



## 评述

# 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径

冯晓娟<sup>1,2,3\*</sup>, 戴国华<sup>1,2</sup>, 刘婷<sup>1,2</sup>, 贾娟<sup>1,2</sup>, 朱二雄<sup>1,2</sup>, 刘程竹<sup>1,2,3</sup>, 赵云鹏<sup>1,2,3</sup>, 王亚<sup>1,2,3</sup>, 康恩泽<sup>1,2,3</sup>, 肖军<sup>4</sup>, 李薇<sup>4\*</sup>

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2. 国家植物园, 北京 100093;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

4. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

\* 通讯作者, E-mail: [xfeng@ibcas.ac.cn](mailto:xfeng@ibcas.ac.cn)(冯晓娟), [liwei@nsfc.gov.cn](mailto:liwei@nsfc.gov.cn)(李薇)

收稿日期: 2024-01-03; 收修改稿日期: 2024-05-18; 接受日期: 2024-06-05; 网络版发表日期: 2024-08-28

国家杰出青年科学基金项目(4205303)和国家自然科学基金项目(42242014)资助

**摘要** 在全球气候变暖的背景下, 土壤碳封存被《联合国气候变化框架公约》列为实现长期“碳中和”的关键途径之一。然而, 土壤碳封存是一个涉及植物、微生物、岩石矿物等核心要素共同参与的复杂生物地球化学过程, 其调控机理和提升途径尚不明确。基于此, 本文通过梳理国内外研究进展, 从植物输入、矿物保护、微生物转化以及岩石风化四个方面综述了土壤碳封存的关键过程与机制, 总结了提升土壤碳封存的主要途径, 并重点讨论和展望了生物地球化学研究方法和技术在探究土壤碳封存机制和提高土壤碳封存潜力方面发挥的作用, 以期从生物地球化学视角深入理解土壤碳封存这一基于自然的气候变化解决方案, 发挥地球科学基础研究的作用, 助力实现国家“双碳”目标。

**关键词** 碳中和, 植物输入, 微生物碳泵, 矿物保护, 岩石风化

## 1 引言

气候变暖是人类当前面临最严峻的挑战之一。工业革命以来, 人类活动排放大量二氧化碳(CO<sub>2</sub>), 成为气候变暖的主要诱因(IPCC, 2023)。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的年度报告显示, 2022年全球平均CO<sub>2</sub>浓度已达到417ppm(1ppm=1mg L<sup>-1</sup>)(NOAA, 2022), 比工业革命前增长50%。联合国政府间气候变

化专门委员会(IPCC)第6次评估报告指出, 未来20年(即2021年至2040年)全球升温预计达到1.5℃(IPCC, 2023)。因此, 采取有效措施减少温室气体排放、增加碳汇, 成为减缓气候变化的首要任务。

“碳中和”是指化石燃料使用及土地利用变化导致的碳排放量与陆海生态系统吸收及其他技术方式(碳捕集、利用与封存)封存的碳量之间达到平衡, 即CO<sub>2</sub>达到净零排放(方精云, 2021)。减排(减少向大气排放

中文引用格式: 冯晓娟, 戴国华, 刘婷, 贾娟, 朱二雄, 刘程竹, 赵云鹏, 王亚, 康恩泽, 肖军, 李薇. 2024. 从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径. 中国科学: 地球科学, 54(11): 3421–3432, doi: [10.1360/SSTe-2024-0003](https://doi.org/10.1360/SSTe-2024-0003)

英文引用格式: Feng X, Dai G, Liu T, Jia J, Zhu E, Liu C, Zhao Y, Wang Y, Kang E, Xiao J, Li W. 2024. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective. Science China Earth Sciences, 67(11): 3386–3396, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1359-9>

CO<sub>2</sub>)和增汇(增加对大气CO<sub>2</sub>的吸收)是实现“碳中和”的两条根本路径。目前,碳捕集、利用与封存技术的大规模应用存在较大困难,短期内不会成为碳封存的主要方式。陆地生态系统固碳,即利用植被-土壤系统进行碳封存,既是基于自然的气候变化解决方案,也是实现“碳中和”目标的有效途径之一。过去几十年,中国陆地生态系统碳汇(每年10~15亿吨CO<sub>2</sub>)部分抵消了人为活动导致的碳排放(丁仲礼和张涛, 2022),其提升潜力和实现途径备受关注。

土壤是陆地生态系统中最大的活跃碳库,其碳储量约为植被碳库的四倍、大气碳库的三倍(Lal等, 2021)。与植被碳库相对较短的储藏周期相比,土壤(有机)碳的平均驻留时间长达百年甚至万年,在缓解气候变暖中发挥着不可替代的作用。根据法国农业部的估算,如果全球1m深的土壤碳库储量增加千分之四,就可抵消当前全球CO<sub>2</sub>净排放量(扣除陆地和海洋的吸收量),使大气CO<sub>2</sub>浓度不再增加(即“千分之四”土壤增碳计划; Ministry of France, 2015)。由此可见,在其他碳汇策略或低碳技术还未能大规模应用的背景下,增加土壤碳汇是实现“碳中和”的重要途径。因此,土壤固碳增汇在国际碳汇领域广受关注。

然而,土壤碳封存是一个非常复杂的生态系统过程,受到植物、微生物、养分、水分、矿物等多种因素的共同调控。我们对土壤碳封存关键过程和调控机理的理解仍较为有限,土壤碳汇的潜力和提升途径尚不明确。基于以上背景,本文通过梳理国内外研究进展,系统介绍土壤碳封存的关键过程与机制,总结土壤碳封存的主要途径,并重点论述生物地球化学研究方法和技术在探究土壤碳封存机制以及提高土壤碳汇潜力方面发挥的作用,以期从生物地球化学视角更好地理解土壤碳封存的机制和潜在途径,并对相关未来研究方向提出几点建议。

## 2 土壤碳封存的关键过程与机制

植物通过光合作用将CO<sub>2</sub>转化为有机质,并以凋落物、根系分泌物等形式输入土壤,是土壤(有机)碳封存的源动力。但是,植物输入的有机碳并不能全部转化为土壤碳,土壤碳的积累还受到降解过程的调控。传统观念认为,容易被微生物利用的有机质(如溶解性的根系分泌物)易于分解为CO<sub>2</sub>,对土壤碳积累的贡献

较小。相比之下,以木质素为代表的植物结构性大分子,具有稳定的化学结构(化学抗性高),不易被微生物直接利用,并在凋落物分解过程中降解缓慢(Melillo等, 1982; Rubin, 2008)。因此,长期以来,木质素被看作是土壤有机碳积累的主要贡献者(图1; Rasse等, 2005),许多土壤碳库模型将其作为指征慢性(即降解缓慢的)碳库的重要参数(Schmidt等, 2011)。然而,随着分子生物地球化学技术的开发和使用,越来越多的证据表明木质素在矿质土壤中并不稳定(Feng等, 2008),其酚类单体的环境驻留时间(或周转时间)显著短于易被矿物保护的土壤碳组分(例如,来自植物的蜡质脂类; Jia等, 2023),说明以木质素为代表的植物大分子对土壤有机碳积累的贡献可能被高估。

随着土壤生物地球化学的发展,学界对土壤碳封存的理论认知发生了巨大转变,从早期“腐殖质”形成理论和以化学抗性为核心的研究(Melillo等, 1982; Rasse等, 2005; Rubin, 2008)转为强调微生物转化和矿物、团聚体保护等物理化学屏蔽机制对土壤有机碳封存的调控作用(图1; Cotrufo等, 2013; Liang等, 2017; Angst等, 2021)。例如,许多研究发现,土壤有机质分子组分的周转(降解)速率主要受土壤环境(而非其化学抗性)的调控(Schmidt等, 2011)。例如,在厌氧环境中,氧气限制可以通过降低微生物和胞外酶的活性而促进有机质的保存和积累,从而造就了陆地生态系统中有机碳密度最高的湿地和泥炭地(Limpens等, 2008)。土壤中的活性金属氧化物(如无定形态的铁铝氧化物等)和黏土矿物可通过吸附、共沉淀等方式和有机质形成交互作用,降低有机质的生物可及性(accessibility)和降解速率,从而对有机碳形成矿物保护作用,在土壤有机碳的长期封存中发挥关键作用(Chen等, 2014; Kleber等, 2015)。此外,植物根系、菌丝、矿物、有机质等胶连形成的土壤团聚体也可以通过限制氧气、水分、胞外酶等的渗透(扩散)而抑制有机质的降解,对土壤有机碳的保存起到重要的调控作用(Six和Paustian, 2014; Wagai等, 2020)。

研究还发现,尽管异养微生物是土壤有机质的分解者(Miltner等, 2012),但其细胞残体及胞外代谢物易与矿物紧密结合,从而通过矿物保护作用形成周转较慢的有机碳库(Sokol等, 2022),并在微生物群落快速的世代繁衍中不断积累,对土壤碳库(特别是慢性碳库)产生重要贡献(Kallenbach等, 2016)。这一过程被比

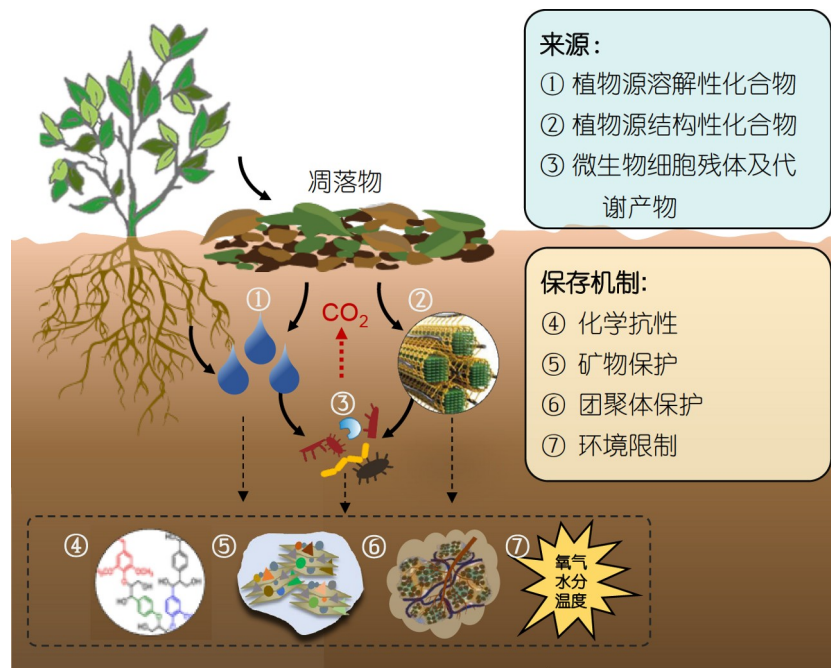


图1 土壤有机碳的来源与保存机制

喻为土壤“微生物碳泵”(Microbial Carbon Pump; Liang 等, 2017), 即微生物通过同化代谢将部分易降解有机碳转化为难降解有机碳(微生物残体)的过程。在微生物转化过程较为强烈的土壤中(如草地表层土壤), 微生物残体(而非木质素)甚至主导了土壤有机碳的长期积累(Ma等, 2018)。

上述过程调控土壤有机碳库(汇)的形成和稳定性, 而土壤矿物或岩石的化学风化则调控土壤无机碳汇。岩石风化固碳是指大气或土壤中的 $\text{CO}_2$ 与岩石发生化学反应, 形成碳酸盐矿物, 同时释放钙、镁、铁、钠、钾等离子的过程(Miller等, 2019; 姜禾禾等, 2023)。由于碳酸盐矿物可与碳酸反应生成 $\text{CO}_2$ , 通常认为陆地碳酸盐岩的风化过程主要在短时间(百年至千年)尺度上影响全球气候, 但在长时间(万年至亿年)尺度上并不能有效移除大气 $\text{CO}_2$ (Berner等, 1983; Li等, 2018)。近期也有研究提出, 碳酸盐岩风化形成的溶解性无机碳可以被水体中浮游藻类和沉水植物转化为有机碳, 从而埋藏在水体沉积物中, 形成有机碳汇(Liu等, 2018)。相比之下, 硅酸盐岩风化过程中, 每个硅酸盐分子可消耗0.5~1.0个 $\text{CO}_2$ 分子, 转变为碳酸盐。在碳酸盐被有效固存的前提下, 硅酸盐岩风化是地质时间尺度上大气 $\text{CO}_2$ 最重要的碳汇(Brady, 1991; Raza等,

2022), 维持着大气 $\text{CO}_2$ 浓度的相对稳定。值得一提的是, 硅酸盐岩风化释放的营养元素, 比如钾、钠等, 还可以通过促进植物生长而提升植被-土壤系统的有机碳汇, 实现短时间尺度上的碳增汇(Beerling等, 2020)。此外, 岩石(主要是沉积岩)中含有大量有机碳, 也称为化石有机碳。在全球尺度上, 化石有机碳风化向大气排放的 $\text{CO}_2$ 通量达每年40~100吨碳, 是地质时间尺度上的重要碳源(Hilton和West, 2020; Zondervan等, 2023)。考虑到化石有机碳释放对全球碳循环和气候变化的潜在影响, 减少沉积岩的侵蚀和暴露也能在一定程度上对碳封存有所贡献。因此, 在不同的时间尺度上, 生物固碳和岩石风化固碳均对土壤碳封存具有重要影响。

### 3 提升土壤碳封存的主要途径

针对土壤碳封存的调控机制, 我们可以从植物输入、(次生)矿物保护、微生物转化和(原生)岩石风化几个角度理解土壤碳增汇的主要(潜在)途径。

#### 3.1 增加植物输入

植物碳是土壤有机碳的原始来源, 增加其输入是提高土壤碳封存的重要途径之一(图2), 至少包括以下

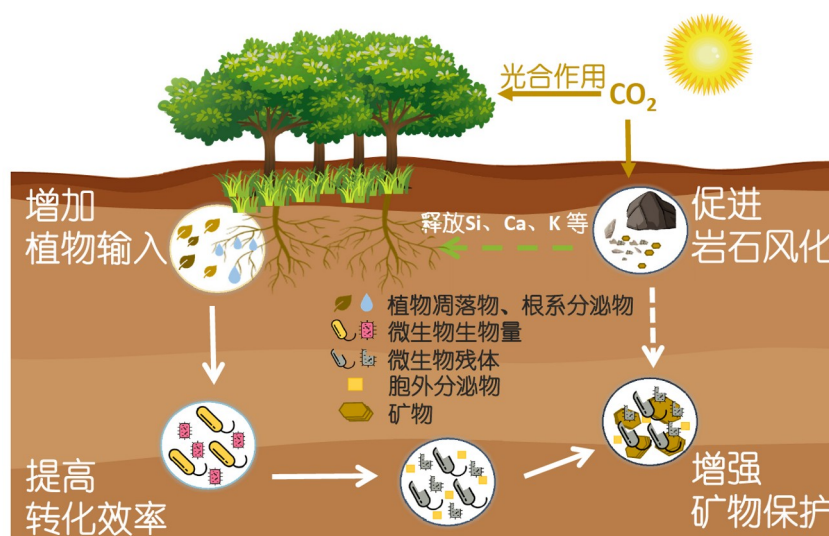


图2 提升土壤碳封存的四条主要途径(增加植物输入、提高微生物转化效率、增强矿物保护和促进岩石风化)

三个方面。第一, 通过恢复被破坏或受干扰的植被来提高植物碳输入, 进而增加土壤碳封存(Lange等, 2015)。与垦殖农田或退化草地相比, 未受干扰的森林、草地具有更高的土壤有机碳储量, 这一方面与植物输入(凋落物未被移除)有关, 另一方面也与土壤结构(未被翻耕、踩踏)有关(Korkanç, 2014)。因此, 植被修复有助于提高土壤碳封存。第二, 通过增加植物多样性促进土壤碳封存。研究表明, 土壤有机碳储量随植物多样性升高而增加(Lange等, 2015; Prommer等, 2020; Chen等, 2023)。这一方面得益于植物生产力和多样性的协同关系(Lange等, 2015); 另一方面, 有研究发现, 增加植物多样性可提高土壤微生物的碳利用效率(即将有机碳同化为微生物生物量的效率), 从而潜在提高土壤有机碳的形成效率(Lange等, 2015; Prommer等, 2020)。因此, 提高植物多样性有利于土壤碳累积(Lange等, 2015)。第三, 通过培育和种植深根植物, 增加根系碳输入。大量研究发现, 与地上凋落物相比, 植物根系输入的有机质(包括根系分泌物)具有更高的土壤碳转化效率, 对土壤有机碳的长期封存贡献更大(Rasse等, 2005; Sokol等, 2019; Villarino等, 2021)。特别是在有机碳和氧气含量较低、微生物较不活跃的深层土壤中, 增加植物根系碳输入具有较高的土壤碳封存潜力。因此, 选育深根植物、增加根系碳向土壤的输入是当前最具前景的土壤碳增汇策略之一(Schwander等, 2016; Busch和Miller, 2022)。世界多国科学家尝试利用

基因编辑技术培育具有深根系特征的高储碳植物, 将大气CO<sub>2</sub>通过光合作用和成土过程长期封存在土壤中, 实现土壤碳增汇。

需要指出的是, 增加植物输入并不一定总能提升土壤碳封存。新鲜有机碳输入可能提高微生物活性, 从而增加微生物对土壤本底有机碳的降解, 引起土壤激发效应(Kuzyakov等, 2000)。当激发效应大于新碳在土壤中的固存量时, 土壤碳储量便会降低。在微生物生长受到养分(如氮)限制的土壤中, 新碳输入容易引起微生物对土壤有机养分的挖掘(即增加土壤本底有机质的降解), 进而引起正激发效应(Zhou等, 2022)。在有机碳含量较高的土壤中, 激发效应的风险特别值得关注。因此, 植物碳输入对土壤碳库的影响需综合评估新碳在土壤中的转化和效率以及本底有机碳(老碳)的激发降解。

### 3.2 增强矿物保护

矿物保护是土壤有机碳的重要稳定机制之一(Kramer和Chadwick, 2018; Georgiou等, 2022; Sokol等, 2022)。研究表明, 土壤中与矿物结合有机碳的周转时间显著长于未被矿物保护的颗粒态有机碳(Jia等, 2023)。因此, 增强矿物与有机质的交互作用被认为是延长土壤有机碳驻留时间、实现土壤碳长期封存的有效途径。以下途径有助于提高矿物保护作用。第一, 添加活性矿物或可以形成桥键的离子(如钙), 增强有机

质与矿物的相互作用(Button等, 2022; Shabtai等, 2023). 已有研究表明, 钙离子、活性铁氧化物等可通过吸附、共沉淀、络合、包裹等物理-化学作用, 与有机质形成复合体, 降低有机碳的生物可利用性和降解速率(Torn等, 1997; Huang等, 2019; Barreto等, 2021). 此外, 钙添加可改变土壤微生物群落结构, 提高微生物活性及对凋落物的转化效率, 促进微生物代谢产物与矿物结合, 从而增加矿物结合有机碳的积累(Shabtai等, 2023). 在沙质土壤中添加黏土矿物也可显著提高土壤有机碳含量(Schapel等, 2019). 因此, 通过人为添加含钙、铁的土壤改良剂和黏土矿物可提高土壤碳封存.

第二, 土壤深翻, 即将有机碳含量高的表层土壤埋入土壤深处, 而将黏粉粒含量高、有机碳含量低的深层土壤置换到表层. 这一做法可以实现两个目的: 一方面, 将表层土壤深埋到氧气、水分含量较低的底层, 可降低土壤微生物活性, 减缓土壤有机碳分解; 另一方面, 底层土有机碳含量低, 矿物表面尚有大量吸附位点未被有机质占据, 其碳饱和度较低, 可迅速积累有机碳(Schiedung等, 2019, 2023). 例如, 德国和新西兰的研究表明, 与未深翻的对照土壤相比, 深翻可使土壤有机碳储量增加42%~70%(Alcántara等, 2017; Schiedung等, 2019). 目前该做法主要应用在农田中, 但在森林和草地中亦得到了验证(Alcántara等, 2017; Schiedung等, 2019).

此外, 作为一种具有高度芳香化结构的固体材料, 生物炭具有比表面积大、疏松多孔、含碳量高、难降解等特点(Wang等, 2015), 不但可以在土壤环境中长期稳定存在, 还具有较强的吸附、络合能力. 因此, 从某种程度上, 施加生物炭也可以对土壤有机质起到类似矿物保护的作用. 然而, 上述途径在实际应用中存在一定的局限性, 如在沙质土壤中添加铁铝氧化物和黏土矿物对碳封存增效显著, 但在风化程度较高的土壤中效果不明显(Button等, 2022), 且过量使用可能导致土壤重金属积累; 土壤深翻可能增加土壤侵蚀风险; 生物炭输入可能引起原有土壤有机碳的激发降解和植物养分限制. 因此, 需要综合考虑母质、地形、生物和土壤类型等多种因素选择适合的措施, 确保土壤健康和可持续利用.

值得一提的是, 传统观念认为, 相比于草地、森林等旱地土壤, 湿地土壤中矿物结合有机碳含量较低

(Sokol等, 2022), 因此不被关注. 但是, 近期的研究发现, 湿地的矿质土壤具有较高的活性(即无定形态)金属氧化物含量(Temmink等, 2022; Zhu等, 2023). 同时, 湿地频繁的氧化还原电势波动能促进金属氧化物的形成或活化, 增强其与有机碳的交互作用(Riedel等, 2012; Wang等, 2017; Liu等, 2023). 因此, 湿地也是矿物-有机质交互作用的热点区域. 湿地中一类旗舰物种-泥炭藓-还能够通过分泌酸性酚类代谢产物活化金属氧化物, 从而增强铁碳交互作用(Zhao等, 2021). Zhao等(2023)发现, 贵州独山为期20年的泥炭藓种植项目使土壤矿物结合有机碳增加了188%, 表明泥炭藓种植和泥炭藓湿地恢复可显著促进矿物结合有机碳的积累, 是一种潜在的基于自然的土壤碳增汇方案.

### 3.3 提高微生物转化效率

微生物既是有机质的降解者, 也是转化者, 能将部分易降解有机碳转化为微生物残体长期保存在土壤中. 土壤动物通过啃食凋落物或捕食微生物, 也可将有机碳“暂时”储存在体内. 但是, 土壤动物死亡后仍会被微生物分解, 最终以微生物残体的形式回归土壤(Kou等, 2023). 因此, 土壤微生物是驱动易降解有机碳向慢性土壤碳库转化的引擎. 然而, 微生物残体的积累伴随着呼吸消耗. 微生物(残体)转化效率, 即微生物将有机碳转化为残体稳定保存在土壤中的效率, 是决定土壤碳转化或封存效率的关键参数(Feng和Wang, 2023). 提高微生物转化效率是提升土壤碳封存的另一个重要途径(图2).

微生物转化效率同时受到微生物活体碳(生物量)合成及残体保存的影响. 有机质(底物)质量、养分可利用性、土壤矿物保护等因素通过影响上述过程而调控微生物转化效率(Feng和Wang, 2023). 作为驱动“微生物碳泵”运转的燃料, 有机质(底物)可通过其可降解性或质量影响微生物代谢效率和转化效率. 基于“微生物效率-基质稳定”理论(Cotrufo等, 2013), 微生物利用低质量底物(即具有较高的碳/氮比或木质素/氮比)需要消耗更多能量用于胞外酶合成, 其碳利用效率较低; 而高质量的底物有利于微生物同化作用和生物量合成(Manzoni等, 2012; Öquist等, 2017), 最终有利于残体的积累. 因此, 提高底物质量可提升微生物转化效率. 土壤养分(特别是氮)的可利用性也可调控微生物活体碳的产生和残体碳的保存, 进而影响微生物转化效率. 当

受养分限制时, 微生物消耗更多能量用于合成胞外酶, 以从土壤有机质中获取所需养分, 进而降低其碳利用效率(Mganga等, 2022). 此外, 微生物残体是重要的氮源; 当微生物受到氮限制时, 微生物残体可被优先降解或重复利用(Cui等, 2020), 进而降低微生物残体的保存以及微生物转化效率. 因此, 优化土壤养分供给可以提高微生物转化效率, 对土壤碳封存具有重要影响. 此外, 土壤矿物也会影响微生物转化效率: 一方面, 微生物倾向于在矿物表面定殖和生长(Glaser等, 2006); 另一方面, 微生物残体易于受到矿物保护而长期保存(Ma等, 2018). 但是, 不同类型的矿物具有不同影响. 例如, 比表面积较大的黏土矿物(如蒙脱石)有利于提高微生物转化效率(Cai等, 2022). 钙添加可促进在矿物表面附着的细菌繁殖并增强有机质-矿物交互作用, 进而提高微生物转化效率, 增加矿物结合有机碳的积累(Shabtai等, 2023). 而水铁矿则可能通过介导自由基生成而降低微生物生物量合成和微生物转化效率(Cai等, 2022). 因此, 添加合适的矿物也可以显著提高微生物转化效率.

### 3.4 促进岩石风化

Seifritz在1990年便提出, 人工促进硅酸盐岩风化(即增强岩石风化)是增加地质碳封存的重要途径(Seifritz, 1990; 李万伦等, 2022). 人为促进硅酸盐岩风化固碳可通过多种方式开展, 包括: (1) 工厂尺度: 通过微生物、化工等手段加速矿粉与CO<sub>2</sub>的矿化反应; (2) 原位封存: 将CO<sub>2</sub>注入富含硅酸盐的地质体或地下含水层中, 促进硅酸盐矿物的碳酸盐化过程(姜禾禾等, 2023); (3) 异位封存: 将碾磨破碎的硅酸盐岩添加到土壤中, 增加其与水和CO<sub>2</sub>的反应界面, 加快硅酸盐矿物的风化过程(Hartmann等, 2013).

“异位封存”的效果受到岩石类型、岩石粒径、水热条件、酸碱度等影响(Snæbjörnsdóttir等, 2020), 而硅酸盐岩风化速率可通过以下四个途径提高. 首先, 岩石溶解速率控制了风化速率(Oelkers等, 2018). 玄武岩、橄榄石、辉长岩等超基性-基性岩石富含钙、镁和铁矿物, 具有较高的溶解速率, 选择这类岩石添加到土壤中更易取得快速风化固碳的效果(Hartmann等, 2013). 其次, 矿物粒径越小, 比表面积越大, 越有利于矿物表面与CO<sub>2</sub>进行反应(Kelland等, 2020). 因此, 在权衡岩石粉碎成本和固碳效益的基础上, 将岩石粉碎至更小粒

级后添加到土壤中, 能够显著提升风化固碳效率(高伟斌等, 2023). 再次, 硅酸盐岩风化反应的前提是CO<sub>2</sub>分子溶于水溶液(Weil和Brady, 2017), 有研究发现风化速率随土壤干旱度增加而呈断崖式下降(Calabrese和Porporato, 2020). 也有研究表明, 在水分充足的情况下, 温度是控制岩石溶解速度的重要因素(Li等, 2016). 因此, 在温暖湿润区向土壤中添加硅酸盐岩粉末更有利于岩石风化固碳. 最后, 土壤酸碱度对岩石风化速率有较大影响(Kantzas等, 2022). 一方面, 溶液低pH值有利于硅酸盐矿物溶解; 比如, 在土壤pH为4时, 玄武岩的溶解速率是pH为6时的17倍. 另一方面, 高pH值有利于碳酸盐矿物生成和沉淀(Orumwense和Forssberg, 1992). 因此, 异位硅酸盐岩风化固碳效果需结合土壤酸碱性综合考量.

加速岩石风化也可以增加土壤有机碳汇. 一方面, 硅酸盐岩风化可以释放一定量的微量营养元素, 如钾和磷等, 有利于植物生长(Beerling等, 2020); 另一方面, 岩石风化可以平衡土壤pH, 改善土壤孔隙率, 增加植物对虫害和干旱的抵抗力, 促进植物生长, 进而增强植物碳输入(Goll等, 2021). 值得关注的是, 岩石风化也会产生次生矿物(Matichenkov和Bocharnikova, 2001), 这些次生矿物可通过矿物保护作用增强对土壤有机碳的封存. 我国基性硅酸盐岩储量丰富且分布广泛, 因此, 通过向土壤施加硅酸盐岩粉进行CO<sub>2</sub>封存的技术在我国也受到了广泛关注.

相对于硅酸盐岩风化在长时间尺度上的固碳优势, 碳酸盐岩风化主要在百年至千年尺度上对大气CO<sub>2</sub>起到调节作用. 比如, 有学者发现在我国非岩溶地区播撒碳酸盐岩粉末可以每年增加3859万吨碳汇(曾思博和刘再华, 2022). 若能够将碳酸盐岩风化与生物泵效应耦联, 可促进风化形成的溶解性无机碳转化为有机碳, 有利于提升有机碳汇(Chen等, 2017). 虽然目前还无法评估碳酸盐岩粉施加导致的长期有机碳汇, 但碳酸盐岩的快速溶解动力学特性(熊练等, 2022)表明碳酸盐岩粉施加可能具有较大的固碳潜力(Hamilton等, 2007; Zeng等, 2022).

## 4 研究展望

如前所述, 土壤碳封存是一个复杂的生物地球化学转化过程, 涉及植物、微生物、岩石矿物等核心要

素共同参与. 土壤碳循环研究的学科交叉特征十分显著, 涉及地球科学、生命科学、化学科学等多个学科方向. 以“土壤有机碳”为项目名称或关键词粗略统计, 过去10年(2014~2023年)国家自然科学基金资助相关项目约700项, 其中2023年超过120项. 这些研究分别从土壤生态学、土壤有机碳形成和转化的微生物学机制、基于大数据的土壤有机碳模型模拟等角度, 解析了土壤碳对全球气候变化的响应规律, 加强了我国土壤碳循环研究. 本文从生物地球化学研究的视角, 提出几个有助于深入解析土壤碳封存机制、评估土壤碳汇潜力的研究方向. 同时, 加强对生物地球化学循环的理解, 量化生物对岩矿的形成和风化、碳循环等的影响, 也是《时域地球——美国国家科学基金会地球科学十年愿景(2020~2030)》提出的地球科学未来12个优先科学问题之一. 因此, 加强土壤固碳的生物地球化学研究, 既能发挥地球科学基础研究作用, 助力“双碳”目标实现, 又可聚焦学科国际前沿, 具有双重重要意义.

#### 4.1 完善土壤微生物残体及其转化效率的评估方法

土壤“微生物碳泵”在矿物结合有机碳的形成、积累及土壤有机碳的长期封存中发挥着关键作用. 然而, 目前我们对微生物碳泵效率及其调控因素的了解非常有限. 利用稳定同位素标记和生物标志物的单体 $^{13}\text{C}$ 分析技术, 向土壤添加 $^{13}\text{C}$ 标记底物(凋落物或有机化合物), 通过监测底物被微生物利用转化为残体(如氨基糖)与呼吸产物( $\text{CO}_2$ )的相对比例, 可以定量评估微生物残体(氨基糖)的积累效率(Jia等, 2017), 从某种程度上反映土壤“微生物碳泵”效率. 然而, 作为微生物细胞壁的组成成分, 氨基糖并不能追踪微生物胞外分泌物(如胞外聚合物和胞外酶等), 用其指示微生物残体忽略了胞外代谢产物的贡献. 因此, 未来亟须开发其他方法或生物标志物, 实现对微生物残体(包括细胞残体和胞外代谢产物)的准确追踪, 以精确评估微生物源有机碳对土壤碳库的贡献以及“微生物碳泵”的效率. 例如, 与氨基糖不同, 氨基酸既具有微生物胞内来源, 也在微生物胞外分泌物中大量存在(Amelung等, 2006; Sollins等, 2006), 具有指示微生物代谢产物的潜力. 但是, 与氨基糖相比, 土壤氨基酸的研究相对较少, 其指示潜力有待挖掘.

#### 4.2 探讨矿物结合有机碳的形成机制和封存潜力

矿物结合有机碳是土壤长期碳汇的重要贡献者, 近期研究指出全球土壤矿物仍具有较大的碳封存潜力(Georgiou等, 2022). 然而, 受到分析技术的制约, 矿物结合有机碳的来源、组成、稳定性以及与矿物的结合方式尚不明确, 限制了学界对其封存潜力的精准评估. 生物地球化学方法在明确矿物结合有机碳的来源和结合方式等方面具有独特的优势. 例如, 利用传统的矿物溶解法(如焦磷酸钠、草酸、连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠提取法等), 可以去除矿物对有机质的保护(屏蔽)作用, 然后结合生物标志物分析方法, 可以对矿物结合的有机质的组成和来源进行精细区分(Liu等, 2023). 此外, 矿物和有机质的微观表征技术可以为有机碳与矿物的结合位点和结合方式提供直观的研究手段. 例如, 扫描透射电子显微镜(STEM)可以观察矿物表面风化的痕迹; 纳米二次离子质谱(NanoSIMS)可以表征碳、氧、硅以及金属元素的分布特征, 结合电子能量损失谱分析, 可以揭示有机碳与金属元素的结合方式(Possinger等, 2020; Li等, 2021). 因此, 借助生物地球化学的研究方法, 可以探究矿物结合有机碳的来源、分子组成和结合方式, 有助于明确矿物结合有机碳形成的热点区和封存潜力.

#### 4.3 明晰岩石风化固碳的策略和可行性

农田岩粉施肥的人工加强风化技术是碳封存的重要战略路径之一, 国外已经开展了大量的理论、室内和田间试验研究. 但是, 该技术距离广泛应用还面临定量核算、工艺优化和综合生态环境效益评估等多方面的关键问题, 这些问题的解决是人工加强风化碳封存技术真正进入碳交易市场的前提. 针对这些问题, 可能的解决方案包括: (1) 由于加强风化碳封存技术的驱动背景是国际碳交易市场和国际碳减排核算, 我国需要开发具有独立知识产权、国际组织认可、可独立核算且快速廉价的岩石风化碳封存评估技术标准. 特别是, 实验室获得的硅酸盐和碳酸盐矿物溶解动力学参数并不适合野外复杂条件, 风化速率在野外与实验室往往存在数量级差别(White和Brantley, 2003). 此外, 常规原位观测不仅要面临应用场景的时空非均一性和监测成本高的问题, 也存在巨大挑战. 比如, 碱度测量受水文、次生碳酸盐沉淀的影响. (2) 发展矿物界

面溶解动力学理论, 并与田间试验进行对比, 寻找适合我国典型农业模式下的最佳人工加强风化工艺. 已有研究主要针对旱作农业模式, 而我国水热条件最适合的地区为稻作农业区. 后者的相关研究还比较薄弱, 需要针对性地开展试验, 从岩石类型、农作模式、施加工艺等方面进行优化, 从而实现最大的CO<sub>2</sub>封存效益. (3) 从金属迁移、土壤肥力和土壤有机质等角度综合评估人工加强风化的生态效益. 某些风化速率较高的硅酸盐岩含有较高浓度的铬、镍等重金属(Haque等, 2020), 岩石风化可能将这些有害重金属释放到土壤中, 影响植物生长和粮食安全, 并可能通过食物链影响人体健康. 为了防止土壤重金属污染, 有必要先评估不同类型硅酸盐岩的有害元素的释放和生态风险. 同时, 监测土壤肥力、土壤有机质积累的变化, 从而计算碳酸盐岩和硅酸盐岩粉播撒固碳的综合生态效益.

综上, 有必要在我国开展典型稻作和旱作农业模式下人工施加岩粉的综合田间试验; 进行水化学、同位素示踪、微观界面特征、岩石试片等CO<sub>2</sub>封存定量技术的综合对比研究(Gou等, 2024); 开展不同粒度、施加节奏、施加深度等不同工艺CO<sub>2</sub>封存效益的对比试验; 进行试验田人工加强风化综合生态效益的对比调查, 从而建立人工加强风化的CO<sub>2</sub>吸收标准化评估体系; 初步遴选出最适合人工加强风化的田地与岩石类型, 建立标准工艺方案; 评估人工加强风化的综合生态环境效益, 为国家是否开展人工加强岩石风化进行碳封存提供可靠的决策咨询.

## 5 结论

土壤碳封存是应对气候变化、实现长期“碳中和”的关键途径之一. 然而, 由于过程复杂, 土壤碳封存的调控机理和提升途径目前尚不明确. 本文通过梳理国内外研究进展, 从植物输入、矿物保护、微生物转化以及岩石风化四个方面综述了土壤碳封存的关键过程与机制, 并总结提出了提升土壤碳封存的四条主要途径, 包括增加植物输入、增强矿物保护、提高微生物转化效率和促进岩石风化. 最后从生物地球化学研究的视角, 提出利用同位素、生物标志物、矿物和有机质的微观表征等技术深入解析土壤碳封存机制、评估土壤碳汇潜力的研究方向, 包括完善土壤微生物残体及其转化效率的评估方法、探讨矿物结合有机碳的形

成机制和封存潜力、明晰硅酸盐岩风化固碳的策略和可行性等. 在森林、草地、湿地、农田等不同生态系统中, 土壤碳封存的关键过程、限制因子和提升潜力存在明显差异, 未来应加强对不同生态系统土壤碳封存机制及途径的差异化研究, 以便因地制宜地制定提升土壤碳封存潜力的技术方案, 为实现国家“碳中和”目标提供科技助力.

**致谢** 本文源于2023年5月在中国科学院植物研究所召开的“基于地球化学学科的土壤固碳机制研究”战略研讨会上与会专家的交流与讨论. 衷心感谢中国科学院地球环境研究所汪进研究员、中国科学院生态环境研究中心罗磊研究员、南京农业大学吴迪副教授、长安大学苟龙飞副教授对本文相关内容的有益指导.

## 参考文献

- 丁仲礼, 张涛. 2022. 碳中和: 逻辑体系与技术需求. 北京: 科学出版社. 265–278
- 方精云. 2021. 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 45: 1173–1176
- 高伟斌, 陈旸, 王浩贤. 2023. 增强硅酸盐岩风化——“碳中和”之新路径. 地球科学进展, 38: 137–150
- 姜禾禾, 王佳敏, 万博. 2023. 国际岩矿地球化学固碳技术研究进展. 第四纪研究, 43: 494–508
- 李万伦, 陈晶, 贾凌霄, 马冰, 陈扬, 孙君一. 2022. 玄武岩CO<sub>2</sub>地质封存研究进展. 地质论评, 68: 648–657
- 熊练, 白晓永, 李阳兵, 赵翠薇, 罗光杰, 吴路华, 陈飞, 李朝君, 冉晨, 张思蕊. 2022. 高分辨率长时间序列的中国岩石化学风化碳汇数据及其变化趋势. 矿物岩石地球化学通报, 41: 956–964
- 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
- Alcántara V, Don A, Vesterdal L, Well R, Nieder R. 2017. Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils—Implications for carbon stocks. *Sci Rep*, 7: 5511
- Amelung W, Zhang X, Flach K W. 2006. Amino acids in grassland soils: Climatic effects on concentrations and chirality. *Geoderma*, 130: 207–217
- Angst G, Mueller K E, Nierop K G J, Simpson M J. 2021. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biol Biochem*, 156: 108189
- Barreto M S C, Elzinga E J, Ramlogan M, Rouff A A, Alleoni L R F. 2021. Calcium enhances adsorption and thermal stability of organic compounds on soil minerals. *Chem Geol*, 559: 119804
- Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, Wade P, Eufrazio R M,

- Renforth P, Sarkar B, Andrews M G, James R H, Pearce C R, Mercure J F, Pollitt H, Holden P B, Edwards N R, Khanna M, Koh L, Quegan S, Pidgeon N F, Janssens I A, Hansen J, Banwart S A. 2020. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583: 242–248
- Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am J Sci*, 283: 641–683
- Brady P V. 1991. The effect of silicate weathering on global temperature and atmospheric CO<sub>2</sub>. *J Geophys Res*, 96: 18101–18106
- Busch W, Miller C. 2022. The greenest revolution—Harnessing the power of plants to help combat climate change. *Biochemist*, 44: 13–18
- Button E S, Pett-Ridge J, Murphy D V, Kuzyakov Y, Chadwick D R, Jones D L. 2022. Deep-C storage: Biological, chemical and physical strategies to enhance carbon stocks in agricultural subsoils. *Soil Biol Biochem*, 170: 108697
- Cai Y, Ma T, Wang Y, Jia J, Jia Y, Liang C, Feng X. 2022. Assessing the accumulation efficiency of various microbial carbon components in soils of different minerals. *Geoderma*, 407: 115562
- Calabrese S, Porporato A. 2020. Wetness controls on global chemical weathering. *Environ Res Commun*, 2: 085005
- Chen B, Yang R, Liu Z, Sun H, Yan H, Zeng Q, Zeng S, Zeng C, Zhao M. 2017. Coupled control of land uses and aquatic biological processes on the diurnal hydrochemical variations in the five ponds at the Shawan Karst Test Site, China: Implications for the carbonate weathering-related carbon sink. *Chem Geol*, 456: 58–71
- Chen C, Dynes J J, Wang J, Sparks D L. 2014. Properties of Fe-organic matter associations via coprecipitation versus adsorption. *Environ Sci Technol*, 48: 13751–13759
- Chen X, Taylor A R, Reich P B, Hisano M, Chen H Y H, Chang S X. 2023. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. *Nature*, 618: 94–101
- Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, Deneff K, Paul E. 2013. The microbial efficiency-matrix stabilization (mems) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob Change Biol*, 19: 988–995
- Cui J, Zhu Z, Xu X, Liu S, Jones D L, Kuzyakov Y, Shibistova O, Wu J, Ge T. 2020. Carbon and nitrogen recycling from microbial necromass to cope with C:N stoichiometric imbalance by priming. *Soil Biol Biochem*, 142: 107720
- Feng X, Wang S. 2023. Plant influences on soil microbial carbon pump efficiency. *Glob Change Biol*, 29: 3854–3856
- Feng X, Simpson A J, Wilson K P, Dudley Williams D, Simpson M J. 2008. Increased cuticular carbon sequestration and lignin oxidation in response to soil warming. *Nat Geosci*, 1: 836–839
- Georgiou K, Jackson R B, Vinduškova O, Abramoff R Z, Ahlström A, Feng W, Harden J W, Pellegrini A F A, Polley H W, Soong J L, Riley W J, Torn M S. 2022. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nat Commun*, 13: 3797
- Glaser B, Millar N, Blum H. 2006. Sequestration and turnover of bacterial- and fungal-derived carbon in a temperate grassland soil under long-term elevated atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Glob Change Biol*, 12: 1521–1531
- Goll D S, Ciais P, Amann T, Buermann W, Chang J, 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
- Gou L F, Huang F, Yang S, Wei G, Zhao Z Q, Jin Z. 2024. Cation isotopes trace chemical weathering. *Fundamental Res*, doi: 10.1016/j.fmre.2023.12.005
- Hamilton S K, Kurzman A L, Arango C, Jin L, Robertson G P. 2007. Evidence for carbon sequestration by agricultural liming. *Glob Biogeochem Cycle*, 21: GB2021
- Haque F, Chiang Y W, Santos R M. 2020. Risk assessment of Ni, Cr, and Si release from alkaline minerals during enhanced weathering. *Open Agr*, 5: 166–175
- Hartmann J, West A J, Renforth P, Köhler P, De La Rocha C L, Wolf-Gladrow D A, Dürr H H, Scheffran J. 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Rev Geophys*, 51: 113–149
- Hilton R G, West A J. 2020. Mountains, erosion and the carbon cycle. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 284–299
- Huang X, Jia Z, Guo J, Li T, Sun D, Meng H, Yu G, He X, Ran W, Zhang S, Hong J, Shen Q. 2019. Ten-year long-term organic fertilization enhances carbon sequestration and calcium-mediated stabilization of aggregate-associated organic carbon in a reclaimed Cambisol. *Geoderma*, 355: 113880
- IPCC. 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Core Writing Team, Lee H, Romero J, eds. Switzerland. 35–115
- Jia J, Feng X, He J S, He H, Lin L, Liu Z. 2017. Comparing microbial carbon sequestration and priming in the subsoil versus topsoil of a Qinghai-Tibetan alpine grassland. *Soil Biol Biochem*, 104: 141–151
- Jia J, Liu Z, Haghipour N, Wacker L, Zhang H, Sierra C A, Ma T, Wang Y, Chen L, Luo A, Wang Z, He J S, Zhao M, Eglinton T I, Feng X. 2023. Molecular <sup>14</sup>C evidence for contrasting turnover and

- temperature sensitivity of soil organic matter components. *Ecol Lett*, 26: 778–788
- Kallenbach C M, Frey S D, Grandy A S. 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat Commun*, 7: 13630
- Kantzas E P, Val Martin M, Lomas M R, Eufrazio R M, Renforth P, Lewis A L, Taylor L L, Mecure J F, Pollitt H, Vercoulen P V, Vakilifard N, Holden P B, Edwards N R, Koh L, Pidgeon N F, Banwart S A, Beerling D J. 2022. Substantial carbon drawdown potential from enhanced rock weathering in the United Kingdom. *Nat Geosci*, 15: 382–389
- Kelland M E, Wade P W, Lewis A L, Taylor L L, Sarkar B, Andrews M G, Lomas M R, Cotton T E A, Kemp S J, James R H, Pearce C R, Hartley S E, Hodson M E, Leake J R, Banwart S A, Beerling D J. 2020. Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C<sub>4</sub> cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Glob Change Biol*, 26: 3658–3676
- Kleber M, Eusterhues K, Keiluweit M, Mikutta C, Mikutta R, Nico P S. 2015. Mineral-organic associations: Formation, properties, and relevance in soil environments. *Adv Agron*, 130: 1–140
- Korkanç S Y. 2014. Effects of afforestation on soil organic carbon and other soil properties. *Catena*, 123: 62–69
- Kou X, Morriën E, Tian Y, Zhang X, Lu C, Xie H, Liang W, Li Q, Liang C. 2023. Exogenous carbon turnover within the soil food web strengthens soil carbon sequestration through microbial necromass accumulation. *Glob Change Biol*, 29: 4069–4080
- Kramer M G, Chadwick O A. 2018. Climate-driven thresholds in reactive mineral retention of soil carbon at the global scale. *Nat Clim Change*, 8: 1104–1108
- Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biol Biochem*, 32: 1485–1498
- Lal R, Monger C, Nave L, Smith P. 2021. The role of soil in regulation of climate. *Phil Trans R Soc B*, 376: 20210084
- Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, Bessler H, Engels C, Griffiths R I, Mellado-Vázquez P G, Malik A A, Roy J, Scheu S, Steinbeiss S, Thomson B C, Trumbore S E, Gleixner G. 2015. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nat Commun*, 6: 6707
- Li G, Hartmann J, Derry L A, West A J, You C F, Long X, Zhan T, Li L, Li G, Qiu W, Li T, Liu L, Chen Y, Ji J, Zhao L, Chen J. 2016. Temperature dependence of basalt weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 443: 59–69
- Li H, Wang S, Bai X, Luo W, Tang H, Cao Y, Wu L, Chen F, Li Q, Zeng C, Wang M. 2018. Spatiotemporal distribution and national measurement of the global carbonate carbon sink. *Sci Total Environ*, 643: 157–170
- Li H, Santos F, Butler K, Herndon E. 2021. A critical review on the multiple roles of manganese in stabilizing and destabilizing soil organic matter. *Environ Sci Technol*, 55: 12136–12152
- Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nat Microbiol*, 2: 17105
- Limpens J, Berendse F, Blodau C, Canadell J G, Freeman C, Holden J, Roulet N, Rydin H, Schaepman-Strub G. 2008. Peatlands and the carbon cycle: From local processes to global implications—A synthesis. *Biogeosciences*, 5: 1475–1491
- Liu C, Wang S, Zhao Y, Wang Y, Wang Y, Zhu E, Jia J, Liu Z, He J S, Feng X. 2023. Enhanced microbial contribution to mineral-associated organic carbon accrual in drained wetlands: Beyond direct lignin-iron interactions. *Soil Biol Biochem*, 185: 109152
- Liu Z, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D, Zeng S. 2018. Large and active CO<sub>2</sub> uptake by coupled carbonate weathering. *Earth-Sci Rev*, 182: 42–49
- Ma T, Zhu S, Wang Z, Chen D, Dai G, Feng B, Su X, Hu H, Li K, Han W, Liang C, Bai Y, Feng X. 2018. Divergent accumulation of microbial necromass and plant lignin components in grassland soils. *Nat Commun*, 9: 3480
- Manzoni S, Taylor P, Richter A, Porporato A, Ågren G I. 2012. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytol*, 196: 79–91
- Matichenkov V, Bocharnikova E. 2001. *Studies in Plant Science*. Amsterdam: Elsevier. 9–219
- Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 63: 621–626
- Mganga K Z, Sietiö O M, Meyer N, Poeplau C, Adamczyk S, Biasi C, Kalu S, Räsänen M, Ambus P, Fritze H, Pellikka P K E, Karhu K. 2022. Microbial carbon use efficiency along an altitudinal gradient. *Soil Biol Biochem*, 173: 108799
- Miller Q R S, Schaeff H T, Kaszuba J P, Gadikota G, McGrail B P, Rosso K M. 2019. Quantitative review of olivine carbonation kinetics: Reactivity trends, mechanistic insights, and research frontiers. *Environ Sci Technol Lett*, 6: 431–442
- Miltner A, Bombach P, Schmidt-Brücken B, Kästner M. 2012. SOM genesis: Microbial biomass as a significant source. *Biogeochemistry*, 111: 41–55
- Ministry of France. 2015. Understand the “4 per 1000” initiative [EB/OL]. 2015 [2016-05-20]. <http://4p1000.org/understand>
- NOAA (National Oceanic and atmospheric Administration US Department of Commerce). 2022. Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022. <https://www.noaa.gov/topic-tags/greenhouse-gases>
- Oelkers E H, Declercq J, Saldi G D, Gislason S R, Schott J. 2018.

- Olivine dissolution rates: A critical review. *Chem Geol*, 500: 1–19
- Öquist M G, Erhagen B, Haei M, Sparrman T, Ilstedt U, Schleucher J, Nilsson M B. 2017. The effect of temperature and substrate quality on the carbon use efficiency of saprotrophic decomposition. *Plant Soil*, 414: 113–125
- Orumwense O A, Forssberg E. 1992. Superfine and ultrafine grinding: A literature survey. *Miner Processing Extractive Metallurgy Rev*, 11: 107–127
- Possinger A R, Zachman M J, Enders A, Levin B D A, Muller D A, Kourkoutis L F, Lehmann J. 2020. Organo-organic and organo-mineral interfaces in soil at the nanometer scale. *Nat Commun*, 11: 6103
- Prommer J, Walker T W N, Wanek W, Braun J, Zezula D, Hu Y, Hofhansl F, Richter A. 2020. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. *Glob Change Biol*, 26: 669–681
- Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil*, 269: 341–356
- Raza A, Glatz G, Gholami R, Mahmoud M, Alafnan S. 2022. Carbon mineralization and geological storage of CO<sub>2</sub> in basalt: Mechanisms and technical challenges. *Earth-Sci Rev*, 229: 104036
- Riedel T, Biester H, Dittmar T. 2012. Molecular fractionation of dissolved organic matter with metal salts. *Environ Sci Technol*, 46: 4419–4426
- Rubin E M. 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature*, 454: 841–845
- Schapel A, Marschner P, Churchman J. 2019. Influence of clay clod size and number for organic carbon distribution in sandy soil with clay addition. *Geoderma*, 335: 123–132
- Schiedung M, Tregurtha C S, Beare M H, Thomas S M, Don A. 2019. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands. *Glob Change Biol*, 25: 2296–2309
- Schiedung M, Don A, Beare M H, Abiven S. 2023. Soil carbon losses due to priming moderated by adaptation and legacy effects. *Nat Geosci*, 16: 909–914
- Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49–56
- Schwander T, Schada von Borzyskowski L, Burgener S, Cortina N S, Erb T J. 2016. A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science*, 354: 900–904
- Seifritz W. 1990. CO<sub>2</sub> disposal by means of silicates. *Nature*, 345: 486
- Shabtai I A, Wilhelm R C, Schweizer S A, Höschel C, Buckley D H, Lehmann J. 2023. Calcium promotes persistent soil organic matter by altering microbial transformation of plant litter. *Nat Commun*, 14: 6609
- Six J, Paustian K. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biol Biochem*, 68: A4–A9
- Snæbjörnsdóttir S Ó, Sigfússon B, Marieni C, Goldberg D, Gislason S R, Oelkers E H. 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 90–102
- Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. 2019. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Glob Change Biol*, 25: 12–24
- Sokol N W, Whalen E D, Jilling A, Kallenbach C, Pett-Ridge J, Georgiou K. 2022. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. *Funct Ecol*, 36: 1411–1429
- Sollins P, Swanston C, Kleber M, Filley T, Kramer M, Crow S, Caldwell B A, Lajtha K, Bowden R. 2006. Organic C and N stabilization in a forest soil: Evidence from sequential density fractionation. *Soil Biol Biochem*, 38: 3313–3324
- Temmink R J M, Lamers L P M, Angelini C, Bouma T J, Fritz C, van de Koppel J, Lexmond R, Rietkerk M, Silliman B R, Joosten H, van der Heide T. 2022. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots. *Science*, 376: eabn1479
- Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A, Vitousek P M, Hendricks D M. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, 389: 170–173
- Villarino S H, Pinto P, Jackson R B, Piñeiro G. 2021. Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Sci Adv*, 7: eabd3176
- Wagai R, Kajiura M, Asano M. 2020. Iron and aluminum association with microbially processed organic matter via meso-density aggregate formation across soils: Organo-metallic glue hypothesis. *Soil*, 6: 597–627
- Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. 2015. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8: 512–523
- Wang Y, Wang H, He J S, Feng X. 2017. Iron-mediated soil carbon response to water-table decline in an alpine wetland. *Nat Commun*, 8: 15972
- Weil R R, Brady N C. 2017. The Nature and Properties of Soils, 15th ed. London: Pearson Press. 10–166
- White A F, Brantley S L. 2003. The effect of time on the weathering of silicate minerals: Why do weathering rates differ in the laboratory and field? *Chem Geol*, 202: 479–506

- Zeng S, Liu Z, 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
- Zhao Y, Liu C, Wang S, Wang Y, Liu X, Luo W, Feng X. 2021. “Triple locks” on soil organic carbon exerted by sphagnum acid in wetlands. [Geochim Cosmochim Acta](#), 315: 24–37
- Zhao Y, Liu C, Li X, Ma L, Zhai G, Feng X. 2023. *Sphagnum* increases soil’s sequestration capacity of mineral-associated organic carbon via activating metal oxides. [Nat Commun](#), 14: 5052
- Zhou J, Guillaume T, Wen Y, Blagodatskaya E, Shahbaz M, Zeng Z, Peixoto L, Zang H, Kuzyakov Y. 2022. Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. [Soil Biol Biochem](#), 175: 108850
- Zhu E, Liu Z, Wang S, Wang Y, Liu T, Feng X. 2023. Organic carbon and lignin protection by metal oxides versus silicate clay: Comparative study based on wetland and upland soils. [J Geophys Res-Biogeosci](#), 128: e2023JG007474
- Zondervan J R, Hilton R G, Dellinger M, Clubb F J, Roylands T, Ogrič M. 2023. Rock organic carbon oxidation CO<sub>2</sub> release offsets silicate weathering sink. [Nature](#), 623: 329–333

(责任编辑: 丁金枝)