际变异的特征规律,发现从长期趋势来看,北半球和南半球对全球 NEP 贡献率相当,年际变化上,北半球的贡献率更大(58%)^[38]。Pieter 等通过收集陆地和海洋的 CO₂的碳通量数据,使用大气环流模型(general circulation model(GCM))计算了 1981—1987 年间全球陆地生态系统碳源汇水平,认为陆地生态系统的碳汇水平远高于海洋生态系统^[39]。在区域尺度上,Yu 等根据碳通量观测数据发现:相同纬度的中国及东亚地区的亚热带森林碳汇能力要高于北美及欧洲地区森林碳汇量^[40],Chen 等的研究结果则表明亚热带和温带森林的碳汇能力要高于热带雨林地区和北方森林地区^[41]。此外,涡度相关碳通量技术也应用于不同气候区和植被类型的生态系统碳汇强度研究,包括寒带草原和温带草原^[42]、森林生态系统^[43]、湿地生态系统^[44]、荒漠生态系统^[45]。基于涡度相关方法的陆地生态系统碳汇研究,可以实施监测生态系统尺度上的陆地与大气碳交换,减少样地清查法中的数据误差,长期的点位观测可以规避生态环境数据的短期波动带来的不确定性,有利于探讨生态系统碳循环过程对气候变化的相应机制。但是,涡度相关方法设备布设要求高,下垫面地形复杂的情况会影响设备运行,且周围会有建筑物限高要求;通量塔数量偏少、设置不合理、覆盖范围小不能完全反映测量生态系统的景观异质性;因涡度测量仪器和工作原理的缺陷,观测数据存在缺失,不能记录到光合作用的碳吸收和呼吸的作用的碳排放数据,对于空缺碳通量数据的填补不同方法误差较大;仪器还不能准确区分记录的异常数据是生态系统碳循环的真实扰动数据还是无效记录数据;由于夜间的湍流被抑制会导致测量系统响应不足,测量数据值偏低,测量数据存在偏移现象(植被在休眠期和非光合作用时期记录到 CO₂吸收现象)^[46];对地表可用能量存在低估现象,能量平衡不闭合。

1.3 模型模拟法

模型模拟法是应用数学方法定量描述陆地生态系统碳汇与生态环境因子观测值之间的关系,对当前碳汇状况进行评估,和对未来碳汇情景进行预测。根据模型在结构、参数及算法上的不同,可以分成经验模型和生态过程模型。样地清查法中应用的异速生长模型、蓄积量—生物量转换模型、全碳库模型等都属于经验模型,Piao 等利用 34 个固定样点数据与从 NOAA-AVHRR 遥感影像提取的归一化植被指数(NDVI)建立经验回归方程,并假设地上/地下生物量比值为常数,随后将实测调查点通过尺度上估算全国碳汇为(0.19—0.26) Pg C/a^[21]。经验模型不考虑环境因素的影响,模型参数没有特定的生态学含义,不能从机理上对碳汇过程进行解释。近年来,随着对陆地生态系统碳循环过程中涉及的生物物理化学过程认识的逐步深入,越来越多的研究者通过分析太阳辐射传输、光合作用和呼吸作用、养分和水分循环等过程,将与过程相关的植被冠层结构(叶面积指数、覆盖度、植被高度、生物量)、辐射吸收(PAR、反照率、净辐射、地表温度、冠层温度、土壤温度)、生化(叶绿素、胡萝卜素、含氮量、叶片含水量)、功能(叶绿素荧光)参数;空气动力学温度、水汽压差、辐射、水热参数等物理参数作为驱动因子,构建基于生态系统碳循环过程的机理模型。根据驱动因子模型进一步可以分为静态模型和动态模型,主要的静态模型包括 CENTURY、InTEC 和 Biome-BGC 等,在模拟期间,驱动因子

(气候、植被)维持基线情景,而动态模型种的植被物种分布会随着气候和土壤条件的变化发生改变,常用的模型有 IBIS、CEVSA、BIOME3、LPJ-DGVM 等。Cao 等利用 CEVSA 模型估算了中国 1981—2000 年间由于气候变化和 CO₂ 浓度增加导致的陆地生态系统的净初级生产力和净生态系统生产力(碳汇)的变化,结果表明在此期间中国陆地生态系统由碳源向碳汇转变,为(-0.32—0.25) Pg C/a^[47]。He 等基于气候因子、土地利用数据和土壤数据,使用 CEVSA2、BEPS 和 TEC3 种生态过程模型估算了 1982—2010 年间的陆地生态系统碳汇强度,结果表明在 1982—2000 年间中国陆地生态系统是明显的碳源,2000 年后转变为明显的碳汇^[48]。利用生态过程模型模拟陆地生态系统碳汇,可以阐明生态系统组分与环境因子之间的交互作用,通过对因子进行归因分析,评价不同因子对模型的贡献,同时也可以对未来陆地生态系统碳汇大小进行预测。但不同类型的模型在原理、结构和参数上存在差别,导致在陆地生态系统碳汇评估中存在很大的不确定性;模型输入参数的固有误差和测量误差、模型参数相关作用产生的误差在应用过程中产生的误差传递最终都会误差累计到碳汇计算中;传统经验模型缺少对估算结果机理性解释,物理模型(辐射传输、光能利用率模型)较为抽象,难以理解且缺少对于土壤呼吸的模拟;过程模型将碳汇复杂的生物物理化学过程简化为几个主要的驱动因子,关键参数依赖经验设置,降低了碳汇估算的准确性;模型方法很少会将生态系统人工管理措施考虑在内(表 2)。

表 2 不同陆地生态系统碳汇估算方法的优缺点及发展趋势

Table 2 The advantages, disadvantages and development tendency of different methods

模型方法 Methods	优点 Advantages	缺陷 Disadvantages	发展趋势 Tendency	
“自下而上” Bottom-up	样地清查法	方法明确、技术简单,可以直接获得最为准确和可靠的数据	(1)工作量大,耗时长;(2)样地清查法没有考虑陆地生态系统的全部类型;(3)碳汇通常基于碳储量的年变化量计算得到,碳储量的年变化量远远小于陆地生态系统的碳储量,碳汇测定误差较大;(4)没有考虑生态系统内的土壤呼吸、水蚀、风蚀等因素造成的碳的横向转	(1)生态系统全组分碳汇估算;(2)陆地生态系统碳汇动态变化(3)统一标准的大尺度陆地生态系统碳汇观测体系
	涡度相关法	能直接测量大气与植被冠层及土壤间物质循环和能量交换	(1)通量塔数量偏少,设置不合理,覆盖范围小不能完全反映测量生态系统的景观异质性;(2)观测数据存在缺失,对于空缺碳通量数据的填补不同方法误差较大;(3)仪器还不能准确区分记录的异常数据是生态系统碳循环的真实扰动数据还是无效记录数据;(4)由于夜间的湍流被抑制会导致测量系统响应不足,测量数据值偏低,测量数据存在偏移现象;(5)对地表可用能量存在低估现象,能量平衡不闭合。	(1)由单一碳水通量观测扩展到多种温室气体通量集成观测;(2)单一尺度通量观测扩展到多尺度多源数据整合;(3)区域和全球碳通量网络建设
	模型模拟法	阐明生态系统组分与环境因子之间的交互作用,可以对未来陆地生态系统碳汇大小进行预测	(1)不同类型的模型在原理、结构和参数上存在差别,导致在陆地生态系统碳汇评估中存在很大的不确定性;(2)模型输入参数的固有误差和测量误差、模型参数相关作用产生的误差在应用过程中产生的误差传递最终都会误差累计;(3)过程模型将碳汇复杂的生物物理化学过程简化为几个主要的驱动因子,关键参数依赖经验设置;(4)模型方法很少会将生态系统人工管理措施考虑在内。	(1)生态过程模型参数本土化;(2)兼容多尺度的生态系统碳汇模型;(3)基于模型的陆地生态系统碳汇不确定性分析;(4)自然-人文耦合的陆地生态系统碳汇模型
“自上而下” Top-down	碳同化反演法	大空间尺度陆地生态系统碳汇动态监测	(1)遥感数据的时空分辨率较低,不能准确区分不同类型生态系统碳汇;(2)受传感器特性、大气辐射偏差、星下点角度等因素的影响,遥感数据出现的偏差;(3)大气 CO ₂ 观测点的数量与分布,大气传输模型和同化方法的差异都影响陆地生态系统碳汇的准确性	(1)大气 CO ₂ 和同位素观测网建设、发展新同化方法(2)高分辨率、长时间序列陆地生态系统碳汇遥感产品;(3)“自下而上”和“自上而下”方法相结合,发展地面观测、卫星遥感、模型同化协同的陆地生态系统碳汇估算方法

2 “自上而下”碳汇方法

陆地生态系统类型多样,分布范围广、异质性强,仅依靠地面观测数据难以满足大尺度陆地生态系统碳汇估算的需求。因此,从数据获取角度出发,需要将地表点状观测拓展为空间上的面上监测,将定点定时的静态观测数据拓展为随时随地的动态观测,将局部的离散观测拓展为全局的连续观测^[49]。从 20 世纪 70 年代开始多光谱卫星、高光谱卫星、热红外传感器、激光雷达传感器、碳卫星陆续的发射并应用于陆地生态系统碳汇研究(表 3)。当前,应用遥感数据估算碳汇的发展趋势主要表现在 4 个方面:(1)通过分析遥感数据植被指数、叶面积指数与地表植被的生产力的相关关系,构建统计模型估算生态系统生产力^[50]。Zhu 利用 AVHRR、MODIS 和 CYCLOPES 卫星传感器获取的 1982—2009 年间叶面积指数时间序列数据,使用全球生态系统模型分析了全球陆地植被生长季累积叶面积指数的变化趋势及其驱动因子^[51]。(2)根据遥感数据的建立光能利用率模型估算陆地生态系统的碳汇能力,常见的模型包括 CASA 模型^[52],BEPS 模型^[53],基于 MODIS 卫星数据的 MODIS-GPP 模型^[54],与涡度相关法相结合的 EC-LUE 模型^[55]。Yu 利用 MODIS 卫星遥感土地覆盖数据和 1996—2000 年的 FPAR、站点通量、气象、氮沉降等资料,对中国亚热带季风区森林碳汇进行了全面评估,得出较高的碳汇估计(0.72 ± 0.08) Pg C/a)并将此碳汇归因于中国植树造林和氮沉降的影响^[40]。(3)基于卫星遥感数据中的日光诱导叶绿素荧光(SIF)与地表植被生产力之间的关系计算陆地生态系统碳汇^[56]。(4)利用大气 CO₂柱浓度观测数据,基于碳同化的方法反演生态系统碳通量^[7],这是“自上而下”碳汇估算方法的基本原理。

表 3 陆地生态系统碳汇评估常用卫星传感器参数

Table 3 The parameters of satellite sensor used in Carbon sink assessment

序号 No.	发射时间 time	卫星名称 Satellite	传感器名称 Sensor	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	波长范围/nm Wavelength range
1	1972	Landsat-1	Multispectral Scanner (MSS)	60 m	18 d	500—1100
2	1978	NOAA-6	Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)	1.1 km	1 d	250—1150
3	1982		MSS 和 Thematic Mapper (TM)	30 m, 120 m	16 d	450—1250
4	1985	Landsat-5	MSS, TM	30 m, 120 m	16 d	450—1250
5	1985	SPOT-1	High-resolution Visible (HRV)	10—20 m	1—3 d	510—890
6	1988	IRS-1A	Linear Image Self-Scanning (LISS I, LISS II)	36—72 m	22 d	460—860
7	1990	SPOT-2	HRV	10—20 m	1—3 d	510—890
8	1997	IRS-1D	LISS	5.8—70 m	25 d	520—1700
9	1997	Obview-2	Sea Viewing Wide Field Sensor (Sea WiFS)	1.1 km	16 d	400—880
10	1998	SPOT-4	HRVIR, VEGETATION	HRVIR; 10—20 m; VEGETATION; 1.15 km	2—3 d	430—1750
11	1999	Landsat-7	Enhanced Thematic Mapper (ETM+)	15—60 m	16 d	450—1250
12	1999	IKONOS-2	High Resolution Sensors	0.82—4 m	3 d	450—853
13	1999	Terra	MODIS, ASTER	MODIS; 250—1000 m; ASTER; 15—90 m	MODIS; 1 d; ASTER; 16 d	MODIS; 4591438.5; ASTER; 600—1165
14	2000	EO-1	Hyperion, Advanced Land Image (ALI)	Hyperion; 30 m ALI; 10—30 m	16 d	Hyperion; 400—2500; ALI; 480—2350
15	2001	Quickbird	High Resolution Sensors	65 cm—2.9 m	1—3.5 d	450—900
16	2002	SPOT-5	HRG, VEGETATION	HRG; 5—20 m VEGETATION; 1.15 km	2—3 d	430—1750

续表

序号 No.	发射时间 time	卫星名称 Satellite	传感器名称 Sensor	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	波长范围/nm Wavelength range
17	2002	AQUA	MODIS	250—1000 m	1 d	459—14385
18	2003	Obview-3	Obview-3	1—4 m	3 d	450—900
19	2006	ALOS	AVNIR-2	10 m	46 d	400—890
20	2007	Worldview-1	WV-1	0.5 m	1.7 d	400—900
21	2008	HJ-1A	HIS	100 m	31 d	430—950
22	2008	GeoEye-1	GIS-MS	0.46—1.84 m	2—8 d	450—920
23	2009	GOSAT	thermal and near-infrared sensor for carbon observation (TANSO)	0.2 cm	3 d	370—14300
24	2009	WorldView-2	WV-110; WV60	0.46	1.1 d	450—1040
25	2009	NOAA-19	AVHRR	1.1 km	1 d	580—12400
26	2011	ResourceSat2	LISS-3; LISS-4	LISS-3: 56 m LISS-4: 5.8 m	24 d	520—860
27	2012	SPOT-6	New AstroSat Optical Modular Instrument (NAOMI)	2.2—8.8 m	1—5 d	0.45—0.89
28	2013	GF-1	PMS	2—8 m	4 d	450—900
29	2013	Landsat-8/LDCM	OLI, TIRS	15—30 m	16 d	430—12510
30	2013	SkySat-1	Skybox Image Sensor	0.9—2 m	1.8 d	450—900
31	2014	SPOT-7	NAOMI	2.2—8.8 m	1—5 d	450—890
32	2014	WorldView-3	WV-3	0.3 m	1—4.5 d	450—2245
33	2014	GF-2	PMS	1—4 m	4 d	450—900
34	2014	OCO-2	HRMX	0.2—0.7 cm	16 d	760—2081
35	2015	Sentinel-2A	MultiSpectral Instrument (MSI)	10—60 m	10 d	443—2190
36	2016	TanSat	ACGS, CAPI		16 d	760—2082
37	2018	GF-5	VIMS	20—40 m	51 d	450—12500
38	2022	EnMAP	HIS	30 m	27 d	420—2450

基于 CO₂浓度观测数据的大气反演模型是近年来发展的陆地生态系统碳汇计算的新技术。它可以获取地面及高空的大区域的 CO₂三维空间数据,远距离实现对 CO₂气体的实时监测,不仅可以获取化石燃料燃烧排放的 CO₂信息,也可以监测生态系统中地-气 CO₂浓度变化^[12-13]。在 2019 年新修订的 IPCC 国家温室气体清单指南中,明确增加了基于 CO₂浓度观测的自上而下碳同化反演估算温室气体源-汇状况的方法,并可以作为独立数据验证排放因子法和过程模型法等自下而上的碳源汇估算模型^[57]。

为了弥补地面 CO₂观测站点数量少的不足,多个国家先后发射了碳卫星应用于监测空间 CO₂浓度变化^[58-59]。联合卫星遥感数据和地面大气 CO₂浓度、站点通量数据和遥感地表参数等数据是全球碳同化系统的发展趋势。在全球尺度上,Ingrid 等应用 Carbon Tracker 全球碳同化反演系统估算了 2001—2015 年间全球碳汇情况;在区域尺度上,基于 Carbon Tracker 改进模型,成功实现了对亚洲^[12]、欧洲^[60]、南美洲^[61]等地区的陆地生态系统碳汇分布的估算。在中国,多个根据不同同化方法的全球碳同化系统已经开发并应用于生态系统碳循环监测。Tian 等基于 POD-4DVar 集合四维变化同化方法发展了 Tan-Track 中国碳卫星联合同化系统^[62]。Zhang 基于亚洲和中国地区的 CO₂观测数据,使用 CarbonTracker-China 全球碳同化系统,反演得到 1°×1°分辨率的碳通量数据,发现在 2001—2010 年间中国陆地生态系统平均碳汇为 0.33 Pg C/a^[26]。Wang 基于中国 6 个地区的温室气体观测本底站碳监测数据和地面调查数据,GOSAT 和 OCO-2 卫星温室气体浓度观测结果和生态系统全球遥感数据,使用 Geos-Chem 全球反演模型,估算 2010—2016 年间我国陆地生态系统的碳汇状况,结果表明,我国陆地生态系统年平均碳汇约为 (1.11±3.8)Pg C/a,约占我国大陆地区年化石燃料燃烧排放量 45%^[25]。

“自上而下”方法也是应用于陆地生态系统碳汇驱动因子分析的主要方法。陆地生态系统碳汇受多种因素影响,不仅包括土地利用/覆盖变化(森林砍伐、植树造林)等人类活动的直接影响,也包括 CO₂ 浓度增加、氮沉降、气溶胶等环境变化的影响,及温度、降水和光照等气候因素的影响^[63]。Piao 等使用大气反演模型估算了 1998—2012 年间全球陆地生态系统碳汇情况并利用陆地生态系统模型分析了主要的驱动因素,他认为该期间全球陆地生态系统的碳汇为(0.17±0.05)Pg C/a,全球陆地生态系统的碳汇量呈增加趋势,原因在于受热带地区森林面积减少速度下降,北温带地区造林面积的增加^[64]。研究表明大气 CO₂ 浓度与陆地生态系统碳汇呈正相关关系,根据 1995—2014 年间全球 CO₂ 浓度变化与陆地生态系统碳汇之间的关系,大气 CO₂ 浓度每增加 100×10⁻⁶,碳汇增加(3.1—8.1)Pg C/a^[17]。在北美洲地区,根据 1980—1993 年间的陆地生态系统数据,随着 CO₂ 浓度上升,碳汇强度增加 0.08 Pg C/a^[65];通过对 1950—2000 年间欧洲大陆地区陆地生态系统碳汇强度增加的驱动力分析表明 CO₂ 浓度增加的贡献率占 61%^[66]。但是,“自上而下”的方法也存在一定的缺陷,遥感数据的时空分辨率较低、模型理论研究支撑不足,不能准确区分不同类型生态系统碳汇;受传感器特性、大气辐射偏差、星下点角度等因素的影响,遥感数据出现的偏差;大气 CO₂ 观测点的数量与分布、大气传输模型和同化方法的差异都影响陆地生态系统碳汇的准确性。

3 陆地生态系统碳汇驱动因子

通过对近年来中国陆地生态系统碳汇研究的文献进行梳理,总结相关的研究方法和结果,通过“自下而上”和“自上而下”两种方法估算的中国陆地生态系统碳汇大小为(0.07—1.91)Pg C/a^[67-69],其中,基于样地清查法估算的碳汇介于(0.13—0.31)Pg C/a^[21,28],基于涡度相关法估算的中国区域碳汇介于(0.18—1.91)Pg C/a^[69-71],基于模型法模拟的碳汇为(0.07—0.29)Pg C/a^[7,22,72]，“自上而下”方法反演得到的陆地生态系统碳汇为(0.28—1.11)Pg C/a^[26,73-74]。通过比较两类碳汇估算方法可以看出,基于不同方法的我国陆地生态系统碳汇水平存在着明显的差异,“自上而下”方法计算的碳汇要普遍高于“自下而上”方法,这主要是因为“自上而下”方法假设化石燃料和非生物质燃料燃烧完全释放为 CO₂,未考虑其他的污染气体和非气态碳化合物,从而高估了大气中 CO₂ 的排放量^[75-76],而基于“自下而上”的方法对于森林产品收获、水体沉积等从陆地生态系统碳库中转移部分缺乏考虑^[77-78];此外,对于陆地生态系统的主体森林生态系统碳汇计算也存在很大的不确定性:对于森林定义的不同统计的森林面积也有区别,森林碳汇往往只针对连片的森林乔木,对经济林、灌木林和其他类型林木较少纳入计算,这造成了森林生态系统碳汇水平的低估^[33]。从中国陆地生态系统碳汇强度历史变化趋势来看,学者对 20 世纪后半叶中国陆地碳汇变化有着较大的争议,一些研究认为从 60 年代到 90 年代,碳汇水平呈微弱的下降趋势^[68,79],而有些研究则认为碳汇不存在明显的变化^[22]。对于 21 世纪以来的碳汇水平,大多数研究都认同中国陆地生态系统碳汇强度在增加^[73,80]。通过对未来碳汇水平的预测,到 2060 年中国陆地生态系统碳汇强度介于(0.19—0.52)Pg C/a^[81-83],将会抵消 2.8—18.7%的碳排放^[84],为我国实现“碳中和”发挥着举足轻重的作用。

在中国,气候因素对于陆地碳汇的驱动作用要高于其他因素。Zhang 等基于碳通量数据使用 6 个生态系统碳汇模型定量分析了中国陆地碳汇年际变化的区域贡献与气候变化之间的关系,结果表明中国季风区对全国陆地生态系统碳汇的年际变化起主导作用(86%),相较于其它区域的气候因子,降水的年际变异对碳汇年际变异的贡献最大(23%)^[85]。Fang 等利用基于 NOAA 时间序列数据获取的归一化植被指数(NDVI)研究了 1982—1999 年间中国植被活动的变化特征及驱动因素,结果表明 18 年间全国 NDVI 增加了 7.4%,其主要的驱动因素在于温度的升高、夏季降水的增加和农业活动的增强^[86]。通过对中国 1982—2010 年间陆地生态系统碳汇变化及驱动因素分析,发现气候因素效应的贡献率为 56.3%,其次是氮沉降(11.3%)和大气 CO₂ 浓度增加(8.6%)^[48]。卢学鹤等利用卫星遥感估算的大气氮沉降数据、卫星柱浓度数据和气象数据模拟了氮沉降对于我国陆地生态系统碳汇的影响,研究表明在 21 世纪初期,大气氮沉降使中国陆地生态系统碳汇增加了 0.0469 Pg C/a^[87]。我国所属的北半球大部分地区为全球氮沉降的高值区域^[88]。

土地利用管理也是中国陆地生态系统碳汇的主要影响因素。当前土地利用/覆盖变化主要包括两个方面,一方面随着经济发展和城市化进程需要的国土开发导致的林地、耕地、草地面积减少、建设用地增加,对1980—2010年间我国陆地生态系统土地利用变化的研究表明,30年间因林地、耕地面积减少和城市用地的增加造成了279 Tg C的损失^[89]。另一方面受益于天然林资源保护工程、退耕还林还草、三北防护林体系等一系列生态工程的实施,增加了森林面积,提高了森林覆盖率,明显提高了我国陆地生态系统的碳汇能力^[90]。Chen等基于MODIS全时间序列叶面积指数数据发现2000—2017年间全球植被叶面积呈增加趋势,其中,中国以占全球6.6%的植被面积,贡献了占1/4的全球叶面积增加量,地球变“绿”的直接因素就是土地利用管理^[91]。

4 展望

陆地生态系统碳汇是一个复杂的机理过程,碳汇估算也受多种因素的影响,包括对于陆地生态系统碳汇定义的差异、模型参数化本身的系统误差、观测样点分布不均的造成抽样误差、观测设备本身存在的测量误差、以及不同碳汇估算原理和方法间的误差^[92-93]。为了加深对陆地生态系统碳汇过程机理的理解,提高陆地生态系统碳汇估算的准确性,准确客观的评价陆地生态系统碳汇对我国碳中和的贡献,需要采用新技术和新方法,多源数据、多尺度数据和多源方法相融合,开展陆地生态系统碳汇评估。

4.1 规范陆地生态系统碳汇指标

要对陆地生态系统碳汇有着全面准确的认识,首先需统一陆地生态系统碳汇指标定义。因对生态系统的定义不同,不同研究使用的观测数据在来源、定义、阈值等方面存在着差异,其结论也会存在较大的差距,Fang等^[86]和Tang等^[33]分别采用森林资源连续清查数据和1:100万植被图来计算森林生态系统碳汇,其定义的森林面积分别为 (1.428×10^6) hm²和 (1.882×10^6) hm²。因此,规范生态系统指标,统一量化分类方法,及时更新土地利用数据,对于比较不同生态系统碳汇有着重要意义。

4.2 扩展陆地生态系统数据监测范围,完善碳汇监测技术手段

在计算陆地生态系统碳汇时不仅要关注森林、草地、农田、湿地(包括泥炭地)等生态系统的碳汇数据,也要重视灌丛、荒漠、冻土、城市生态系统等碳汇数据,以及水体可溶碳、大气中除CO₂通量以外的氮、硫、甲烷通量、人为碳汇活动数据的收集,扩大陆地生态系统数据监测范围,标准化数据观测,提高数据的代表性和准确性。完善国家陆地生态系统定位观测研究站、中国通量观测研究联盟、中国生态系统光谱观测研究网络等观测系统的建设,从而获取长期、连续、定位的生态系统观测数据,推进大气观测卫星(天气、气候大气成分探测卫星)、陆地观测卫星(光学、微波、地球物理场探测卫星)等空间基础设施和基于无人机遥感技术的近地面遥感监测平台的建设,获取高分辨率、长时间序列、高可靠性的生态系统遥感监测数据(碳通量、气溶胶、叶绿素荧光、生物量、叶面积指数、大气颗粒物、污染气体、温室气体浓度),完善“天-空-地”一体化的陆地生态系统观测体系。我国于2018年发射的首颗碳卫星(TanSat),在研究全球CO₂浓度,监测温室气体方法、估算全球和区域碳通量已发挥了重要作用^[94]。2022年8月发射的首颗陆地生态系统碳监测卫星“句芒”为我国获取全球森林碳汇的多要素遥感信息,提高碳汇计量的效率和精度、实现陆地生态系统碳汇监测提供重要支撑^[95]。

4.3 新技术的应用及模型方法的系统耦合

新技术和新方法的广泛应用可以促进陆地生态系统碳汇研究。测序技术的突破、质谱技术的发展以及生物信息学的进步为从分子层面阐明生态系统群落组成、功能和结构提供了帮助;稳定碳同位素追踪技术通过测定植被、土壤及大气中各碳库示踪物量的变化,量化植被光合作用中碳的传输与分配特征、阐明土壤碳动态变化,从叶片、种群、群落、生态系统等尺度解释陆地生态系统碳循环;日光诱导叶绿素荧光(SIF)遥感技术作为新兴的植被遥感技术,在借助近地面遥感平台、机载平台和星载平台获取丰富的数据源基础上,通过深入SIF机理研究,构建起从叶片、冠层全球尺度的生态系统过程中的关键生理生化参数反演模型,为陆地生态系统碳循环监测提供了新的视角。陆地生态系统碳汇方法日趋成熟,单一的技术手段和方法已经不能实现碳汇

的准确评估,今后的研究方向已倾向于综合应用各类观测数据、耦合多种模型、“自下而上”和“自上而下”方法相结合进行碳汇比较验证。包括基于物联网、大数据技术建立温室气体、碳、氮同位素协同观测网络,植被碳循环模型与气候模型相耦合研究不同尺度陆地生态系统间的物质循环和能量流动,揭示陆地生态系统碳汇,降低预测的不确定性。

4.4 国家重大生态工程的碳汇评估

最后,根据中国政府出台的“碳汇能力巩固提升行动”方案,需要量化国家生态保护修复重大工程对陆地生态系统碳汇的影响。防护林工程、退耕还林还草工程和国土绿化工程对森林、草地等生态系统的增汇潜力,以及随着时间的推移植被年龄结构的变化和经营管理措施对碳汇能力的影响都需要科学评估,同时也要研制和完善突发气候状况下(极端天气、火灾)和不同碳排放场景下的陆地生态系统碳汇模型。此外,考虑到陆地生态系统碳汇评估的研究性,当2060年实现“碳中和”目标后^[96],随着能源结构的调整、CO₂浓度的变化,“后碳中和”时代的陆地生态系统碳汇评估可能遇到新的问题和挑战,这需要有预见性考量并提前作出科学的应对。

参考文献(References):

- [1] Gregg J S, Andres R J, Marland G. China: Emissions pattern of the world leader in CO₂ emissions from fossil fuel consumption and cement production. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): L08806.
- [2] Matthews J B R, Masson-Delmotte V, Babiker M, Chen Y, De Coninck H, Connors S, Van Diemen R, Dube O, Ebi K, Engelbrecht F, Ferrat M, Ford J, Forster P, Fuss S, Guillén Bolaos T, Harold J, Hoegh-Guldberg O, Hourcade J-C, Huppmann D, Zickfeld K. Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 541-562.
- [3] 蔡兆男,成里京,李婷婷,郑循华,王林,韩圣慧,王凯,屈侠,江飞,张永雨,朱建华,龙上敏,孙扬,贾炳浩,袁文平,张天一,张晴,谢瑾博,朱家文,刘志强,吴琳,杨东旭,魏科,吴林,张稳,刘毅,曹军骥. 碳中和目标下的若干地球系统科学和技术问题分析. *中国科学院院刊*, 2021, 36(5): 602-613.
- [4] 张守攻. 提升生态碳汇能力. *兵团日报*, 2021-06-16(5).
- [5] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 423-434.
- [6] 王国胜,孙涛,咎国盛,王棒,孔祥吉. 陆地生态系统碳汇在实现“双碳”目标中的作用和建议. *中国地质调查*, 2021, 8(4): 13-19.
- [7] Schwalm C R, Williams C A, Schaefer K. Carbon consequences of global hydrologic change, 1948 - 2009. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G3): G03042.
- [8] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [9] Fernández-Martínez M, Sardans J, Chevallier F, Ciais P, Obersteiner M, Vicca S, Canadell J G, Bastos A, Friedlingstein P, Sitch S, Piao S L, Janssens I A, Peñuelas J. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO₂ and temperature. *Nature Climate Change*, 2019, 9(1): 73-79.
- [10] Le Quéré C, Andrew R, Friedlingstein P, Sitch S, Pongratz J, Manning A, Korsbakken J, Peters G, Canadell J, Jackson R, Boden T, Tans P, Andrews O, Arora V, Bakker D, Barbero L, Becker M, Betts R, Bopp L, Chevallier F, Chini L, Ciais P, Cosca C, Cross J, Currie K, Gasser T, Harris I, Hauck J, Haverd V, Houghton R, Hunt C W, Hurtt G, Ilyina T, Jain A K, Kato E, Kautz M, Keeling R, Goldewijk K K, Körtzinger A, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lima I, Lombardozi D, Metzl N, Millero F, Monteiro P, Munro D, Nabel J, Nakaoka S, Nojiri Y, Padin X A, Peregon A, Pfeil B, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Reimer J, Rüdénbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Stocker B, Tian H, Tilbrook B, Laan-Luijckx I V D, Werf G, Heuven S, Viovy N, Vuichard N, Walker A, Watson A, Wiltshire A, Zaehle S, Zhu D. Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data*, 2018, 10: 405-448.
- [11] Battle M, Bender M L, Tans P P, White J W, Ellis J T, Conway T, Francey R J. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and delta¹³C. *Science*, 2000, 287(5462): 2467-2470.
- [12] Thompson R L, Patra P K, Chevallier F, Maksyutov S, Law R M, Ziehn T, van der Laan-Luijckx I T, Peters W, Ganshin A, Zhuravlev R, Maki T, Nakamura T, Shirai T, Ishizawa M, Saeki T, Machida T, Poulter B, Canadell J G, Ciais P. Top - down assessment of the Asian carbon budget since the mid 1990s. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-10.
- [13] Buchwitz M, Bovensmann H, Burrows J, Schneising O, Reuter M. Review of the paper “Regional CO₂ Fluxes during 2010-2015 Inferred from

- GOSAT XCO₂ retrievals using a new version of Global Carbon Assimilation System". *Atmospheric chemistry and physics*, 2021, 21(3): 1963-1985.
- [14] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [15] Tian H Q, Xu X F, Lu C Q, Liu M L, Ren W, Chen G S, Melillo J, Liu J Y. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G2): G02011.
- [16] Piao S L, Ito A, Li S G, Huang Y, Ciais P, Wang X H, Peng S S, Nan H J, Zhao C, Ahlström A, Andres R J, Chevallier F, Fang J Y, Hartmann J, Huntingford C, Jeong S, Levis S, Levy P E, Li J S, Lomas M R, Mao J F, Mayorga E, Mohammad A, Muraoka H, Peng C H, Peylin P, Poulter B, Shen Z H, Shi X, Sitch S, Tao S, Tian H Q, Wu X P, Xu M, Yu G R, Viovy N, Zaehle S, Zeng N, Zhu B. The carbon budget of terrestrial ecosystems in East Asia over the last two decades. *Biogeosciences*, 2012, 9(9): 3571-3586.
- [17] Jiang F, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Zhang H F, Machida T, Ciais P, Peters W, Wang H M, Chen B Z, Liu L X, Zhang C H, Matsueda H, Sawa Y. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-9.
- [18] Wang G C, Huang Y, Zhang W, Yu Y Q, Sun W J. Quantifying carbon input for targeted soil organic carbon sequestration in China's croplands. *Plant and Soil*, 2015, 394(1): 57-71.
- [19] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [20] Zhang H F, Chen B Z, van der Laan-Luijkx I T, Chen J, Xu G, Yan J W, Zhou L X, Fukuyama Y, Tans P P, Peters W. 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.
- [21] 王婧, 刘毅, 杨东旭. 探寻我国碳汇分布: 从大气 CO₂ 探测入手. *科学通报*, 2021, 66(7): 709-710.
- [22] 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. *科学通报*, 2012, 57(11): 943-950, 987.
- [23] 郭兆迪, 胡会峰, 李品, 李怒云, 方精云. 1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43(5): 421-431.
- [24] 张煜星, 王雪军. 全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(2): 199-214.
- [25] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [26] Jiang F, Wang H M, Chen J M, Ju W M, Tian X J, Feng S Z, Li G C, Chen Z Q, Zhang S P, Lu X H, Liu J, Wang H K, Wang J, He W, Wu M S. Regional CO₂ fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO₂ retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(3): 1963-1985.
- [27] 于贵瑞, 牛书丽, 李发东, 张雷明, 陈卫楠. 陆地生态系统环境控制实验的研究方法及技术体系. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2275-2289.
- [28] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [29] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 孙文娟, 胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. *中国基础科学*, 2015, 17(3): 20-25.
- [30] Zhu J X, Hu H F, Tao S L, Chi X L, Li P, Jiang L, Ji C J, Zhu J L, Tang Z Y, Pan Y D, Birdsey R A, He X H, Fang J Y. Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-10.
- [31] 刘迎春, 高显连, 付超, 于贵瑞, 刘兆英. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. *生态学报*, 2019, 39(11): 4002-4010.
- [32] Zhang C X, Xie G D, Zhen L, Li S M, Deng X Z. Estimates of Variation in Chinese Terrestrial Carbon Storage Under an Environmental Conservation Policy Scenario for 2000-2025. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 315-321.
- [33] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [34] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [35] Baldocchi D. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3600-3609.
- [36] Baldocchi D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of *Global Change Biology*. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 242-260.

- [37] Fu B J, Li S G, Yu X B, Yang P, Yu G R, Feng R G, Zhuang X L. Chinese ecosystem research network: progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 225-233.
- [38] Fu Z, Dong J W, Zhou Y K, Stoy P C, Niu S L. Long term trend and interannual variability of land carbon uptake—the attribution and processes. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(1): 014018.
- [39] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 1990, 247(4949): 1431-1438.
- [40] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [41] Chen Z, Yu G R, Wang Q F. Magnitude, pattern and controls of carbon flux and carbon use efficiency in China's typical forests. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 464-473.
- [42] Hao Y B, Kang X M, Wu X, Cui X Y, Liu W J, Zhang H, Li Y, Wang Y F, Xu Z H, Zhao H T. Is frequency or amount of precipitation more important in controlling CO₂ fluxes in the 30-year-old fenced and the moderately grazed temperate steppe? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 171: 63-71.
- [43] Liu P, Black T A, Jassal R S, Zha T S, Nesic Z, Barr A G, Helgason W D, Jia X, Tian Y, Stephens J J, Ma J Y. Divergent long-term trends and interannual variation in ecosystem resource use efficiencies of a southern boreal old black spruce forest 1999-2017. *Global Change Biology*, 2019, 25(9): 3056-3069.
- [44] Lu W Z, Xiao J F, Liu F, Zhang Y, Liu C A, Lin G. Contrasting ecosystem CO₂ fluxes of inland and coastal wetlands: a meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1180-1198.
- [45] Biederman J A, Scott R L, Arnone J A III, Jasoni R L, Litvak M E, Moreo M T, Papuga S A, Ponce-Campos G E, Schreiner-McGraw A P, Vivoni E R. Shrubland carbon sink depends upon winter water availability in the warm deserts of North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 407-419.
- [46] Qi Y H, Wei D, Zhao H, Wang X D. Carbon sink of a very high marshland on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(4): e2020JG006235.
- [47] Cao M K, Prince S D, Li K R, Tao B, Small J, Shao X M. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [48] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [49] 王桥. 中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题. *遥感学报*, 2021, 25(1): 25-36.
- [50] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 董文杰. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 541-550.
- [51] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Armeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [52] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608, 644.
- [53] Ji C, Zhang J H, Yao F M. The Yield Estimation of Rapeseed in Hubei Province by BEPS Process-Based Model and MODIS Satellite Data. Bian F, Xie Y. *International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 643-652.
- [54] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 孙莉, 乔青, 王辉, 宁杨翠. 基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 8-13.
- [55] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, Zhou G Y, Tieszen L L, Baldocchi D, Bernhofer C, Gholz H, Goldstein A H, Goulden M L, Hollinger D Y, Hu Y M, Law B E, Stoy P C, Vesala T, Wofsy S C. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189-207.
- [56] Damm A, Guanter L, Paul-Limoges E, van der Tol C, Hueni A, Buchmann N, Eugster W, Ammann C, Schaepman M E. Far-red Sun-induced chlorophyll fluorescence shows ecosystem-specific relationships to gross primary production: an assessment based on observational and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 91-105.
- [57] Gitarskiy M L. The refinement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories. *Fundamental and Applied Climatology*, 2019, 2: 5-13.
- [58] Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Deng J B, Wang J, Chen X. An advanced carbon dioxide retrieval algorithm for satellite measurements and its

- application to GOSAT observations. *Science Bulletin*, 2015, 60(23): 2063-2066.
- [59] Liu Y, Wang J, Yao L, Chen X, Cai Z N, Yang D X, Yin Z S, Gu S Y, Tian L F, Lu N M, Lyu D R. The TanSat mission: preliminary global observations. *Science Bulletin*, 2018, 63(18): 1200-1207.
- [60] Tsuruta A, Aalto T, Backman L, Krol M C, Peters W, Lienert S, Joos F, Miller P A, Zhang W X, Laurila T, Hatakka J, Leskinen A, Lehtinen K E J, Peltola O, Vesala T, Levula J, Dlugokencky E, Heimann M, Kozlova E, Aurela M, Lohila A, Kauhaniemi M, Gomez-Pelaez A J. Methane budget estimates in Finland from the CarbonTracker Europe-CH₄ data assimilation system. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2019, 71(1): 1565030.
- [61] Laan - Luijckx I T, Velde I R, Krol M C, Gatti L V, Domingues L G, Correia C S C, Miller J B, Gloor M, Leeuwen T T, Kaiser J W, Wiedinmyer C, Basu S, Clerbaux C, Peters W. Response of the Amazon carbon balance to the 2010 drought derived with CarbonTracker South America. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(7): 1092-1108.
- [62] Tian X, Xie Z, Liu Y, Cai Z, Fu Y, Zhang H, Feng L. A joint data assimilation system (Tan-Tracker) to simultaneously estimate surface CO₂ fluxes and 3-D atmospheric CO₂ concentrations from observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13281-13293.
- [63] Chen B Z, Zhang H F, Wang T, Zhang X Y. An atmospheric perspective on the carbon budgets of terrestrial ecosystems in China: progress and challenges. *SCIENCE BULLETIN*, 2021, 66(17): 1713-1718.
- [64] Piao S L, Huang M T, Liu Z, Wang X H, Ciais P, Canadell J G, Wang K, Bastos A, Friedlingstein P, Houghton R A, Le Quéré C, Liu Y W, Myneni R B, Peng S S, Pongratz J, Sitch S, Yan T, Wang Y L, Zhu Z C, Wu D H, Wang T. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period. *Nature Geoscience*, 2018, 11(10): 739-743.
- [65] Schimel D, Melillo J, Tian H, McGuire A D, Kicklighter D, Kittel T, Rosenbloom N, Running S, Thornton P, Ojima D, Parton W, Kelly R, Sykes M, Neilson R, Rizzo B. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, 2000, 287(5460): 2004-2006.
- [66] Bellassen V, Viovy N, Luyssaert S, Maire G, Schelhaas M J, Ciais P. Reconstruction and attribution of the carbon sink of European forests between 1950 and 2000. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3274-3292.
- [67] 曹明奎, 陶波, 李克让, 邵雪梅, Stephen D. 1981—2000 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [68] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W, Liu M L, Tian H Q. Contribution of increasing CO₂ and climate change to the carbon cycle in China's ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G1): G01018.
- [69] Yao Y T, Li Z J, Wang T, Chen A P, Wang X H, Du M Y, Jia G S, Li Y N, Li H Q, Luo W J, Ma Y M, Tang Y H, Wang H M, Wu Z X, Yan J H, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhang Y, Zhou G S, Piao S L. A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 253/254: 84-93.
- [70] Zhu Z L, Sun X M, Zhou Y L, Xu J P, ZHANG Renhua Institute of Geographic Sciences Y G &, Research N R, Sciences C A O, Beijing, China; Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China. Correcting method of eddy covariance fluxes over non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(S1): 42-50.
- [71] Zhu X J, Yu G R, He H L, Wang Q F, Chen Z, Gao Y N, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Sun X M. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from upscaling network observations. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 52-61.
- [72] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1), GB1007.
- [73] Jiang F, Wang H W, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Ding A J, Liu L X, Peters W. Nested atmospheric inversion for the terrestrial carbon sources and sinks in China. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5311-5324.
- [74] Yang D X, Zhang H F, Liu Y, Chen B Z, Cai Z N, Lü D R. Monitoring carbon dioxide from space: retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using CarbonTracker-China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(8): 965-976.
- [75] Peters W, Krol M C, van der WERF G R, Houweling S, Jones C D, Hughes J, Schaefer K, Masarie K A, Jacobson A R, Miller J B, Cho C H, Ramonet M, Schmidt M, Ciattaglia L, Apadula F, Heltai D, Meinhardt F, Di Sarra A G, Piacentino S, Sferlazzo D, Aalto T, Hatakka J, Ström J, Haszpra L, Meijer H A J, Van Der Laan S, Neubert R E M, Jordan A, Rodó X, Morguí J A, Vermeulen A T, Popa E, Rozanski K, Zimnoch M, Manning A C, Leuenberger M, Uglietti C, Dolman A J, Ciais P, Heimann M, Tans P P. Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1317-1337.
- [76] Guan D B, Liu Z, Geng Y, Lindner S, Hubacek K. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 672-675.
- [77] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, McDowell W H, Tranvik L J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Downing J A, Middelburg J J, Melack

- J. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, 10(1): 172-185.
- [78] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, Peylin P, Houghton R A, Birdsey R A, Heath L, Sundquist E T, Stallard R F, Ciais P, Moorcroft P, Caspersen J P, Shevliakova E, Moore B, Kohlmaier G, Holland E, Gloor M, Harmon M E, Fan S M, Sarmiento J L, Goodale C L, Schimel D, Field C B. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292(5525): 2316-2320.
- [79] Tao B, Cao M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981 - 2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(5): 745-753.
- [80] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin F S 3rd. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [81] Ji J J, Huang M, Li K R. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(6): 885-898.
- [82] Yu L, Gu F, Huang M, Tao B, Hao M, Wang Z. 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.
- [83] Han P F, Zeng N, Zhang W, Cai Q X, Yang R Q, Yao B, Lin X H, Wang G C, Liu D, Yu Y Q. Decreasing emissions and increasing sink capacity to support China in achieving carbon neutrality before 2060.2021: arXiv: 2102.10871. <https://arxiv.org/abs/2102.10871>.
- [84] Duan H B, Zhou S, Jiang K J, Bertram C, Harmsen M, Krieglner E, van Vuuren D P, Wang S Y, Fujimori S, Tavoni M, Ming X, Keramidas K, Iyer G, Edmonds J. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit. *Science*, 2021, 372(6540): 378-385.
- [85] Zhang L, Ren X L, Wang J B, He H L, Wang S Q, Wang M M, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Zhou L, Niu zhongen, Ge R, Li Y Y, Lv Y, Yan H M, Huang M, Yu G R. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: regional contributions and climate attribution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003.
- [86] Fang J Y, Piao S L, He J S, Ma W H. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982 - 1999. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2004, 47(3): 229-240.
- [87] 卢学鹤, 江洪, 张秀英, 金佳鑫. 氮沉降与 LUCC 的关系及其对中国陆地生态系统碳收支的影响. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(11): 1482-1493.
- [88] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, Ahlström A, van Lissa C J, Zhao X, Xia N, Wu X H, Jackson R B. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [89] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, Yang H, Lai L, Tan J Z. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-13.
- [90] Li P, Zhu J, Hu H, Guo Z, Pan Y, Birdsey R, Fang J. The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon. *Biogeosciences*, 2016, 13(2): 375-388.
- [91] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [92] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键滢, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. *生态学报*, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [93] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世莘, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 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. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
- [94] 刘毅, 姚璐, 王靖, 杨东旭, 蔡兆男, 卢乃锰, 吕达仁. 中国碳卫星数据的应用现状. *卫星应用*, 2022(2): 46-50.
- [95] 贺涛, 国爱燕, 黄缙, 张新伟, 李雨廷, 毛一岚, 刘付强, 曹海翊. 陆地生态系统碳监测卫星“句芒”号概览. *国际太空*, 2022(9): 8-12.
- [96] 方精云. 碳中和的生态学透视. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1173-1176.