



中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制

王锴¹, 朴世龙^{1,2*}, 何悦¹, 刘永稳², 何洪林^{3,4,5}

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青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所国家生态科学数据中心, 北京 100101;

5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

* 通讯作者, E-mail: slpiao@pku.edu.cn

收稿日期: 2021-12-15; 收修改稿日期: 2022-07-04; 接受日期: 2022-09-13; 网络版发表日期: 2022-12-23

国家重点研发计划项目(批准号: 2019YFA0607304)资助

摘要 深入理解陆地生态系统碳汇的稳定性, 有助于准确预测未来全球变化背景下陆地碳汇的可持续性, 可为制定气候变化应对方案提供科学依据. 文章综合采用大气反演法、生态系统碳循环模型和基于碳通量观测的机器学习模型等3种主流方法, 解析了中国陆地生态系统碳汇稳定性(年际波动幅度)的空间分布规律和驱动机制. 研究发现, 相比于美国和欧洲, 中国陆地生态系统碳汇的年际波幅小、稳定性高. 就空间格局而言, 华北平原、东北平原和云贵高原西部的碳汇稳定性低于其他地区, 但原因各异: 在华北平原和东北平原, 降水年际波动大, 且碳汇对降水波动敏感; 而在云贵高原西部, 碳汇对温度波动敏感. 鉴于生态系统碳汇稳定性对气候变化的响应机制存在明显地理分异, 巩固和提升中国陆地生态系统碳汇须因地制宜、科学统筹.

关键词 陆地生态系统碳汇, 稳定性, 年际变异, 中国, 碳中和

1 引言

陆地生态系统平均每年吸收约30%的人为二氧化碳排放, 碳汇能力胜于海洋生态系统(Friedlingstein等, 2020; IPCC, 2021). 因此, 在全球变暖背景下, 陆地生态系统碳汇被视为缓解气候变化的重要途径(Shevliakova等, 2013; IPCC, 2021). 然而, 相比于海洋碳汇, 陆地生态系统碳汇的年际波动更大(Piao等, 2020). 据全球

碳计划估算, 近40年陆地生态系统碳汇年际波动大小为 1.07Pg C a^{-1} , 相当于海洋碳汇波动大小的7倍(Friedlingstein等, 2020). 陆地生态系统碳汇年际波动如此剧烈(不稳定), 对基于自然的气候变化解决方案助力碳中和构成了严峻挑战. 因此, 陆地生态系统碳汇稳定性机制已成为碳循环领域的前沿热点问题(Piao等, 2020).

陆地生态系统碳汇不稳定, 本质在于生态系统碳

中文引用格式: 王锴, 朴世龙, 何悦, 刘永稳, 何洪林. 2023. 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制. 中国科学: 地球科学, 53(2): 216–226, doi: [10.1360/N072021-0345](https://doi.org/10.1360/N072021-0345)

英文引用格式: Wang K, Piao S, He Y, Liu Y, He H. 2023. Spatial variations and mechanisms for the stability of terrestrial carbon sink in China. Science China Earth Sciences, 66(2): 227–236, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-1003-5>

汇功能对气候波动的抵抗力弱或气候波动性强。气候和生态系统均具明显空间差异, 由此, 陆地生态系统碳汇稳定性的地理分异明显。在气候波动剧烈或生态系统碳汇对气候波动敏感的地区, 生态系统碳汇稳定性通常较低。例如, 厄尔尼诺-南方涛动深刻影响热带亚马孙地区碳汇: 在厄尔尼诺年, 亚马孙地区常发生极端干旱事件, 以至于树木死亡, 生态系统碳吸收骤减, 甚至变成碳源(Allen等, 2015; Liu等, 2017; Cai等, 2020)。揭示陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布规律, 有助于准确理解生态系统对气候变化的响应机制(Arora等, 2013), 亦有助于识别陆地碳汇脆弱区, 以因地制宜地采取碳汇巩固措施。

中国陆地生态系统碳汇受季风活动年际变化的影响(黄荣辉等, 2008), 由此, 有研究认为, 中国部分地区陆地生态系统碳汇稳定性较低(Zhang等, 2019)。然而, 需要指出的是, 中国陆地生态系统和气候皆具多样性, 碳汇稳定性亦可能因地制宜。数十年来, 大气二氧化碳浓度观测数据持续积累(刘立新等, 2009), 陆地碳循环过程模型迅速发展(Sitch等, 2015), 通量塔观测网络不断拓展(于贵瑞等, 2014), 为研究中国陆地碳汇时空动态提供了关键的数据和方法基础。但是, 长期以来, 中国陆地碳汇稳定性及其空间分布却鲜受关注。

本研究利用3种国际主流的碳循环动态研究手段, 即基于大气二氧化碳观测的大气反演模型、生态系统碳循环模型和基于通量塔观测的机器学习模型, 探讨中国陆地生态系统碳汇稳定性及其空间分布规律。具体而言, 本研究主要聚焦3个科学问题: (1) 过去30余年(1980~2018年)中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间格局如何? (2) 不同地区碳汇稳定性的主导气候因子是什么? (3) 气候波动幅度和碳汇对气候波动的敏感性, 虽均可能影响碳汇稳定性, 孰轻孰重?

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

由于缺乏大尺度长期的中国陆地碳通量连续观测, 目前尚无法直接监测中国陆地生态系统碳汇的年际稳定性。估算陆地碳汇常使用4种方法: 清查法、大气反演法、生态系统碳循环模型和基于通量塔观测的机器学习模型。清查法的数据调查周期通常为数年, 无法用于评估年际尺度碳汇波动。因此, 本文综合应用其

他3种方法来评估中国陆地生态系统碳汇稳定性。需要指出的是, 这3种方法相互独立, 涵盖“自上而下”和“自下而上”两种类型。不同估算方法的优缺点不尽相同(朴世龙等, 2022), 因此, 各方法结果一致性较高则意味着结论更为可靠。

大气反演法基于大气二氧化碳浓度观测和大气传输模型, 结合化石燃料燃烧的碳排放量等先验信息, 估算地表碳通量的时空分布。本研究采用了国际主流的4个大气反演产品: Copernicus Atmosphere Monitoring Service(CAMS)、CarbonTracker Europe(CTE)、Jena CarboScope和Model for Interdisciplinary Research On Climate(MIROC, 4.0版本) based Atmospheric Chemistry-Transport Model(MIROC4-ACTM)(Rödenbeck等, 2003; Chevallier等, 2005; van der Laan-Luijkx等, 2017; Patra等, 2018)(网络版附表S1, <http://earthcn.sci-china.com>)。这4个产品均被用于研究全球碳收支(Friedlingstein等, 2020)。

生态系统碳循环模型可刻画光合作用、呼吸作用等碳循环关键过程, 从而模拟陆地碳通量的时空分布。本研究采用16个全球动态植被模型(CABLE-POP、CLASS-CTEM、CLM5.0、DLEM、ISAM、ISBA-CTRIP、JSBACH、JULES、LPJ、LPJ-GUESS、LPX-Bern、OCN、ORCHIDEE、ORCHIDEE-CNP、SDGVM和VISIT)模拟的净生物群区生产力(Net Biome Productivity, NBP)作为陆地碳汇模拟估算量(Friedlingstein等, 2019)(网络版附表S1)。这16个模型由相同的基于观测的大气二氧化碳浓度和气候数据集驱动。此外, 本研究还使用了针对中国地区优化的另外3个模型(CEVSA2、BEPS和TEC)(网络版附表S1)。这3个模型使用中国地区植被、土壤碳密度的野外调查数据以及通量塔观测数据进行优化(He等, 2019; Zhang等, 2019)。

涡度相关通量观测技术被广泛应用于测定站点尺度的净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)。结合机器学习方法, 可将站点尺度的碳通量观测结果升尺度, 从而解析陆地生态系统碳汇的时空分布。本文使用了两个机器学习模型(网络版附表S1): (1) 基于全球通量观测网络(FLUXNET)的碳通量观测数据、遥感数据和气象数据的FLUXCOM模型(Jung等, 2020); (2) 融合更多中国地区通量观测的MTE模型(Yao等, 2018)。需要说明的是, 机器学习模型不包含采

伐、火灾等干扰因素对陆地碳汇的影响, 可能高估陆地生态系统碳汇量. 然而, 机器学习模型估算碳通量随时间变化时使用了碳通量的空间梯度信息(Jung等, 2020), 由此低估全球陆地碳汇的年际波动幅度, 即高估全球陆地生态系统碳汇稳定性.

为探讨气候因子对陆地生态系统碳汇稳定性的影响, 本研究采用了CRUJRA再分析资料的近地表温度、降水和向下短波辐射数据(University of East Anglia Climatic Research Unit, 2019). 所有数据均被重采样至 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格网, 以便进行下一步分析. 另外, 本研究使用土地覆盖数据集MCD12C1来定义并剔除无植被或植被稀疏地区(Friedl等, 2002).

2.2 统计分析

本研究通过去除长期线性趋势来计算每个模型评估的碳通量的年际波动. 陆地碳汇年际波动时间序列的标准差用于表征陆地碳汇稳定性, 标准差越大意味着稳定性越低.

在分析中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布时, 对于附表S1中的每一个模型, 首先计算了 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格中每个格点碳汇年际波动的标准差及其在研究区所有格点中的百分位数. 然后对于每个模型, 利用第20、第40、第60和第80百分位数作为阈值, 将所有格点划分为5个等级. 陆地碳汇年际波动的标准差超过第60百分位数的格点, 其陆地碳汇稳定性低. 对于每一个格点, 统计各等级对应的模型数, 模型数最多的等级即为该格点碳汇稳定性水平, 对应模型数目则作为一致性指标.

在研究陆地生态系统碳汇稳定性的驱动机制时, 首先利用多元线性回归方程计算温度(T)、降水(P)和短波辐射(Rad)变化对陆地碳汇(TCS)年际波动的贡献.

$$\begin{aligned} \text{TCS} &= \text{TCS}^T + \text{TCS}^P + \text{TCS}^{\text{Rad}} \\ &= a^T \cdot T + a^P \cdot P + a^{\text{Rad}} \cdot \text{Rad}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, TCS^T 、 TCS^P 和 TCS^{Rad} 分别为温度、降水和短波辐射变化导致的陆地碳汇年际变化; T 、 P 和 Rad 同样在计算时去除了长期线性趋势. a^T 、 a^P 和 a^{Rad} 分别为陆地碳汇对3种气候因子的敏感性. 需要注意的是, 式(1)未考虑残差项以及气候因子间的交互作用. 以温度为例, TCS^T 和敏感性 a^T 的关系可由下式得到:

$$\text{TCS}^T = a^T \cdot T, \quad (2)$$

3种气候因子对陆地碳汇年际变化和碳汇稳定性贡献的相对大小通过分别计算 TCS^T 、 TCS^P 和 TCS^{Rad} 三者与TCS的协方差得到. 在式(1)中, TCS^T 、 TCS^P 与 TCS^{Rad} 三者之和等于TCS. 结合协方差的可加性(参见网络版附录, <http://earthcn.scichina.com>), 三者与TCS协方差之和被认为等于TCS的方差:

$$\begin{aligned} \text{cov}(\text{TCS}^T, \text{TCS}) + \text{cov}(\text{TCS}^P, \text{TCS}) \\ + \text{cov}(\text{TCS}^{\text{Rad}}, \text{TCS}) = \text{var}(\text{TCS}), \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\text{cov}(\text{TCS}^T, \text{TCS})$ 、 $\text{cov}(\text{TCS}^P, \text{TCS})$ 和 $\text{cov}(\text{TCS}^{\text{Rad}}, \text{TCS})$ 分别为 TCS^T 、 TCS^P 和 TCS^{Rad} 与TCS的协方差; $\text{var}(\text{TCS})$ 为TCS的方差. 对每个格点而言, 最大协方差所对应的气候因子即为该点陆地碳汇年际波动的主导气候因子. 基于此, 对于每个模型, 可以计算出主导气候因子的空间分布. 对于每个格点, 统计各气候因子对应的模型数, 模型数最多的主导气候因子即为该格点陆地碳汇年际变化以及陆地碳汇稳定性的主导气候因子, 对应模型数目作为一致性指标.

主导气候因子对陆地碳汇年际变化的影响可被分解为两个方面: 气候因子的波动大小和陆地碳汇对气候异常的敏感性. 同样以温度为例, 由式(2)可得

$$\text{STD}(\text{TCS}^T) = |a^T| \cdot \text{STD}(T), \quad (4)$$

其中, $\text{STD}(\text{TCS}^T)$ 和 $\text{STD}(T)$ 分别为 TCS^T 和 T 的标准差; $|a^T|$ 为温度敏感性 a^T 的绝对值. 由式(4)可知, 空间上, 某一地区 TCS^T 波动幅度较大, 意味着该地区温度敏感性的绝对值和/或温度波动幅度较大. 在格点尺度上, 温度敏感性的绝对值和温度波动幅度的大小均通过它们的空间分布百分位数来衡量. 对于某一格点, 如果温度敏感性绝对值的百分位数大于温度波动幅度的百分位数, 则认为温度敏感性对 TCS^T 波动幅度影响更大, 反之亦然. 因此, 对于每个格点, 本研究首先计算陆地碳汇年际波动的主导气候因子, 然后分析该因子的波动幅度和陆地碳汇对该因子波动的敏感性的相对重要性.

3 结果

3.1 中国陆地生态系统碳汇总量的稳定性

基于3种不同方法(大气反演法、生态系统碳循环模型和基于通量塔观测的机器学习模型)估算的

1980~2018年中国陆地碳汇年际波动幅度(年际变化标准差)为 $0.03\sim 0.15\text{Pg C a}^{-1}$ (图1和附图S1), 相当于同期全球陆地碳汇年际波动幅度的9~19%。其中, 基于通量塔观测的机器学习模型估算的陆地碳汇年际波动幅度明显小于其他两种方法的结果(图1a), 这可能是由于机器学习模型在估算碳通量时间上年际变化的梯度时使用了碳通量的空间梯度, 从而低估了碳汇的年际波动。与北半球其他地区相比, 相同方法下, 中国陆地碳汇年际波动幅度小于美国和欧洲(附图S1), 表明中国陆地碳汇稳定性相对较高。

陆地碳汇大小主要取决于光合作用(对应总初级生产力, GPP)和生态系统呼吸(TER), 因此, 我们进一步探索中国陆地碳汇年际变化与二者的关联。研究发现, 中国陆地碳汇年际变化与总初级生产力的相关性($r=0.61$, 图1b中所有模型评估的相关系数均值)显著大于($p<0.01$)与生态系统呼吸的相关性($r=0.21$, 图1c中所有模型评估的相关系数均值)。需要说明的是, 尽管在部分生态系统碳循环模型中, 中国陆地碳汇年际变化与火灾碳排放相关程度较高, 但是, 基于遥感观测结果表明, 中国火灾碳排放年际波动幅度很小。因此, 火灾碳排放对中国陆地碳汇年际波动的贡献相对较小(图1d)。

为了探究不同气候因子的波动对中国陆地生态系统碳汇稳定性的作用, 我们解析了中国陆地碳汇年际变化与不同气候因子(气温、降水和太阳辐射)的相关性。结果表明, 中国陆地碳汇(以及总初级生产力)的年际变化与降水的相关性强于与气温的相关性(图1e和1f)。同时, 太阳辐射对中国陆地碳汇总量的年际变化影响较小。以上结果说明, 在国家尺度上, 降水是影响中国陆地生态系统碳汇稳定性的主导气候因子。

3.2 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布

我们进一步采用上述3种不同方法(共25个不同模型)解析中国陆地碳汇稳定性的地理分异, 并比较了不同模型结果。结果显示, 在华北平原、东北平原和云贵高原西部, 碳汇年际波动幅度较大, 且模型一致性较高(图2), 意味着有较高的置信度认为这些地区的生态系统碳汇稳定性较低。不仅如此, 这些地区碳汇量较大, 尤其是云贵高原西部(附图S2)。相比之下, 在新疆北部和青藏高原, 不同模型较为一致地得到相对较小的陆地碳汇年际波动幅度, 因此, 这些地区具有较高的碳

汇稳定性(图2)。然而, 这些地区的碳汇量明显小于东部地区(附图S2)。值得注意的是, 在中国东南部, 模型一致性较低, 说明该地区生态系统碳汇稳定性估算结果尚存较大不确定性(图2)。

中国陆地碳汇稳定性的空间差异源于气候波动以及陆地碳汇对气候波动的响应。为了探究中国不同地区气候波动对生态系统碳汇稳定性的影响机制, 我们首先解析了中国陆地碳汇年际变化的主导气候因子的空间分布。结果表明, 在大部分地区, 尤其是碳汇稳定性较低的华北平原和东北平原地区, 碳汇年际变化主要受降水影响(图3)。相比之下, 气温是云贵高原西部和青藏高原碳汇年际波动的主导气候因子(图3)。此外, 在中国东南部的部分地区, 碳汇年际变化主要受太阳辐射影响, 但模型间一致性较低(图3)。因此, 在理解气候对中国陆地碳汇稳定性的影响时, 需要考虑不同地区主导气候因子的差异。

其次, 我们解析了主导气候因子的波动幅度和陆地碳汇对气候波动的敏感性相对重要性的空间格局。结果表明, 在长江中下游平原, 陆地生态系统碳汇波动幅度主要受主导气候因子(降水)年际波动的控制(图4)。该地区降水的年际波动幅度明显大于中国其他地区, 但生态系统碳汇对降水波动的敏感性相比其他地区较弱(附图S3)。相反地, 在云贵高原西部、四川盆地、内蒙古高原东部以及新疆北部, 生态系统碳汇的年际波动幅度主要由陆地碳汇的气候敏感性驱动(图4)。这些地区的生态系统碳汇对气候波动的敏感性要大于其他地区, 而气候因子本身的波动幅度较小(附图S3)。值得注意的是, 在陆地碳汇稳定性低的华北平原和东北平原, 气候波动幅度和陆地碳汇的气候敏感性均较强, 且两者对陆地碳汇年际波动幅度的重要性相近(图4)。上述结果说明, 在研究气候对中国陆地生态系统碳汇稳定性的影响时, 气候因子波动幅度大小和碳汇对气候波动的敏感性两方面因素均不可忽视, 而在不同地区, 二者的相对重要性不同。

4 讨论

本研究采用涵盖3种独立方法的25个模型, 详细分析了1980~2018年中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布和驱动因子。总体上, 相比于西北地区和青藏高原, 东部地区的生态系统碳汇强度大, 但稳定性低(图2

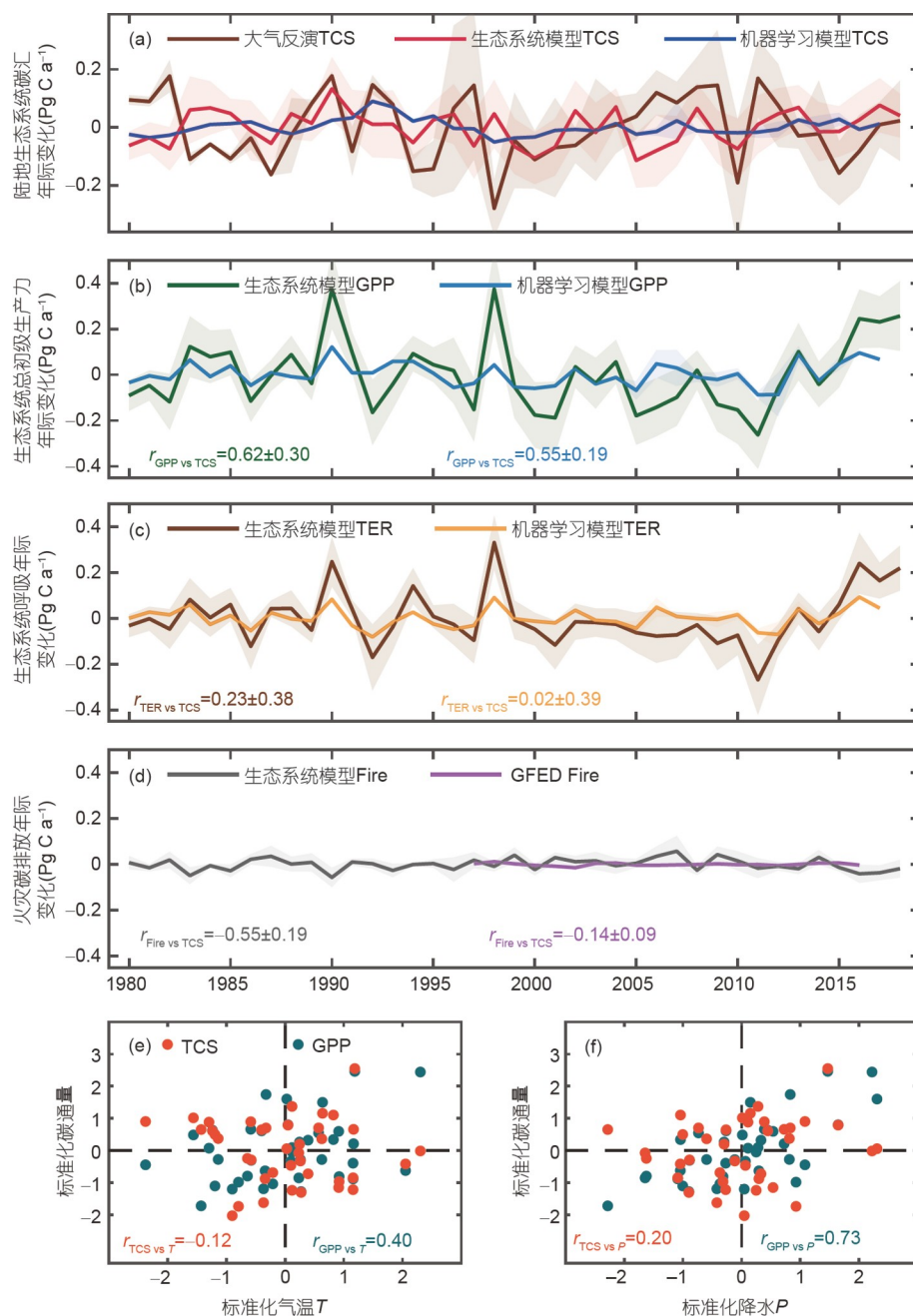
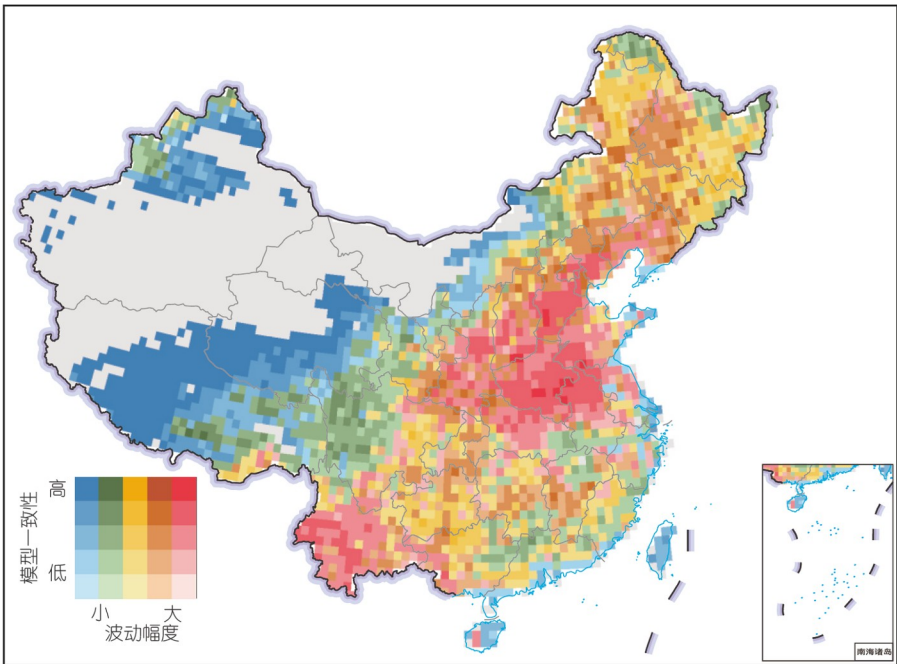


图1 中国陆地生态系统碳通量的年际变化

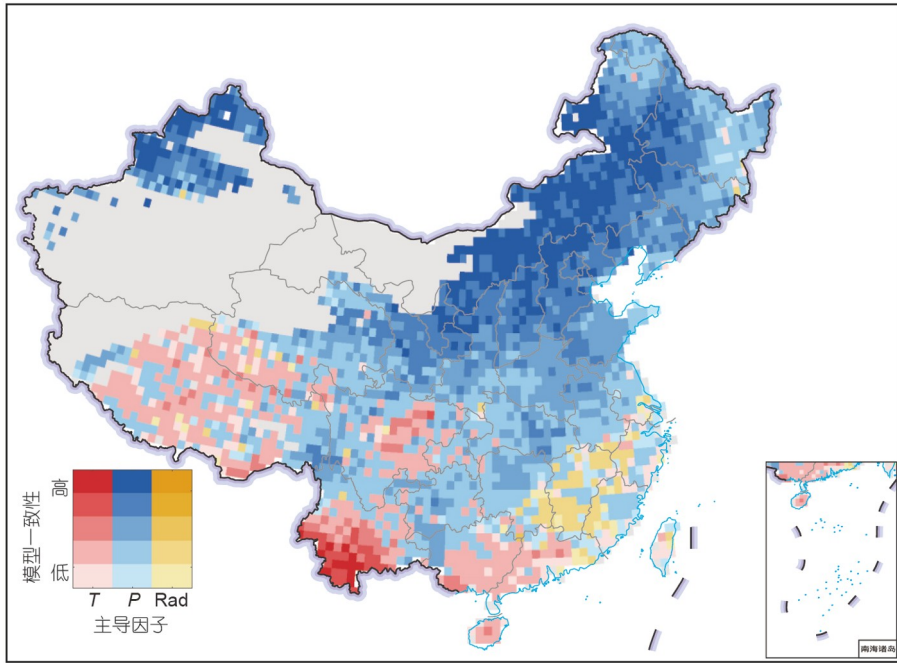
(a)~(d)中阴影部分表示模型间的不确定度。大气反演法和机器学习模型评估碳通量的不确定度用最大值和最小值的范围表示, 生态系统模型评估的不确定度用1倍标准差表示。(b)~(d)中的相关系数分别指3种碳通量与陆地生态系统碳汇的简单相关系数。(d)中紫色折线表示利用GFED数据集计算的由火灾引起的碳释放的年际变化(van der Werf等, 2017), 对应的系数表示大气反演法评估的陆地生态系统碳汇与火灾引起的碳释放的相关关系。(e)和(f)表示气候因子和碳通量关系, 其中TCS和GPP均为所有模型平均的结果, 所有变量均为除以标准差后的标准化结果, 且碳通量与气候因子的相关系数指偏相关系数



审图号: GS京(2022)0795号

图 2 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布

陆地碳汇稳定性由高到低, 依次用蓝色、绿色、黄色、棕色和红色表示. 蓝色部分表示碳汇年际波动弱, 稳定性高. 红色部分表示碳汇年际波动强, 稳定性低. 颜色越深表示模型间一致性越高



审图号: GS京(2022)0795号

图 3 中国陆地生态系统碳汇年际变化的主导气候因子

本研究考虑的3种气候因子分别为近地表气温(T)、降水(P)和向下短波辐射(Rad). 颜色越深表示模型间一致性越高

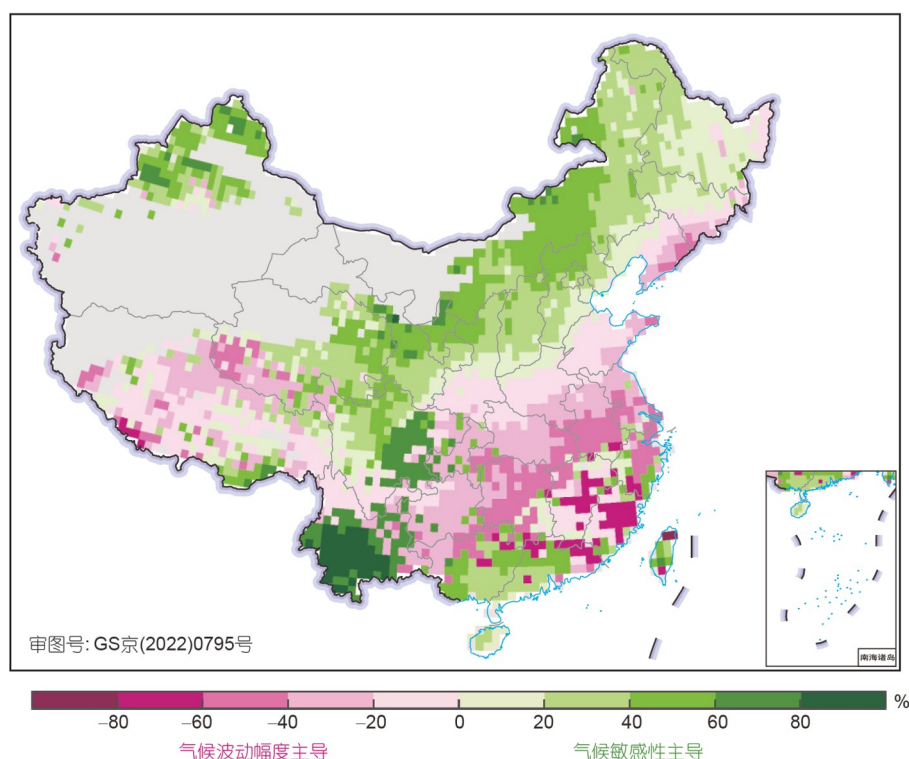


图4 气候波动幅度和碳汇的气候敏感性对碳汇稳定性影响的相对重要性

相对重要性用气候敏感性的空间百分位数与气候波动幅度的空间百分位数之差来表示。红色表示气候波动幅度主导碳汇稳定性, 绿色表示碳汇对气候波动的敏感性主导碳汇稳定性

和附图S2)。华北平原、东北平原和云贵高原西部的碳汇稳定性较低, 而东南沿海部分地区的碳汇稳定性较高。不同地区生态系统碳汇稳定性的差异意味着需要有所侧重地巩固生态系统碳汇功能, 因地制宜地实施碳中和措施。具体而言, 东南沿海地区生态系统碳汇较为稳定, 但人为碳排放量较高, 陆地碳汇及其稳定性的可提升空间较小, 宜着力节能减排; 而在陆地碳汇稳定性低的地区, 可采取多种生态措施(如生态修复工程)提升陆地碳汇的稳定性和可持续性。

巩固和提升陆地生态系统碳汇须考虑碳汇稳定性对气候波动的响应机制及其地理分异。在碳汇稳定性低的华北平原和东北平原, 陆地碳汇稳定性主要受强烈的降水波动控制, 且陆地碳汇对降水波动的敏感性较强。这些地区的降水年际波动与东亚季风强度的年际变化密切相关(Ding和Chan, 2005; Sun等, 2017), 因而准确预测东亚季风年际变化有助于提前了解这些地区生态系统的水分盈亏, 从而推测气候波动导致的碳汇变化。已有研究表明, 东亚季风的年际变率一方面

与气候模态关系密切, 如厄尔尼诺-南方涛动(丁一汇等, 2013); 另一方面也受到陆面过程变化的影响, 如青藏高原积雪覆盖变化(You等, 2020)。因此, 须深入探索东亚季风年际变化机制, 提高东亚季风变化预测能力。此外, 针对可能发生的旱涝灾害, 完善相关的气象灾害预警系统, 并建立应急联动机制, 切实采取有效防灾减灾措施, 则有助于提升生态系统和社会层面对灾害的抵抗力。例如, 未来需加强水利灌溉和排水工程管理, 并结合改进的天气预报, 减小降水剧烈波动对土壤水分含量的影响(Zhu等, 2013), 避免极端气候事件导致生态系统生产力锐减和碳汇稳定性骤降。

不同于华北平原和东北平原, 云贵高原西部生态系统碳汇稳定性低的主因是陆地碳汇对温度波动的敏感性强。在该地区, 温度升高不利于生态系统生产力的增加(Li和Xiao, 2020), 且与火灾的发生密切相关(Chen等, 2020; Fang等, 2021)。尽管在国家尺度上, 火灾引起的碳释放对陆地碳汇的年际变化贡献较小, 但在云贵高原西部, 火灾对陆地碳汇的年际波动有显著影响

(Zhang等, 2016). 鉴于此, 稳固该地区生态系统碳汇须制定科学有效的林火管理策略(Xiong等, 2020), 加强对森林可燃物的可持续管理, 以控制火灾发生的概率和强度(胡海清等, 2013; 贺红士等, 2010). 此外, 增强山地生态系统的抗干扰能力也有助于降低陆地碳汇对气候异常的敏感性, 提升生态系统完整性则是有效途径之一. 因此, 须开展综合水土保持生态修复工作(张文聪和高媛, 2011), 严守生态保护红线, 保护生物多样性, 并加强自然保护区建设(Xu等, 2017), 减少极端气候事件导致的森林死亡, 从而稳固碳汇(Allen等, 2015; 朴世龙等, 2019; Brodribb等, 2020). 鉴于云贵高原西部碳汇能力较强(附图S2), 须确保上述陆地碳汇的巩固和提升措施得到有效落实.

目前, 中国陆地生态系统碳汇稳定性估算结果仍存在不确定性, 主要体现在中国东南部不同模型间碳汇年际波动幅度的一致性较低(图2). 考虑到该地区生态系统的碳汇能力较强(附图S2), 减小不同方法对该地区碳汇稳定性评估的不确定性具有重要意义. 一方面, 不同模型估算的该地区碳汇年际变化的主导气候因子存在偏差(图3), 导致解析的气候波动幅度和碳汇的气候敏感性对碳汇年际波动的相对重要性不同(图4); 另一方面, 本研究使用的3种方法中的生态系统碳循环模型和机器学习模型这两种方法(共21个模型)未能全面考虑土地覆盖变化对陆地碳汇年际变化的影响(Yao等, 2018; Friedlingstein等, 2019; Jung等, 2019). 土地覆盖变化虽然不是陆地碳汇年际变化的主导因子(Piao等, 2020), 亦会导致陆地碳汇稳定性评估产生一定偏差. 因此, 为减小陆地碳汇稳定性评估的不确定性, 亟需在该地区增加更多基于观测和实验结果的约束, 以优化模型结构和参数. 此外, 由于当前估计土地覆盖变化对碳汇的影响仍有较大不确定性(Gasser等, 2020), 本研究在分析陆地碳汇年际变化的影响因子时也没有考虑土地覆盖变化, 建议未来的相关研究考虑土地覆盖变化的影响.

基于通量塔观测的机器学习模型通常低估了全球陆地碳汇的年际波动幅度(Jung等, 2020). 本研究发现, 与全球尺度相比, 机器学习模型对中国陆地碳汇年际波动幅度的低估程度可能更大, 使得该方法评估的中国对全球陆地碳汇年际波动幅度的贡献比例小于大气反演法和生态系统碳循环模型得到的结果. 这也说明, 降低中国陆地碳汇评估的不确定性对准确认识全球陆

地碳汇的稳定性至关重要.

5 结论

本研究解析了中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间格局及驱动机制, 发现碳汇稳定性受气候波动幅度和碳汇对气候波动的敏感性共同影响. 碳汇稳定性及其主导气候因子均具明显地理分异, 故碳汇巩固和提升措施须因地制宜. 在气候波动大的地区, 须深入理解气候波动的驱动机制(Wang等, 2012), 更准确预测气候年际变化, 并提高灾害预警及应对能力. 在碳汇对气候波动敏感性大的地区, 加强生态系统管理, 注重保护生态系统完整性, 提高生态系统对极端气候事件的抵抗力. 此外, 鉴于碳汇对气候变化的响应因时而异(Piao等, 2017; Peñuelas等, 2017), 有必要长期监测碳汇稳定性. 值得注意的是, 未来气候变暖背景下, 干旱等极端事件的频率和强度皆趋增(Wang等, 2015; IPCC, 2021), 不利于陆地生态系统碳汇稳定性. 尽快实施中国陆地生态系统碳汇巩固和提升行动, 可为实现碳中和战略目标提供保障.

致谢 感谢任小丽博士和邓滢博士在写作过程中的帮助.

参考文献

- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 司东, 王遵娅, 朱玉祥, 柳艳菊, 宋亚芳, 张锦. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. 大气科学, 37: 253–280
- 贺红士, 常禹, 胡远满, 刘志华. 2010. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望. 植物生态学报, 34: 741–752
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 黄刚. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展. 大气科学, 32: 691–719
- 胡海清, 魏书精, 孙龙, 王明玉. 2013. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. 干旱区地理, 36: 57–75
- 刘立新, 周凌晔, 张晓春, 温民, 张芳, 姚波, 方双喜. 2009. 我国4个国家级本底站大气CO₂浓度变化特征. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 222–228
- 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: 1010–1020
- 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
- 张文聪, 高媛. 2011. 水土保持生态修复工作成效与经验. *中国水利*, 12: 62–64
- Allen C D, Breshears D D, McDowell N G. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6: art129
- Arora V K, Boer G J, Friedlingstein P, Eby M, Jones C D, Christian J R, Bonan G, Bopp L, Brovkin V, Cadule P, Hajima T, Ilyina T, Lindsay K, Tjiputra J F, Wu T. 2013. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 earth system models. *J Clim*, 26: 5289–5314
- Brodribb T J, Powers J, Cochard H, Choat B. 2020. Hanging by a thread? Forests and drought. *Science*, 368: 261–266
- Cai W, McPhaden M J, Grimm A M, Rodrigues R R, Taschetto A S, Garreaud R D, Dewitte B, Poveda G, Ham Y G, Santoso A, Ng B, Anderson W, Wang G, Geng T, Jo H S, Marengo J A, Alves L M, Osman M, Li S, Wu L, Karamperidou C, Takahashi K, Vera C. 2020. Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 215–231
- Chen A, Tang R, Mao J, Yue C, Li X, Gao M, Shi X, Jin M, Ricciuto D, Rabin S, Ciais P, Piao S. 2020. Spatiotemporal dynamics of ecosystem fires and biomass burning-induced carbon emissions in China over the past two decades. *Geogr Sustain*, 1: 47–58
- Chevallier F, Fisher M, Peylin P, Serrar S, Bousquet P, Bréon F M, Chédin A, Ciais P. 2005. Inferring CO₂ sources and sinks from satellite observations: Method and application to TOVS data. *J Geophys Res*, 110: D24309
- Ding Y, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview. *Meteorol Atmos Phys*, 89: 117–142
- Fang K, Yao Q, Guo Z, Zheng B, Du J, Qi F, Yan P, Li J, Ou T, Liu J, He M, Trouet V. 2021. ENSO modulates wildfire activity in China. *Nat Commun*, 12: 1764
- Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F, Schaaf C. 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sens Environ*, 83: 287–302
- Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, Andrew R M, Hauck J, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Bakker D C E, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Anthoni P, Barbero L, Bastos A, Bastrikov V, Becker M, Bopp L, Buitenhuis E, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Currie K I, Feely R A, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Goll D S, Gruber N, Gutekunst S, Harris I, Haverd V, Houghton R A, Hurtt G, Ilyina T, Jain A K, Joetzier E, Kaplan J O, Kato E, Klein Goldewijk K, Korsbakken J I, Landschützer P, Lauvset S K, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Lombardozi D, Marland G, McGuire P C, Melton J R, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Neill C, Omar A M, Ono T, Peregon A, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Séférian R, Schwinger J, Smith N, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, Tubiello F N, van der Werf G R, Wiltshire A J, Zaehle S. 2019. Global carbon budget 2019. *Earth Syst Sci Data*, 11: 1783–1838
- 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, Joetzier 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
- Gasser T, Crepin L, Quilcaille Y, Houghton R A, Ciais P, Obersteiner M. 2020. Historical CO₂ emissions from land use and land cover change and their uncertainty. *Biogeosciences*, 17: 4075–4101
- He H, Wang S, Zhang L, Wang J, Ren X, Zhou L, Piao S, Yan H, Ju W, Gu F, Yu S, Yang Y, Wang M, Niu Z, Ge R, Yan H, Huang M, Zhou G, Bai Y, Xie Z, Tang Z, Wu B, Zhang L, He N, Wang Q, Yu G. 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
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

- Jung M, Koirala S, Weber U, Ichii K, Gans F, Camps-Valls G, Papale D, Schwalm C, Tramontana G, Reichstein M. 2019. The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. *Sci Data*, 6: 74
- Jung M, Schwalm C, Migliavacca M, Walther S, Camps-Valls G, Koirala S, Anthoni P, Besnard S, Bodesheim P, Carvalhais N, Chevallier F, Gans F, Goll D S, Haverd V, Köhler P, Ichii K, Jain A K, Liu J, Lombardozzi D, Nabel J E M S, Nelson J A, O'Sullivan M, Pallandt M, Papale D, Peters W, Pongratz J, Rödenbeck C, Sitch S, Tramontana G, Walker A, Weber U, Reichstein M. 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: Synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, 17: 1343–1365
- Li X, Xiao J. 2020. Global climatic controls on interannual variability of ecosystem productivity: Similarities and differences inferred from solar-induced chlorophyll fluorescence and enhanced vegetation index. *Agric For Meteorol*, 288-289: 108018
- Liu J, Bowman K W, Schimel D S, Parazoo N C, Jiang Z, Lee M, Bloom A A, Wunch D, Frankenberg C, Sun Y, O'Dell C W, Gurney K R, Menemenlis D, Gierach M, Crisp D, Eldering A. 2017. Contrasting carbon cycle responses of the tropical continents to the 2015–2016 El Niño. *Science*, 358: eaam5690
- Patra P K, Takigawa M, Watanabe S, Chandra N, Ishijima K, Yamashita Y. 2018. Improved chemical tracer simulation by MIROC4.0-based atmospheric chemistry-transport model (MIROC4-ACTM). *Sci Online Lett Atmos*, 14: 91–96
- Peñuelas J, Ciais P, Canadell J G, Janssens I A, Fernández-Martínez M, Carnicer J, Obersteiner M, Piao S, Vautard R, Sardans J. 2017. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. *Nat Ecol Evol*, 1: 1438–1445
- Piao S, Liu Z, Wang T, Peng S, Ciais P, Huang M, Ahlstrom A, Burkhardt J F, Chevallier F, Janssens I A, Jeong S J, Lin X, Mao J, Miller J, Mohammad A, Myneni R B, Peñuelas J, Shi X, Stohl A, Yao Y, Zhu Z, 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, Wang X, Wang K, Li X, Bastos A, Canadell J G, Ciais P, Friedlingstein P, Sitch S. 2020. Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives. *Glob Change Biol*, 26: 300–318
- Rödenbeck C, Houweling S, Gloor M, Heimann M. 2003. CO₂ flux history 1982–2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport. *Atmos Chem Phys*, 3: 1919–1964
- Shevliakova E, Stouffer R J, Malyshev S, Krasting J P, Hurtt G C, Pacala S W. 2013. Historical warming reduced due to enhanced land carbon uptake. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 16730–16735
- 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. 2015. Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Biogeosciences*, 12: 653–679
- Sun L, Shen B, Sui B, Huang B. 2017. The influences of East Asian Monsoon on summer precipitation in Northeast China. *Clim Dyn*, 48: 1647–1659
- University of East Anglia Climatic Research Unit. 2019. CRU JRA v2.0: A forcings dataset of gridded land surface blend of Climatic Research Unit (CRU) and Japanese reanalysis (JRA) data. Centre for Environmental Data Analysis
- van der Laan-Luijkx I T, van der Velde I R, van der Veen E, Tsuruta A, Stanislawski K, Babenhauserheide A, Zhang H F, Liu Y, He W, Chen H, Masarie K A, Krol M C, Peters W. 2017. The CarbonTracker Data Assimilation Shell (CTDAS) v1.0: Implementation and global carbon balance 2001–2015. *Geosci Model Dev*, 10: 2785–2800
- van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, van Leeuwen T T, Chen Y, Rogers B M, Mu M, van Marle M J E, Morton D C, Collatz G J, Yokelson R J, Kasibhatla P S. 2017. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst Sci Data*, 9: 697–720
- Wang H, Fan K, Sun J, Li S, Lin Z, Zhou G, Chen L, Lang X, Li F, Zhu Y, Chen H, Zheng F. 2015. A review of seasonal climate prediction research in China. *Adv Atmos Sci*, 32: 149–168
- Wang H J, Sun J Q, Chen H P, Zhu Y L, Zhang Y, Jiang D B, Lang X M, Fan K, Yu E T, Yang S. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteorol Zeitschrift*, 21: 279–304
- Xiong Q, Luo X, Liang P, Xiao Y, Xiao Q, Sun H, Pan K, Wang L, Li L, Pang X. 2020. Fire from policy, human interventions, or biophysical factors? Temporal-spatial patterns of forest fire in southwestern China. *For Ecol Manage*, 474: 118381
- Xu W, Xiao Y, Zhang J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X, Rao E, Lu F, Wang X, Daily G C, Ouyang Z. 2017. Strengthening protected areas for

- biodiversity and ecosystem services in China. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 114: 1601–1606
- Yao Y, Li Z, Wang T, Chen A, Wang X, Du M, Jia G, Li Y, Li H, Luo W, Ma Y, Tang Y, Wang H, Wu Z, Yan J, Zhang X, Zhang Y, Zhang Y, Zhou G, Piao S. 2018. 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
- You Q, Wu T, Shen L, Pepin N, Zhang L, Jiang Z, Wu Z, Kang S, AghaKouchak A. 2020. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system. [Earth-Space Sci Rev](#), 201: 103043
- Zhang L, Ren X, Wang J, He H, Wang S, Wang M, Piao S, Yan H, Ju W, Gu F, Zhou L, Niu Z, Ge R, Li Y, Lv Y, Yan H, Huang M, Yu G. 2019. Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: Regional contributions and climate attribution. [Environ Res Lett](#), 14: 014003
- Zhang Y, Qin D, Yuan W, Jia B. 2016. Historical trends of forest fires and carbon emissions in China from 1988 to 2012. [J Geophys Res-Biogeosci](#), 121: 2506–2517
- Zhu X, Li Y, Li M, Pan Y, Shi P. 2013. Agricultural irrigation in China. [J Soil Water Conservation](#), 68: 147A–154A

(责任编辑: 吴海斌)