



DOI: 10.20103/j.stxb.202209022507

毛江涛, 徐文婷, 谢宗强. 森林碳汇研究热点与趋势——基于知识图谱分析. 生态学报, 2023, 43(19): 8241-8253.

森林碳汇研究热点与趋势 ——基于知识图谱分析

毛江涛^{1,2}, 徐文婷¹, 谢宗强^{1,2,*}

¹ 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

² 中国科学院大学生命科学学院, 北京 101408

摘要: 森林在全球碳循环中发挥着重要作用, 森林碳汇是陆地碳汇的重要组成部分, 其研究的知识领域在国际社会中已较为成熟。以 Web of Science 中 1990—2021 年 4973 篇相关的文献为研究对象, 运用文献计量工具 CiteSpace 绘制文献共被引和关键词共现网络知识图谱, 以此清楚分析森林碳汇研究的发展趋势。研究发现: (1) 森林碳汇研究的发文量持续增长, 文献数量的变化趋势证明森林碳汇仍是国内外的研究热点。(2) 森林碳汇研究主线变化从运用大量方法测量森林碳平衡, 到对森林碳汇稳定区域估计的理论归纳, 再到将理论用于实践并全面实现对全球碳汇规模的监控。阶段的热点问题从森林是否为碳汇到森林碳汇的形成机制, 再到实现监控管理下的可持续森林碳汇。(3) 国内森林碳汇研究主线变化从研究测量碳储量的方法, 到运用大量方法测量中国森林碳平衡, 再到中国森林碳汇稳定区域估计的理论归纳。阶段的热点问题从中国森林碳储量的变化, 转变为中国森林是否为碳汇, 最后聚焦到中国森林碳汇的形成机制。如今国内研究趋势逐渐与国际接轨, 中国在国际森林碳汇研究领域的学术地位日益提升。在未来, 中国需要增加对森林生态系统调查和监测强度, 构建“天-空-地”一体化的碳汇计算体系, 进而实现对碳汇规模的准确监控。并且需要准确且全面评估森林碳汇对我国实现“碳中和”目标的贡献, 推动我国“碳中和”目标的实现。

关键词: 森林碳汇; CiteSpace; 文献计量; 知识图谱

森林是生产力最高、结构最复杂、生物多样性最丰富的陆地生态系统。全球森林面积达 42 亿 hm^2 , 约为陆地总面积的 31%^[1], 是全球陆地生态系统的重要组成部分, 为人类的衣食住行提供基础的物质资料, 同时也具有不可或缺的固碳增汇功能^[2], 是人类生存、生活、生产的资源供给调节系统。

森林是陆地生态系统中最大的碳库, 在陆地碳循环中发挥着重要作用, 其碳库变化会影响大气 CO_2 浓度, 从而影响森林发挥的气候调节功能^[3]。森林生态系统依据碳收支状况, 可以分为碳源和碳汇, 碳源表示碳排放量大于吸收量, 处于净排放的状态, 碳汇则表示碳吸收量大于排放量。森林碳汇大小是森林生态系统碳循环作用的结果, 是指森林植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被或土壤中, 从而减少该气体在大气中的浓度^[4], 即与外界进行以 CO_2 为主的碳交换过程。森林碳汇是陆地碳汇的主体, 在降低大气中温室气体浓度、减缓全球气候变暖中, 具有十分重要的作用, 在抵消化石燃料碳排放中扮演重要的角色^[5-7]。

从 1990 年至今, 森林碳汇是全球学术界和政治界所关注的热点, 该领域的文献量也在不断增加, 研究内容与范围也在不断加深与扩大。然而, 关于森林碳汇的研究普遍是通过某一方面进行论述, 比如国内外碳汇

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFD1100403)

收稿日期: 2022-09-02; 网络出版日期: 2023-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xie@ibcas.ac.cn

计量方法的多样化^[8],森林碳汇估算的不确定因素^[9],森林碳汇市场^[10],森林固碳理论与研究方法^[11]等,对森林碳汇的研究脉络、热点及趋势不清晰,无法从整体把握该领域的研究方向。知识图谱是随着现代信息技术发展而产生的新兴领域,可以将错综复杂的知识体系可视化,洞悉各个领域的结构特征,梳理当代知识大爆炸形成的丰富知识网络,预测科学技术知识前沿发展的最新态势。本文借助 CiteSpace 工具,通过分析 Web of Science (WOS) 中选出的 4973 篇森林碳汇文献,分析国内外关于森林生态系统碳源汇研究脉络,提炼森林碳汇研究领域的知识基础,厘清森林碳汇研究的热点、演化路径和未来趋势。

1 数据源与研究方法

WOS 是国际公认权威的综合性学术信息资源数据库,收录了世界权威、高影响力的学术期刊^[12]。鉴于其收录刊物的权威性和广泛性,本研究以“(关键词:forest AND carbon sink AND 语种:English AND 文献类型:Article)”为检索条件,对 1990—2021 年科学引文索引扩展 (SCI-EXPANDED) 和社会科学引文索引 (SSCI) 中检索森林碳汇文献,获得文献 4973 篇。

本研究运用 CiteSpace (5.8.R3) 对检索到的文献进行可视化分析,通过信息可视化来呈现森林碳汇研究的结构、分布和规律图谱。

2 国际有关森林碳汇研究结果与分析

2.1 森林碳汇研究计量

文献数量的分布在一定程度上能反映该领域研究的发展动态。从论文发表数量来看,2001 年之前的发文量呈现缓慢上升趋势,共有 502 篇,占论文总量的 10.1%;2002—2010 年发文量涨幅明显,国内外对该领域的关注度逐渐提高,总计 1250 篇;2011 年至今,发文量呈爆发式增长,快速发展,累计 3221 篇 (图 1)。

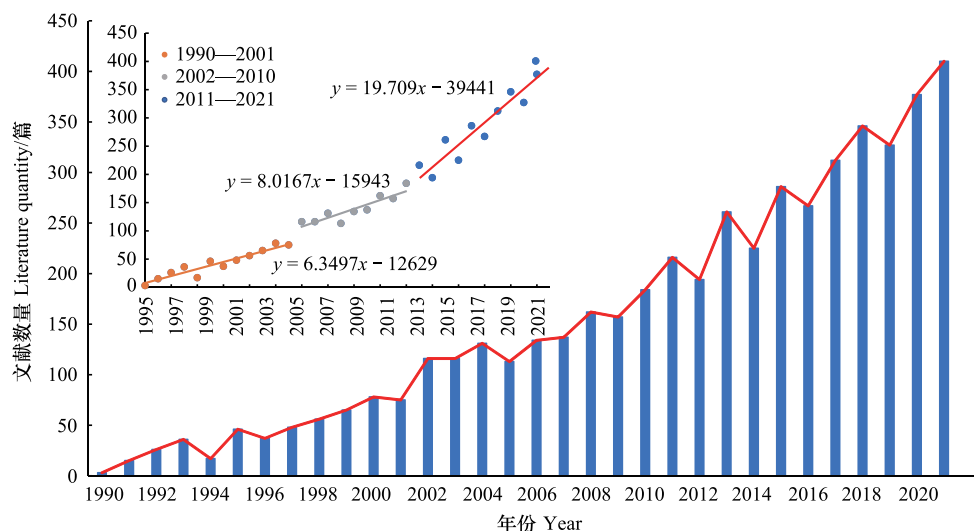


图 1 1990—2021 年森林碳汇研究文献数量年度分布图

Fig.1 Annual distribution of literatures in forest carbon sink domain (1990—2021)

森林碳汇研究覆盖多个领域,出版刊物 563 种,发文量居于前 10 位的期刊多在森林生态—环境领域 (图 2)。发文量位于榜首的 *Global Change Biology* 与生态景观密切相关,其次为 *Forest Ecology and Management* 和 *Biogeosciences*,这 3 个热点期刊的发文量占比为 13.53%,*Agricultural and Forest Meteorology*, *Science of the Total Environment* 等其他热点期刊发文量为 15.71%。

有 125 个国家参与该领域的研究,其中发文前十位的热点国家为美国 (1926)、中国 (976)、德国 (592)、加拿大 (534)、英国 (368)、澳大利亚 (311)、法国 (306)、日本 (273)、荷兰 (255)、瑞典 (250) (图 3)。美

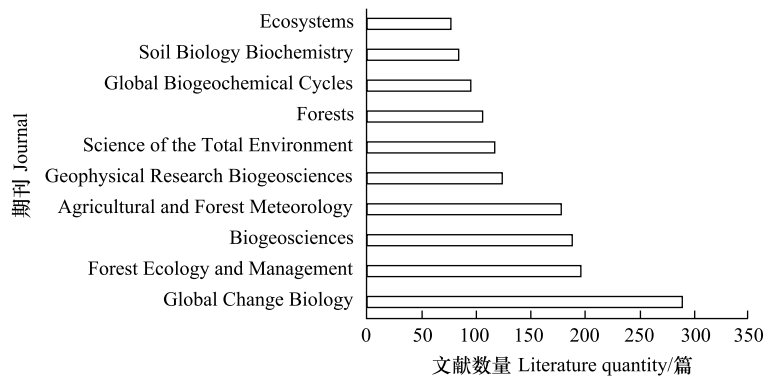


图2 森林碳汇研究发文前10位刊物发文数量

Fig.2 Top 10 journals with articles in the field of forest carbon sink

国在森林碳汇研究中占据核心地位,尤以美国林业局(274)和美国农业局(323)最强。中国紧随其后位居第二,拥有全球最大发文量机构中国科学院(610)。其余国家占据该研究中重要学术地位,推动着该领域的发展。

2.2 森林碳汇研究热点与发展趋势

任何领域的发展都会存在一些具有重要意义的拐点,这些拐点对本文掌握相关领域的研究脉络至关重要,高中心性论文就起到了这样的作用^[13],它们在结构上占据关键位置,成为连接其他节点和开创性研究结果的中心节点^[14]。突现检测用于探索研究方向,它们在所对应的时间区域里具有特别的意义,被认为是相关时间界限的痕迹^[15-16]。通过文献共被引网络图谱中(图4),探测到7篇中心性大于0.10的热点文献(表1)和10篇引用突现的热点文献(表2)。关键词来源于论文的研究内容与主题,是论文核心内容的提炼,可以用来分析研究的热点问题^[17]。本文按发文量增长趋势的快慢分为三个研究阶段,以高频词汇兼顾高中心性词汇的方法筛选关键词,结合重要文献与关键词,分析讨论森林碳汇研究的热点与发展趋势^[18](表3,图5)。

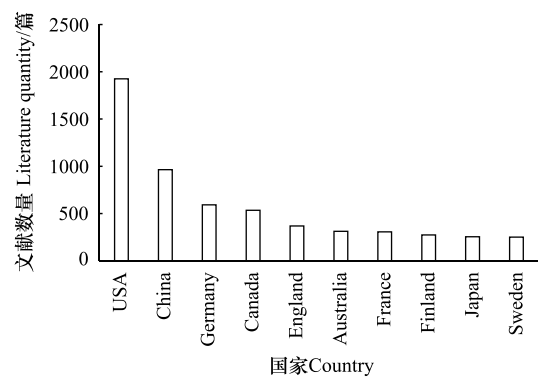


图3 森林碳汇研究发文前10位国家发文数量

Fig.3 Top 10 countries with articles in the field of forest carbon sink

表1 森林碳汇研究的高中心性文献

Table 1 High centrality literatures of forest carbon sink

文献 References	第一作者 First authors	出版年 Year	中心性 Centrality	被引频次 Frequency
TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO ₂ fluxes, 1988—2003	Baker DF	2006	0.32	15
Towards robust regional estimates of CO ₂ sources and sink using atmospheric transport models	Gurney KR	2002	0.26	46
Age structure and disturbance legacy of North American forests	Pan Y	2011	0.13	26
Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests: Evidence from Long-Term Plots	Phillips OL	1998	0.12	32
Trends in the sources and sink of carbon dioxide	Le Quere C	2009	0.11	49
Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991	Myneni RB	1997	0.11	24
Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years	Ballantyne AP	2012	0.11	18

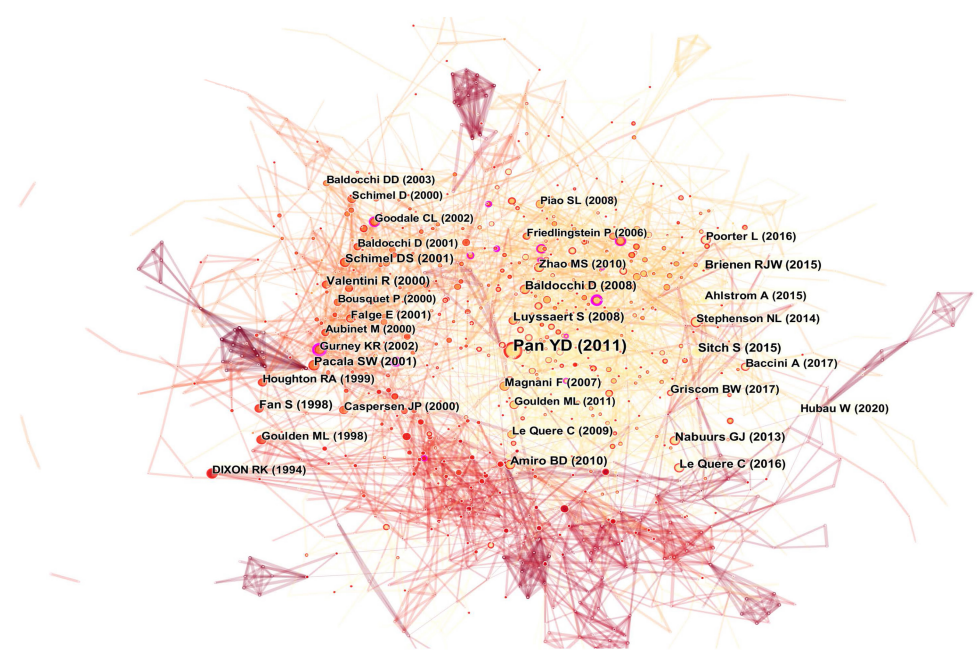


图 4 森林碳汇研究文献共被引网络图谱
Fig.4 The co-citation network map of forest carbon sink

表 2 森林碳汇研究的高突现性文献
Table 2 High citation bursts literatures of forest carbon sink

文献 References	第一作者 First authors	出版年 Year	突现性 Citation bursts	被引频次 Frequency
Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems	Dixon RK	1994	28.47	46
A Large Terrestrial Carbon Sink in North America Implied by Atmospheric and Oceanic Carbon Dioxide Data and Models	Fan S	1998	30.73	54
Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests	Valentini R	2000	32.2	59
Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems	Schimel DS	2001	26.94	53
Consistent Land- and Atmosphere-Based U.S. Carbon Sink Estimates	Pacala SW	2001	26.43	52
Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange	Falge E	2001	26.35	48
Old-growth forests as global carbon sink	Luyssaert S	2008	28.98	58
‘Breathing’ of the terrestrial biosphere; lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems	Baldocchi D	2008	24.96	50
A Large and Persistent Carbon Sink in the World’s Forests	Pan YD	2011	119.91	245
Recent trends and drivers of regional sources and sink of carbon dioxide	Sitch S	2015	25.14	63

第 1 个阶段的热门问题是“确定森林是否为碳汇”（主要存在于 1990—2001 年）。森林在全球应对气候变化中扮演着碳源和碳汇的双向角色,森林是碳汇 (carbon sink) 还是碳源是关键的研究方向。森林碳汇研究的 forest、carbon sink 核心词汇在此阶段出现。通过分析二氧化碳 (carbon dioxide) 的变化与植物生长 (growth) 估计森林生态系统 (ecosystem) 生物量 (bioma) 是基于热点问题的重要研究内容。如何消除环境变化带来的不确定性,通过不同方法准确测量森林生态系统碳平衡是研究主线。在不断变化的气候 (climate) 和土地 (soil) 利用背景下,1994 年 Dixon RK 开始研究森林碳库^[19],认为预测未来森林分布、组成和生产力的能力存在较大的不确定性,森林可能成为碳汇。为证明森林是否为碳汇,首先分析了二氧化碳数据碳循环响应地表空气温度的年际波动^[20],为研究气候变化与碳循环打下基础。在此基础上,Fan S、Phillips OL 和 Valentini R 等人率先通过模型 (model)、长期样地调查和涡度协方差技术三种监测计算碳的方法,证明

了高纬度森林生态系统发挥碳汇作用^[21-23]。由于估计森林碳含量的方法存在缺点,Falge E 和 Pacala SW 从技术方面入手,对涡度协方差技术进行了优化,填补了涡度协方差技术中生态系统净交换量的缺口,并消除碳汇估计中时空分布的差异^[24-25],更好地估计了森林生态系统碳平衡。随着全球气候变化的日益复杂,准确且实时估计森林碳含量仍是当今社会重要的工作。

表 3 森林碳汇研究分阶段重要关键词

Table 3 The important keywords at different phases of forest carbon sink research

第一阶段 Stage 1			第二阶段 Stage 2			第三阶段 Stage 3		
关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency	关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency	关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency
forest	0.03	843	stock	0.01	179	management	0.01	204
climate change	0.03	798	net ecosystem exchange	0.01	169	tree mortality	0.01	47
dynamics	0.02	580	soil organic carbon	0.01	158	blue carbon	0.01	43
carbon dioxide	0.05	445	carbon stock	0.01	141	area	0	32
bioma	0.02	437	drought	0.01	132	mechanism	0.01	32
CO ₂	0.02	435	interannual variability	0.01	118	precipitation	0	30
storage	0.02	429	Norway spruce	0.01	92	stabilization	0	30
ecosystem	0.03	406	ecosystem respiration	0.03	91	inventory	0	30
sink	0.01	403	CO ₂ exchange	0.02	89	allometric equation	0	29
climate	0.03	386	disturbance	0.01	87	system	0	26
sequestration	0.01	379	forest management	0.02	81	semiarid ecosystem	0	26
model	0.01	373	dioxide exchange	0.02	69	reduction	0	23
nitrogen	0.04	340	stand	0.01	67	forest productivity	0.01	23
carbon	0.05	339	boreal	0.01	66	mortality	0	22
soil	0.03	321	bioenergy	0.01	20	climate change mitigation	0	21
carbon sequestration	0.01	321						
growth	0.02	317						
carbon sink	0.02	315						
flux	0.02	315						
emission	0.02	311						

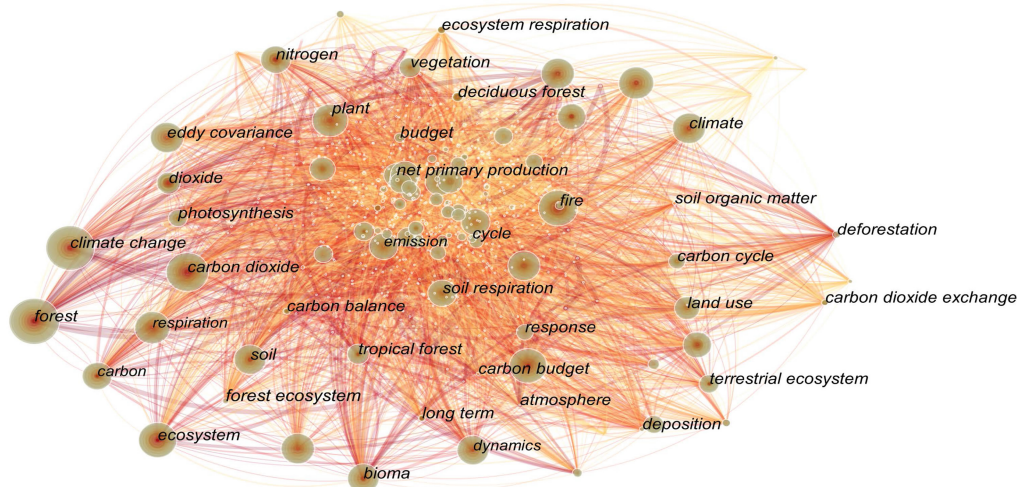


图 5 关键词共现图

Fig.5 Map of co-occurring keywords

第2个阶段的热门问题是“确定森林碳汇形成机制”(主要存在于2002—2010年)。森林碳汇的研究不再停于表面,探讨森林碳汇的规模与分布及其驱动因素是重要研究内容。研究森林干扰(disturbance)、气候干旱(drought)等影响因素,实现对森林碳汇的稳定区域(area)估计的理论归纳是研究主线。初期,Schimel DS 针对大气层和陆地之间碳交换随气候长期性变化的不确定性,研究全球和区域森林生态系统的碳交换模式与机制,表明森林碳汇的演变在很大程度上是土地利用随时间变化的结果,还有对环境变化的响应^[26]。在此理论基础上 Gurney KR 通过比较不同大气模型得到地表—大气二氧化碳交换量(CO₂ exchange)的区域估计,初步证明北方森林(boreal forest)碳汇在北半球各大洲的分布相对均匀,但二氧化碳交换对季节性和年际时间尺度的响应影响模型的估计的原因尚不明确^[27]。以此为基,Baker DF 开始研究区域二氧化碳通量年际变化(interannual variability)对模型估计的影响,对模型进行优化,其结果有利于评估北方森林碳汇的规模^[28]。由于模型存在局限性,Baldocchi D 认为在涡度协方差基础上建立传感器网络更能准确测量植被和自由大气之间水平面的质量和能量交换,能更深入探讨森林碳汇的时空分布格局,并研究了在不同环境因素影响下,生态系统净交换(net ecosystem exchange)被光合作用和生态系统呼吸(ecosystem respiration)调节机制^[29]。Pan Y 结合多种数据集(inventory)编制了第一个大陆森林年龄图,用森林年龄结构代表过去干扰的重要性,探究森林干扰对森林生态系统的碳储量的影响,但树龄并不是影响碳储量的唯一因素,气候、降水、氮沉降、施肥和其他因素也是重要的^[30]。随着对不同环境下森林碳汇规模与分布的了解,2009年Le Quere C 揭示了二氧化碳源和汇的趋势,对区域趋势的进一步了解将有助于更好地约束气候—碳循环反馈^[31]。

第3个阶段的热门问题是“如何实现监控管理下的可持续森林碳汇”(主要存在于2012—2021年),目前全球人为二氧化碳排放的增长与国内生产总值的增长密切相关,所以有效管理(management)森林生态系统保持发挥碳汇作用至关重要。如何让森林在气候变化(climate change)、降水(precipitation)、树木死亡(tree mortality)等不同因素影响下发挥可持续稳定(stabilization)的碳汇作用成为重要研究内容。将理论用于实践,全面实现对全球碳汇规模的准确监控和管理是研究主线。研究区域从森林到陆地与海洋,研究规模从区域到达全球,研究内容也愈发全面和成熟。为证明森林管理政策的有效性,Pan YD 研究了碳平衡在管理和未管理的森林中扮演的当前和未来的角色,证明森林是巨大而持久的碳汇,表明更好地了解森林在生物圈碳通量中的作用以及造成森林碳变化的机制(mechanism)^[32],对于预测未来大气中CO₂的增长以及指导缓解政策的设计和实施至关重要。TransCom 3 项目的成立,研究了大气传输模型的差异如何影响二氧化碳通量反演,为更好地监管森林碳通量提供了理论支持^[28],该项目的实现是响应管理政策的结果。Ballantyne AP 也通过汇集二氧化碳排放清单(inventory)等数据估计了过去50年中全球碳吸收的变化趋势,得出大气中二氧化碳的净吸收量持续增加的结论,然而未来气候预测的最大不确定性来源之一是全球碳循环对气候变化的反应,确定全球碳吸收的机制是制约现代全球碳预算和预测未来碳—气候相互作用的一个关键挑战^[33]。结合对碳汇变化的研究,Sitch S 总结了全球二氧化碳源和汇的最新趋势,并建立包括土地利用和土地覆盖变化模型,确定驱动全球碳流量的关键因素^[34]。表明陆地汇的趋势是由净生产力(forest productivity)的增加驱动的,气候变暖和降雨量减少抵消了大气中CO₂升高和生长季节长度变化对碳储存的积极影响,为之后实现全球碳汇变化监测提供理论基础。随着科技的发展,准确持续估计并监控管理全球碳预算成为重要环节,其量化了人类活动排放到大气中的二氧化碳的输入量、大气中二氧化碳浓度的增长率,以及随着大气中二氧化碳含量的增加、气候变化和变异性以及其他人为和自然变化而导致的陆地和海洋水库中的碳储存变化,帮助本研究更好地理解全球碳循环、气候政策的制定和预测未来气候变化,促进世界的进步与发展。

3 国内有关森林碳汇研究结果与分析

3.1 森林碳汇研究计量

“(关键词:forest AND carbon sink AND 语种:English AND 文献类型:Article)”为检索条件,以1990—2021

年检索 4973 篇森林碳汇文献为前提,按国别“Peoples R China”进行提炼,得到论文为 976 篇。

国内有关森林碳汇的论文发表进展略微滞后于国际,但与国际文献数量的增长趋势大体一致(图 6),1995—2001 年,论文从无到有,零星发表;2002—2010 年,发文量逐步增加,持续发展;2011—2021 年,发文量激增,快速发展。

国内有关森林碳汇研究作者已形成了一个较稳定的中心节点群,分别是于贵瑞、方精云、朴世龙、刘纪远、周国逸、彭长辉等学者,其中于贵瑞(52)、朴世龙(38)、方精云(33)发文量位于前列,体现了这些研究团队在国内该领域的重要学术地位。

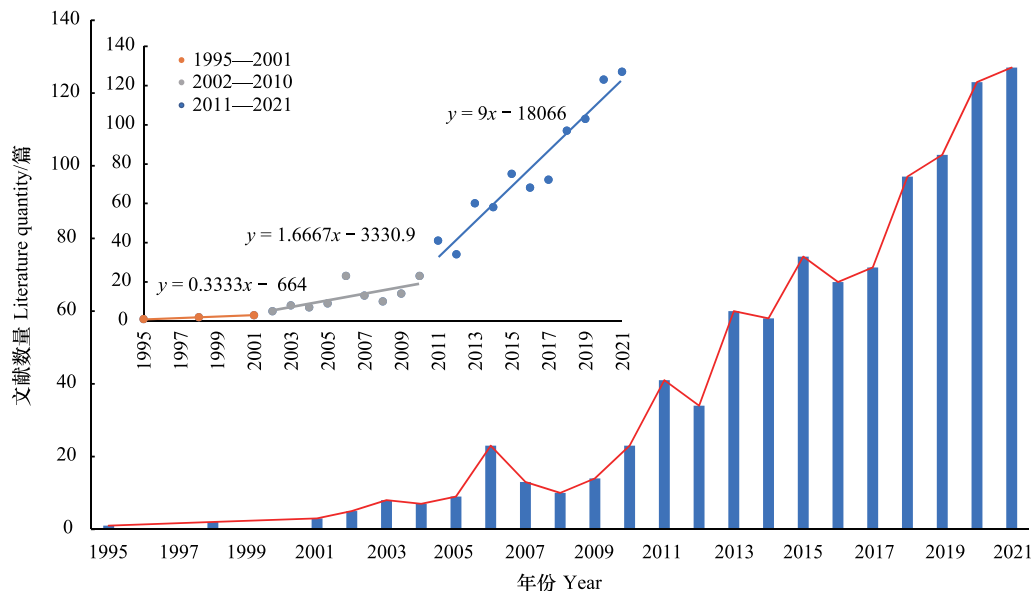


图 6 1990—2021 年国内森林碳汇研究文献数量年度分布图

Fig.6 Annual distribution of literatures in domestic forest carbon sink domain (1990—2021)

有 1437 个机构参与该领域的研究,其中发文前十位的热点机构为(图 7):中国科学院(610)、北京大学(103)、中国林业科学院(55)、北京林业大学(54)、北京师范大学(54)、西北农林科技大学(43)、南京大学(39)、浙江农林大学(38)、南京信息工程大学(35)、东北林业大学(34)。中国科学院与北京大学在森林碳汇的研究中扮演关键角色。

3.2 森林碳汇研究热点与发展趋势

通过文献共被引网络图谱中,探测到 5 篇中心性大于 0.10 的热点文献(表 4)和 7 篇引用突现的热点文献(表 5)。以高频词汇兼顾高中心性词汇的方法筛选关键词,结合重要文献与关键词,分析讨论森林碳汇研究的热点与发展趋势。

第 1 个阶段的热点问题是“确定中国森林碳储量的变化”(主要存在于 1995—2001 年)。研究二氧化碳(carbon dioxide)的变化与净初级生产力(net primary productivity)估计森林生态系统(ecosystem)碳通量(fluxes)该阶段研究的重要内容。探索测量森林生态系统碳含量的方法是研究主线。随着国际社会对森林碳平衡的重视,国内也开始效仿计算森林碳储量,核心文章出现在 2001 年,方精云首次通过全国森林资源结合一种改

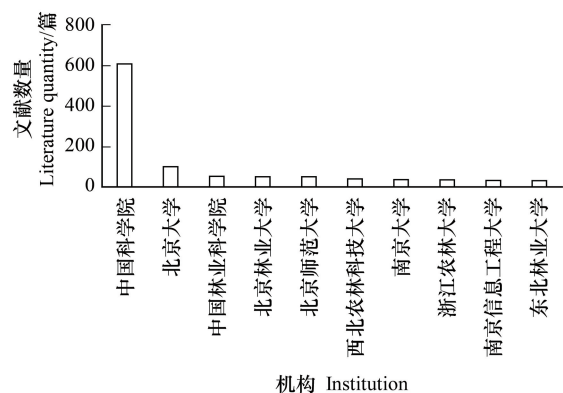


图 7 森林碳汇研究发文前 10 位机构发文数量

Fig.7 Top 10 institutions with articles in the field of domestic forest carbon sink

进的森林生物量估算方法—生物量扩展系数 (biomass expansion factor, BEF) 研究中国森林生物质碳储存的变化^[35],为我国森林碳汇研究向国际接轨奠定基础。

表 4 国内森林碳汇研究的高中心性文献
Table 4 High centrality literatures of domestic forest carbon sink

文献 References	第一作者 First authors	出版年 Year	中心性 Centrality	被引频次 Frequency
The carbon balance of terrestrial ecosystems in China	朴世龙	2009	16.13	35
Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009	赵茂盛	2010	6.07	16
China's terrestrial carbon balance: Contributions from multiple global change factors	田汉勤	2011	6.37	15
Forest biomass carbon sink in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth	方精云	2014	7.15	26
High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region	于贵瑞	2014	9.37	27
Spatio-temporal changes in biomass carbon sink in China's	郭兆迪	2013	6.98	20
Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010	逯非	2018	7.1	16

表 5 国内森林碳汇研究的高突现性文献
Table 5 High citation bursts literatures of domestic forest carbon sink

文献 References	第一作者 First authors	出版年 Year	突现性 Citation bursts	被引频次 Frequency
The carbon balance of terrestrial ecosystems in China	朴世龙	2009	0.22	35
Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998	方精云	2001	0.2	8
How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau	冯晓明	2013	0.17	5
High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region	于贵瑞	2014	0.09	27
Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010	逯非	2018	0.08	16

第 2 个阶段的热门问题是“确定中国森林是否为碳汇”(主要存在于 2002—2010 年)。运用模型模拟 (model) 与涡度协方差技术 (eddy covariance) 等方法研究中国森林碳汇是本阶段重要研究内容。运用大量方法准确测量中国森林生态系统的碳平衡是研究主线。经典生态学理论认为与非成熟森林相比,成熟森林作为碳汇功能较弱,周国逸发现了成熟森林土壤固碳及机理,颠覆了经典理论,证明成熟森林可持续积累碳,中国森林表现出强大的碳汇功能^[36]。朴世龙也基于样本的生物量结合遥感植被绿度指数、生态系统模型探究并量化中国陆地生态系统的碳平衡,证明中国的陆地生态系统是一个净汇^[37]。但随着化石燃料排放的二氧化碳 (carbon dioxide) 不断增加,气候变化 (climate change) 充满不确定性,是中国整体碳平衡中不确定性的主要因素 (impact),影响中国的发展,所以迫切需要研究气候变化对全球陆地净初级生产力的影响,中国面临一个巨大挑战是如何在未来采取行动减少碳排放。

第 3 个阶段的热门问题是“确定中国森林碳汇形成机制”(主要存在于 2011—2021 年),探讨中国碳汇的分布及其驱动因素是重要研究内容。研究土地利用变化 (land use change)、干旱 (drought)、氮 (nitrogen) 以及生态恢复等不同因素,持续更新估计方法,实现对中国森林碳汇进行稳定区域估计的理论归纳是本阶段的研究主线(表 6)。田汉勤率先对中国碳汇的驱动因素进行了评估,研究了多种环境因素对中国陆地生态系统碳源和碳汇的相对贡献,证明氮的输入是中国碳固定的主要驱动力,而施肥和土地利用变化 (land use change) 也是造成碳固定的重要机制^[38]。赵茂盛研究了气候变化与生产力的关系,表明与气候变暖相关的高温和干旱不仅降低了净生产力,还可能引发更多的生态系统干扰^[39]。郭兆迪则初步揭示出中国森林生物质碳汇的时空格局,其对估计国家碳预算至关重要,并有助于构成应对气候变化的可持续森林管理

(management) 政策^[40]。在此基础上于贵瑞首次研究亚热带森林 (subtropical forest) 生态系统碳平衡问题以及驱动因素,为研究全球碳汇分布格局提供理论基础,建立中国与国际相连的桥梁^[41]。在碳排放和碳固定方面,中国已被证明在决定全球碳平衡方面具有重要意义,基于明确的森林碳汇形成机制,下一步需要建立国际理念,对中国森林碳汇进行有效监管。因为森林的增长与扩张对森林碳汇的规模具有较大的贡献^[42]。目前针对保护森林碳汇问题,中国采取了多个生态恢复项目,并对项目结果进行了评估。冯晓明评估了退耕还林工程 (Grain for Green Project, GTGP) 项目结果,表明恢复受干扰和过度开发的生态系统有利于改善碳固定的效率,但土壤碳储存 (soil carbon) 的变化通常滞后于植物生产力的变化^[43]。2018 年逯非研究了中国国家生态修复工程对碳汇的影响,证明中国能够通过生态恢复项目和可持续森林管理减少发展中国家森林砍伐和森林退化导致的二氧化碳的排放^[44],国家生态恢复项目的实施可以成为中国国家气候变化减缓战略中一个重要的量化组成部分,在之后森林碳汇的研究方面,应继续给予高度重视。

表 6 森林碳汇研究分阶段重要关键词

Table 6 The important keywords at different phases of domestic forest carbon sink research

第一阶段 Stage 1			第二阶段 Stage 2			第三阶段 Stage 3		
关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency	关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency	关键词 Keywords	中心度 Centrality	被引频次 Frequency
forest	0.11	188	climate change	0.03	146	land use change	0.02	55
fluxes	0.09	66	sequestration	0.03	113	soil carbon	0.02	32
ecosystem	0.06	101	dynamics	0.06	102	boreal forest	0.03	31
CO ₂	0.06	101	bioma	0.06	98	management	0.01	30
climate	0.06	94	model	0.01	90	drought	0.02	29
atmospheric CO ₂	0.06	44	carbon sink	0.04	87	forest ecosystem	0.02	27
balance	0.05	61	impact	0.03	80	plantation	0.02	25
storage	0.04	149	respiration	0.02	70	elevated CO ₂	0.02	25
sink	0.04	90	terrestrial ecosystem	0.01	68	photosynthesis	0.01	25
net primary production	0.04	60	carbon dioxide	0.04	66	nitrous oxide	0.02	22
			stock	0.03	65	carbon stock	0.02	20
			nitrogen	0.06	62	deposition	0.01	19
			soil organic carbon	0.03	62	water	0.01	18
			carbon sequestration	0.02	60	subtropical forest	0	18
			eddy covariance	0.05	59	plant	0	16

4 讨论与展望

4.1 讨论

(1) 森林碳汇研究主线变化从运用大量方法测量森林碳平衡,到对森林碳汇稳定区域估计的理论归纳,再到将理论用于实践并全面实现对全球碳汇规模的监控。研究热点变化由森林是否为碳汇到森林碳汇的形成机制,再到实现监控管理下的可持续森林碳汇。20 世纪 50 年代末开始对大气中的二氧化碳进行首次高精度测量后不久,人们清楚地看到,如果所有人造的二氧化碳排放都留在大气中,全球平均二氧化碳增长率大大低于预期,寻找这种缺失的碳,并确定驱动碳汇的过程,是过去几十年碳循环研究的主要问题之一^[45]。在 20 世纪 90 年代,陆地生物圈的净吸收量有更大的增长^[33],森林碳汇成为全球学术界和政治界所关注的热点,关于世界不同地区的区域碳预算的文献越来越多,一些区域碳循环评估和进程项目的出现^[46],开始阐明驱动大气中二氧化碳来源和汇的趋势的过程,探讨森林碳汇的形成机制。随着森林碳汇评估和技术的发展,越来越多的研究用于解决人类生活面对的问题,化石燃料的大量使用以及毁林导致大气中温室气体浓度不断升高,

地球在不断变暖,巴黎气候大会形成的温室气体减排协议,为实现 21 世纪内将全球气温较工业化前水平的升高控制在 2℃ 以下做出重要指导,将森林碳汇研究理论用于实践,实现对全球碳汇规模的监控,保证国家生态安全和人类经济社会可持续发展。

(2) 国内森林碳汇研究主线变化从研究测量碳储量的方法,到运用大量方法测量中国森林碳平衡,再到中国森林碳汇稳定区域估计的理论归纳。研究热点由中国森林碳储量的变化,到中国森林是否为碳汇,再到中国森林碳汇的形成机制。人类活动显著改变了全球碳循环,打破了碳平衡,从而出现了全球气候变暖等问题^[47],森林可以通过光合作用吸收并固定 CO₂ 以减少大气 CO₂ 浓度,我国地域广阔,森林类型复杂多样,基于国际对森林碳汇的研究,我国科学家开始探讨中国森林的碳储量变化,但由于资料和技术缺乏,早期研究的结果各不相同^[48-49],21 世纪以后,随着数据的详细与技术的进步,为了准确评估中国森林碳汇,科学家从碳汇格局及其影响因素出发,探讨中国森林碳汇形成机制增加我国森林碳汇功能,研究发现中国碳汇能力的增加源于人工林建设、生态恢复、生态工程等因素。2020 年 9 月,习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布中国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(简称“双碳”目标),并将其纳入我国生态文明建设整体布局。2021 年 9 月,在《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中对增加森林蓄积量提出了明确要求,意味着高效提升中国森林碳汇能力是落实“双碳”目标的关键生态方法^[50],国内研究趋势逐渐与国际接轨,在未来中国会将理论用于实践,全面实现“双碳”目标。

4.2 展望

目前森林生态系统发挥的碳汇功能已得到证实,但对其碳汇分布和驱动因素的认识仍具有不确定性,尤其是国内碳汇研究,这种不确定性的存在会影响碳汇监控的准确性,为了实现对全球碳汇规模的准确监控和评估森林碳汇对我国实现“碳中和”目标的贡献,未来研究需关注以下两个方面:

(1) 增加森林生态系统调查和监测强度,将不同碳汇估算方法进行优势互补,通过“多数据、多过程、多尺度、多方法”相融合,构建“天-空-地”一体化的碳汇计算体系。目前区域尺度碳汇估算方法存在多样化,需及时构建统一标准的区域尺度碳汇观测体系,通过遥感手段加强 CO₂ 和大气 CO₂ 示踪物的观测,优化大气反演法提高区域碳收支反演能力,汲取相关理论归纳,进一步研发自然与人文耦合的生态系统碳循环过程模型和提升模型的精度,从而形成一体化的碳汇计算体系,提高碳汇评估的准确度,实现对碳汇规模的准确监控^[51]。

(2) 准确且全面评估森林碳汇对我国实现“碳中和”目标的贡献,推动“碳中和”目标的实现。我国政府已经明确要求“CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”,阐明我国陆地生态系统碳汇大小对于我国实施碳中和战略目标有着重要意义,森林碳汇作为陆地碳汇的重要组成部分,更应该明确其对我国实现“碳中和”目标的贡献。为此,在接下来的研究中,需要提出并采取相关增汇措施,比如适当更新森林年龄结构、根据气候变化进行树种匹配和林分设计等,准确量化环境变化和管理措施对碳汇的贡献,健全我国对生态系统碳汇潜力的预测体系,服务于我国“碳中和”的战略发展目标^[52]。

致谢: 申国珍、邓滢、葛结林和熊高明老师对写作给予帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *Bioscience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [2] Friedlingstein P. Carbon cycle feedbacks and future climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2054): 20140421.
- [3] Bäckstrand K, Löwbrand E. Planting trees to mitigate climate change: contested discourses of ecological modernization, green governmentality and civic environmentalism. *Global Environmental Politics*, 2006, 6(1): 50-75.
- [4] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2011.

- [5] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin III F S. 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.
- [6] Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, Poulter B, Arneeth A, Haverd V, Calle L. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 4382-4387.
- [7] Rogelj J, Schaeffer M, Meinshausen M, Knutti R, Alcamo J, Riahi K, Hare W. Zero emission targets as long-term global goals for climate protection. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(10): 105007.
- [8] Baccini A, Walker W, Carvalho L, Farina M, Sulla-Menashe D, Houghton R A. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*, 2017, 358(6360): 230-234.
- [9] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, Birdsey R A, de Bruin S, Farina M, Fatoyinbo L, Hansen M C, Herold M, Houghton R A, Potapov P V, Suarez D Requena, Roman-Cuesta R M, Saatchi S S, Slay C M, Turubanova S A, Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 234-240.
- [10] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [11] Brienen R J W, Phillips O L, Feldpausch T R, Gloor E, Baker T R, Lloyd J, Lopez-Gonzalez G, Monteagudo-Mendoza A, Malhi Y, Lewis S L, Vázquez Martínez R, Alexiades M, Álvarez Dávila E, Alvarez-Loayza P, Andrade A, Aragão L E O C, Araujo-Murakami A, Arets E J M M, Arroyo L, Aymard C G A, Bánki O S, Baraloto C, Barroso J, Bonal D, Boot R G A, Camargo J L C, Castilho C V, Chama V, Chao K J, Chave J, Comiskey J A, Comejo Valverde F, da Costa L, de Oliveira E A, Di Fiore A, Erwin T L, Fauset S, Forsthofer M, Galbraith D R, Grahame E S, Groot N, Hérault B, Higuchi N, Coronado E N H, Keeling H, Killeen T J, Laurance W F, Laurance S, Licona J, Magnussen W E, Marimon B S, Marimon-Junior B H, Mendoza C, Neill D A, Nogueira E M, Núñez P, Pallqui Camacho N C, Parada A, Pardo-Molina G, Peacock J, Peña-Claros M, Pickavance G C, Pitman N C A, Poorter L, Prieto A, Quesada C A, Ramírez F, Ramírez-Angulo H, Restrepo Z, Roopsind A, Rudas A, Salomão R P, Schwarz M, Silva N, Silva-Espejo J E, Silveira M, Stropp J, Talbot J, ter Steege H, Teran-Aguilar J, Terborgh J, Thomas-Caesar R, Toledo M, Torello-Raventos M, Umetzu R K, Van der Heijden G M F, Van der Hout P, Vieira I C G, Vieira S A, Vilanova E, Vos V A, Zagt R J. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 2015, 519(7543): 344-348.
- [12] 侯国林, 黄震方, 台运红, 张玲, 黄锦. 旅游与气候变化研究进展. *生态学报*, 2015, 35(9): 2837-2847.
- [13] 冯佳, 王克非, 刘霞. 近二十年国际翻译学研究动态的科学知识图谱分析. *外语电化教学*, 2014, (1): 11-20.
- [14] 陈悦, 陈超美, 胡志刚, 王贤文. 引文空间分析原理与应用: CiteSpace 实用指南. 北京: 科学出版社, 2014: 134, 136, 150.
- [15] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.
- [16] 郭涵宇. 新兴研究领域识别计量: 理论·指标·实例. 北京: 科学出版社, 2017: 105-105.
- [17] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016: 194-194.
- [18] 毛江涛, 徐文婷, 葛结林, 熊高明, 谢宗强. 乡村生态景观生物多样性研究热点和趋势——基于文献计量研究. *生态学报*, 2022, 42(09), 3869-3877.
- [19] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [20] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [21] Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, Laurance W F, Nuñez P V, Vasquez R M, Laurance S G, Ferreira L V, Stern M, Brown S, Grace J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 1998, 282(5388): 439-442.
- [22] Fan S, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. A large terrestrial carbon sink in north america implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, 282(5388): 442-446.
- [23] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik Ü, Berbigier P, Loustau D, Guðmundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404(6780): 861-865.
- [24] 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.
- [25] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible

- annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [26] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell B H, Apps M J, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G, Cramer W, Denning A S, Field C B, Friedlingstein P, Goodale C, Heimann M, Houghton R A, Melillo J M, Moore III B, Murdiyarso D, Noble I, Pacala S W, Prentice I C, Raupach M R, Rayner P J, Scholes R J, Steffen W L, Wirth C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [27] Gurney K R, Law R M, Denning A S, Rayner P J, Baker D, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen Y H, Ciais P, Fan S M, Fung I Y, Gloor M, Heimann M, Higuchi K, John J, Maki T, Maksyutov S, Masarie K, Peylin P, Prather M, Pak B C, Randerson J, Sarmiento J, Taguchi S, Takahashi T, Yuen C W. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 2002, 415(6872): 626-630.
- [28] Baker D F, Law R M, Gurney K R, Rayner P, Peylin P, Denning A S, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen Y H, Ciais P, Fung I Y, Heimann M, John J, Maki T, Maksyutov S, Masarie K, Prather M, Pak B, Taguchi S, Zhu Z. TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1988-2003. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1): GB1002.
- [29] Baldocchi D D. 'Breathing' of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26.
- [30] Pan Y, Chen J M, Birdsey R, McCullough K, He L, Deng F. Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences*, 2011, 8(3): 715-732.
- [31] Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, Marland G, Bopp L, Ciais P, Conway T J, Doney S C, Feely R A, Foster P, Friedlingstein P, Gurney K, Houghton R A, House J I, Huntingford C, Levy P E, Lomas M R, Majkut J, Metz N, Ometto J P, Peters G P, Prentice I C, Randerson J T, Running S W, Sarmiento J L, Schuster U, Sitch S, Takahashi T, Viovy N, van der Werf G R, Woodward F I. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 831-836.
- [32] 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, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [33] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, Tans P P, White J W C. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 2012, 488(7409): 70-72.
- [34] Sitch S, Friedlingstein P, Gruber N, Jones S D, Murray-Tortarolo G, Ahlström A, Doney S C, Graven H, Heinze C, Huntingford C, Levis S, Levy P E, Lomas M, Poulter B, Viovy N, Zaehle S, Zeng N, Arneth A, Bonan G, Bopp L, Canadell J G, Chevallier F, Ciais P, Ellis R, Gloor M, Peylin P, Piao S L, Le Quéré C, Smith B, Zhu Z, Myneni R. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 2015, 12(3): 653-679.
- [35] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [36] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, Zhang D Q, Tang X L, Zhou C Y, Yan J H, Mo J M. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417-1417.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [40] Guo Z D, Hu H F, Li P, Li N Y, Fang J Y. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. *Science China Life Sciences*, 2013, 56(7): 661-671.
- [41] Yu G R, Chen Z, Piao S, 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.
- [42] Fang J Y, Guo Z D, Hu H F, Kato T, Muraoka H, Son Y. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 2019-2030.
- [43] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- [44] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q,

- Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [45] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 1990, 247(4949): 1431-1438.
- [46] Canadell J, Ciais P, Sabine C, Joos F. Regional carbon cycle assessment and processes (RECCAP), Special issue. *Biogeosciences*, 2013, http://www.biogeosciences-discuss.net/special_issue83.html.
- [47] Luo Y Q, Weng E S. Dynamic disequilibrium of the terrestrial carbon cycle under global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(2): 96-104.
- [48] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, 2001, 49(3): 339-358.
- [49] Peng C H, Apps M J. Contribution of China to the global carbon cycle since the last glacial maximum. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1997, 49(4): 393-408.
- [50] Cook-Patton S C, Leavitt S M, Gibbs D, Harris N L, Lister K, Anderson-Teixeira K J, Briggs R D, Chazdon R L, Crowther T W, Ellis P W, Griscom H P, Herrmann V, Holl K D, Houghton R A, Larrosa C, Lomax G, Lucas R, Madsen P, Malhi Y, Paquette A, Parker J D, Paul K, Routh D, Roxburgh S, Saatchi S, van den Hoogen J, Walker W S, Wheeler C E, Wood S A, Xu L, Griscom B W. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. *Nature*, 2020, 585(7826): 545-550.
- [51] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.
- [52] 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, 陈世苹, 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.