



# 解决围绕碳酸盐岩风化碳汇的争议

白晓永<sup>1,4,6\*</sup>, 张思蕊<sup>1,2</sup>, Pete SMITH<sup>3</sup>, 李朝君<sup>1,2</sup>, 熊练<sup>1,5</sup>, 杜朝超<sup>1,5</sup>, 薛盈盈<sup>1,5</sup>,  
李姿霖<sup>1,5</sup>, 龙明康<sup>1,2</sup>, 李明会<sup>1,5</sup>, 张小芸<sup>1,5</sup>, 杨姝<sup>1,5</sup>, 罗青<sup>1,5</sup>, 沈晓倩<sup>1,5</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. Institute of Biological and Environmental Sciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UU, UK;
4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025;
5. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025;
6. 中国科学院地球环境研究所, 中国科学院第四纪与全球变化卓越研究中心, 西安 710061

\* 通讯作者, E-mail: [baixiaoyong@vip.skleg.cn](mailto:baixiaoyong@vip.skleg.cn)

收稿日期: 2024-01-19; 收修改稿日期: 2024-06-17; 接受日期: 2024-07-22; 网络版发表日期: 2024-08-08

国家自然科学基金项目(U22A20619、42077455、42367008)、中国科学院西部之光交叉团队项目(xbzs-gzsys-202101)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB40000000)、贵州省科技项目(黔科合支撑[2024]重点014、黔科合支撑[2022]重点010、黔科合支撑[2023]一般219、黔科合基础-ZK[2021]一般192)、贵州省高层次创新型人才项目(GCC[2022]015-1)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(SKLEG2024202)和贵州省科技项目(GZ2019SIG、GZ2020SIG)资助

**摘要** 在全球碳循环过程, 碳酸盐岩风化碳汇(CCSs)的重要性几乎与植被碳汇相同. 然而, 由于碳酸盐溶解过程可逆, 在各国制定应对全球气候问题的碳中和政策时, CCSs引发了争议. 因此, 为了解决这些争议, 本文回顾了对CCSs研究的最新进展, 并围绕其存在的一些悬而未决的争议进行了探讨. 分析了有关CCSs的五个争议, 分别揭示了CCSs的存在, 量化了它们的重要性, 澄清了它们的时空格局, 并记录了它们在全球变化背景下如何增加和演变. 通过解决这些争议, 将有助于明确CCSs在全球陆地生态系统碳循环中的作用.

**关键词** 碳汇, 碳酸盐岩风化, 碳循环, 气候变化, 人工干预

## 1 引言

碳酸盐岩风化吸收的大气二氧化碳主要以 $\text{HCO}_3^-$ 的形式通过河流持续地从大陆输送到海洋中, 成为陆地生态系统中与植被光合作用碳汇一样的重要碳汇. 因此, 碳酸盐岩风化碳汇(CCSs)是与地球上是否存在人类无关的自然现象. 然而, CCSs是否存在, 依然有巨

大争议(蒋忠诚等, 2013). 例如, *SCIENCE*杂志分别在2011和2012年发文, 一方面认为石灰岩降解可能是一个实质性的无机碳汇, 大气 $\text{CO}_2$ 形成的碳酸对石灰岩的侵蚀可能构成了“被低估的碳汇”, 可以缓解部分人为造成的 $\text{CO}_2$ 的增加. 但这种缓解作用只有当捕获的 $\text{CO}_2$ 以非反应形式隔离时才可能实现, 否则不能算作碳汇(Larson, 2011; Groves等, 2012). 另一方面认为

中文引用格式: 白晓永, 张思蕊, Smith P, 李朝君, 熊练, 杜朝超, 薛盈盈, 李姿霖, 龙明康, 李明会, 张小芸, 杨姝, 罗青, 沈晓倩. 2024. 解决围绕碳酸盐岩风化碳汇的争议. 中国科学: 地球科学, 54(9): 2747-2761, doi: [10.1360/N072024-0024](https://doi.org/10.1360/N072024-0024)

英文引用格式: Bai X, Zhang S, Smith P, Li C, Xiong L, Du C, Xue Y, Li Z, Long M, Li M, Zhang X, Yang S, Luo Q, Shen X. 2024. Resolving controversies surrounding carbon sinks from carbonate weathering. Science China Earth Sciences, 67(9): 2705-2717, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1391-0>

CO<sub>2</sub>不会有净封存, 而是向海洋转移. 这是由于石灰岩的风化消耗CO<sub>2</sub>在溶液中形成可溶的碳酸氢盐, 如果以方解石的形式重新沉积, 所吸收的CO<sub>2</sub>将会返回到大气中. 如果其被带入海洋, 随着CO<sub>2</sub>的重新释放则可能会被隔离为贝壳或珊瑚礁(Curl, 2012). Curl(2012)认为如果考虑被碳酸盐风化作用临时吸收的大气CO<sub>2</sub>, 绝大部分CO<sub>2</sub>最终还要因碳酸盐矿物再次沉淀而重返大气, 因此很难产生CCSs.

但是, 有研究认为, 碳酸盐岩风化过程对大气CO<sub>2</sub>产生了巨大的碳汇效应(Ferris等, 1994), 使地球大气CO<sub>2</sub>浓度从原始的25%, 下降到现代的0.03%~0.04% (Allegre和Schneider, 1994; Falkowski等, 2000), 且从风化的速率和总量来看, CCSs占整个岩石风化碳汇的94%, 是全球最重要的碳汇之一(Hartmann等, 2014; Liu等, 2018). 尽管CCSs不如植被碳汇明显, 但一直以来不同研究以等均证实CCSs确实存在的(Ciais等, 2013; IPCC, 2013). 而且, 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次气候变化评估报告(AR5)里不仅强调了CCSs的重要性及稳定性, 并与陆地生态过程、海洋碳汇和人工捕捉封存并列列为四大去除大气CO<sub>2</sub>的技术路径(IPCC, 2013). 此外, 2021年中国也出台了关于碳达峰碳中和的重要文件, CCSs被列入其中, 为CCSs的深入研究带来巨大的机遇(蒋忠诚等, 2022). 总之, CCSs作为全球碳循环的重要一环, 对于调节大气CO<sub>2</sub>

浓度发挥了重要作用, 对全球碳循环模式的完善作出了重要贡献. 现在是碳达峰的关键期, 要充分有效发挥森林、土壤、岩石风化等的固碳作用, 强调CCSs的增量(章程等, 2022).

因此, 尽管以往的研究已经取得了较大进展, 但是, 不同研究对CCSs的存在真相依然存在较大的分歧与争议. 然而, 解决CCSs存在以及其量级对全球碳循环以及碳遗失分布状况和影响机制的认识至关重要.

本文回顾全球关于CCSs研究, 就其是否存在、量级大小、如何分布、如何增加以及全球变化背景下如何演变的5个争议开展探究, 厘清不同研究结果分歧背后的原因和脉络, 并进行了思考和对未来的展望, 以期抛砖引玉, 为更准确诊断中国碳酸盐岩地区生态系统的健康和可持续性提供研究思路和方法论参考(图1), 系统阐述CCSs的重要性与不可缺性, 并展望CCSs在实现“碳中和”目标中的作用.

## 2 CCSs是否存在?

CCSs是否存在这个问题长期存在争议(Larson, 2011; Burke等, 2018). 以往研究认为其不存在的原因如下: (1) CCSs会在洞穴、河流、水生植物体内等场所中进行转移. 具体表现在碳酸盐岩被雨水溶解的部分, 随水流至洞穴, 在运移过程中条件发生改变, 水体

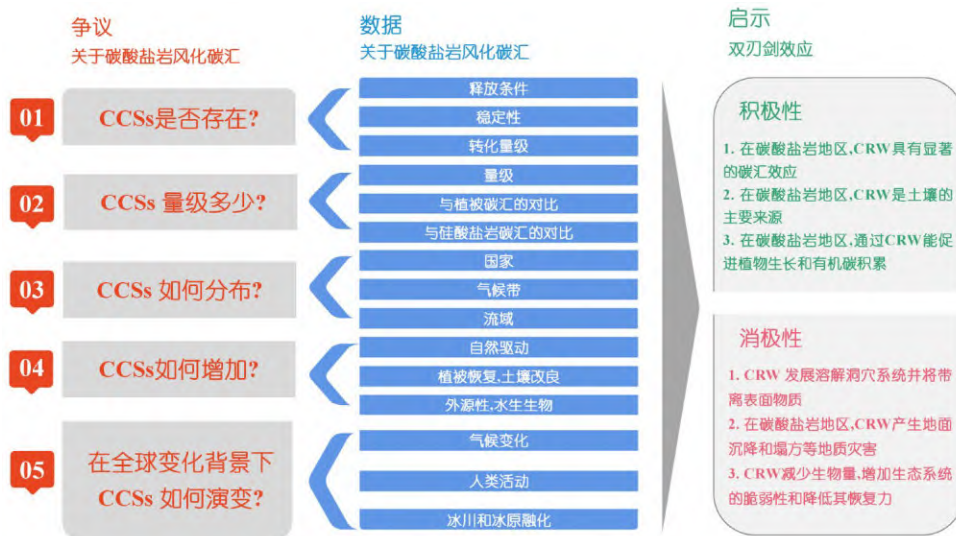


图1 碳酸盐岩风化碳汇的五个争议及其数据和启示

CRW: 碳酸盐岩风化

中部分CO<sub>2</sub>溢出,重新变成碳酸钙沉积,最终形成石笋或钟乳石,导致了CCSs的转移(Groves等, 2012; Curl, 2012; Huang等, 2019; Wen等, 2021). (2) 认为富含HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的水在迁移过程中, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>会转化为CO<sub>2</sub>逃逸到洞穴空气中(Larson, 2011; Hilton和West, 2020). (3) 碳酸盐溶解过程中消耗的CO<sub>2</sub>会通过海洋中碳酸盐沉积而返回大气(Liu等, 2011; Larson, 2011; Burke等, 2018). 然而, 通过对当前研究系统分析发现, CCSs不仅存在, 而且稳定性强, 转移量小(图2).

首先, 我们发现在实验室条件下碳酸盐岩风化可以实现平衡逆向反应, 但在自然状态下, 碳酸盐岩风化难以释放CO<sub>2</sub>. 研究发现, 在实验室环境下碳酸盐岩达到溶解平衡, 导致反应达到饱和状态, 随之重新释放CO<sub>2</sub>. 条件是电导率达到400~500 μs cm<sup>-1</sup>, Ca<sup>2+</sup>浓度达到80~100 mg L<sup>-1</sup>, 同时HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度达到4~5 mmol L<sup>-1</sup> (Yoshimura等, 2004; Shan等, 2019). 事实上, 这些条件在自然界中很难实现. 主要受大气降水和径流等大量外源水的输入, 导致碳酸盐岩风化在短时间(百年内)和小空间尺度难以达到溶解平衡而发生逆向反应(Copard等, 2007; Larson, 2011; Liu等, 2011; Hilton和West, 2020). 此外, 大量研究证实碳酸盐岩风化过程能够使

大量大气CO<sub>2</sub>转移到碳酸盐岩中被封存从而产生碳汇效应(Walker, 1990; Kasting, 1987). 尽管CCSs (0.5~0.9 Pg C a<sup>-1</sup>)相比陆地生态系统碳汇(13.74 Pg C a<sup>-1</sup>)量级小, IPCC AR5将CCSs列为去除大气二氧化碳的四种技术途径之一(其他途径是陆地生态过程、海洋碳汇和人工捕获和储存). 证据表明CCSs是真实存在, 并且在全球碳循环中具有重要地位.

其次, 发现碳酸盐岩风化过程在自然状态下具有极强的稳定性(Larson, 2011; Zeng等, 2019; Xiong等, 2022). IPCC AR5重点指出碳酸盐岩风化产生的CCSs, 可维持在千年至万年尺度上不释放(IPCC, 2013; Soulet等, 2021). Spence和Telmer(2005)、Bernier和Bernier (1987)以及Köhler(2020)也通过对遍布多个大洲的观测站进行测算分析证实了这一观点. 他们揭示了不同区域的碳酸盐沉积释放CO<sub>2</sub>至少需要3.5×10<sup>3</sup>~1×10<sup>5</sup> a (Bernier和Bernier, 1987; Spence和Telmer, 2005; Köhler, 2020; Soulet等, 2021). CCSs可以重新释放CO<sub>2</sub>, 但是在时间尺度上是十分缓慢的.

CCSs的转移主要发生在河流、海洋、水生植物以及洞穴中. 在自然界中, 大气CO<sub>2</sub>经碳酸盐岩风化后被带到水体. 一部分随着河流流入海洋, 另一部分被植

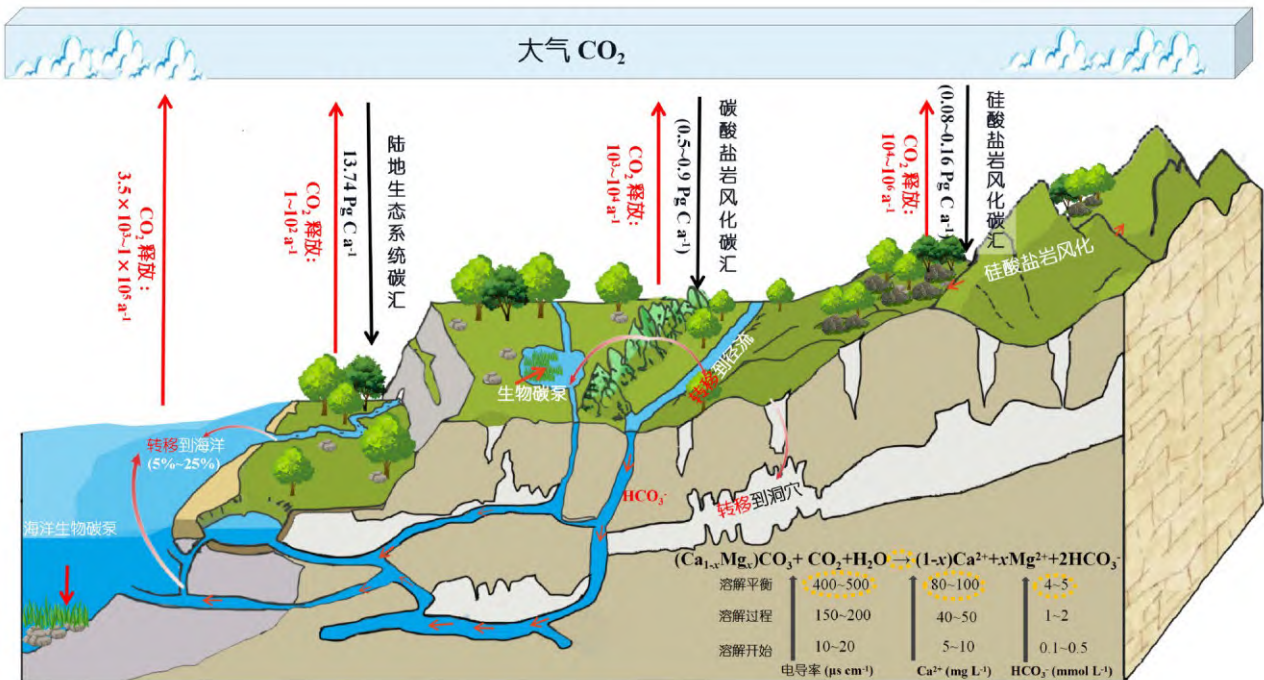


图2 碳酸盐岩地区碳循环图

被吸收进入生物圈, 少部分沉积到水底或者洞穴中, 只有极少部分又回到大气中(图2)(Larson, 2011; Hilton和West, 2020). 在密西西比河流域中, 内陆水域的有机碳沉积和向海洋及河流的有机碳排放分别为0.6和0.5Pg C a<sup>-1</sup>(Cole等, 2007; Gaillardet和Galy, 2008). 在向水生植物转移方面, 发现水生生物碳泵会使部分无机碳转化为有机碳(Liu和Dreybrodt, 2015; Porder, 2019). 由水生光合作用转化产生的有机碳约为20%(Battin等, 2009). 在洞穴中, 虽然碳酸盐岩风化会使洞穴中形成石笋或钟乳石, 从而对大气CO<sub>2</sub>的进行转移, 但是只有5%~25%发生转移(Wen等, 2021). 因此, CCSs转移的过程需要一定条件并且可转移的量级有限. 综上所述, CCSs不仅存在, 而且稳定, 转移量小. 这一发现为将CCSs纳入到全球陆地遗失碳汇的考虑中提供理论基础.

### 3 CCSs的量级有多少?

CCSs是全球陆地碳汇的重要组成部分, 在全球碳循环和气候变化中发挥着重要作用(Yuan, 1997; Gaillardet等, 1999; Gombert, 2002; Liu等, 2010). 许多研究表明, CCSs可以进一步降低温室效应强度, 从而耗尽大气和土壤CO<sub>2</sub>(Zeng等, 2017; Romero-Mujalli等,

2018b; Strefler等, 2018). 同时, “遗失碳汇”是当前全球碳循环研究的热点话题之一, 已成为全球碳循环建模者开展碳收支计算的重点(Liu等, 2021). Li等(2018)认为全球CCSs分别约占全球陆地碳汇的25%和“遗失碳汇”的50%. 因此, 精确估算全球CCSs的量级, 不仅有助于解决全球“遗失碳汇”问题, 而且有助于揭示CCSs在全球碳循环和气候变化中的重要地位.

目前学者们根据河流水化学数据及岩性数据等多源数据, 采用多种方法来评估CCSs的量级. 我们将众多学者的研究结果进行了对比(表1), 目前使用较多的方法是热力学溶蚀模型和GEM-CO<sub>2</sub>模型. 从全球尺度, 其中基于热力学溶蚀模型计算出的全球CCSs量级最大, 通量约为87t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总量约为0.89Pg C a<sup>-1</sup>(Li等, 2018). 基于GEM-CO<sub>2</sub>模型计算出的CCSs量级较小. 例如, Xi等(2021)计算出全球CCSs通量约为2.7t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; Amiotte Suchet等(2003)计算的全球CCSs总量约为0.10Pg C a<sup>-1</sup>. 在中国尺度, 当前学者多采用热力学溶蚀模型进行中国CCSs的估算. 例如, 杜朝超等(2024)认为中国CCSs的通量为6.21t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总量为0.013Pg C a<sup>-1</sup>; 曾思博和刘再华(2022)估算出的中国CCSs通量为6.93t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总量为0.017Pg C a<sup>-1</sup>; 李汇文等(2019a)估算出的中国CCSs通量为4.28t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总量为0.007Pg C a<sup>-1</sup>; 由于上述学者所采用的基础

表1 碳酸盐岩风化碳汇(CCSs)量级比较

参考文献	面积 (×10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	通量 (t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	总量 (Pg C a <sup>-1</sup> )	研究区	方法
Yuan, 1997	22.00	27.73	0.61	全球	水化学径流法
Gaillardet等, 1999	-	6.82	0.15	全球	逆解模型
Liu和Zhao, 2000	22.00	5.21	0.11	全球	水化学径流法
Gombert, 2002	27.99	10.79	0.30	全球	热力学溶蚀模型
Amiotte Suchet等, 2003	18.03	5.74	0.10	全球	GEM-CO <sub>2</sub> 模型
Martin, 2017	21.22	37.70	0.80	全球	GEM-CO <sub>2</sub> 模型
Li等, 2018	10.23	87.00	0.89	全球	热力学溶蚀模型
Liu等, 2018	-	-	0.50	全球	耦合碳酸盐岩风化模型
Zeng等, 2019	744.50	4.30	0.32	全球	热力学溶蚀模型
Xi等, 2021	118.50	2.70	0.32	全球	GEM-CO <sub>2</sub> 模型
Xiong等, 2022	-	5.36	0.30	全球	Suchet模型 Hartmann模型
李汇文等, 2019a	2.27	4.28	0.007	中国	热力学溶蚀模型
曾思博和刘再华, 2022	2.54	6.93	0.017	中国	热力学溶蚀模型
杜朝超等, 2024	1.55	6.21	0.013	中国	热力学溶蚀模型

数据及研究时段的不同, 研究结果存在略微差异. 结合当前CCSs量级范围, 本文预计全球CCSs的量级约为0.5~0.9Pg C a<sup>-1</sup>, 中国的CCSs量级为0.005~0.02Pg C a<sup>-1</sup>.

为了揭示上述CCSs量级在全球碳循环中的地位和作用, 本研究将全球CCSs与不同植被碳汇以及硅酸盐岩碳汇进行对比分析(图3). 由于计算碳汇所采用的方法、数据、研究时间段的不同, 以及估算模型的不确定性, 所得出的碳汇结果具有较大差异. 当前常用的估算方法有地面调查、生态系统碳通量检测、大气成分监测与大气反演以及模型模拟等(杨元合等, 2022). 本研究预计的全球CCSs总量(0.5~0.9Pg C a<sup>-1</sup>)约为全球陆地植被碳汇总量(13.74Pg C a<sup>-1</sup>)的0.04~0.07倍, 约为森林生态系统碳汇(1.1Pg C a<sup>-1</sup>)的0.45~0.82倍, 约为草地生态系统碳汇(0.37Pg C a<sup>-1</sup>)的1.35~2.43倍, 约为灌丛生态系统碳汇(0.3Pg C a<sup>-1</sup>)的1.67~3倍, 约为农田生态系统碳汇(0.33Pg C a<sup>-1</sup>)的1.52~2.73倍, 约为湿地生态系统碳汇(0.83Pg C a<sup>-1</sup>)的0.6~1.08倍(Pan等, 2011; Mitsch等, 2013; Sulla-Menashe和Friedl, 2018; Chang等, 2021; Ren等, 2020; Sha

等, 2022), 约为全球硅酸盐岩风化碳汇总量(0.17Pg C a<sup>-1</sup>)的2.94~5.29倍(Hartmann, 2009). 上述研究结果对比表明, 增强CCSs不仅是减缓大气CO<sub>2</sub>浓度上升和全球变暖的重要手段, 更是实现“碳中和”目标的有效途径和有力抓手.

#### 4 CCSs如何分布?

全球CCSs占陆地碳汇的14.71%(Beaulieu等, 2012; Friedlingstein等, 2020). 如表2所示, 俄罗斯、加拿大、中国和美国是世界上CCSs最大的四个国家, 共计占全球CCSs的60.2%(Lapenis等, 2005; Poulter等, 2014; Li等, 2018; Xiong等, 2022). 中国和俄罗斯的CCSs通量分别为6.93和6.91t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 高于全球平均CCSs通量(Gaillardet等, 1999; Liu和Zhao, 2000; Li等, 2018; Zeng等, 2019; Goll等, 2021; Zeng等, 2022; Xiong等, 2022).

由于不同气候区的降水和温度条件的差异(Gombert, 2002; Cox等, 2013; Goldscheider等, 2020), 热带地区CCSs通量最高为57.7t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 暖温带为24.4t C



图3 碳汇量级比较

含碳酸盐岩风化碳汇、硅酸盐岩风化碳汇、草地碳汇、森林碳汇、灌木碳汇、农田碳汇

**表 2** 不同国家、气候带和流域碳酸盐风化碳汇(CCSs)及其通量(CCSF)分布情况统计

分类	区域	CCSs (Tg C a <sup>-1</sup> )	CCSF (t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )
气候带	热带	123	57.7
	亚热带	120	18.6
	冷温带	205	24.4
	暖温带	74	20.5
	寒带	24	10
流域	亚马孙流域	153	30.58
	密西西比河流域	72	20.37
	黄河流域	15.8	11.27
	长江流域	1.06	5.74
	珠江流域	2.14	12.35
国家	俄罗斯	29.99	6.91
	加拿大	10.54	3.39
	中国	16.56	6.93
	美国	10.71	4.78
	巴西	1.19	4.57

km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 极地最低为10t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(Reay等, 2008; Li等, 2018; Xiong等, 2022). 随着气候带由南向北移动, CCSs也呈相应减少趋势(Romero-Mujalli等, 2018a; Gaillardet等, 2019; Goldscheider等, 2020). 然而, 受碳酸盐岩面积的空间分布影响, 冷温带CCSs最大为205Tg C a<sup>-1</sup>, 寒带最小为24Tg C a<sup>-1</sup>, 相差了7.5倍(White和Blum, 1995; Goldscheider等, 2020; Bufer等, 2021).

通过比较全球流域的CCSs, 发现全球主要流域的CCSs为427Tg C a<sup>-1</sup>(Gaillardet等, 1999). 其中亚马逊流域(153Tg C a<sup>-1</sup>)最高, 占到全球主要流域CCSs总量的35.58%, 是密西西比河(72Tg C a<sup>-1</sup>)的2.1倍, 分别是长江流域(15.8Tg C a<sup>-1</sup>)的9.7倍, 珠江流域(2.14Tg C a<sup>-1</sup>)和黄河流域(1.06Tg C a<sup>-1</sup>)的47.8倍(Subramaniam等, 2008; Wang等, 2012; Zhang等, 2014). 虽然珠江流域的CCSs总量很小, 但其CCSs通量高于世界主要流域(李晶莹和张经, 2003; 覃小群等, 2013; Fan等, 2014; 张连凯等, 2016; Liu和Han, 2020; Gong等, 2021).

全球CCSs主要分布在北美、西欧和中国西南部(Zeng等, 2019; Goldscheider等, 2020)并且主要集中在热带和温带地区(Tian等, 1998; Gatti等, 2014; Soulet等,

2021), 其中, 热带亚马孙流域的CCSs含量最高(Gaillardet等, 1999; Li等, 2017).

## 5 CCSs如何增加?

科学揭示CCSs的作用机制及影响因素, 对实现CCSs具有重要意义. 研究表明, 碳酸盐岩风化受诸多自然和人为因素的控制(图4)(Gaillardet等, 1999; Gombert, 2002; Liu等, 2010; Dreybrodt, 2012), 蕴藏着巨大的碳汇潜力(Raymond等, 2008; Gislason等, 2009).

CCSs通量的量级取决于碳酸盐岩的溶蚀程度. 碳酸盐岩主要包括石灰岩和白云岩两类(Morse等, 2007), 其中, 石灰岩主要由方解石组成(Goldscheider等, 2020), 方解石达到溶解平衡时的浓度随着周围环境中CO<sub>2</sub>浓度的增加而增加, 可从55mg L<sup>-1</sup>(P<sub>CO<sub>2</sub></sub>=0.03%)、150mg L<sup>-1</sup>(P<sub>CO<sub>2</sub></sub>=0.3%)增加到300mg L<sup>-1</sup>(P<sub>CO<sub>2</sub></sub>=3%)(Merkel和Planer, 2005). 随着CO<sub>2</sub>浓度不断增加, 方解石溶蚀持续进行, 不断析出HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 促进CCSs速率. Gong等(2021)计算出中国水平衡和降水对CCSs的相对贡献率分别达到57%和35%; Xi等(2021)表明, 在生态水文因子方面, 降水与CCSs的相关性最强, 对CCSs的贡献率最大, 高达50%, 远高于温度(8%)和土壤水分(24%)的影响. 温度是碳酸盐岩风化的基本控制因素(Dreybrodt, 2012), 因为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>变化对温度高度敏感, 温度在一定范围内增加了风化强度和CCSs, 低温和高温都会限制CCSs(Dreybrodt, 2012; Romero-Mujalli等, 2018b). 因此, 适宜的温度(10~15℃)可促进碳酸盐岩的溶解达到最大值, 增加土壤CO<sub>2</sub>(Gaillardet等, 1999; Zeng等, 2019).

植被恢复有利于土壤CO<sub>2</sub>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>通量积累, 可以显著提升碳酸盐岩地下溶蚀速率, 从而增加CCSs潜力(Ford和William, 2007; Zhang等, 2008). 此外, 中国南方植被恢复使地表平均CCSs增加(0.11±0.05)Pg C a<sup>-1</sup>(Tong等, 2020), 植被的出现能使碳酸盐岩风化速度增加3~10倍(Berner, 1997; Liu等, 2018).

土壤CO<sub>2</sub>是碳酸盐风化的重要驱动力(Yang等, 2012), 土壤的理化性质对碳酸盐风化过程有着重要的影响. 土壤改良主要利用土壤中的矿质元素, 增加了土壤有机质, 改善了土壤透气性, 使得土壤CO<sub>2</sub>浓度提高,

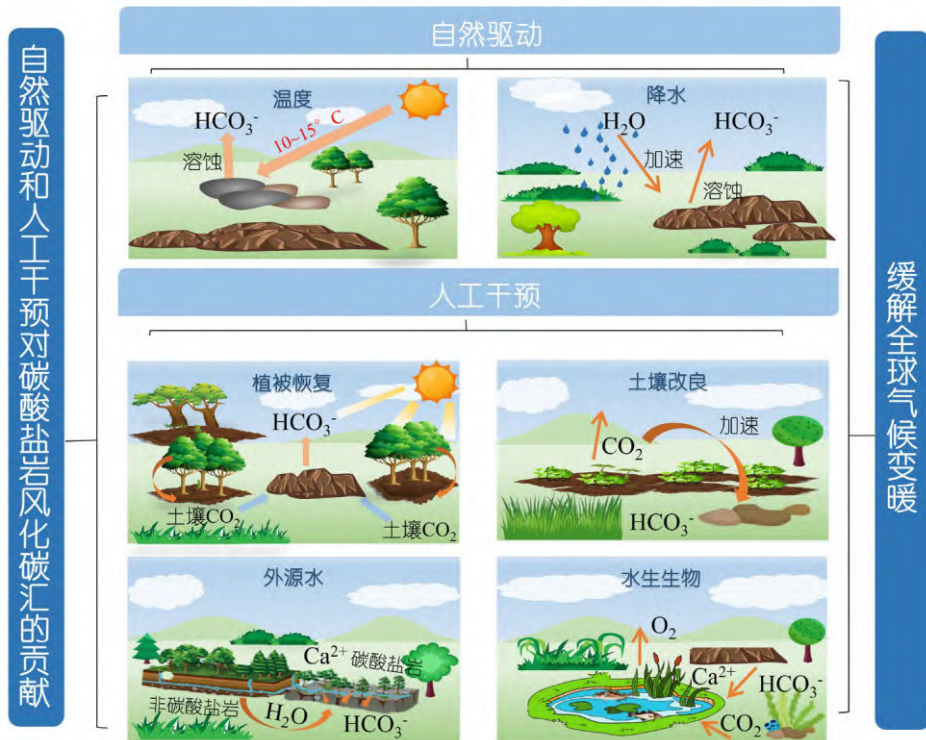


图4 自然和人为驱动对碳酸盐岩风化碳汇的贡献

进而促进碳酸盐风化过程的正向发生,从而增加碳汇(Jain等, 2005; Nguyen等, 2021). 罗为群等(2009)利用滤泥对碳酸盐岩区土壤进行改良,产生的有机酸和 $\text{CO}_2$ ,促进了碳酸盐岩的正向反应. Bingeman等(1953)施用秸秆后使得土壤微生物活性提高,增加了土壤碳的矿化速率,进而加快了土壤释放 $\text{CO}_2$ 的速度,最终促进了CCSs的发生.

外源水对碳酸盐岩的侵蚀是增加碳汇的一个重要因素(Cao等, 2017). 由于其硬度、pH值及饱和度都较低,对碳酸盐岩有很强的侵蚀力(Schindlbacher等, 2019). 黄芬等(2018)将具有侵蚀力的外源水引入流经碳酸盐岩区,桂林毛村CCSs通量经一段反应距离和汇入地下河出口分别增加至 $8.84$ 和 $28.21 \text{ t C km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . 水生生物利用无机碳合成有机碳,是碳酸盐岩地区碳循环的重要过程,而且减少了水气界面的 $\text{CO}_2$ 向大气逸出,是稳定CCSs的有效途径(Pu等, 2019; Zhang等, 2019). 王培等(2013)通过实验得出,碳酸盐岩区小球藻能将水中约41%的 $\text{HCO}_3^-$ 利用. 然而,水生生物新陈代谢需要消耗氧,生物量与溶解氧呈负相关,且生物量

过多会出现死亡现象(Chen等, 2007). 残体腐烂和化肥形成了水体中氮和磷的主要来源(Meyers和Ishiwatari, 1993),致使水体中氮和磷的含量远大于植物生长所需要的养分. 因此,培育水生生物变成了双刃剑,适量的水生生物,对提高CCSs稳定性具有重要意义.

总之,CCSs的相对稳定性和规模主要受气候变化和人类活动的控制. 在自然因素方面,CCSs受到 $\text{CO}_2$ 浓度、降水和温度等多种驱动力的影响,环境敏感性强. 此外,人为干预方式主要包括植被恢复、土壤改良、外源水灌溉和水生植物栽培等. 在许多研究中,这些方法都取得了明显的效果.

## 6 过去和未来CCSs怎样变化?

气候变化和人类活动正加速CCSs,形成气候变化的负反馈机制(刘再华和Dreybrodt, 2012; Drake等, 2018; Zeng等, 2021).

随着全球变暖,许多研究探讨了温度变化对CCSs的影响,并计算了温度升高对CCSs的定量变化(表3).

表3 气候变暖对碳酸盐岩风化碳汇(CCSs)及其通量(CCSF)的影响<sup>a)</sup>

区域	平均温度(°C)	CCSF(t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	年份	参考文献
加登阿尔卑斯山区	4.41	16.34		
中国西南部板寨区	18.40	6.48	2007~2019	Zeng等, 2021
瑞士阿尔卑斯山区	4.25	14.76		

区域	温度(°C a <sup>-1</sup> )	CCSs的变化	年份	参考文献
黄土高原	+0.04	+0.07t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>		
珠江流域	+0.04	+0.05t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	2000~2014	Gong等, 2021
中国	+0.01	-0.0054t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>		
喀斯特槽谷	+0.06	+0.202t C km <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	1992~2017	李汇文等, 2019b
冰岛	+1.00	岩石风化通量(+4%~14%)	1964~2004	Gislason等, 2009
中国西南	+0.02	-5.55Tg C		
贵州省	+0.33	碳汇强度(-37%)	1970~2013	曾思博, 2017
云南省	+1.04	碳汇强度(-32%)		

a) +表示增加, -表示减少

研究表明全球气温上升将通过降水量和大陆植被覆盖度的变化促进水文循环的变化, 进而影响大陆岩石风化, 增强CCSs能力(Drake等, 2018; Zeng等, 2019). 2000~2014年全球CCSs总量从0.979Pg C a<sup>-1</sup>减少到0.870Pg C a<sup>-1</sup>, 多年平均碳汇总量为0.894Pg C a<sup>-1</sup>, 平均每年减少17.14×10<sup>5</sup>t C km<sup>-2</sup>. 中国石灰岩风化碳汇总体处于轻微增加趋势, 总体上通量增加幅度在0.036t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总量增加幅度为0.06Tg C a<sup>-1</sup>(Li等, 2018; 李汇文等, 2019a). 气候变暖不仅对低纬度槽谷地区CCSs产生影响, 还有助于促进高寒植被生长并增强碳汇(Huang等, 2019; 李汇文等, 2019b). 此外, 气候变暖使得青藏高原冰川融化释放约0.19Tg C a<sup>-1</sup>的溶解有机碳(Chen等, 2022). 在未来RCP4.5情景下, 冻土融化将使净初级产量增加(7.15±4.83)Tg C a<sup>-1</sup>; 而在RCP8.5情景下, 将增加(24.27±9.19)Tg C a<sup>-1</sup>(Liu等, 2022). 海冰融化导致表层水的淡化将增加CO<sub>2</sub>的溶解度, 相应的增加3t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>(Anderson和Kaltin, 2001). Liu等(2018)估计, 到2100年, 全球变暖可能导致全球CCSs增加21%(即约0.18Pg C a<sup>-1</sup>). Zeng等(2019)预测从2015~2060年, 中国CCSs通量受到全球变化的影响将增加约1t C km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, 总碳汇增加约2.54×10<sup>6</sup>Tg C a<sup>-1</sup>(+14.4%), 而非岩溶区撒播碳酸盐粉末的潜在碳中和潜力增加约6.97×10<sup>6</sup>Tg C a<sup>-1</sup>(+18.1%). 如果未来全球变暖继续超过碳酸盐岩的最高溶蚀温度范围, 它将限制碳酸盐岩的风化, 并可能对其产生负面影响(Zeng

等, 2021; Soulet等, 2021; Komar和Zeebe, 2021), 而不断增加的降雨和土地利用变化将抵消这一影响, 从而导致更大的CCSs(Zeng等, 2019; Sha等, 2022; Li等, 2022b).

## 7 碳酸盐风化碳汇存在什么影响?

在不同的情境下, CCSs的增加是一把“双刃剑”(图5). 一方面, 在合适的地方, 碳酸盐岩地区的植被恢复具有显著的碳汇效应(Huang等, 2019; Tong等, 2020; Khadka等, 2014), 2002~2017年中国南方植被恢复使地表平均CCSs增加(0.11±0.05)Pg C a<sup>-1</sup>(Berner, 1997; Liu等, 2018). 此外, 碳酸盐岩区域的洞穴、地下河和管道等地下空间可以富集高浓度的CO<sub>2</sub>, 例如, 丰芽-格邦国家公园洞穴最内层的CO<sub>2</sub>浓度从春季(2016年3月)570ppmv到夏季(2016年8月)的8000ppmv(1ppmv=1μL L<sup>-1</sup>), 而洞穴外露天地面上方0.5m处大气CO<sub>2</sub>值为360~630ppmv, 小于洞穴内的CO<sub>2</sub>浓度(Andrews和Schlesinger, 2001; Trinh等, 2018). 碳酸盐风化对水生生物生长起着施肥作用(Yang等, 2016), 产生水体沉积物碳汇(Liu等, 2021), 丰富水生生物物种, 增加生物多样性(Sipos等, 2017; de la Puente等, 2022), 并为CO<sub>2</sub>的地质封存提供有利的空间条件, 增强碳汇稳定性(蒋忠诚等, 2022).

另一方面, 碳酸盐岩风化过程形成碳酸盐岩石、





图5 碳酸盐岩风化的“双刃剑”效应

发育碳酸盐岩空穴系统, 带走地表物质, 形成了地表地下双层结构等碳酸盐岩生态脆弱性系统(Singer和War-kentin, 1996), 产生了地面沉降和塌陷等妨碍工程建设和地质灾害或脆弱性地质现象。碳酸盐岩系统在演进过程中也会使生物量减少, 脆弱性增加, 恢复力降低(Mumby等, 2014), 这些过程对产生CCSs具有一定的消极影响。因此, CCSs并不总是有利的, 在不同情景下, 就像一把双刃剑, 有利也有弊。

## 8 结论

结合陆地系统科学、碳酸盐风化动力学和碳循环研究, 我们揭示了CCSs的五大争议, 并从科学上回答了CCSs是否存在、量化了它们的规模、澄清了它们的时空分布模式、记录了它们在全球变化背景下是如何增加和演变的。五个答案如下: (1) CCSs确实存在, 而且比植被碳汇更加稳定; (2) CCSs对全球碳循环的贡献约为 $0.5\sim 0.9\text{Pg C a}^{-1}$ , 通量为 $2.7\sim 87\text{t C km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ , 是森林生态系统碳汇的 $0.45\sim 0.82$ 倍, 是硅酸盐岩风化碳汇的 $2.94\sim 5.29$ 倍; (3) CCSs主要分布在热带和温带, 例如亚马逊流域( $153\text{Tg C a}^{-1}$ )和俄罗斯( $29.99\text{Tg C}$

$\text{a}^{-1}$ ); (4) CCSs的自然驱动力主要体现在降水和温度的增碳作用, 而人工碳增汇则主要涉及植被恢复、土壤改良、外部水源灌溉以及改善水生植物生长环境以提高光合作用效率等方面; (5) 未来全球变暖将导致CCSs增加 $21\%(0.18\text{Tg C a}^{-1})$ 。总之, 这些答案为未来全球碳循环研究和解决全球CCSs问题提供了理论支持。

## 参考文献

- 杜朝超, 白晓永, 李阳兵, 谭秋, 赵翠薇, 罗光杰, 吴路华, 陈飞, 李朝君, 冉晨, 张思蕊, 熊练, 宋丰姣, 肖碧琴, 李姿霖, 薛盈盈, 龙明康, 罗青, 张小芸, 李明会, 沈晓倩, 杨殊. 2024. 中国碳酸盐岩地区岩溶无机碳汇格局及影响因素. 中国科学: 地球科学, 54: 745-759
- 黄芬, 吴夏, 杨慧, 张春来, 曹建华. 2018. 桂林毛村地下河流域岩溶关键带碳循环研究. 广西科学, 25: 515-523
- 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 何师意, 章程, 张强. 2013. 论岩溶作用对全球碳循环的意义与碳汇效应——兼对《对〈中国岩溶作用产生的大气 $\text{CO}_2$ 碳汇分区估算〉一文的商榷》的答复. 中国岩溶, 32: 1-6
- 蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕. 2022. 我国岩溶地区碳汇研究进展与展望. 中国岩溶, 41: 345-355
- 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 吴路华. 2019a. 中国石灰岩化学风化

- 碳汇时空演变特征分析. 中国科学: 地球科学, 49: 986–1003
- 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 田义超, 罗光杰, 陈飞, 李琴, 吴路华, 王金凤, 王明明, 田诗琪, 邓元红, 胡泽银, 杨钰杰, 李朝君, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 冉晨, 罗旭玲. 2019b. 化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估. 生态学报, 39: 6158–6172
- 李晶莹, 张经. 2003. 黄河流域化学风化作用与大气CO<sub>2</sub>的消耗. 海洋地质与第四纪地质, 2: 43–49
- 刘再华, Dreybrodt W. 2012. 碳酸盐风化碳汇与森林碳汇的对比——碳汇研究思路和方法变革的必要性. 中国岩溶, 31: 345–348
- 罗为群, 蒋忠诚, 赵草著, 杨富军, 邓艳. 2009. 亚硫酸法糖厂滤泥改良石灰土试验研究. 农业现代化研究, 30: 248–252
- 覃小群, 刘朋雨, 黄奇波, 张连凯. 2013. 珠江流域岩石风化作用消耗大气/土壤CO<sub>2</sub>量的估算. 地球学报, 34, 4: 455–462
- 王培, 曹建华, 李亮, 杨慧, 李光超. 2013. 不同来源小球藻对岩溶水Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>利用的初步研究. 水生生物学报, 37: 626–631
- 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, 陈世革, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 2022. 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, 52: 534–574
- 曾思博. 2017. 西南地区近40年气候变化及其对岩溶作用碳汇的影响研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学. 1–63
- 曾思博, 刘再华. 2022. 我国岩溶碳汇和在非岩溶区播撒碳酸盐粉的碳中和潜力. 科学通报, 67: 4116–4129
- 张连凯, 覃小群, 刘朋雨, 黄奇波. 2016. 硫酸参与的长江流域岩石化学风化与大气CO<sub>2</sub>消耗. 地质学报, 90, 8: 1933–1944
- 章程, 肖琼, 孙平安, 高旭波, 郭永丽. 2022. 岩溶碳循环及碳汇效应研究与展望. 地质科技通报, 41: 190–198
- Atjay G L, Ketner P, Duvigneaud P. 1979. Terrestrial primary production and phytomass. In: Bolin B, Degens E T, Kempe S, Ketner P, eds. The Global Carbon Cycle. New York: John Wiley & Sons, 129–181.
- Allegre C J, Schneider S H. 1994. The evolution of the Earth. *Sci Am*, 271: 66–75
- Amiotte Suchet P, Probst J L, Ludwig W. 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Glob Biogeochem Cycle*, 17: 1038
- Anderson L G, Kaltin S. 2001. Carbon fluxes in the Arctic Ocean—Potential impact by climate change. *Polar Res*, 20: 225–232
- Andrews J A, Schlesinger W H. 2001. Soil CO<sub>2</sub> dynamics, acidification, and chemical weathering in a temperate forest with experimental CO<sub>2</sub> enrichment. *Glob Biogeochem Cycle*, 15: 149–162
- Battin T J, Luysaert S, Kaplan L A, Aufdenkampe A K, Richter A, Tranvik L J. 2009. The boundless carbon cycle. *Nat Geosci*, 2: 598–600
- Beaulieu E, Godd ris Y, Donnadi u Y, Labat D, Roelandt C. 2012. High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change. *Nat Clim Change*, 2: 346–349
- Berner R A. 1997. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, 276: 544–546
- Berner R A. 2006. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 5653–5664
- Berner E K, Berner R A. 1987. The Global Water Cycle—Geochemistry and Environment. Englewood Cliffs: Prentice-Hall
- Bingeman C W, Varner J E, Martin W P. 1953. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Sci Soc Amer J*, 17: 34–38
- Bufe A, Hovius N, Emberson R, Rugenstein J K C, Galy A, Hassenruck-Gudipati H J, Chang J M. 2021. Co-variation of silicate, carbonate and sulfide weathering drives CO<sub>2</sub> release with erosion. *Nat Geosci*, 14: 211–216
- Burke A, Present T M, Paris G, Rae E C M, Sandilands B H, Gaillardet J, Peucker-Ehrenbrink B, Fischer W W, McClelland J W, Spencer R G M, Voss B M, Adkins J F. 2018. Sulfur isotopes in rivers: Insights into global weathering budgets, pyrite oxidation, and the modern sulfur cycle. *Earth Planet Sci Lett*, 496: 168–177
- Cao J H, Jiang Z C, Yuan D X, Xia R Y, Zhang C. 2017. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years. *Geol China*, 44: 874–900
- Carter A J, Scholes R J. 2000. Spatial Global Database of Soil Properties. IGBP Global Soil Data Task. Toulouse: International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) Data Information Systems
- Carvalho N, Forkel M, Khomik M, Bellarby J, Jung M, Migliavacca M, Mu M, Saatchi S, Santoro M, Thurner M, Weber U, Ahrens B, Beer C, Cescatti A, Randerson J T, Reichstein M. 2014. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. *Nature*, 514: 213–217
- Chang J F, Ciais P, Gasser T, Smith P, Herrero M, Havlik P, Obersteiner M, Guenet B, Goll D S, Li W, Naipal V, Peng S S, Qiu C J, Tian H Q, Viovy N, Yue C, Zhu D. 2021. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nat Commun*, 12: 118
- Chen C C, Gong G C, Shiah F K. 2007. Hypoxia in the East China Sea: One of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Mar Environ Res*, 64: 399–408
- Chen H, Ju P J, Zhu Q, Xu X L, Wu N, Gao Y H, Feng X J, Tian J Q, Niu S L, Zhang Y J, Peng C H, Wang Y F. 2022. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 701–716

- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, Defries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Quéré C L, Myneni R B, Piao S, Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. Cambridge: Cambridge University Press
- 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. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10: 172–185
- Copard Y, Amiotte-Suchet P, Di-Giovanni C. 2007. Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. *Earth Planet Sci Lett*, 258: 345–357
- Cox P M, Pearson D, Booth B B, Friedlingstein P, Huntingford C, Jones C D, Luke C M. 2013. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 494: 341–344
- Curl R L. 2012. Carbon shifted but not sequestered. *Science*, 335: 655
- de la Puente L, Pedro Ferrio J, Palacio S. 2022. Disentangling water sources in a gypsum plant community. Gypsum crystallization water is a key source of water for shallow-rooted plants. *Ann Bot*, 129: 87–100
- Drake T W, Tank S E, Zhulidov A V, Holmes R M, Gurtovaya T, Spencer R G M. 2018. Increasing alkalinity export from large Russian Arctic rivers. *Environ Sci Technol*, 52: 8302–8308
- Dreybrodt W. 2012. Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology (Vol. 4). Cham: Springer Science & Business Media
- Erb K H, Kastner T, Plutzer C, Bais A L S, Carvalhais N, Fetzel T, Gingrich S, Haberl H, Lauk C, Niedertscheider M, Pongratz J, Thurner M, Luysaert S. 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553: 73–76
- Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, Canadell J, Canfield D, Elser J, Gruber N, Hibbard K, Höglberg P, Linder S, Mackenzie F T, Moore III B, Pedersen T, Rosenthal Y, Seitzinger S, Smetacek V, Steffen W. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system. *Science*, 290: 291–296
- Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, Liu B J, Tao Z H, Gao S, Zhang L H. 2014. Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, midstream and downstream. *J Asian Earth Sci*, 96: 17–26
- Ferris F G, Wiese R G, Fyfe W S. 1994. Precipitation of carbonate minerals by microorganisms: Implications for silicate weathering and the global carbon dioxide budget. *Geomicrobiol J*, 12: 1–13
- Foley J A. 1995. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus B-Chem Phys Meteor*, 47: 310–319
- Ford D, William P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 1–562
- 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, Arneeth 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, Joetzer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozi D, Marland G, Metz 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
- Gaillardet J, Galy A. 2008. Himalaya—Carbon sink or source? *Science*, 320: 1727–1728
- Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre C J. 1999. Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chem Geol*, 159: 3–30
- Gaillardet J, Calmels D, Romero-Mujalli G, Zakharova E, Hartmann J. 2019. Global climate control on carbonate weathering intensity. *Chem Geol*, 527: 118762
- Gatti L V, Gloor M, Miller J B, Doughty C E, Malhi Y, Domingues L G, Basso L S, Martinewski A, Correia C S C, Borges V F, Freitas S, Braz R, Anderson L O, Rocha H, Grace J, Phillips O L, Lloyd J. 2014. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506: 76–80
- George E F, Hall M A, Klerk G. 2008. Plant Propagation by Tissue Culture. Amsterdam: Springer Netherlands. 283–333
- Gislason S R, Oelkers E H, Eiriksdottir E S, Kardjilov M I, Gisladottir G, Sigfusson B, Snorrason A, Elefsen S, Hardardottir J, Torssander P, Oskarsson N. 2009. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 277: 213–222
- Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, Broda S, Drew D, Hartmann J, Jiang G H, Moosdorf N, Stevanovic Z, Veni G. 2020. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. *Hydrogeol J*, 28: 1661–1677
- Goll D S, Ciais P, Amann T, Buermann W, Chang J F, Eker S, Hartmann J, Janssens I, Li W, Obersteiner M, Penuelas J, Tanaka K, Vicca S. 2021. Potential CO<sub>2</sub> removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nat Geosci*, 14: 545–549
- Gombert P. 2002. Role of karstic dissolution in global carbon cycle.

- Glob Planet Change*, 33: 177–184
- Gong S H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Chen F, Qian Q H, Xiao J Y, Zeng C. 2021. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China. *Sci Total Environ*, 750: 141525
- Groves C, Cao J H, Zhang C. 2012. Response-carbon shifted but not sequestered. *Science*, 335: 655
- Hartmann J. 2009. Bicarbonate-fluxes and CO<sub>2</sub>-consumption by chemical weathering on the Japanese Archipelago—Application of a multi-lithological model framework. *Chem Geol*, 265: 237–271
- Hartmann J, Moosdorf N, Lauerwald R, Hinderer M, West A J. 2014. Global chemical weathering and associated P-release—The role of lithology, temperature and soil properties. *Chem Geol*, 363: 145–163
- Hengl T, de Jesus J M, MacMillan R A, Batjes N H, Heuvelink G B M, Ribeiro E, Samuel-Rosa A, Kempen B, Leenaars J G B, Walsh M G, Gonzalez M R. 2014. SoilGrids1km: Global soil information based on automated mapping. *PLoS ONE*, 9: e105992
- Hilley G E, Porder S. 2008. A framework for predicting global silicate weathering and CO<sub>2</sub> drawdown rates over geologic time-scales. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 16855–16859
- Hilton R G, West A J. 2020. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 284–299
- Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, Moore B, Peterson B J, Shaver G R, Woodwell G M. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *Ecol Monogr*, 53: 235–262
- Huang M T, Piao S L, Ciais P, Peñuelas J, Wang X H, Keenan T F, Peng S S, Berry J A, Wang K, Mao J F, Alkama R, Cescatti A, Cuntz M, Deurwaerder DH, Gao M D, He Y, Liu Y W, Luo Y Q, Myneni R B, Niu S L, Shi X Y, Yuan W Q, Verbeeck H, Wang T, Wu J, Janssens I A. 2019. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nat Ecol Evol*, 3: 772–779
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 1535
- Jain A K, West T O, Yang X J, Post W M. 2005. Assessing the impact of changes in climate and CO<sub>2</sub> on potential carbon sequestration in agricultural soils. *Geophys Res Lett*, 32: L19711
- Jobbágy E G, Jackson R B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl*, 10: 423–436
- Kasting J F. 1987. Theoretical constraints on oxygen and carbon dioxide concentrations in the Precambrian atmosphere. *Precambrian Res*, 34: 205–229
- Khadka M B, Martin J B, Jin J. 2014. Transport of dissolved carbon and CO<sub>2</sub> degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment. *J Hydrol*, 513: 391–402
- Köhler P. 2020. Anthropogenic CO<sub>2</sub> of high emission scenario compensated after 3500 years of ocean alkalization with an annually constant dissolution of 5 Pg of olivine. *Front Clim*, 2: 575744
- King A W, Post W M, Wulfschlegel S D. 1997. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Clim Change*, 35: 199–227
- Komar N, Zeebe R E. 2021. Reconciling atmospheric CO<sub>2</sub>, weathering, and calcite compensation depth across the Cenozoic. *Sci Adv*, 7: eabd4876
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123: 1–22
- Lapenis A, Shvidenko A, Shepaschenko D, Nilsson S, Aiyyer A. 2005. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate. *Glob Change Biol*, 11: 2090–2102
- Larson C. 2011. An unsung carbon sink. *Science*, 334: 886–887
- Li C J, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Chen F, Xi H P, Luo X L, Ran C, Chen H, Zhang S R, Liu M, Gong S H, Xiong L, Song F J, Xiao B Q, Du C C. 2022a. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes. *Glob Change Biol*, 28: 4377–4394
- Li H W, Wang S J, Bai X Y, Luo W J, Tang H, Cao Y, Wu L H, Chen F, Li Q, Zeng C, Wang M M. 2018. Spatiotemporal distribution and national measurement of the global carbonate carbon sink. *Sci Total Environ*, 643: 157–170
- Li L H, Zhang Y, Zhou T J, Wang K C, Wang C, Wang T, Yuan L W, An K, Zhou C H, Lü G N. 2022b. Mitigation of China's carbon neutrality to global warming. *Nat Commun*, 13: 5315
- Li Y, Zhang C Q, Wang N A, Han Q, Zhang X Z, Liu Y, Xu L M, Ye W T. 2017. Substantial inorganic carbon sink in closed drainage basins globally. *Nat Geosci*, 10: 501–506
- Liu J K, Han G L. 2020. Major ions and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations. *Sci Total Environ*, 724: 138208
- Liu L, Zhuang Q L, Zhao D S, Zheng D, Kou D, Yang Y H. 2022. Permafrost degradation diminishes terrestrial ecosystem carbon sequestration capacity on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Glob Biogeochem Cycle*, 36: e2021GB007068
- Liu Z H, Zhao J. 2000. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO<sub>2</sub> sink. *Environ Geol*, 39: 1053–1058

- Liu Z H, Dreybrodt W. 2015. Significance of the carbon sink produced by H<sub>2</sub>O-carbonate-CO<sub>2</sub>-aquatic phototroph interaction on land. *Sci Bull*, 60: 182–191
- Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. 2010. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO<sub>2</sub> budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. *Earth-Sci Rev*, 99: 162–172
- Liu Z H, Dreybrodt W, Liu H. 2011. Atmospheric CO<sub>2</sub> sink: Silicate weathering or carbonate weathering? *Appl Geochem*, 26: S292–S294
- Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D X, Zeng S B. 2018. Large and active CO<sub>2</sub> uptake by coupled carbonate weathering. *Earth-Sci Rev*, 182: 42–49
- Liu Z H, Yan H, Zeng S B. 2021. Increasing autochthonous production in inland waters as a contributor to the missing carbon sink. *Front Earth Sci*, 9: 620513
- Martin J B. 2017. Carbonate minerals in the global carbon cycle. *Chem Geol*, 449: 58–72
- Merkel B, Planer F B. 2005. *Groundwater Geochemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 1–200
- Meybeck M. 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am J Sci*, 287: 401–428
- Meyers P A, Ishiwatari R. 1993. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org Geochem*, 20: 867–900
- Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecol*, 28: 583–597
- Moon S, Chamberlain C P, Hilley G E. 2014. New estimates of silicate weathering rates and their uncertainties in global rivers. *Geochim Cosmochim Acta*, 134: 257–274
- Morse J W, Arvidson R S, Lüttge A. 2007. Calcium carbonate formation and dissolution. *Chem Rev*, 107: 342–381
- Mumby P J, Chollett I, Bozec Y M, Wolff N H. 2014. Ecological resilience, robustness and vulnerability: How do these concepts benefit ecosystem management? *Curr Opin Environ Sust*, 7: 22–27
- Nguyen A T Q, Nguyen A M, Pham N T T, Nguyen H X, Dang Q T, Tran T M, Nguyen A D, Tran P D, Nguyen M N. 2021. CO<sub>2</sub> can decrease the dissolution rate of ashed phytoliths. *Geoderma*, 385: 114835
- Olson J S, Watts J A, Allison L J. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Oak Ridge National Laboratory
- Pan Y, Birdsey R A, Fang J, 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. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333: 988–993
- Porder S. 2019. How plants enhance weathering and how weathering is important to plants. *Elements*, 15: 241–246
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156–159
- Poulter B, Frank D, Ciais P, Myneni R B, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell J G, Chevallier F, Liu Y Y, Running S W, Sitch S, van der Werf G R. 2014. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 509: 600–603
- Prentice I C, Sykes M T, Lautenschlager M, Harrison S P, Denissenko O, Bartlein P J. 1993. Modelling global vegetation patterns and terrestrial carbon storage at the Last Glacial Maximum. *Glob Ecol Biogeogr Lett*, 3: 67–76
- Prentice I C, Farquhar G, Fasham M J R, Houghton J T, Ding Y, Griggs D J. 2001. The Science of Climate Change. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change*, 183–237
- Pu J, Li J, Zhang T, Xiong X, Yuan D. 2019. High spatial and seasonal heterogeneity of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> emissions in a karst groundwater-stream continuum, southern China. *Environ Sci Pollut Res*, 26: 25733–25748
- 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
- Raymond P A, Oh N H, Turner R E, Broussard W. 2008. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature*, 451: 449–452
- Reay D S, Dentener F, Smith P, Grace J, Feely R A. 2008. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nat Geosci*, 1: 430–437
- Ren W, Banger K, Tao B, Yang J, Huang Y W, Tian H Q. 2020. Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901–2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management. *Geogr Sustain*, 1: 59–69
- Romero-Mujalli G, Hartmann J, Börker J. 2018a. Temperature and CO<sub>2</sub> dependency of global carbonate weathering fluxes—Implications for future carbonate weathering research. *Chem Geol*, 527: 118874
- Romero-Mujalli G, Hartmann J, Börker J, Gaillardet J, Calmels D. 2018b. Ecosystem controlled soil-rock pCO<sub>2</sub> and carbonate weathering—Constraints by temperature and soil water content. *Chem Geol*, 527: 118634
- Schindlbacher A, Beck K, Holzheu S, Borken W. 2019. Inorganic carbon leaching from a warmed and irrigated carbonate forest soil. *Front For Glob Change*, 2: 40

- Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, Lan H, Zhang X L, Li J, Liu X F, Chang S J, Xie Y C. 2022. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. *Commun Earth Environ*, 3: 8
- Shan X J, Liu P Y, Zhang L K, Qin X Q, Cao J H, Yu D S, Yao X, Liu W. 2019. Hydrochemical characteristics and karst carbon sink estimation under the influence of allogenic water. *Carbonates Evaporites*, 34: 1855–1863
- Singer M J, Warkentin B P. 1996. Soils in an environmental context: An American perspective. *Catena*, 27: 179–189
- Sipos J, Hodecek J, Kuras T, Dolny A. 2017. Principal determinants of species and functional diversity of carabid beetle assemblages during succession at post-industrial sites. *Bull Entomol Res*, 107: 466–477
- Soulet G, Hilton R G, Garnett M H, Roylands T, Klotz S, Croissant T, Dellinger M, Le Bouteiller C. 2021. Temperature control on CO<sub>2</sub> emissions from the weathering of sedimentary rocks. *Nat Geosci*, 14: 665–671
- Spence J, Telmer K. 2005. The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO<sub>2</sub> fluxes: Evidence from major ions,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , and  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  in rivers of the Canadian Cordillera. *Geochim Cosmochim Acta*, 69: 5441–5458
- Streifer J, Amann T, Bauer N, Kriegler E, Hartmann J. 2018. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environ Res Lett*, 13: 034010
- Subramaniam A, Yager P L, Carpenter E J, Mahaffey C, Björkman K, Cooley S, Kustka A B, Montoya J P, Sañudo-Wilhelmy S A, Shipe R, Capone D G. 2008. Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. *Proc Natl Acad Sci USA*, 105: 10460–10465
- Sulla-Menashe D, Friedl M A. 2018. User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product. Reston: USGS. 18
- Task G S D. 2014. Global soil data products CD-ROM contents (IGBP-DIS). ORNL DAAC
- Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, McGuire A D, Helfrich III J V K, Moore III B, Vörösmarty C J. 1998. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 396: 664–667
- Tong X, Brandt M, Yue Y M, Ciaisi P L, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. 2020. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nat Commun*, 11: 129
- Trinh D, Trinh Q, Fernández-Cortés A, Matthey D, Guinea J. 2018. First assessment on the air CO<sub>2</sub> dynamic in the show caves of tropical karst, Vietnam. *Int J Speleol*, 47: 93–112
- Walker J C G. 1990. Precambrian evolution of the climate system. *Glob Planet Change*, 2: 261–289
- Wang S L, Yeager K M, Wan G J, Liu C Q, Wang Y C, Lü Y C. 2012. Carbon export and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> fate in carbonate catchments: A case study in the karst plateau of southwestern China. *Appl Geochem*, 27: 64–72
- Wen H, Sullivan P L, Macpherson G L, Billings S A, Li L. 2021. Deepening roots can enhance carbonate weathering by amplifying CO<sub>2</sub>-rich recharge. *Biogeosciences*, 18: 55–75
- White A F, Blum A E. 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochim Cosmochim Acta*, 59: 1729–1747
- Whittaker R H, Likens G E, Woodwell G M, Pecan E V. 1973. Carbon and the Biosphere. In: Proceeding of the 24th Brookhaven Symposium in Biology. Springfield: Technical Information Center, Office of Information Services, US AEC, 1973. 281–302
- Xi H P, Wang S J, Bai X Y, Tang H, Luo G J, Li H W, Wu L H, Li C J, Chen H, Ran C, Luo X L. 2021. The responses of weathering carbon sink to eco-hydrological processes in global rocks. *Sci Total Environ*, 788: 147706
- Xiong L, Bai X Y, Zhao C W, Li Y B, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Chen F, Li C J, Ran C, Xi H P, Luo X L, Chen H, Zhang S R, Liu M, Gong S H, Xiao B Q, Du C H, Song F J. 2022. High-resolution data sets for global carbonate and silicate rock weathering carbon sinks and their change trends. *Earths Future*, 10: e2022EF002746
- Yang R, Liu Z H, Zeng C, Zhao M. 2012. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO<sub>2</sub> and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China. *J Hydrol*, 468-469: 151–158
- Yang M, Liu Z, Sun H, Yang R, Chen B. 2016. Organic carbon source tracing and DIC fertilization effect in the Pearl River: Insights from lipid biomarker and geochemical analysis. *Appl Geochem*, 73: 132–141
- Yoshimura K, Liu Z H, Cao J H, Yuan D X, Inokura Y, Noto M. 2004. Deep source CO<sub>2</sub> in natural waters and its role in extensive tufa deposition in the Huanglong Ravines, Sichuan, China. *Chem Geol*, 205: 141–153
- Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciaisi 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
- Yuan D X. 1997. The carbon cycle in karst. *Z Geomorphol*, 108: 91–102
- Zeng C, Wang S, Bai X, Li Y, Tian Y, Li Y, Wu L, Luo G. 2017. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 8: 721–736
- Zeng S B, Liu Z H, Kaufmann G. 2019. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use

- changes. *Nat Commun*, 10: 5749
- Zeng S B, Liu Z H, Goldscheider N, Frank S, Goeppert N, Kaufmann G, Zeng C, Zeng Q R, Sun H L. 2021. Comparisons on the effects of temperature, runoff, and landcover on carbonate weathering in different karst catchments: Insights into the future global carbon cycle. *Hydrogeol J*, 29: 331–345
- Zeng S B, Liu Z H, Groves C. 2022. Large-scale CO<sub>2</sub> removal by enhanced carbonate weathering from changes in land-use practices. *Earth-Sci Rev*, 225: 103915
- Zhang C, Pei J G, Xie Y Q, Cao J H, Wang L L. 2008. Impact of land use covers upon karst processes in a typical Fengcong depression system of Nongla, Guangxi, China. *Environ Geol*, 55: 1621–1626
- Zhang L K, Qin X Q, Liu P Y, Huang Q B, Lan F, Ji H B. 2014. Estimation of carbon sink fluxes in the Pearl River basin (China) based on a water-rock-gas-organism interaction model. *Environ Earth Sci*, 74: 945–952
- Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Wang J F, Li Q, Wu L H, Chen F, Li C J, Deng Y H, Yang Y J, Xi H P. 2021. Global CO<sub>2</sub> consumption by silicate rock chemical weathering: Its past and future. *Earths Future*, 9: e2020EF001938
- Zhang T, Li J H, Pu J B, Yuan D X. 2019. Carbon dioxide exchanges and their controlling factors in Guijiang River, SW China. *J Hydrol*, 578: 124073
- Zomer R J, Bossio D A, Sommer R, Verchot L V. 2017. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Sci Rep*, 7: 15554

(责任编辑: 胡修棉)