



中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望

朴世龙^{1,2*}, 何悦¹, 王旭辉¹, 陈发虎²

1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: slpiao@pku.edu.cn

收稿日期: 2021-07-07; 收修改稿日期: 2021-12-18; 接受日期: 2022-01-24; 网络版发表日期: 2022-03-11

国家自然科学基金项目(批准号: 41988101)和国家重点研发计划项目(编号: 2019YFA0607304)资助

摘要 2020年9月, 中国向世界宣示力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标. 这一背景下, 中国陆地生态系统碳汇潜力受到空前关注, 成为各国政府、学术界、公众共同关心的热点议题. 文章聚焦中国陆地生态系统碳汇估算, 梳理不同估算方法的原理、优点和不足, 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, 并对未来研究思路提出建议, 以期为准准确估算中国陆地生态系统碳汇提供方法论参考, 为中国制定实现碳中和的减排政策提供科学支撑.

关键词 陆地生态系统, 碳汇, 碳中和, 中国

1 引言

近几十年来, 随着全球变化, 陆地生态系统成为大气二氧化碳(CO₂)一个重要的汇, 有效缓解了气候变暖(IPCC, 2013). 根据全球碳计划(Global Carbon Project)的估算, 2010~2019年陆地生态系统净吸收了同期31%的人类活动所释放的CO₂(Friedlingstein等, 2020). 需要指出的是, 陆地生态系统存在非常大的空间异质性, 因此全球尺度上陆地生态系统碳汇估算通常采用碳平衡方程残余项解析法: 人为活动向大气中排放的CO₂(化石燃料燃烧和土地利用变化所导致的CO₂排放)总量, 减去大气CO₂增量和海洋所固定的CO₂, 残余项即为陆地生态系统碳汇, 亦称剩余陆地碳汇. 这一间接估算方法的优点在于避开了陆地生态系统空间异质性的难题, 由相对比较容易获取的大气和海洋碳收支以及人

为活动碳排放数据得到. 但是, 由于残余项包含了碳平衡方程中其他变量的所有误差, 其估算结果的不确定性仍然很大. 不仅如此, 由于大气层CO₂混匀较快, 该方法仅适用于全球尺度, 而如何准确估算区域尺度陆地碳收支, 是学术界面临的一个巨大挑战.

自20世纪90年代以来, 各国科学家为估算区域尺度陆地碳汇开展了大量工作, 取得了共识性结论: 北半球陆地生态系统是一个重要碳汇, 其大小基本能够抵消全球碳收支的不平衡, 表明上世纪末所提出的“失踪的碳汇”问题已基本得到解决(Fan等, 1998; Pan等, 2011). 然而, 学术界对于北半球陆地碳汇的空间分布的认识仍存在较大不确定性. 例如, Fan等(1998)利用大气反演模型, 估算北美陆地碳汇为(1.7±0.5)Pg C a⁻¹, 几乎相当于同期整个北半球陆地碳汇的大小(Stephens等, 2007). 这一结果引起了极大争议, 众多学者认为,

中文引用格式: 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 2022. 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, 52(6): 1010-1020, doi: 10.1360/SSTe-2021-0197

英文引用格式: Piao S, He Y, Wang X, Chen F. 2022. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. Science China Earth Sciences, 65(4): 641-651, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9892-6>

Fan等(1998)所采用的估算方法高估了北美陆地碳汇(Field和Fung, 1999; Holland等, 1999; Houghton等, 1999). 类似的由不同方法引起的争议也曾发生在欧洲陆地碳汇估算研究中(Reuter等, 2017). 为更准确估算区域尺度陆地碳汇, 许多区域性碳循环研究计划相继启动, 例如: 北美碳计划(North American Carbon Program, NACP)、欧洲碳循环联合项目(Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance-Integrated Project, CarboEurope-IP)、非洲碳计划(Carbon cycle and other GHG gases in Sub-Saharan Africa, CarboAfrica)等.

在中国, 在科技部、国家自然科学基金委等的部署和支持下, 中国科学家们也针对中国陆地生态系统碳收支开展了一系列重要工作, 取得了丰硕的成果, 为中国达成碳中和目标和参与全球气候治理提供了关键科学支撑. 本文拟在总结区域陆地生态系统碳汇估算方法体系的基础上, 重点评述中国陆地碳汇估算前沿进展. 值得指出的是, 尽管目前的研究已经取得了很大的成就, 不同研究对中国陆地生态系统碳汇的估算结果依然存在较大的分歧与争议. 因此, 本文拟通过系统阐释不同碳汇估算方法的优缺点, 厘清不同研究结果分歧背后的原因, 以期抛砖引玉, 为更准确估算中国陆地生态系统碳汇提供研究思路和方法论参考.

2 区域陆地生态系统碳收支估算方法

区域陆地生态系统碳收支估算方法大体可分为“自下而上(Bottom-up)”和“自上而下(Top-down)”两种不同类型. “自下而上”的估算方法是指将样点或网格尺度的地面观测、模拟结果推广至区域尺度, 常用的“自下而上”方法包括清查法、涡度相关法和生态系统过程模型模拟法等. “自上而下”的估算方法主要指基于大气CO₂浓度反演陆地生态系统碳汇, 即大气反演法. 可以理解的是, 不同估算方法的优缺点和不确定性来源均不尽相同.

2.1 清查法

清查法主要基于不同时期资源清查资料的比较来估算陆地生态系统(主要是植被和土壤)碳储量变化, 即陆地生态系统碳汇强度(Dixon等, 1994; Fang等, 2001; Piao等, 2009; Pan等, 2011). 例如: 基于连续的

森林资源清查数据, 计算木材蓄积量变化, 再通过生物量转换方程推导出森林生物量碳储量变化(Fang等, 2001). 对于缺乏连续清查数据的生态系统类型, 如灌木、草地等, 则可建立植被碳储量观测值和遥感植被指数之间的统计关系, 结合遥感植被指数变化, 估算植被碳储量变化(Piao等, 2009). 此外, 利用不同时期的土壤普查数据与野外实测资料, 同样可以估算不同时期土壤碳储量的变化. 汇总植被与土壤碳储量的变化, 即可以得到整个区域的生态系统碳汇.

清查法的优点在于能够直接测算样点尺度植被和土壤的碳储量. 其局限性主要包括: (1) 清查周期长; (2) 清查数据侧重森林和草地等分布广泛的生态系统, 而在湿地等面积占比低的生态系统, 长期观测的清查数据稀缺, 导致区域尺度汇总结果存在一定的偏差; (3) 鉴于陆地生态系统空间异质性强, 在从样点到区域尺度碳储量的转换过程也存在较大不确定性; (4) 清查数据不包含生态系统碳横向转移, 如木材产品中的碳以及随土壤侵蚀而转移的有机碳等. 一般而言, 资源清查数据的样点覆盖密度是制约基于清查法的碳汇估算准确度的核心因素.

2.2 涡度相关法

涡度相关法根据微气象学原理, 直接测定固定覆盖范围(footprint, 通常数平方米到数平方千米)内陆地生态系统与大气间的净CO₂交换量, 据此通过尺度上演估算区域尺度净生态系统生产力(NEP)(Jung等, 2011; Yu等, 2014; Wang等, 2015; Yao等, 2018a). 涡度相关法主要优点在于可实现精细时间尺度(例如每半小时)上碳通量的长期连续定位观测, 从而能反映气候波动对NEP的影响(于贵瑞等, 2014). 涡度相关法的局限性主要包括: (1) 涡度相关法主要基于微气象学原理, 不可避免的会受到观测缺失, 下垫面和气象条件复杂、能量收支闭合度、观测仪器系统误差等因素影响, 从而给碳通量估算带来一定的观测误差和代表性误差; (2) 森林生态系统通量观测站点常设置在人为影响较小的区域, 难以兼顾林龄差异和生态系统异质性, 导致区域尺度碳汇推演结果存在偏差; (3) 农田生态系统涡度相关通量观测无法区分土壤碳收支部分与作物收获和秸秆, 因而难以准确估算农业生态系统碳收支; (4) 涡度观测法测定的碳通量通常不包含采伐、火灾等干扰因素的影响, 因此可能高估了区域尺

度上生态系统碳汇(Jung等, 2011). 例如, 基于全球涡度相关法观测得到的碳通量, 通过尺度上演估算的全球NEP为 23Pg C a^{-1} , 约为全球陆地碳汇的8倍(Jung等, 2011). 总之, 由于区域尺度上人为影响普遍存在且对碳汇有明显影响, 涡度相关法通常很少用于直接估算区域尺度上碳汇大小, 更多用于理解生态系统尺度上碳循环对气候变化的响应过程.

2.3 生态系统过程模型模拟法

基于过程的生态系统模型通过模拟陆地生态系统碳循环的过程机制, 对网格化的区域和全球陆地碳源汇进行估算, 它是包括全球碳计划在内的众多全球和区域陆地生态系统碳汇评估的重要工具(Friedlingstein等, 2020). 模型模拟法的优势在于可定量区分不同因子对陆地碳汇变化的贡献, 并可预测陆地碳汇的未来变化(Sitch等, 2008; Piao等, 2017). 其局限性主要包括: (1) 模型结构、参数以及驱动因子(如气候、土地利用变化数据等)仍存在较大不确定性; (2) 目前的生态系统过程模型普遍未考虑或简化考虑生态系统管理(如森林管理、农业灌溉等)对碳循环的影响(Piao等, 2018); (3) 多数模型未包括非 CO_2 形式的碳排放(如生物源挥发性有机物)与河流输送等横向碳传输过程(Regnier等, 2013). 由于不同模型在结构、参数和驱动因子等方面的显著差异, TRENDY、MsTMIP、ISI-MIP等多模型比较计划研究均表明, 生态系统过程模型模拟结果仍存在很大的不确定性, 给区域陆地生态系统碳汇模拟的可靠性带来较大争议(IPCC, 2013).

2.4 大气反演法

大气反演法是基于大气传输模型和大气 CO_2 浓度观测数据, 并结合人为源 CO_2 排放清单, 估算陆地碳汇(Bousquet等, 2000; Gurney等, 2002). 不同于“自下而上”的方法, 大气反演法的优点在于其可实时评估全球尺度的陆地碳汇功能及其对气候变化的响应. 大气反演法的局限性主要包括: (1) 目前, 基于大气反演法的净碳通量数据空间分辨率较低, 无法准确区分不同生态系统类型碳通量; (2) 大气反演法结果的精度受限于大气 CO_2 观测站点的数量与分布格局(目前 CO_2 浓度观测站主要分布在北美和欧洲, 发展中国家地区观测站分布非常有限)、大气传输模型的不确定性、 CO_2 排放清单(如化石燃料燃烧碳排放)的不确定性等; (3)

大气反演法普遍未考虑非 CO_2 形式的陆地与大气之间的碳交换, 以及国际贸易导致的碳排放转移. 总的来说, 随着目标区域变小, 大气反演结果的不确定性逐渐增大(Peylin等, 2013); 就国家尺度而言, 即使是具有较多的大气 CO_2 观测站点的欧美国家, 大气反演结果的不确定性也不可忽视.

3 中国陆地生态系统碳汇估算进展

3.1 中国陆地生态系统碳汇大小

如前文所述, 过去20年来, 中国科学家利用多种不同方法对中国陆地碳汇进行了估算, 其结果可汇总如图1所示. 这些研究一致表明中国陆地生态系统是一个重要碳汇, 但不同方法的估算结果存在一定的差异. 其中, 清查法估算中国陆地碳汇为 $0.21\sim 0.33\text{Pg C a}^{-1}$ (考虑内陆水体碳沉积量 $\sim 0.02\text{Pg C a}^{-1}$; Jiang等, 2016), 与生态系统过程模型估算结果($0.12\sim 0.26\text{Pg C a}^{-1}$)相当(图1a); 但基于大气反演法估算的结果具有很大的不确定性($0.17\sim 1.11\text{Pg C a}^{-1}$), 不同研究结果可相差一个数量级. 值得注意的是, 大气反演法结果中, Wang J等(2020)报道中国陆地碳汇为 $(1.11\pm 0.38)\text{Pg C a}^{-1}$, 相当于同期全球陆地碳汇的60%, 不仅高于其他方法估算的结果, 也远高于同样基于大气反演法的其他研究结果, 是造成大气反演法估算结果不确定性的最大来源. 例如, Chen等(2021)采用与Wang J等(2020)基本相同的大气 CO_2 浓度观测数据(除香港观测站), 但利用不同大气反演模型(CTC-5), 估算中国陆地碳汇大小(未校正木材与食品国际贸易等碳排放转移量和非 CO_2 形式碳排放)为 0.45Pg C a^{-1} (Chen等, 2021), 仅相当于Wang J等(2020)估算结果的41%. 总体上, 除Wang J等(2020)以外, 校正木材与食品国际贸易等碳排放转移量以及非 CO_2 形式碳排放量后($\sim 0.14\text{Pg C a}^{-1}$; Wang等, 2021), 基于大气反演模型估算的中国陆地碳汇为 $0.17\sim 0.35\text{Pg C a}^{-1}$ (图1a), 这与基于“自下而上”的清查法的估算结果基本吻合.

通过上述不同方法估算的中国陆地生态系统碳汇大小的对比, 我们发现不同反演模型估算结果间存在较其他方法大得多的不确定性. 因此, 有必要谨慎对待单一大气反演模型的估算结果, 并用基于地面观测的估算结果进一步核对. 我们也注意到, 大气反演法高估区域碳汇大小在北美和欧洲碳汇研究中同样发生

表1 不同陆地生态系统碳汇估算方法的优点和缺点

估算方法	优点	缺点
清查法	样点尺度植被和土壤碳储量观测结果较准确	(1) 清查周期长, 空间分辨率低; (2) 生态系统覆盖不全, 如湿地等; (3) 样点-区域尺度碳汇转换不确定性较大; (4) 未包含生态系统碳横向转移
自下而上	涡度相关法 可实现精细时间尺度生态系统碳通量的长期连续定位观测, 有助于理解碳循环过程对环境变化的响应及其机理	(1) 存在观测缺失、地形复杂、气象条件复杂、能量收支不闭合、观测仪器系统误差等问题; (2) 观测点人为干扰小, 难以兼顾生态系统异质性; (3) 无法区分农田生态系统土壤碳变化与作物收获等碳通量分量; (4) 未考虑采伐、火灾等干扰因素的影响, 高估区域尺度上生态系统碳汇
	生态系统过程模型模拟法 可定量区分不同驱动因子对陆地碳汇变化的贡献, 可预测陆地碳汇未来变化	(1) 模型结构和参数存在较大不确定性; (2) 普遍未考虑或简化考虑生态系统管理对碳循环的影响; (3) 多数模型未包括非CO ₂ 形式碳排放和河流输送等横向碳传输过程
自上而下	大气反演法 可估算全球尺度的碳源汇实时变化	(1) 空间分辨率较低, 无法准确区分不同生态系统类型碳通量; (2) 反演精度受限于大气CO ₂ 观测站点的数量与分布格局、大气传输模型和CO ₂ 排放清单的不确定性等; (3) 普遍未考虑非CO ₂ 形式的陆地-大气间碳交换, 以及国际贸易导致的碳排放转移等

过(Fan等, 1998; Reuter等, 2017), 进一步说明对大气反演模型结果进行地面校正的必要性. 此外, 最近研究指出, Wang J等(2020)高估中国陆地碳汇的另一个原因是其将香格里拉观测站CO₂浓度数据用于低分辨率大气反演模型反演. 香格里拉观测站位于地形复杂的横断山脉, 用于代表网格尺度(4°×5°)大气CO₂浓度时存在显著偏差(Wang等, 2021), 浓度差可达5ppm(1ppm=1μL L⁻¹). 这一大气CO₂浓度偏差足以显著影响大气反演结果. 例如, 剔除香格里拉站数据后, 法国大气反演模型(CAMS)估算中国陆地碳汇大小较剔除前下降50%, 为0.25Pg C a⁻¹ (Wang等, 2021), 这一结果与其他方法得到的碳汇大小接近. 因此, 合理选择和布置大气CO₂观测站也是利用大气反演法准确估算区域陆地碳汇的关键.

3.2 中国陆地生态系统碳汇占全球陆地碳汇的比例

基于以上汇总的中国陆地碳汇研究结果, 我们发现, 中国以其约占全球6.5%的陆地面积, 贡献了相当于全球陆地生态系统净CO₂吸收量的10~31%(图1b; Wang J等(2020)除外), 表明中国陆地生态系统在全球生态系统碳汇中具有重要作用. 较之于全球其他区域, 中国陆地生态系统碳汇总量与欧洲相当(0.14~0.23Pg C a⁻¹)(Janssens等, 2003; Ciais等, 2006, 2020), 但小于美国(0.30~0.58Pg C a⁻¹)(Pacala等, 2001; King等, 2015); 就单位面积而言, 中国陆地生态系统碳汇(18~37gC m⁻² a⁻¹)也与欧洲相当(16~26gC m⁻² a⁻¹). 需

要指出的是, 尽管中美两国森林生态系统单位面积碳汇大小相近(1.22 vs. 0.94Mg C ha⁻¹ a⁻¹; Pan等, 2011), 但由于中国荒漠与裸地面积占比远大于美国, 导致国家尺度上, 中国陆地生态系统单位面积碳汇仅为美国的一半左右(33~63gC m⁻² a⁻¹).

有趣的是, 不同于清查法、生态系统过程模拟和大气反演法, 涡度相关法估算中国陆地净生态系统生产力(NEP)的全球占比仅为5~8%(Yu等, 2014; Wang等, 2015; Tramontana等, 2016; Yao等, 2018a), 远低于图1所汇总的中国陆地生态系统碳汇全球占比. 需要注意的是, 区域尺度上NEP不等于碳汇, 因前者不涵盖生态系统干扰和生态系统管理等带来的碳源汇变化. 因此, 对比中国陆地生态系统NEP和碳汇的全球占比之间的显著差异, 进一步说明植树造林等生态系统工程以及生态系统管理对中国生态系统碳汇的贡献大于全球平均水平. 同时, 由于中国人工林当前以幼龄林和中龄林为主(Zhang等, 2017), 比老龄林具有更大碳汇潜力. 因此, 相比于欧洲和美国, 中国森林生态系统未来固碳潜力可能更大, 其具体大小和分布需要进一步研究.

3.3 中国陆地生态系统碳汇抵消工业排放比例

中国陆地生态系统显著的碳汇功能有效抵消了中国部分工业碳排放(图1c). 然而值得注意的是, 20世纪80年代以来, 中国化石燃料燃烧碳排放总量平均每年增长15%(Friedlingstein等, 2020), 导致中国陆地碳汇抵消同期化石燃料燃烧碳排放的比例不断下降(图1c), 从20世纪80~90年代的~30%, 降至2010年以来的

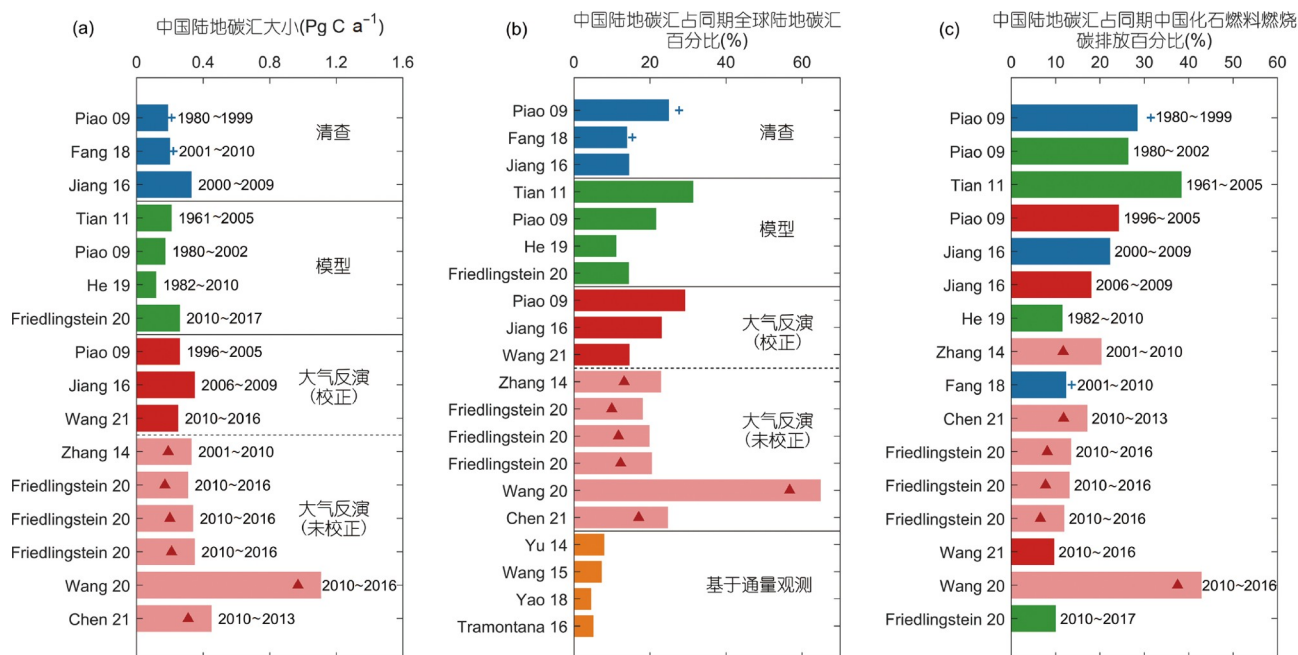


图 1 基于不同方法估算的中国陆地生态系统碳汇大小

(a) 中国陆地碳汇大小. 蓝色、绿色与红色(包括淡红色)分别表示基于清查法、过程模型模拟法与大气反演法估算得到的碳汇大小. 其中, 蓝色十字表示清查法中考虑内陆水体碳沉积后的估算值; 淡红色表示未经校正的大气反演模型估算值, 红色三角形表示校正横向碳输送和非CO₂形式碳排放后的估算值. (b) 中国陆地碳汇占同期全球陆地碳汇的百分比. 橘黄色表示基于涡度相关法估算的净生态系统生产力(NEP)的全球占比值. (c) 中国陆地碳汇占同期中国化石燃料燃烧碳排放(E_{FOS})的百分比. 中国 E_{FOS} 与全球陆地净碳汇数据均来自全球碳计划2020年年度评估报告(Friedlingstein等, 2020). 注意(c)中从上到下不同研究按其研究的时间范围从早到晚排列

7~15%. 这意味着, 尽管植树造林等生态工程增汇可缓解中国减排压力, 但碳汇增速(图1a)远小于同期化石燃料燃烧造成的碳排放增速. 另外, 在森林生长中后期, 生态系统碳汇强度可随林龄增加而下降. 因此, 可以预料, 未来随着中国成熟林和老龄林比例不断上升, 陆地碳汇作为抵消工业碳排放的工具之一其效应会进一步减弱. 多种减排手段综合应用是中国达成碳中和目标的必由之路.

4 展望

陆地生态系统碳汇“可测量、可报告、可核查”是制定中国减排增汇政策的重要科学基础. 如何及时、有效地满足这一决策需求对科学界既是一个挑战, 更是一个机遇. 由于区域尺度陆地碳汇估算方法不一, 给碳汇估算结果带来了很大的不确定性, 这在本文对中国陆地生态系统碳汇估算结果的汇总和评述中也得到了充分的体现. 目前, 前文所述的四类区域碳汇估算

方法仍然是定量研究中国陆地生态系统碳汇及其时空变化的重要手段且在进一步完善中, 基于这四类不同方法的新的观测、计算和模拟结果正在不断涌现. 同时, 由于不同方法涉及多个时空尺度, 且其不确定性来源存在差异, 因此对其不确定性进行定量评估也是当前研究的一大难题. 鉴于不同方法利弊兼具, 且优势互补, 我们建议, 在进一步完善各估算手段的基础上, 亟需通过“多数据、多过程、多尺度、多方法”相融合, 构建“天-空-地”一体化的中国陆地生态系统碳收支计量体系(图2). 为此, 未来须加强如下几个方面的工作.

4.1 补齐中国陆地碳汇关键区观测短板, 构建统一标准的国家尺度陆地碳汇观测体系

数十年来, 中国科学家针对中国陆地生态系统碳收支开展了大量观测研究工作, 为摸清中国陆地碳汇家底和潜力奠定了坚实基础. 然而, 由于中国陆地生态系统类型丰富、分布广泛, 陆地碳汇关键区观测仍

然不足, 如下三方面短板亟待补齐。

加强地下碳库, 尤其是土壤碳库变化观测。当前中国地上植被碳库观测较为充分, 并可与遥感观测相结合来反映不同时空尺度植被碳库的变化。但全国范围统一标准的土壤碳库定期观测仍然不足, 特别是中西部地区土壤碳储量估算不确定性仍较大。例如, 对青藏高原0~3m深冻土碳库的估算不同研究的结果相差一倍以上(Ding等, 2019; Wang T H等, 2020)。为了准确估算中国土壤碳库及其变化, 须定期开展统一标准的、全面覆盖的土壤碳库清查。

加强湿地、荒漠等气候变化敏感区碳汇观测。以往的陆地生态系统碳汇观测主要侧重于森林、草地等生态系统类型; 然而, 湿地、荒漠等非林草生态系统类型的碳汇在准确估算国家尺度陆地碳汇时不容忽视。例如, 全新世以来若尔盖湿地土壤碳积累速率达5~48g C m⁻² a⁻¹, 具有明显的碳汇潜力(Chen等, 2014)。另外, 生态系统碳库包括有机碳和无机碳两类组分。在我国, 土壤无机碳库主要以碳酸盐形式存在于西北荒漠区, 盐碱性土壤水溶解吸收CO₂形成无机碳汇。由于中国荒漠区的巨大面积, 这种非生物碳固定潜力亦不容小觑(Li等, 2015)。然而, 近年来氮沉降与气候变化等因素可导致中国土壤无机碳的大量损失(Raza等, 2020; Song等, 2022), 由于国家尺度上荒漠地区陆地碳汇尚无统一观测, 数据稀缺, 今后亟需加大该方向的研究力度。

加强人为活动干扰区生态系统碳汇观测。传统的生态系统观测通常建立在人为干扰较少的生态系统, 然而对于区域碳源汇功能来说, 人类活动包括人为干扰和生态系统管理有着不可忽视的影响。例如, 中国植树造林贡献了全球陆地25%的绿化增量(Chen等, 2019; Piao等, 2020a), 但研究发现, 植树造林是否增加土壤碳储量却因地而异, 受树种和土壤本底碳储量显著影响(Hong等, 2020)。在青藏高原高寒草地, 放牧和禁牧并存, 围封年限显著影响草地固碳(Sun等, 2020)。人为活动对全国尺度陆地生态系统碳汇的作用仍有待系统性清查; 尤其是, 森林采伐、牲畜啃食等导致的有机碳横向转移及其变化观测仍然不足, 亟待加强。

4.2 加强遥感CO₂观测及大气CO₂示踪物观测, 建立中国陆地生态系统碳收支和化石燃料碳排放协同反演体系

大气反演法不仅是估算区域尺度陆地碳收支的重

要方法, 也是评价减排成效的关键手段。《IPCC 2006年国家温室气体清单指南 2019修订版》明确提出要基于卫星遥感和地面大气浓度观测, 利用大气反演系统估算温室气体排放量, 作为传统“自下而上”清单结果的独立验证。为实现近实时高分辨率CO₂浓度观测和通量反演, 美国和欧洲均已提出新一代综合CO₂观测反演体系的发展蓝图, 而中国区域碳收支反演能力仍有待加强。

目前, 大气反演中国陆地生态系统碳收支的主要瓶颈是当前中国大气CO₂浓度长期观测数据稀缺, 据此难以准确估算国家尺度陆地生态系统碳收支(Wang等, 2021), 更无法支撑高空间分辨率的各省区碳收支评估。因此, 扩展地面CO₂观测网络势在必行。为了科学高效地建设地面CO₂观测网络, 需要基于大气传输模型评估潜在站点位置的CO₂足迹范围, 并使用大气反演模型评估潜在站点的观测数据是否能够有效降低区域碳收支估算的不确定性, 以实现较高的建设效费比。与此同时, 蓬勃发展的卫星遥感CO₂柱浓度数据可以成为填补地面CO₂观测数据空缺的重要补充手段。然而遥感CO₂观测尚未在中国陆地碳收支反演中发挥作用, 中国目前仅有一颗专用于温室气体柱浓度监测的科学实验卫星(TANSat), 此外少数其他卫星(风云3D和高分5号卫星)可用于大气CO₂柱浓度的观测。因此, 未来须研发新一代高时空分辨率的国产温室气体浓度观测卫星, 并建立高精度辐射传输模式和分子光谱学数据库, 提升CO₂柱浓度数据精度, 以有效提升中国陆地碳汇反演能力。

另一方面, 传统的大气反演只能对陆地-大气净碳通量做出估计, 对人为和生态系统的碳源汇分配缺少相应的观测约束, 只能依赖化石燃料碳排放清单信息。而目前的碳排放清单在区域和城市尺度存在较大不确定性, 导致生态系统碳汇估算结果不够准确(Chevallier等, 2019)。最近的研究表明, 通过结合大气CO₂碳同位素(¹³C和¹⁴C)和硫化羰(COS)等大气CO₂示踪物的观测可以有效分离化石燃料碳排放与生态系统碳收支(Keeling等, 2017; Campbell等, 2017; Basu等, 2020)。为此, 需要建立大气CO₂浓度、碳同位素和硫化羰协同观测网络, 开发基于高精度遥感-地基站点多物种观测的综合反演模型, 发展陆地生态系统碳收支与化石燃料碳排放的综合反演体系, 实现分区域、分省的排放监测和估算。该反演体系可服务于巴黎协定履约成

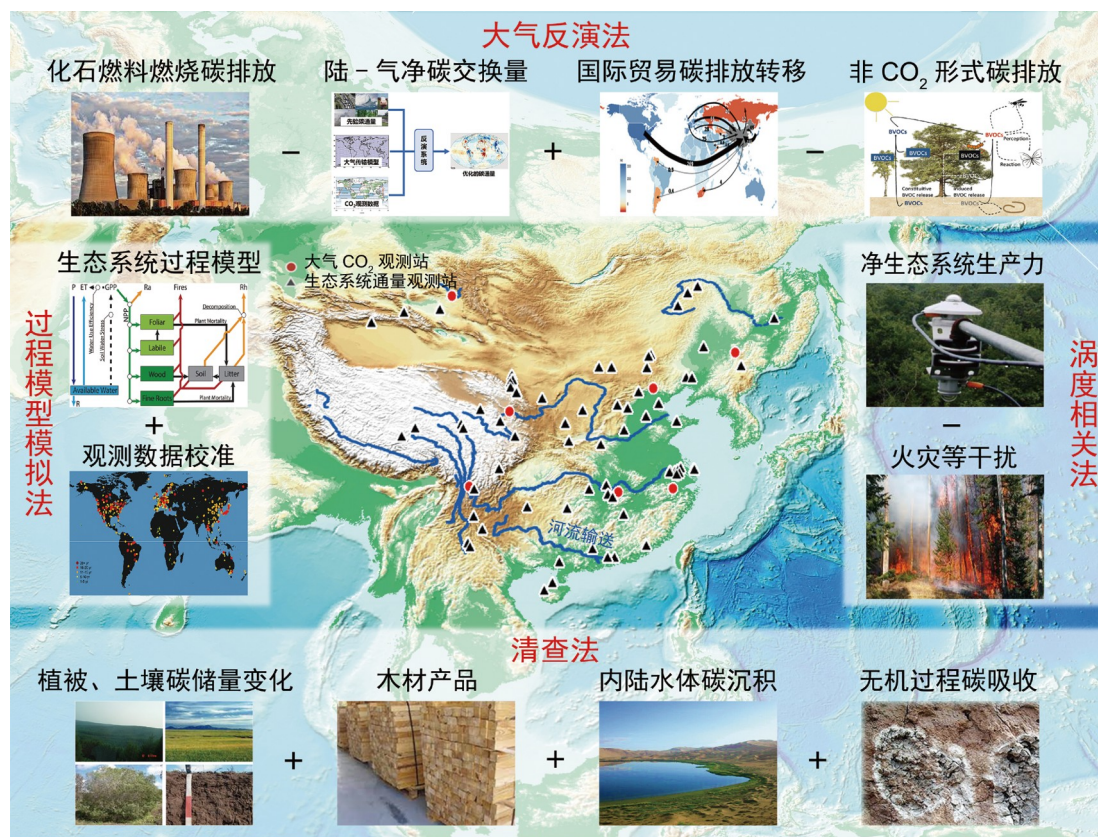


图2 中国陆地生态系统碳汇综合观测和评估方法体系示例

陆地生态系统碳通量观测站点位置(ChinaFlux, www.chinaflux.org/)用灰色三角形表示, 大气CO₂观测站位置用红色圆点表示. 该系统由多种不同方法(清查法、涡度相关法、过程模型模拟法, 大气反演法)组成, 通过“多数据、多过程、多尺度、多方法”的融合, 以兼容不同方法和观测平台的优势, “天-空-地”一体化协同监测和评估中国陆地生态系统碳汇

效评估, 还有助于为全球和区域尺度陆地碳汇估算提供中国方案与数据, 促进减排增汇国际合作.

4.3 研发自然-人文耦合的陆地生态系统碳循环过程模型, 着力提升中国陆地碳汇稳定性预测能力

基于过程的生态系统碳循环模型是预测未来陆地碳汇变化的重要工具. 目前有十多种不同碳循环模型广泛用于全球碳计划和IPCC的全球陆地生态系统碳收支的动态变化评估. 然而, 还没有中国自主知识产权的碳循环模型在全球陆地碳循环前沿研究中占据重要地位. 这其中很重要的原因是我们在该领域起步较晚、研究基础薄弱, 急需加强生态系统碳循环模型研发.

发展中国特色的生态系统碳循环模型, 一个潜在的重要突破口可能在于将人类活动对生态系统的影响过程有机融合到模型中去. 经过30多年的发展, 国际上主流碳循环模型已能够较完备地模拟自然生态系统的

碳循环过程对气候变化的响应(Fisher和Koven, 2020; Friedlingstein等, 2020), 但普遍不能较好刻画人类活动对生态系统的影响(Bonan和Doney, 2018). 比如, 仅有少部分模型能够刻画森林管理对生态系统碳源汇的影响(Pugh等, 2019); 绝大部分模型未考虑陆地生态系统有机碳横向传输过程(Ciais等, 2021)、农业生态系统管理(Le Quéré等, 2018)和林龄对碳汇的影响(Yao等, 2018b); 可同时模拟这些过程的模型更是尚未见诸报道. 因此, 准确量化自然与人为活动各分量对陆地生态系统增汇潜力的贡献仍然具有很大挑战性. 考虑到过去数十年中国陆地生态系统碳汇很大程度上得益于退耕还林、植树造林等生态工程(Lu等, 2018), 研发自然-人文耦合的生态系统碳循环过程模型对准确预测中国陆地生态系统碳汇潜力并定量区分自然与人为因素的贡献至关重要(傅伯杰, 2018).

另一方面, 观测结果表明, 陆地生态系统碳汇稳定

性较弱(Piao等, 2020b), 例如极端气候事件导致生态系统大量释放CO₂, 可完全或部分抵消区域尺度上生态系统多年累积的净碳吸收(Ciais等, 2005; 朴世龙等, 2019). 然而当前模型普遍不能准确反应生态系统碳汇对极端气候事件的响应, 尤其是极端气候事件响应的不稳定性特征(Schewe等, 2019). 预测生态系统碳汇的稳定性, 尤其是气候变化敏感区、生态脆弱区, 或碳汇关键区(如中国青藏高原、黄土高原、西南喀斯特地区)的碳汇稳定性, 对于准确预测中国陆地碳汇变化以及加强生态系统管理都非常关键. 这些也是当前模型发展的薄弱环节. 因此, 亟需在自然-人文耦合生态系统过程模型中, 准确刻画生态系统对极端气候事件响应、冻土冻融等过程, 建立适用于中国不同生态系统的碳循环参数数据集, 提升模型模拟的精度与时空分辨率.

5 结论

阐明中国陆地生态系统碳汇大小对于中国实施碳中和战略目标有着重要意义. 已有研究报道的中国陆地碳汇大小有着非常大的差别, 本文通过对国内外学术界在碳汇估算方法进展方面的概括和评述, 对造成这一现象背后的方法差异进行了详细梳理和阐释. 综合考虑已有的研究结果及其使用方法的优点和不足, 我们认为, 当前中国陆地生态系统是一个重要碳汇, 基于不同方法估算得到的平均值为 0.24 Pg C a^{-1} ($0.17\sim 0.35 \text{ Pg C a}^{-1}$). 由于中国化石燃料燃烧碳排放总量的快速增加, 中国陆地碳汇抵消同期化石燃料燃烧碳排放的比例不断下降, 从20世纪80~90年代的~30%降至2010年以来的7~15%. 未来研究应通过“多数据、多过程、多尺度、多方法”相融合, 构建“天-空-地”一体化的中国陆地生态系统碳收支计量体系, 构建中国陆地碳汇管理决策支持系统, 为2060年碳中和目标实现提供科学依据.

致谢 感谢刘永稳博士、汪宜龙博士在写作过程中的帮助.

参考文献

傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 37: 1–

- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1321–1334
- 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 2014. 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, 33: 903–917
- Basu S, Lehman S J, Miller J B, Andrews A E, Sweeney C, Gurney K R, Xu X, Southon J, Tans P P. 2020. Estimating US fossil fuel CO₂ emissions from measurements of ¹⁴C in atmospheric CO₂. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117: 13300–13307
- Bonan G B, Doney S C. 2018. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 359: 6375
- Bousquet P, Peylin P, Ciais P, Le Quere C, Friedlingstein P, Tans P P. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 290: 1342–1346
- Campbell J E, Berry J A, Seibt U, Smith S J, Montzka S A, Launois T, Belviso S, Bopp L, Laine M. 2017. Large historical growth in global terrestrial gross primary production. *Nature*, 544: 84–87
- Chen B, Zhang H, Wang T, Zhang X. 2021. An atmospheric perspective on the carbon budgets of terrestrial ecosystems in China: Progress and challenges. *Sci Bull*, 66: 1713–1718
- Chen C, Park T, Wang X, Piao S, Xu B, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z, Nemani R R, Myneni R B. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain*, 2: 122–129
- Chen H, Yang G, Peng C, Zhang Y, Zhu D, Zhu Q, Hu J, Wang M, Zhan W, Zhu E, Bai Z, Li W, Wu N, Wang Y, Gao Y, Tian J, Kang X, Zhao X, Wu J. 2014. The carbon stock of alpine peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau during the Holocene and their future fate. *Quat Sci Rev*, 95: 151–158
- Chevallier F, Remaud M, O'Dell C W, Baker D, Peylin P, Cozic A. 2019. Objective evaluation of surface- and satellite-driven carbon dioxide atmospheric inversions. *Atmos Chem Phys*, 19: 14233–14251
- Ciais P, Borges A V, Abril G, Meybeck M, Folberth G, Hauglustaine D, Janssens I A. 2006. The impact of lateral carbon fluxes on the European carbon balance. *Biogeosciences*, 5: 1259–1271
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Kerönen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437: 529–533

- Ciais P, Yao Y, Gasser T, Baccini A, Wang Y, Lauerwald R, Peng S, Bastos A, Li W, Raymond P A, Canadell J G, Peters G P, Andres R J, Chang J, Yue C, Dolman A J, Haverd V, Hartmann J, Laruelle G, Konings A G, King A W, Liu Y, Luysaert S, Maignan F, Patra P K, Peregon A, Regnier P, Pongratz J, Poulter B, Shvidenko A, Valentini R, Wang R, Broquet G, Yin Y, Zscheischler J, Guenet B, Goll D S, Ballantyne A P, Yang H, Qiu C, Zhu D. 2021. Empirical estimates of regional carbon budgets imply reduced global soil heterotrophic respiration. *Natl Sci Rev*, 8: 10.1093/nsr/nwaa145
- Ding J Z, Wang T, Piao S L, Smith P, Zhang G L, Yan Z J, Ren S, Liu D, Wang S P, Chen S Y, Dai F Q, He J S, Li Y N, Liu Y W, Mao J F, Arain A, Tian H Q, Shi X Y, Yang Y H, Zeng N, Zhao L. 2019. The paleoclimatic footprint in the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region. *Nat Commun*, 10: 4195
- Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263: 185–190
- Fan S, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282: 442–446
- Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320–2322
- Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. 2018. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 4015–4020
- Field C B, Fung I Y. 1999. The not-so-big U.S. carbon sink. *Science*, 285: 544–545
- Fisher R A, Koven C D. 2020. Perspectives on the future of land surface models and the challenges of representing complex terrestrial systems. *J Adv Model Earth Syst*, 12: e2018MS001453
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Aragão L E O C, Armeth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit-Cattin A, Bittig H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Evans W, Florentie L, Forster P M, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Ilyina T, Jain A K, Joetzjer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Marland G, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, van der Werf G, Vuichard N, Walker A P, Wanninkhof R, Watson A J, Willis D, Wiltshire A J, Yuan W, Yue X, Zaehle S. 2020. Global carbon budget 2020. *Earth Syst Sci Data*, 12: 3269–3340
- 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, 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. 2002. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415: 626–630
- 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 G, 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. 2019. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *Natl Sci Rev*, 6: 505–514
- Holland E A, Brown S, Potter C S, Fan S A K, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. 1999. North American carbon sink. *Science*, 283: 1815
- Hong S B, Yin G D, Piao S L, Dybzinski R, Cong N, Li X Y, Wang K, Penuelas J, Zeng H, Chen A P. 2020. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nat Sustain*, 3: 694–700
- Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. 1999. The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285: 574–578
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, Smith P, Nabuurs G J, Folberth G, Schlamadinger B, Hutjes R W A, Ceulemans R, Schulze E D, Valentini R, Dolman A J. 2003. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 300: 1538–1542
- 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. 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Sci Rep*, 6: 22130
- Jung M, Reichstein M, Margolis H A, Cescatti A, Richardson A D, Arain M A, Armeth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen J, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law B E, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C. 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J*

- Geophys Res*, 116: G00J07
- Keeling R F, Graven H D, Welp L R, Resplandy L, Bi J, Piper S C, Sun Y, Bollenbacher A, Meijer H A J. 2017. Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: 10361–10366
- King A W, Andres R J, Davis K J, Hafer M, Hayes D J, Huntzinger D N, de Jong B, Kurz W A, McGuire A D, Vargas R, Wei Y, West T O, Woodall C W. 2015. North America's net terrestrial CO₂ exchange with the atmosphere 1990–2009. *Biogeosciences*, 12: 399–414
- Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, Sitch S, Pongratz J, Manning A C, Ivar Korsbakken J, Peters G P, Canadell J G, Jackson R B, Boden T A, Tans P P, Andrews O D, Arora V K, Bakker D C E, Barbero L, Becker M, Betts R A, Bopp L, Chevallier F, Chini L P, Ciais P, Cosca C E, Cross J, Currie K, Gasser T, Harris I, Hauck J, Haverd V, Houghton R A, Hunt C W, Hurtt G, Ilyina T, Jain A K, Kato E, Kautz M, Keeling R F, Klein Goldewijk K, Körtinger A, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lima I, Lombardozzi D, Metz N, Millero F, Monteiro P M S, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Nojiri Y, Antonio Padin X, Peregon A, Pfeil B, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Reimer J, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Stocker B D, Tian H, Tilbrook B, Tubiello F N, Laan-Luijkx I T V, Werf G R V, Van Heuven S, Viovy N, Vuichard N, Walker A P, Watson A J, Wiltshire A J, Zaehle S, Zhu D. 2018. Global carbon budget 2017. *Earth Syst Sci Data*, 10: 405–448
- Li Y, Wang Y G, Houghton R A, Tang L S. 2015. Hidden carbon sink beneath desert. *Geophys Res Lett*, 42: 5880–5887
- Lu F, Hu H, Sun W, Zhu J, Liu G, Zhou W, Zhang Q, Shi P, Liu X, Wu X, Zhang L, Wei X, Dai L, Zhang K, Sun Y, Xue S, Zhang W, Xiong D, Deng L, Liu B, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J, Huang Y, He N, Zhou G, Bai Y, Xie Z, Tang Z, Wu B, Fang J, Liu G, Yu G. 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 4039–4044
- 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. 2001. Consistent land-and atmosphere-based US carbon sink estimates. *Science*, 292: 2316–2320
- 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, Josep G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S, McGuire A D, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. 2011. A large and persistent carbon sink in the World's forests. *Science*, 333: 988–993
- Peylin P, Law R M, Gurney K R, Chevallier F, Jacobson A R, Maki T, Niwa Y, Patra P K, Peters W, Rayner P J, Rödenbeck C, van der Laan-Luijkx I T, Zhang X. 2013. Global atmospheric carbon budget: Results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions. *Biogeosciences*, 10: 6699–6720
- Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458: 1009–1013
- 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 Q C, Liu Y, Myneni R B, Peng S S, Pongratz J, Sitch S, Yan T, Wang Y, Zhu Z C, Wu D H, Wang T. 2018. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period. *Nat Geosci*, 11: 739–743
- Piao S L, Liu Z, Wang T, Peng S S, Ciais P, Huang M T, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J F, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X Y, Stohl A, Yao Y T, Zhu Z C, Tans P P. 2017. Weakening temperature control on the interannual variations of spring carbon uptake across northern lands. *Nat Clim Change*, 7: 359–363
- Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. 2020a. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 14–27
- Piao S L, Wang X H, Wang K, Li X Y, Bastos A, Canadell J G, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S. 2020b. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives. *Glob Change Biol*, 26: 300–318
- Pugh T A M, Lindeskog M, Smith B, Poulter B, Arneeth A, Haverd V, Calle L. 2019. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116: 4382–4387
- Raza S, Miao N, Wang P, Ju X, Chen Z, Zhou J, Kuzyakov Y. 2020. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. *Glob Change Biol*, 26: 3738–3751
- Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie F T, Gruber N, Janssens I A, Laruelle G G, Lauerwald R, Luysaert S, Andersson A J, Arndt S, Arnosti C, Borges A V, Dale A W, Gallego-Sala A, Goddérís Y, Goossens N, Hartmann J, Heinze C, Ilyina T, Joos F, LaRowe D E, Leifeld J, Meysman F J R, Munhoven G, Raymond P A, Spahni R, Suntharalingam P, Thullner M. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nat Geosci*, 6: 597–607
- Reuter M, Buchwitz M, Hilker M, Heymann J, Bovensmann H, Burrows J P, Houweling S, Liu Y Y, Nassar R, Chevallier F, Ciais P, Marshall J, Reichstein M. 2017. How much CO₂ is taken up by the European terrestrial biosphere? *Bull Am Meteorol Soc*, 98: 665–

- Schewe J, Gosling S N, Reyer C, Zhao F, Ciais P, Elliott J, Francois L, Huber V, Lotze H K, Seneviratne S I, van Vliet M T H, Vautard R, Wada Y, Breuer L, Büchner M, Carozza D A, Chang J, Coll M, Deryng D, de Wit A, Eddy T D, Folberth C, Frieler K, Friend A D, Gerten D, Gudmundsson L, Hanasaki N, Ito A, Khabarov N, Kim H, Lawrence P, Morfopoulos C, Müller C, Müller Schmied H, Orth R, Ostberg S, Pokhrel Y, Pugh T A M, Sakurai G, Satoh Y, Schmid E, Stacke T, Steenbeek J, Steinkamp J, Tang Q, Tian H, Tittensor D P, Volkholz J, Wang X, Warszawski L. 2019. State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes. *Nat Commun*, 10: 1005
- Sitch S, Huntingford C, Gedney N, Levy P E, Lomas M, Piao S L, Betts R, Ciais P, Cox P, Friedlingstein P, Jones C D, Prentice I C, Woodward F I. 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Glob Change Biol*, 14: 2015–2039
- Song X D, Yang F, Wu H Y, Zhang J, Li D C, Liu F, Zhao Y G, Yang J L, Ju B, Cai C F, Huang B, Long H Y, Lu Y, Sui Y Y, Wang Q B, Wu K N, Zhang F R, Zhang M K, Shi Z, Ma W Z, Xin G, Qi Z P, Chang Q R, Ci E, Yuan D G, Zhang Y Z, Bai J P, Chen J Y, Chen J, Chen Y J, Dong Y Z, Han C L, Li L, Liu L M, Pan J J, Song F P, Sun F J, Wang D F, Wang T W, Wei X H, Wu H Q, Zhao X, Zhou Q, Zhang G L. 2022. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale. *Natl Sci Rev*, 9: 10.1093/nsr/nwab120
- Stephens B B, Gurney K R, Tans P P, Sweeney C, Peters W, Bruhwiler L, Ciais P, Ramonet M, Bousquet P, Nakazawa T, Aoki S, Machida T, Inoue G, Vinnichenko N, Lloyd J, Jordan A, Heimann M, Shibistova O, Langenfelds R L, Steele L P, Francey R J, Denning A S. 2007. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, 316: 1732–1735
- Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Wang J N, Tsunekawa A, Zhou H K, Liu Y, Li Y R, Liu S L. 2020. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. *Sci Bull*, 65: 1405–1414
- Tian H, Melillo J, Lu C, Kicklighter D, Liu M, Ren W, Xu X, Chen G, Zhang C, Pan S, Liu J, Running S. 2011. China's terrestrial carbon balance: Contributions from multiple global change factors. *Glob Biogeochem Cycle*, 25: GB1007
- Tramontana G, Jung M, Schwalm C R, Ichii K, Camps-Valls G, Ráduly B, Reichstein M, Arain M A, Cescatti A, Kiely G, Merbold L, Serrano-Ortiz P, Sickert S, Wolf S, Papale D. 2016. Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms. *Biogeosciences*, 13: 4291–4313
- Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S, Bösch H, O'Dell C W, Tang X, Yang D, Liu L, Xia C Z. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 586: 720–723
- Wang Q F, Zheng H, Zhu X J, Yu G R. 2015. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001–2010. *Sci Bull*, 60: 577–590
- Wang T H, Yang D W, Yang Y T, Piao S L, Li X, Cheng G D, Fu B J. 2020. Permafrost thawing puts the frozen carbon at risk over the Tibetan Plateau. *Sci Adv*, 6: eaaz3513
- Wang Y L, Wang X H, Wang K, Chevallier F, Zhu D, Lian J H, He Y, Tian H Q, Li J S, Zhu J X, Jeong S, Canadell J. 2021. The size of land carbon sink in China. *Nature*, doi: 10.1038/s41586-021-04255-y
- 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. 2018a. A new estimation of China's net ecosystem productivity based on eddy covariance measurements and a model tree ensemble approach. *Agric For Meteorol*, 253-254: 84–93
- Yao Y T, Piao S L, Wang T. 2018b. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Sci Bull*, 63: 1108–1117
- Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. 2014. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 4910–4915
- 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. 2014. Net terrestrial CO₂ exchange over China during 2001–2010 estimated with an ensemble data assimilation system for atmospheric CO₂. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 3500–3515
- Zhang Y, Yao Y T, Wang X H, Liu Y W, Piao S L. 2017. Mapping spatial distribution of forest age in China. *Earth Space Sci*, 4: 108–116

(责任编辑: 张甘霖)