

引文格式: 冯伟辉, 文波龙, 孙晓新, 等. 土壤有机碳的稳定机制及其影响因子[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(2): 175-188. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202411034

土壤有机碳的稳定机制及其影响因子*

冯伟辉^{1,2,3}, 文波龙^{2,3**}, 孙晓新^{1,4**}, 罗那那^{2,3}, 杨静¹

1. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 黑土地保护与利用全国重点实验室, 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;
3. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;
4. 黑龙江三江平原湿地生态系统定位观测研究站, 黑龙江 抚远 156500

摘要:【目的】为全球气候变化背景下土壤碳封存研究和实践提供理论支撑。【方法】综述土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)的稳定机制(分子结构抗性、团聚体物理保护、矿质化学保护、土壤微生物碳泵)及其影响因子(土壤理化性质、土地利用方式、大气CO₂浓度、火烧)。【结果】木质素和黑碳分子结构复杂, 具备较强的抗分解能力, 但在环境适宜时仍然能被降解; 团聚体对SOC的包裹和对微生物的限制降低了SOC被分解的概率, 矿物吸附所形成的矿物结合态有机碳可在土壤中稳定千年; 丛枝菌根真菌向土壤中输送了大量植物源碳, 经微生物转化而成的稳定性碳在SOC中的占比最高可达62%。上述3种机制共同作用提高了SOC的稳定性。SOC相关因子通过改变植被组成和生产力、微生物群落结构和活性等途径影响其输入与输出, 适宜的环境能促进SOC积累, 但生态系统的复杂性使得SOC在不同样地对同一因子的响应结果可能不同, 如高浓度CO₂对SOC的影响在不同研究中表现为促进、抑制或无显著作用。【结论】土壤中的稳定机制延长了SOC的周转时间, 有利于SOC积累, 在探究各因子对SOC的影响时不能以偏概全, 要结合生态系统类型进行综合分析。

关键词: 土壤有机碳; 稳定性; 团聚体; 黏土矿物; 微生物

中图分类号: S153.621 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X(2025)02-0175-14

Stability Mechanism and Influencing Factors of Soil Organic Carbon

FENG Weihui^{1,2,3}, WEN Bolong^{2,3**}, SUN Xiaoxin^{1,4**}, LUO Nana^{2,3}, YANG Jing¹

1. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 4. Heilongjiang Sanjiang Plain Wetland Ecosystem Observation and Research Station, Fuyuan 156500, China)

收稿日期: 2024-11-28

修回日期: 2025-03-05

网络首发日期: 2025-05-27

*基金项目: 吉林省重大科技专项(20230303005SF, 20240203004NC); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA28110400); 国家重点研发计划项目(2022YFD1500502)。

作者简介: 冯伟辉(1998—), 男, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要从事湿地碳循环研究。

E-mail: 1393625953@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 文波龙(1982—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 主要从事湿地环境科学与生态工程、农业资源与环境研究。E-mail: wenbolong@iga.ac.cn; 孙晓新(1980—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 主要从事退化生态系统恢复、湿地生物地球化学循环等研究。E-mail: sunxiaoxin@nefu.edu.cn

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20250526.1555.001>



Abstract: [Purpose] To provide theoretical support for the research and practice of soil carbon sequestration under the background of global climate change. [Methods] The stability mechanisms (such as molecular structural resistance, aggregate physical protection, mineral chemical protection, and soil microbial carbon pump) of soil organic carbon (SOC) and its influencing factors (such as soil physicochemical properties, land use pattern, atmospheric CO₂ concentration, and burning) were reviewed. [Results] Lignin and black carbon have complex molecular structure and strong anti-decomposition ability, but they can be degraded when the environment is suitable; the packaging of SOC by aggregates and the restriction on microorganisms reduce the decomposition probability of SOC, and the mineral-bound organic carbon formed by mineral adsorption can be stable in soil for thousands of years; arbuscular mycorrhizal fungi transport a large amount of plant-derived carbon to the soil, and the proportion of stable carbon transformed by microorganisms is up to 62% in SOC. The three mechanisms work together to improve the stability of SOC. SOC-related factors affect SOC input and output by changing vegetation composition and productivity, microbial community structure and activity, and suitable environment can promote SOC accumulation. However, the complexity of the ecosystem makes the response of SOC to the same factor in different sites may be different. For example, the effect of high CO₂ concentration on SOC is shown as promotion, inhibition, or no significant effect in different studies. [Conclusion] The stability mechanism in soil prolongs the turnover time of SOC, and it is beneficial to the accumulation of SOC. Therefore, when exploring the impact of various factors on SOC, it is not possible to generalize, and a comprehensive analysis should be conducted in combination with the type of ecosystem.

Keywords: soil organic carbon; stability; aggregates; clay minerals; microorganism

土壤作为陆地生态系统最大的碳汇载体, 每年可通过呼吸作用向大气中排放碳 68 Pg, 远高于化石燃料的碳排放量(每年 5 Pg), 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量约为 1 550 Pg, 超过大气碳库(750 Pg)与植被碳库(560 Pg)的总和^[1-2], 其微小变化都会显著影响大气 CO₂ 浓度, 对全球生态环境产生巨大影响。研究表明: 每年土壤表层(0~30 cm) SOC 储量增加 4%, 就可抵消人为排放的碳^[3], 因此, 在 2015 年召开的巴黎气候大会上, “千分之四全球土壤增碳计划”应运而生。而 SOC 储量不仅取决于植物源和微生物源碳的输入, 还取决于其稳定性, 即 SOC 在一定条件下抵抗外界因素干扰和恢复原有水平的能力^[4]。

对于 SOC 稳定机制的研究, 目前已取得一些进展。MARSCHNER 等^[5]认为: 稳定的 SOC 由难分解的有机分子组成, 因其具有复杂的芳香环结构, 在土壤碳循环周转过程中被选择性地保留下来。LORENZ 等^[6]认为土壤中的保护机制提高了 SOC 稳定性, 包括: (1) 物理保护, 即团聚体多种闭蓄机制的保护作用; (2) 化学保护, 即 SOC 与矿物、金属离子之间的相互作用。这些保护机制在延长 SOC 周转时间方面发挥了重要作用,

特别是化学保护, 可使 SOC 在土壤中稳定几个世纪甚至数千年^[7]。微生物作为土壤碳循环的重要驱动者, 对 SOC 的调控和稳定作用也逐渐被挖掘, 形成了新的稳定机制——土壤微生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)概念体系^[8], 即微生物通过同化作用将 SOC 转化为自身生物量, 在生长过程中积累大量细胞残体储存在土壤中, 增加 SOC 固存。本研究对 SOC 的稳定机制及其影响因子进行综述, 阐述其研究进展, 以期为全球气候变化背景下的土壤碳封存研究和实践提供理论支撑。

1 SOC 的稳定机制

1.1 SOC 分子结构抗性

SOC 分子结构抗性取决于分子结构, 如芳香性碳含量高的 SOC 较难降解, 分子结构在一定程度上能够预测 SOC 在土壤中的分解速率^[9]。本研究选取土壤中较难分解的木质素和黑碳来阐述 SOC 的生化难分解性。

1.1.1 木质素

木质素是一种不规则的、由具有胶体性质的支链苯丙烷单元组成的三维高分子芳香性聚合

物^[10], 由于存在复杂芳香环结构及不可水解的碳碳键和醚键, 且降解过程需要专性氧化还原酶参与^[11], 而土壤中仅有少量微生物能分泌这种酶, 因此, 木质素的降解速率非常缓慢。木质素属于酚类聚合物, 其碱解后产生香兰基酚 (vanillyl phenols, V)、丁香基酚 (syringyl phenols, S)、肉桂基酚 (cinnamyl phenols, C) 和苯酰基酚 (benzoyl phenols, B) 4 大类特征单体, 其中, V、S 和 C 可作为地上生物的标识物, 表征植物来源的 SOC^[12]; B 可来自非木质素源, 故不将其作为木质素标识物^[13]。S 和 C 类单体周转相对较快, V 类单体较为稳定, 且 V 和 S 单体中的醛易被氧化成酸, 因此, 随着微生物的分解, 土壤中 S/V 和 C/V 的值会逐渐降低, 酸醛比逐渐增加^[12]。

木质素的降解不能为微生物提供所需的碳源和能量, 因此, 在降解过程中需要其他可代谢化合物 (如碳水化合物等) 的协同作用, 这在一定程度上延长了其在土壤中的保留时间^[14-15]。木质素虽然具有复杂的分子结构, 但土壤微生物在上万年的演变过程中进化出了较强的分解能力^[16]。然而, 微生物更倾向于选择活性有机质作为碳源和能量 (如地电杆菌倾向于利用肽、碳水化合物等简单分子, 经糖酵解和三羧酸循环获得能量), 若活性有机质无法满足微生物的需求, 木质素同样会被降解^[17]。放线菌、变形菌、厚壁菌等细菌可通过芳香醚裂解、联苯代谢、阿魏酸代谢等多种途径分解木质素^[18], 20% 的木质素碳能被细菌完全矿化^[19]。真菌在木质素的降解过程中也发挥着重要作用, 在其分泌的过氧化物酶、酚氧化酶、漆酶等催化作用下, 木质素结构开始降解, 依次发生侧链氧化、去甲基化、芳香环开裂等^[20]。

1.1.2 黑碳

黑碳是生物质和化石燃料不完全燃烧或岩石风化的产物^[21], 广泛存在于土壤和沉积物中^[22], 平均约占 SOC 的 40%^[23]。黑碳具有高度浓缩的稠环芳香结构^[24], 较难降解, 故能在土壤中保留千年。黑碳最初被认为是不能降解的, 但随着研究的深入, 许多证据表明黑碳在一定条件下能被降解, 只是降解过程缓慢^[25]。如: 在物理降解和垂直方向迁移的作用下, 热带稀树草原表层土壤中的黑碳可在 50 年内快速流失^[26]; 在火烧频发的生态系统中, 黑碳可因化学降解而流失^[27]。微

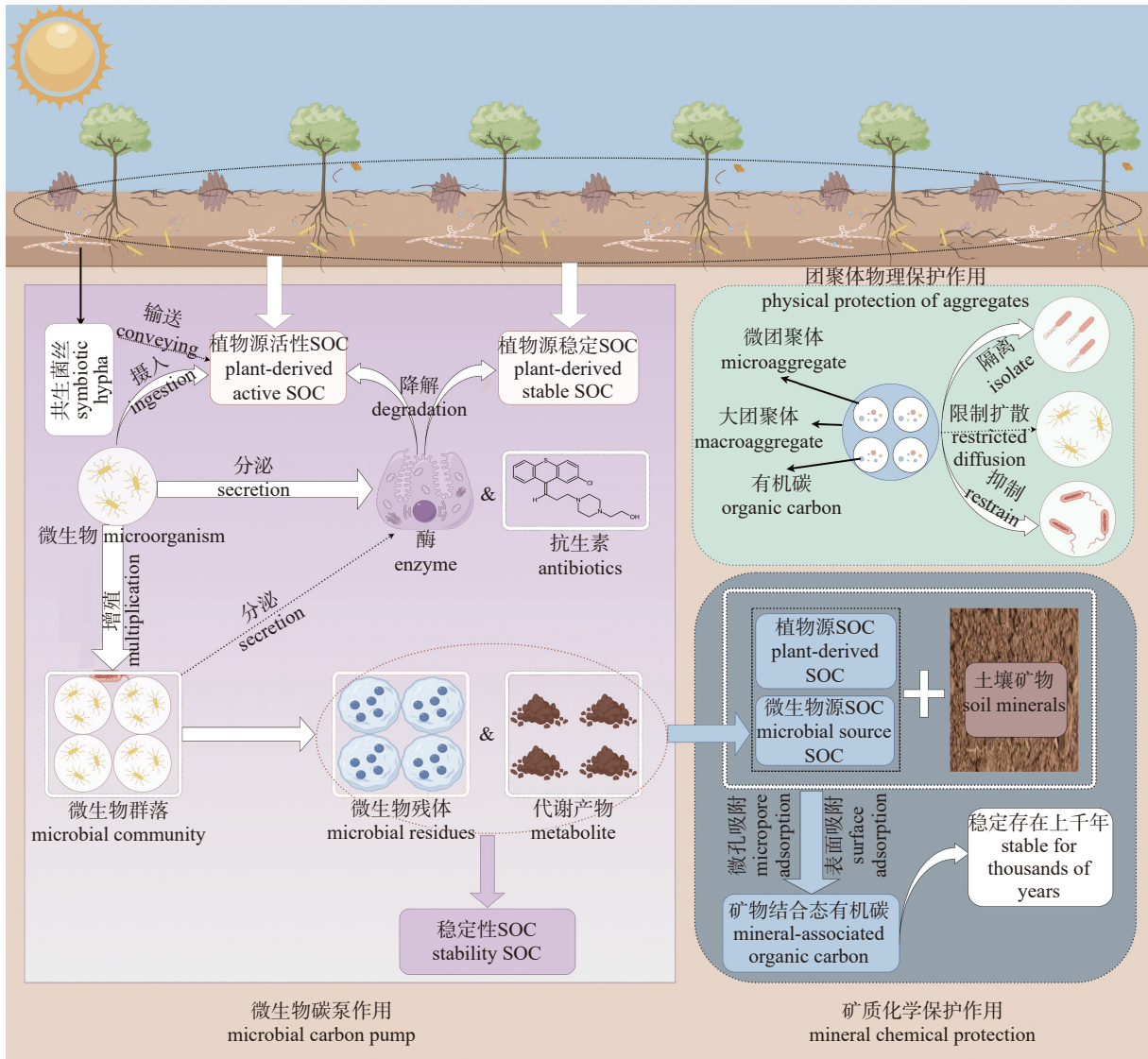
生物在黑碳的降解中也发挥着重要作用。HAMER 等^[28]在黑碳与沙的混合培养中发现: 添加葡萄糖组的矿化率为 1.2%, 高于对照组的 0.8%, 葡萄糖的添加激发了微生物活性, 促进了黑碳降解。

综上所述, 木质素和黑碳虽然都具有复杂的芳香环结构, 但当外界环境适宜时都能降解。单体碳同位素分析表明: 一些分子结构复杂的 SOC (如木质素) 在土壤中的周转时间相对较短^[5], 而某些活性 SOC (如糖类) 却可以在土壤中固持数十年^[29], 可见, 在解释 SOC 的稳定机制方面, 分子结构抗性有一定的局限性^[30]。文永莉^[31]的研究表明: SOC 稳定性并不只取决于分子结构, 还与铁铝氧化物、黏土矿物等通过表面相互作用所形成的有机无机复合体的降解难度密切相关。此外, 团聚体物理保护、MCP 等对提高 SOC 稳定性也发挥着重要作用。

1.2 团聚体物理保护作用

土壤团聚体的形成是生物因子 (如微生物) 和环境因子 (如有机质含量、土壤粒径) 共同作用的结果, 其与微生物密切相关。一方面, 团聚体是微生物重要的栖息地, 超过 90% 的细菌生活在大团聚体中, 微生物定居的面积不到团聚体总面积的 1%^[32]; 另一方面, 微生物在团聚体形成过程中发挥着重要作用^[33], 但它对微团聚体和大团聚体的作用机制不同。微团聚体的形成主要依靠细菌分泌的胶结物质, 此外, 细菌还会分解有机物形成有机无机产物, 与土壤颗粒结合形成微团聚体; 而大团聚体是由微团聚体彼此之间结合而成, 该过程中微生物主要通过电荷静电引力、代谢产物的黏结作用以及菌丝菌根的缠绕作用发挥功能^[33]。

团聚体可通过多种保护机制提高 SOC 的稳定性 (图 1)。首先, 它能够包裹 SOC, 通过空间上的物理隔离, 避免酶和微生物与 SOC 直接接触, 降低 SOC 被分解的概率; 其次, 团聚体内微生物和酶的扩散能力受到限制, 抑制了微生物的资源可利用性; 最后, 在毫米级的团聚体内, 氧气浓度存在明显梯度, 使得微生物具有较低的分解速率^[34]。研究表明: 大团聚体对 SOC 的保护作用相对较弱, 微团聚体对 SOC 的保护作用相对较强^[35], 这主要是胶结剂不同所致。大团聚体中多为易分解且瞬变的有机胶结剂 (如多糖类物质),



注：图通过 Figdraw 绘制；下同。

Note: The figure was drawn by Figdraw; the same as below.

图 1 土壤有机碳 (SOC) 稳定机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil organic carbon (SOC) stabilization mechanism

稳定周期为数周或数月；而微团聚体中则多为持久性较强且不易分解的有机无机复合体 (如腐殖质)，稳定性为数十年^[36]。团聚体内孔隙的大小也会影响 SOC 的分解。微团聚体内孔隙更小，当孔隙小于 3 μm 时，微生物便不能进入团聚体内部，避免了与底物接触，从而减少 SOC 分解^[37]。团聚体的破坏会显著促进 SOC 分解，降低 SOC 的稳定性。BARRETO 等^[38]研究表明：森林土壤中 >8.00 mm、>2.00~8.00 mm 和 >0.25~2.00 mm 的团聚体被破坏后，SOC 的矿化速率显著增加，分别是相应未破坏团聚体的 878%、300% 和 345%。因此，良好的团聚体能够储存更多的 SOC，更有

利于实现碳封存。

1.3 矿质化学保护作用

SOC 与土壤矿物质 (即粉粒和黏粒) 的结合能有效提高其稳定性，结合方式主要包括表面吸附和微孔吸附 (图 1)，其中，表面吸附主要通过范德华力、氢键、共价键、络合作用和阳离子桥 5 种方式实现^[16]。土壤矿物中较低的氧气浓度，以及矿物与有机质经螯合作用所形成的有机无机复合体均会显著抑制土壤中的化学反应速率^[39]，减少 SOC 矿化。土壤矿物还可通过吸附、遮挡、聚集、氧化还原反应和聚合等过程将活性 SOC 转化为更稳定的形式，吸附、遮挡和聚集也可通过降低

SOC 有效性, 形成体积过大而无法被微生物摄取的碳^[40]。

土壤矿物巨大的比表面积和较多的电荷含量使其具有较强的吸附能力^[41], 如氧化铁、钙、铝、镁盐可与有机质通过配位交换或离子键形成矿物结合态有机碳, 提高 SOC 稳定性。研究表明: 钙键结合态有机碳因活性较高而稳定性较弱, 而铁铝键结合态有机碳因活性较弱而稳定性较高^[42]。土壤铁、铝矿物在 SOC 稳定积累过程中发挥着“捕获”SOC 并形成“锈汇”的作用, 是影响 SOC 在土壤中长期固持的关键因素^[43], 作为土壤中的活跃成分, 它可以供给土壤正电荷, 并作为胶结物质, 有效地使黏粒胶结在一起, 加强对 SOC 的保护^[44]。另外, 铁、铝矿物在土壤中存在多种赋存形态, 弱结晶的水铁矿、结晶度极高的针铁矿和三水铝石, 都能通过分子相互作用提高 SOC 稳定性^[45]。

1.4 微生物碳泵 (MCP) 概念体系

传统观点认为: 微生物在土壤碳循环中扮演着分解者的角色, 它可以通过异化作用分解 SOC, 释放 CO₂, 不利于 SOC 积累; 但随着研究方法和测试手段的进步, 学者们发现: 微生物还可将活性 SOC 转化为稳定的 SOC, 以促进 SOC 积累, 因此, 微生物在土壤碳循环中的作用是双向的 (图 1)。SOC 输入途径分为两类, 一类是植物源碳, 主要为枯枝落叶、植被根系及根系分泌物; 另一类是微生物源碳, 主要为微生物残体、活体微生物及代谢产物。SOC 输出途径则为植物根系、土壤动物和微生物的呼吸作用及含碳矿物质的化学氧化过程。作为碳输入与输出的纽带, 微生物在植物源碳周转过程中发挥着重要的调控作用。一方面, 微生物会将其作为能量来源, 以分泌胞外酶等形式分解获能来维持自身生命活动 (体外修饰途径); 另一方面, 微生物也会将其作为碳源, 摄取小分子有机质后, 经同化作用将其转为自身生物量, 在不断生长、繁殖和死亡的迭代过程中以微生物残体碳 (氨基糖) 和代谢产物 (胞壁质、几丁质) 的形式埋藏在土壤碳库中 (体内周转途径), 增加 SOC 固存, 即土壤 MCP。相比于植物源碳, 经微生物同化作用所形成的残体碳对稳定性 SOC 的贡献更高^[46]。SIMPSON 等^[47]利用核磁共振技术发现微生物残体碳对 SOC 的贡献超过 50%。但在不同的生态系统类型中, 微生物

残体碳在 SOC 中的占比存在一定差异。WANG 等^[48]采用 Meta 方法分析全球数据发现: 在 0~20 cm 土层中, 微生物残体碳在农田、草地和森林 SOC 中的占比分别为 51%、47% 和 35%。总体而言, 微生物残体碳在 SOC 中的占比介于 33%~62% 之间, 远高于活体微生物生物量碳的占比 (1%~3%)^[49]。

近年来, 一些学者将研究重点放在与植物相关的真菌上, 探索其在 SOC 周转中的作用。研究表明: 真菌占优势的微生物群落能够促进 SOC 积累和稳定性提高^[50], 且真菌可以将植物光合固碳的 60%~70% 转移到土壤中^[51]。丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 作为与植物关系密切的微生物之一, 能够向土壤中输送植物源碳, 可与陆地上 70% 的植物形成互利共生体^[52], 并在该共生体系中帮助植物吸收土壤中的水分和养分, 增强植物抗逆性, 促进植物光合作用, 提高植物生物量, 从而促进碳在植物中的积累; 同样地, 植物也会提供一定量的养分供其生长发育。在与 AMF 共生的植物中, 地上部分碳储量约为 2.41×10^8 t, 是外生菌根植物的 2.4 倍, 非菌根植物的 8.3 倍, 欧石南菌根植物的 34.0 倍^[53]。AMF 还拥有错综复杂的菌丝网络, 可将植物光合作用固定的碳输送到根际和非根际土壤, 是植物源碳向土壤转移的重要途径。AMF 在 SOC 稳定性方面也发挥着重要的调控作用: 菌丝分泌物和菌丝残体分子结构复杂, 且易被矿物吸附形成矿物结合态有机碳; 活体菌丝通过缠绕、联结等作用, 使周围分散的土壤颗粒聚集在一起形成大团聚体, 增强了对 SOC 的保护作用; 输入土壤的菌丝残体和分泌物可引起激发效应^[54]。菌丝残体和分泌物一方面可直接形成稳定性 SOC, 另一方面也可作为其他微生物的碳源和能量, 促进土壤原有 SOC 的矿化。AMF 的菌丝和孢子还能分泌球囊霉素, 其结构相对稳定, 碳含量占土壤全碳的 4%~5%^[55], 且具有良好的疏水性和热稳定性, 难以分解, 从而提高 SOC 的固存。球囊霉素还可作为黏合剂, 促进土壤团聚体的形成, 提高 SOC 的稳定性。

2 影响土壤有机碳稳定性的环境因子

2.1 土壤理化性质

土壤理化性质对 SOC 的影响机制见图 2, 主

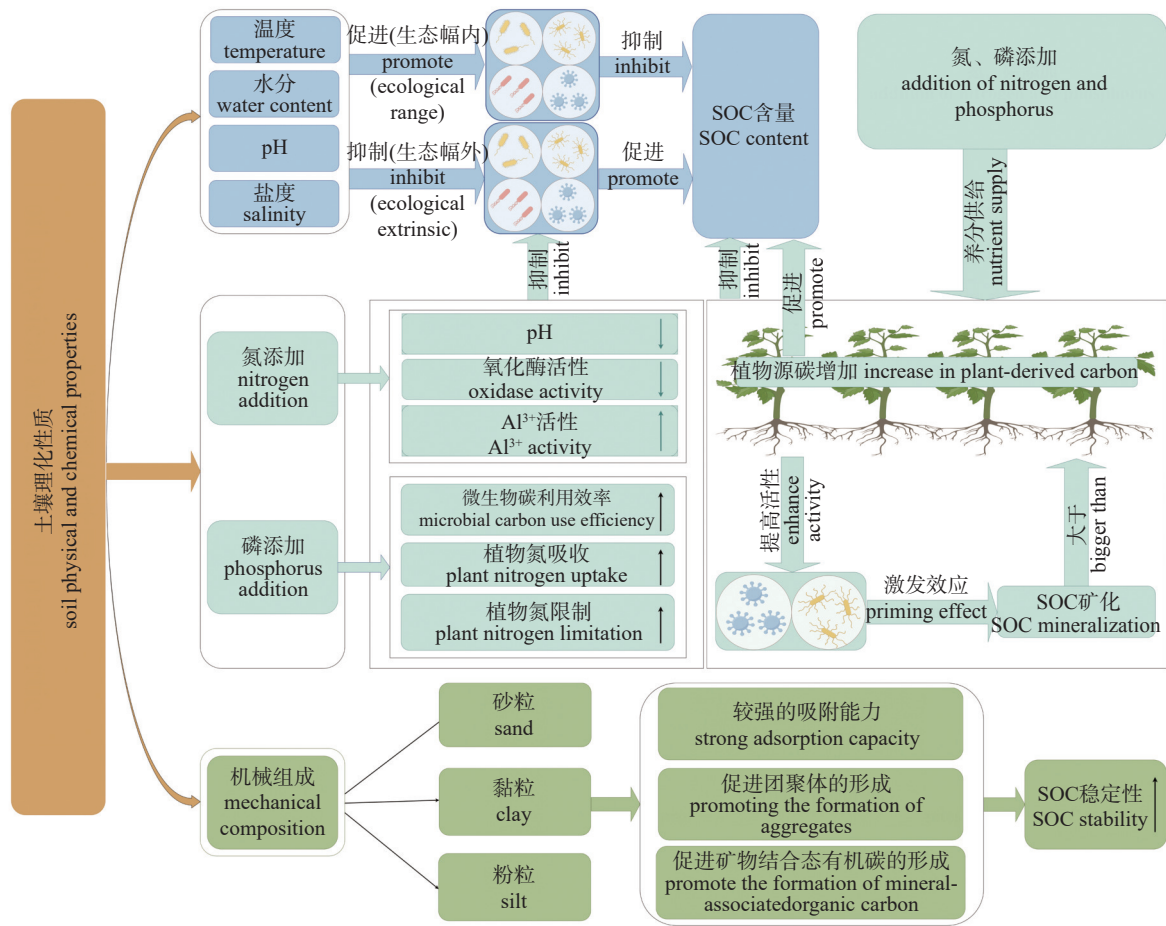


图 2 土壤理化性质影响 SOC 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil physical and chemical properties affecting SOC

要影响因子包括温度、水分、pH 值、盐度、土壤机械组成和营养元素。

2.1.1 温度

温度作为重要的生态因子，对土壤生物化学循环过程具有重要影响。一般认为，温度越高，SOC 矿化速率越快，但经过一段时间后，由于活性 SOC、水分、氮过量和微生物的热适应性，土壤呼吸对温度的敏感性越来越低^[56]。杨钙仁等^[57]研究表明：温度每升高 5 ℃，泥炭沼泽、腐殖质沼泽和沼泽化草甸沉积物的 SOC 矿化率分别增加 3.1%、3.3% 和 1.6%，且在较低温度下，3 类湿地的 SOC 矿化速率在培养期基本处于稳定状态；而在较高温度下，前期 SOC 矿化速率明显高于后期。杨继松等^[58]研究也得出了类似结论，即培养初期矿化速率较高，后期逐渐降低，且温度升高促进了 SOC 矿化。楚楚玮等^[59]研究表明：深层 SOC 含量与温度显著负相关，这同样说明温度升高加

剧了 SOC 矿化。温度还会通过改变微生物群落结构、酶活性等影响 SOC 分解。刘芳^[60]的室内增温实验表明：增温后，几丁质酶活性的改变是影响 SOC 分解最重要的因子。此外，温度变化所引起的土壤冻融过程也会促进团聚体周转，并对微生物群落结构产生影响，从而影响 SOC 分解^[61]。

2.1.2 水分

水分也是影响 SOC 的重要环境因子，过干和过湿均不利于微生物发育，只有在水分适宜时，才能激发其活性，促进 SOC 分解^[62]。不同气候状态下降雨所产生的影响不同，干旱地区的降水会激发微生物活性，促进 SOC 分解；而湿润地区的降水会抑制土壤呼吸或对其无明显影响^[63]。降雨时间分布不均匀所导致的土壤干湿交替对 SOC 也有重要影响。干湿交替使得土壤孔隙内的空气被压缩，造成团聚体裂解，里面包裹的 SOC 裸露出来，以至于被微生物降解^[64]。此外，干旱

状态下溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的扩散受到限制, 微生物获得的碳源和能量有限, 活性降低, 部分微生物也因干旱胁迫而死亡, 从而减缓 SOC 分解; 但当土壤复湿后, 会迅速激发微生物活性, 消耗大量有机质^[65]。由于长期的淹水覆盖, 湿地的土壤通气条件较差, 微生物活性较低, 植物残体分解非常缓慢, 所以土壤中含有大量有机质, 湿地作为重要碳汇, 碳储量约为 7.7×10^{10} t^[66]。FENNER 等^[67]研究认为: 土壤中的酚类物质可通过限制微生物活性从而阻止 SOC 分解, 而湿地长期的高水位所形成的厌氧环境抑制了酚氧化酶活性, 提升了土壤中酚类物质的浓度, 从而促进 SOC 积累, 即“酶栓效应”。此外, 地下水位升高, 容重增大, 土温和氧化还原电位降低, 也会限制土壤中有机质的降解, 导致土壤 CO₂ 通量下降^[68]。RYAN 等^[69]研究也表明: 水位上升会抑制植物根系呼吸和土壤微生物活性, 有利于增加碳储量。

2.1.3 pH 值

pH 值也是影响 SOC 的重要因子, 它可以通过影响植被对养分的吸收、土壤微生物活性以及阳离子的凝聚和离子交换量来间接影响 SOC 含量^[70-71]。不同植被对 pH 值的耐受范围不同, 只有在合适区间内植被才具备正常生理活性, 发挥出较大生产力, 促进 SOC 积累。当土壤 pH 值大于 8.5 或小于 5.5 时, 微生物活性受到抑制, 如在酸性土壤中, 微生物种类以真菌为主, 有利于 SOC 积累^[72]。董洪芳等^[73]研究发现: 黄河口滨岸潮滩湿地的 pH 值与 SOC 含量呈负相关, 王春光^[74]和常帅等^[75]的研究也得出一致的结论。pH 值升高也会导致土壤溶液中的负电荷上升, 使土壤溶解度增加, 进而加剧 SOC 分解^[76]。

2.1.4 盐度

盐度也是影响 SOC 的重要因子, 它可通过影响微生物群落的数量、结构、丰度和活性对 SOC 产生影响。土壤中高浓度的盐分会抑制微生物群落数量和活性, 如细菌需改变细胞膜化学组成并分泌糖类、氨基酸等渗透调节物质, 以调节体内渗透压、适应外界环境, 避免盐分胁迫, 进而促进 SOC 积累^[77-78]。胡敏杰等^[79]研究表明: 土壤盐度越大, SOC 含量越高, 两者呈线性正相关。王纯等^[80]研究表明: DOC 和易氧化有机碳含量及其分配比例随着盐度的增加而增加, 而微生物

量碳含量和微生物熵随着盐度的增加而降低。但李苏青等^[81]研究表明: 盐度过高会降低 SOC 含量, 而适量的盐分能够促进 SOC 积累。MORRISSEY 等^[82]研究表明: 在一定盐度范围内, 盐分升高可增强碳降解胞外酶的活性, 这表明在含盐量较低的生态系统中提高盐度能促进 SOC 分解。但过高的盐离子浓度也会通过负向渗透势、离子毒性等途径影响微生物功能和繁殖, 甚至造成细胞裂解死亡, 导致 SOC 分解减少^[83]。此外, 从对植物影响的角度来说, 盐分可通过改变土壤渗透势和基质势影响植物的生长和初级生产力, 部分植物受盐碱胁迫而生产力低下甚至凋亡, 光合作用固定的碳有限, 向土壤中输送的植物源碳减少, 从而影响 SOC 的固存和空间分布格局, 如: 长江口崇明东滩湿地 3 种主要盐沼植物群落的总生物量表现为互花米草群落>芦苇群落>海三棱藨草群落的变化规律^[84]。

2.1.5 机械组成

土壤机械组成也是影响 SOC 的重要因子。根据土壤粒径大小, 可将土壤颗粒分为砂粒、粉粒、黏粒。其中, 黏粒含量越高, 土壤颗粒对 SOC 的吸附能力越强, 团聚体和矿物的保护作用也就越强; 而砂粒含量越高, 吸附作用越小, 保护作用也越弱。王春光^[74]的研究表明: SOC 含量与黏粒含量呈极显著正相关, 与砂粒含量呈极显著负相关。黏土矿物具有较强的表面吸附能力, 它能够吸附降解性差的疏水性 SOC 并进行保护, 从而提高 SOC 的稳定性, 且黏粒中黏土矿物占比较大, 故 SOC 含量与黏粒含量往往呈正相关关系^[85]。HASSINK^[86]根据土壤粒径与 SOC 的关系提出了“碳饱和容量”, 将 SOC 的稳定能力归因于土壤黏粒含量。土壤粒径还可通过影响土壤水气条件对 SOC 产生影响, 如: 在崇明东滩南部冲刷带芦苇湿地, 其土壤为砂壤土, 土粒之间孔隙较大, 通气透水性较好, 且含盐量较低, 微生物活动剧烈, 从而促进 SOC 分解; 而在东北部淤涨带芦苇米草湿地, 其土壤为黏土, 含水量和含盐量较高, 微生物活性较弱, 从而抑制 SOC 分解^[87]。

2.1.6 营养元素

氮 (nitrogen, N) 和磷 (phosphorus, P) 作为植物生长所必需的营养元素, 对植物生长起着非常重要的作用。在 N、P 营养元素缺乏的生态系统中, 植被生产力低下, 其通过光合作用固定的碳

减少,生物量较低,而植被凋落物、根系生物量及分泌物又是 SOC 的重要来源,故该系统中的 SOC 含量很低。根据生态化学计量比理论,土壤中养分元素(主要为 N、P)的输入与有效性制约着 SOC 的积累速率和存储能力^[88],所以 N、P 添加对森林、草地、农田、湿地等各类生态系统的生产力具有显著的促进作用;且 N 添加引起的促进作用在北方森林更为显著,而 P 添加的促进作用在热带森林更为显著^[89],这种 N、P 添加引起植被生产力提高的原因可能与养分限制的空间格局有关^[90]。土壤 N、P 限制还会影响微生物对 SOC 的分解速率。在 N、P 缺乏的生态系统中,微生物利用活性 SOC 作为能量来源,通过分泌一定量的养分矿化酶来分解含 N、P 的顽固有机物,以此获得与自身生长所需比例相当的 N 和 P,即“营养挖掘假说”^[91],这说明 N、P 限制会促进 SOC 分解,降低 SOC 储量,因此,常通过添加 N、P 来提高 SOC 储量。研究表明:添加 N,可将 SOC 储量提高 4%~11%;添加 P,可将 SOC 储量提高约 5%;同时添加 N、P,可将 SOC 储量提高 8%^[92]。其原因在于:添加 N、P 后增加了向土壤中输送的植物源碳,减少了微生物对 SOC 的分解,而且这 2 个方面可以耦合发生,从而增加 SOC 储量^[93]。此外,添加 N 可降低土壤 pH 值,引起土壤酸化和铝离子活化,从而对微生物产生毒害作用^[94];而添加 P 可通过提高微生物碳利用效率、增强植物 N 限制以及植物对 N 的吸收等方式抑制微生物活性,降低 SOC 分解^[95]。添加 N、P 还可通过降低氧化酶活性减少 SOC 矿化^[96]。但也有研究表明:添加 N、P 会降低 SOC 储量,不利于 SOC 积累。LUO 等^[97]研究表明:添加养分虽然可以通过提高植被地上部和地下部的生产力来增加向土壤中输入的植物源碳,但同时也可以加速微生物对 SOC 的分解,且增加量小于分解量,导致 SOC 储量减小。HUANG 等^[98]研究表明:添加 P 使 SOC 含量降低了 14%,添加 N、P 使 SOC 含量降低了 7%,这可能是由于不平衡或过量添加 N、P,超过了植物和微生物对养分的适应阈值,进而产生毒害作用,抑制了植物生长和微生物活性,最终通过降低植物源碳的输入、限制微生物对活性 SOC 的转化等方式降低 SOC 储量^[92]。综上所述,在实现土壤碳汇效益最大化的情况下,如何把握植物所需养分含量的临界点,未来还需深入探讨。

2.2 土地利用方式

土地利用方式是影响 SOC 储量的重要因素,合理的土地利用方式对土壤结构的改善、肥力的提升具有良好的促进作用^[99],它可以通过影响土壤理化性质、植被生产力、微生物群落的结构和活性等对 SOC 产生影响。土地利用的方式很多,如农田、森林、草原、园地、湿地等,相比之下,农田生态系统因作物收获期短而碳汇能力较弱^[100]。在 20 世纪,由于社会生产的极度落后,加之政府对自然生态的认知不足,一系列“毁林造田”“毁湿造田”“围湖造田”等活动席卷全国,造成中国的森林、湿地和草原面积不断下降;近年来,人们对绿水青山美好生态环境的愿望越来越强烈,“退耕还林”“退耕还湿”“退养还林”“退养还湿”等活动纷纷在全国开展,改变了生态系统类型,甚至出现了陆生、水生生态系统的转变,而不同生态系统的土壤理化性质、植被种类和生产力、微生物群落结构和丰度等存在差异,因此 SOC 储量和稳定性也有所不同。在“毁湿造田”“毁林造田”等过程中,农产品被带出生态系统,返回土壤的植物源碳减少,从而降低了 SOC 储量。简兴等^[101]研究表明:湿地在开垦为耕地 3 年后,0~30 cm 土层的 SOC 含量显著下降,平均降幅为 62.43%;EULISS 等^[102]研究表明:北美草原湿地围垦为农田后,SOC 的固定不足原来的一半,极大地削弱了土壤碳汇功能;迟光宇等^[103]研究表明:开垦 5 年和 18 年的旱地表层 SOC 与天然林地相比分别减少 81.9% 和 68.3%。“退耕还湿”可增加 SOC 储量。王春光^[74]的研究表明:退耕湿地的 SOC 储量高于大豆田,但远低于天然沼泽,且这一差距随着退耕时间的延长而增加;惠若男等^[104]研究也表明:退耕还湿有利于 SOC 积累。但是,也有研究得出了相反的结论。IOST 等^[105]研究发现:湿地围垦成农田 20 年后,SOC 积累明显,呈持续增长趋势;靳振江等^[106]研究表明:江汉平原河口湿地在长期种植水稻后,SOC 含量提高了 55.42%,且微生物量碳含量是原来的 1.8 倍,这可能与被改变的生态系统 SOC 背景值有关。综上所述,众多学者对土地利用类型转变后 SOC 的响应规律研究结果不同,推测原因可能与所选择的研究区域和研究样地有关。不同区域和样地的气候、温度、光照、雨量、植被、土壤类型、人类活动等均存在较大差异,可能导

致了研究结果的不一致性, 今后应在更大的空间尺度、更全面的生态系统类型上对土地利用类型转变后 SOC 的响应规律进行研究, 以揭示其响应机制。

2.3 大气 CO₂ 浓度

大气 CO₂ 浓度也是影响 SOC 的重要因子, 它可以通过影响植被生产力、凋落物的产量和质量、微生物群落的结构和丰度等对 SOC 产生影响。一方面, CO₂ 作为植物光合作用的原料, 在一定浓度范围内可以刺激植物光合作用, 提高植物生产力, 增加向土壤转移的植物源碳; 另一方面, 土壤中增加的植物源碳为微生物提供了生命活动所必需的能量和碳源, 再加之大气中高浓度 CO₂ 所引起的增温效应, 改变了微生物群落结构和演替进程, 提高了微生物的活性, 从而促进 SOC 分解。可见, SOC 储量对大气 CO₂ 浓度增加的响应取决于增加的植物源碳、微生物转化形成的稳定性碳以及微生物的分解强度, 若微生物分解的 SOC 量大于增加的碳, 则 SOC 储量减小, 反之则增大。多数学者认为: 高浓度 CO₂ 增加了 SOC 含量。韩米雪^[107]的研究表明: 在 14 年的时间尺度下, 大气 CO₂ 浓度升高增加了稻田 SOC 含量; 徐乔等^[108]对中国 FACE 平台试验区土壤进行了连续 9 年的高浓度 CO₂ 处理, 发现 SOC 含量显著增加 (年均 1%)。但也有少数学者认为高浓度 CO₂ 会降低 SOC 的稳定性, 抑制 SOC 积累。刘娟等^[109]通过 SOC 矿化实验发现: CO₂ 浓度升高促进了 SOC 矿化, 不利于 SOC 积累; 刘瑜等^[110]研究表明: 高浓度 CO₂ 降低了 SOC 含量, 其中, 20~40 cm 土层的降幅大于 0~20 cm 土层。同样, 也有部分学者认为高浓度 CO₂ 对 SOC 含量无显著影响。PHILLIPS 等^[111]认为: 高浓度 CO₂ 虽然提高了植被生产力, 但进入土壤中的植物源碳引起了正的“激发效应”, 导致 SOC 分解加快, 故不会引起 SOC 积累; 赵光影等^[112]研究表明: 在升高 CO₂ 浓度并结合氮沉降连续运行 2 个生长季后, SOC 含量没有显著变化; TER-RER 等^[113]对全球 CO₂ 加富实验的数据进行了整合分析, 发现 CO₂ 浓度升高对 SOC 储量的影响与植被生物量的增加幅度呈负相关, 即当 CO₂ 浓度升高对植物生产力的促进作用较弱时, SOC 储量增加, 反之则减少。这种响应模式与植物的养分获取策略有关, 如果植物获取的养分主要来自

微生物矿化的土壤有机质, 则 SOC 储量下降, 反之则上升^[114]。综上所述, 关于 CO₂ 浓度对 SOC 储量的影响是促进还是抑制, 目前尚无定论。生态系统对大气 CO₂ 浓度的响应是长期的, 可能持续数十年甚至几个世纪, 目前短期实验的研究结论还不足以说明 CO₂ 浓度升高对 SOC 的定性影响, 且短期实验内所测定的 SOC 变化量相对于总量来说占比较小, 很难界定误差影响, 未来还需加强研究, 更深层次地揭示其机理。

2.4 火烧影响

火烧作为自然环境中最普遍、最具毁灭性的因子之一, 对生态系统的影响是多方面的。一方面, 它可以燃烧地表植被, 将其中大部分有机碳以含碳温室气体 (主要为 CO₂) 的形式排放到大气中, 在该过程中, 部分生物质因不完全燃烧通过续埋效应进入土壤中, 增加 SOC 储量; 另一方面, 火烧能够改变植被组成、土壤理化性质、微生物群落的结构和丰度, 并引发侵蚀作用等相关进程, 从而对 SOC 产生影响。火烧不仅影响 SOC 固存和转化、输入和输出途径, 还影响 SOC 在土壤剖面的垂直分布, 不同火烧强度对 SOC 的影响也不同。王卫霞等^[115]研究表明: 相同火烧强度下, 0~10 cm 土层的 SOC 含量大于 10~25 cm 土层, 其原因在于有机质燃烧所形成的黑碳进入土壤表层, 从而增加了 SOC 含量。王新宇等^[116]研究表明: 轻度火烧使土壤黑碳含量增加了 65.5%, SOC 含量增加了 43.7%; 而重度火烧的土壤黑碳含量增加了 118.3%, SOC 含量增加了 189.3%。李媛等^[117]研究发现: 与未烧地相比, 除 0~10 cm 土层的 SOC 变化不显著外, 其余土层均显著增加。WANG 等^[118]总结了 200 多个火烧实验结果, 发现高强度野火使森林 SOC 平均减少了 25.3%。综上所述, 学者们在不同生态系统、不同火烧强度及不同土层深度所得到的研究结论存在差异, 其原因是多方面的, 可能与研究样地所处的气候带有一定关系, 也可能与样地的生态环境和背景值有关。由于温度适宜, 降水、光照和土壤肥力较为充足, 部分样地在经历火烧后又发生次生演替, 在相对较短的时间内发育成与当地气候相适应的顶级群落, 从而增加 SOC 储量; 而有的样地在火烧后由于环境条件恶劣, 水、肥缺乏, 植被恢复所需时间较长, 减少了向土壤中转移的植物源碳, 造成 SOC 储量降低。

3 展望

有关 SOC 的稳定机制和影响因子研究已取得一些进展,但仍存在一些不足。为进一步理解土壤碳循环,在当今气候变化背景下更好地实现土壤碳封存,未来应进一步加强以下 6 个方面的研究工作。

(1) 不同生态系统的气候、土壤和植被差异较大,发挥主导作用的碳稳定机制和影响因子也有所不同,且这些稳定机制和影响因子之间如何关联、交互作用如何平衡,仍需通过定位研究进行综合探讨。

(2) 在 SOC 剖面分布上,深层土壤碳储量占比超过 60%^[19],但在当今气候变化背景下,深层 SOC 稳定性的变化研究还较为缺乏,此外,深层土壤植物源碳的输入减少,缺乏碳源和能量,那么其微生物如何调控 SOC 的周转?又以怎样的生存策略响应恶劣的环境条件?这些科学问题值得深入探究。

(3) 在碳输入与排放之间,微生物具备“中间桥梁”的作用,其对碳的利用效率在很大程度上影响着碳的固存,提高微生物碳利用效率有利于 SOC 积累,但微生物碳利用效率受多种因素的制约,如底物质量、微生物种类和活性、土壤理化性质等,深度揭示这些因素对微生物碳利用效率的影响机制,把握各类生态系统能够达到最大微生物碳利用效率的生态阈值,对增加 SOC 储量、缓解温室效应非常有益,因此,有关微生物碳利用效率的内在影响机理也是未来研究的重点。

(4) 植被凋落物、根系及分泌物是 SOC 的重要来源,这些植物源碳一方面可作为碳源进入到微生物碳循环体系,在微生物的迭代循环过程中以氨基糖的形式稳定在土壤碳库中,促进 SOC 积累;另一方面,这些植物源碳也可作为能量来源,维持微生物的生命活动,并最终被分解为 CO₂ 排放到大气中。在该过程中,微生物利用植物源碳作为碳源和能量所消耗的 SOC 比例、其调控机制、影响因子等许多内在机理还有待揭秘,未来可通过室内培养、同位素示踪等方法进一步加强研究。

(5) SOC 储量取决于碳输入与输出之间的平衡,“新碳”的输入可增加 SOC 储量,但也会通过激发效应引起土壤中“老碳”的分解。通过提高植

被生物量、施肥、秸秆还田等措施能够增加土壤中“新碳”的输入量,但其对 SOC 的积累是促进还是抑制,目前还仅停留于现象描述,机理研究不够深入,如在“新碳”驱动下,微生物的响应机制、生活策略和演替方向发生了怎样的变化尚不清楚,未来仍需深入探讨。

(6) 植被作为生态系统的能量生产者,在土壤碳输入方面发挥着重要作用,N、P、高浓度 CO₂ 等生态因子通过影响植被生产力、根系分泌物、地上地下碳分配等影响土壤碳储量,但植被生长缓慢,在对各因子的响应上可能不够敏感,需经长时间的积累才能在植被—土壤互作体系中发挥作用。在该过程中,微生物也会受到影响,做出响应并反作用于 SOC。但是,无论是植被生长,还是微生物生活策略和演替方向改变,都是一个漫长的过程,短期试验得出的结果与对照相比可能不会有显著差异,且土壤碳储量基数巨大,微小的误差可能引起较大的波动,很难判定引起波动的原因。因此,未来在探索各因子对 SOC 的影响研究中,应开展长期试验,并探索 SOC 循序渐进的响应规律。

4 结论

由于复杂的分子结构以及在团聚体包裹、土壤矿物吸附和微生物转化作用下,SOC 的稳定性提高,土壤固碳能力增强。土壤理化性质、土地利用方式、大气 CO₂ 浓度和火烧通过改变植被组成和生产力、微生物群落结构和活性等途径影响 SOC 输入与输出,且不同生态系统间的差异使得 SOC 对同一因子的响应结果可能不同,因此,在探究各因子对 SOC 的影响时不能以偏概全,要结合生态系统类型进行综合分析。

[参考文献]

- [1] 朱珠,徐侠,杨赛兰,等.陆地生态系统土壤有机碳分解温度敏感性研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):33. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202002049.
- [2] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81. DOI: 10.3402/tellusb.v44i2.15428.
- [3] PAUSTIAN K, LEHMANN J, OGLE S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532(7597): 49. DOI: 10.1038/nature17174.

- [4] 吴庆标, 王效科, 郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 743. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2005.05.026](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2005.05.026).
- [5] MARSCHNER B, BEODOWSKI S, DREVES A, et al. How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils?[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1): 91. DOI: [10.1002/jpln.200700049](https://doi.org/10.1002/jpln.200700049).
- [6] LORENZ K, LAL R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems: a review[J]. Agromomy for Sustainable Development, 2014, 34(2): 443. DOI: [10.1007/s13593-014-0212-y](https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y).
- [7] KOGEL-KNABNER I, GUGGENBERGER G, KLEBER M, et al. Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1): 61. DOI: [10.1002/jpln.200700048](https://doi.org/10.1002/jpln.200700048).
- [8] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. Nature Microbiology, 2017, 2(8): 17105. DOI: [10.1038/nmicrobiol.2017.105](https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105).
- [9] MELILLO J M, ABER J D, MURATORE J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics[J]. Ecology, 1982, 63(3): 621. DOI: [10.2307/1936780](https://doi.org/10.2307/1936780).
- [10] 周晓荷. 藏西南高寒草地土壤有机碳周转和分子组成特征及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [11] KIRK T K, FARRELL R L. Enzymatic combustion: the microbial degradation of lignin[J]. Annual Review of Microbiology, 1987, 41(1): 465. DOI: [10.1146/annurev.mi.41.100187.0023241](https://doi.org/10.1146/annurev.mi.41.100187.0023241).
- [12] MA T, ZHU S S, WANG Z H, et al. Divergent accumulation of microbial necromass and plant lignin components in grassland soils[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3480. DOI: [10.1038/s41467-018-05891-1](https://doi.org/10.1038/s41467-018-05891-1).
- [13] BAHRI H, DIGMAC M F, RUMPEL C, et al. Lignin turnover kinetics in an agricultural soil is monomer specific[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(7): 1977. DOI: [10.1016/j.soilbio.2006.01.003](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.003).
- [14] YANG Y, DOU Y X, WANG B R, et al. Deciphering factors driving soil microbial life-history strategies in restored grasslands[J]. iMeta, 2022, 2(1): e66. DOI: [10.1002/IMT2.66](https://doi.org/10.1002/IMT2.66).
- [15] 刘宁, 何红波, 解宏图, 等. 土壤中木质素的研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 991. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2011.04.041](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2011.04.041).
- [16] LÜTZOW M V, KÖGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions: a review[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426. DOI: [10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x).
- [17] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, 528(7580): 60. DOI: [10.1038/nature16069](https://doi.org/10.1038/nature16069).
- [18] 谢长校, 孙建中, 李成林, 等. 细菌降解木质素的研究进展[J]. 微生物学通报, 2015, 42(6): 1122. DOI: [10.13344/j.microbiol.china.140686](https://doi.org/10.13344/j.microbiol.china.140686).
- [19] HATAKKA A. Lignin-modifying enzymes from selected white-rot fungi-production and role in lignin degradation[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1994, 13(2/3): 125. DOI: [10.1111/j.1574-6976.1994.tb00039.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1994.tb00039.x).
- [20] 王仁佑, 曾光明, 郁红艳, 等. 木质素的微生物降解机制[J]. 微生物学杂志, 2008, 28(3): 59. DOI: [10.3969/j.issn.1005-7021.2008.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7021.2008.03.013).
- [21] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829. DOI: [10.5846/stxb201301050036](https://doi.org/10.5846/stxb201301050036).
- [22] FANG Y, SINGH B, SINGH P B, et al. Biochar carbon stability in four contrasting soils[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 60. DOI: [10.1111/ejss.12094](https://doi.org/10.1111/ejss.12094).
- [23] PRESOTN C M, SCHMIDT M W I. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions[J]. Biogeosciences, 2006, 3(4): 397. DOI: [10.5194/bg-3-397-2006](https://doi.org/10.5194/bg-3-397-2006).
- [24] SINGH N, ABIVEN S, TORN M S, et al. Fire-derived organic carbon in soil turns over on a centennial scale[J]. Biogeosciences, 2012, 9(8): 2847. DOI: [10.5194/bg-9-2847-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-2847-2012).
- [25] MASIELLO C A. New directions in black carbon organic geochemistry[J]. Marine Chemistry, 2004, 92(1): 201. DOI: [10.1016/j.marchem.2004.06.043](https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.043).
- [26] DAI X, BOUTTON T W, GLASER B. Black carbon in a temperate mixed-grass savanna[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(10): 1879. DOI: [10.1016/j.soilbio.2005.02.021](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.02.021).
- [27] CHUGHTAI A R, JASSIN J A, PETERSON J H, et al. Spectroscopic and solubility characteristics of oxidized soot[J]. Aerosol Science Technology, 1991, 15(2): 112. DOI: [10.1080/02786829108959518](https://doi.org/10.1080/02786829108959518).
- [28] HAMER U, MARSCHNER B, BRODOWSKI S, et al. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(7): 823. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2004.03.003](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.03.003).
- [29] BERHE A A, HARDEN J W, TORN M S, et al. Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: G02019. DOI: [10.1029/2011JG001790](https://doi.org/10.1029/2011JG001790).
- [30] BASILE-DOELSCH I, BALESENT J, ROSE J. Are interactions between organic compounds and nanoscale weathering minerals the key drives of carbon storage in soils?[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(7): 3997. DOI: [10.1021/acs.est.5b00650](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00650).
- [31] 文永莉. 不同施肥条件下旱地红壤铁铝氧化物转化与固碳机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [32] WITZGALL K, VIDAL A, SCHUBERT D I, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4115. DOI: [10.1038/s41467-021-24192-8](https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8).
- [33] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚

- 体及微生物学特性的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1277. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.06.025](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.06.025).
- [34] SEXSTONE A J, REVSBECH N P, PARKIN T B, et al. Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(3): 645. DOI: [10.2136/sssaj1985.03615995004900030024x](https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900030024x).
- [35] LI D J, SCHDE C, HAHHIX M L, et al. Differential responses of soil organic carbon fractions to warming: results from an analysis with data assimilation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67: 24. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.07.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.008).
- [36] 徐香茹, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2017.06.35](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2017.06.35).
- [37] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2011.00447](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2011.00447).
- [38] BARRETO C R, MADARI E B, MADDOCK E J, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 132(3/4): 243. DOI: [10.1016/j.agee.2009.04.008](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.008).
- [39] KLEBER M, BOURG I C, COWARD E K, et al. Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(6): 402. DOI: [10.1038/s43017-021-00162-y](https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y).
- [40] XIAO K Q, ZHAO Y, LIANG C, et al. Introducing the soil mineral carbon pump[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2023, 4(3): 135. DOI: [10.1038/s43017-023-00396-y](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00396-y).
- [41] 徐香茹, 骆坤, 周宝库, 等. 长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1961. DOI: [10.13287/j.1001-9332.20150601.002](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.20150601.002).
- [42] 郇继承, 潘根兴. 江汉平原不同土地利用和起源下农田土壤有机碳组分变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 153. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2012.06.016](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2012.06.016).
- [43] DUNGAIT J A J, HOPKINS D W, GREGORY A S, et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6): 1781. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x).
- [44] 吴晓丽, 李林, 史喜林, 等. 土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3): 42. DOI: [10.16423/j.cnki.1003-8701.2014.03.004](https://doi.org/10.16423/j.cnki.1003-8701.2014.03.004).
- [45] WAGAI R, MAYER L M, KITAYAMA K, et al. Association of organic matter with iron and aluminum across a range of soils determined *via* selective dissolution techniques coupled with dissolved nitrogen analysis[J]. Biogeochemistry, 2013, 112(1/2/3): 95. DOI: [10.1007/s10533-011-9652-5](https://doi.org/10.1007/s10533-011-9652-5).
- [46] MAMBELLI S, BIRD J A, GLEIXNER G, et al. Relative contribution of foliar and fine root pine litter to the molecular composition of soil organic matter after *in situ* degradation[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(9): 1099. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2011.06.008](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.06.008).
- [47] SIMPSON A J, SIMPSON M J, SMITH E, et al. Microbially derived inputs to soil organic matter: are current estimates too low?[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(23): 8070. DOI: [10.1021/es071217x](https://doi.org/10.1021/es071217x).
- [48] WANG B R, AN S S, LIANG C, et al. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 162: 108422. DOI: [10.1016/j.soilbio.2021.108422](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422).
- [49] ANDERSON T H, DOMSCH K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 471. DOI: [10.1016/0038-0717\(89\)90117-x](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90117-x).
- [50] FREY S D, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no tillage agroecosystems along two climatic gradients[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(4): 573. DOI: [10.1016/s0038-071\(98\)00161-8](https://doi.org/10.1016/s0038-071(98)00161-8).
- [51] FREY S D. Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2019, 50(1): 237. DOI: [10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331](https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331).
- [52] BRUNDRETT M C, TEDERSOO L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity[J]. New Phytologist, 2018, 220(4): 1108. DOI: [10.1111/nph.14976](https://doi.org/10.1111/nph.14976).
- [53] SOUDZILOVSKAIA N A, BODEGOM P M V, TERRER C, et al. Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5077. DOI: [10.1038/s41467-019-13019-2](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13019-2).
- [54] 秦泽峰, 谢沐希, 张运龙, 等. 丛枝菌根真菌介导的土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(4): 756. DOI: [10.11674/zwyf.2022529](https://doi.org/10.11674/zwyf.2022529).
- [55] STAUNTON S, SABY N P A, ARROUAY D, et al. Can soil properties and land use explain glomalin-related soil protein (GRSP) accumulation? A nationwide survey in France[J]. Catena, 2020, 193: 104620. DOI: [10.1016/j.catena.2020.104620](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104620).
- [56] 徐小峰, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175. DOI: [10.17521/cjpe.2007.0023](https://doi.org/10.17521/cjpe.2007.0023).
- [57] 杨钙仁, 张文菊, 童成立, 等. 温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 243. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2005.02.009](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2005.02.009).
- [58] 杨继松, 刘景松, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 38. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2008.0020](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2008.0020).
- [59] 楚梦玮, 侯巍楹, 净婷菲, 等. 云南省深层土壤有机碳的估算及其影响因素分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 516. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202008050](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202008050).
- [60] 刘芳. 增温和氮添加对四种森林土壤有机碳分解的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [61] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 等. 冻融作用下黑土有机碳数

- 量变化的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 984. DOI: [10.3321/j.issn:1672-2043.2008.03.027](https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-2043.2008.03.027).
- [62] 霍莉莉. 沼泽湿地垦殖前后土壤有机碳垂直分布及其稳定性特征研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013.
- [63] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1867. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2010.0246](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2010.0246).
- [64] 王健波, 张燕卿, 严昌荣, 等. 干湿交替条件下土壤有机碳转化及影响机制研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 998. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2013.04.039](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2013.04.039).
- [65] ZHU B, CHENG W X. Impacts of drying-wetting cycles on rhizosphere respiration and soil organic matter decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 63: 89. DOI: [10.1016/j.soilbio.2013.03.027](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.03.027).
- [66] 段晓南, 王晓科, 尹弢, 等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1091. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.05.040](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.05.040).
- [67] FENNER N, FREEMAN C. Drought-induced carbon loss in peatlands[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 895. DOI: [10.1038/ngeo1323](https://doi.org/10.1038/ngeo1323).
- [68] 苏天燕, 刘文杰, 杨秋, 等. 土壤碳循环对地下水位的响应研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 180. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00075](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00075).
- [69] RYAN M G, LAW B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3. DOI: [10.1007/s10533-004-5167-7](https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7).
- [70] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 海南琼中不同林龄橡胶林土壤有机碳组分及其影响因素[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(5): 886. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202204033](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202204033).
- [71] LI Y, WU H D, WANG J Z, et al. Plant biomass and soil organic carbon are main factors influencing dry-season ecosystem carbon rates in the coastal zone of the Yellow River Delta[J]. *PLoS One*, 2019, 14(1): e0210768. DOI: [10.1371/journal.pone.0210768](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210768).
- [72] 肖焯, 黄志刚. 环境因子对湿地土壤有机碳的影响因素研究进展[J]. 遵义师范学院学报, 2020, 22(1): 87. DOI: [10.3969/j.issn.1009-3583.2020.01.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3583.2020.01.021).
- [73] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物—土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1594. DOI: [10.13227/j.hjlx.2010.06.006](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.2010.06.006).
- [74] 王春光. 退耕对三江平原沼泽土壤有机碳恢复的影响机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [75] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355. DOI: [10.13866/j.azr.2021.05.17](https://doi.org/10.13866/j.azr.2021.05.17).
- [76] 徐晓风. pH对红壤和潮土有机碳转化及土壤微生物群落结构的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.
- [77] 刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 769. DOI: [10.3321/j.issn:1000-6923.2008.09.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6923.2008.09.001).
- [78] PIVNI-KOVA B, REJMANKOVA E, SNYDER J M, et al. Heterotrophic microbial activities and nutritional status of microbial communities in tropical marsh sediments of different salinities: the effects of phosphorus addition and plant species[J]. *Plant and Soil*, 2010, 336: 49. DOI: [10.1007/s11104-010-0439-6](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0439-6).
- [79] 胡敏杰, 邹芳芳, 邹双全. 盐度梯度下闽江口短叶茳芩湿地土壤生态化学计量学特征[J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(4): 17.
- [80] 王纯, 刘兴土, 全川. 水盐梯度对闽江河口湿地土壤有机碳组分的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3919. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6923.2017.10.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2017.10.037).
- [81] 李苏青, 管冬兴, 李希媛, 等. 天津滨海湿地土壤有机碳和有效磷的盐度响应及影响因素[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1381. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202405.031](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202405.031).
- [82] MORRISSEY E M, GILLESPIE J L, MORINA J C, et al. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands[J]. *Global Biology*, 2014, 20(4): 1351. DOI: [10.1111/gcb.12431](https://doi.org/10.1111/gcb.12431).
- [83] RATH K M, MAHESHWARI A, BENGTSON P, et al. Comparative toxicities of salts on microbial processes in soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2016, 82(7): 2012. DOI: [10.1128/AEM.04052-15](https://doi.org/10.1128/AEM.04052-15).
- [84] 严格, 葛振鸣, 张利权. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 85. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2014.01.012](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2014.01.012).
- [85] KAISER K, GUGGENBERGER G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7): 711. DOI: [10.1016/S0146-6380\(00\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00046-2).
- [86] HASSINK J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77. DOI: [10.1023/A:1004213929699](https://doi.org/10.1023/A:1004213929699).
- [87] 李艳丽, 肖春玲, 王磊, 等. 上海崇明东滩两种典型湿地土壤有机碳汇聚能力差异及成因[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1310. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2009.0202](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2009.0202).
- [88] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054).
- [89] LI Y, NIU S L, YU G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 934. DOI: [10.1111/gcb.13125](https://doi.org/10.1111/gcb.13125).
- [90] FENG J G, ZHU B. Global patterns and associated drivers of priming effect in response to nutrient addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153(1): 108118. DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.108118](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108118).
- [91] 张睿媛, 袁丹, 秦树平, 等. 碳氮磷化学计量比对土壤有机碳矿化激发效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(8): 1311. DOI: [10.12357/cjea.20230135](https://doi.org/10.12357/cjea.20230135).
- [92] 冯继光, 张秋芳, 袁霞, 等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响: 进展与展望[J]. 植物生态学报, 2022, 46(8): 855. DOI: [10.17521/cjpe.2021.0358](https://doi.org/10.17521/cjpe.2021.0358).
- [93] XU C H, XU X, JU C H, et al. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(6): 1170. DOI: [10.1111/gcb.15489](https://doi.org/10.1111/gcb.15489).

- [94] 叶成龙, 张浩, 周小龙, 等. 氮添加对高寒草甸土壤微生物呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2279. DOI: [10.5846/stxb201705100859](https://doi.org/10.5846/stxb201705100859).
- [95] FENG J G, ZHU B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 38. DOI: [10.1016/j.soilbio.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.04.008).
- [96] LIU W X, QIAO C L, YANG S, et al. Microbial carbon use efficiency and priming effect regulate soil carbon storage under nitrogen deposition by slowing soil organic matter decomposition[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 37. DOI: [10.1016/j.geoderma.2018.07.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.008).
- [97] LUO R Y, KUZYAKOV Y, LIU D Y, et al. Nutrient addition reduces carbon sequestration in a Tibetan grassland soil: disentangling microbial and physical controls[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 144: 107764. DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.107764](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107764).
- [98] HUANG J S, LIU L L, QI K, et al. Different mechanisms drive changes in soil C pools under N and P enrichment in a subalpine spruce plantation[J]. *Geoderma*, 2019, 340: 213. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.027).
- [99] 赵林林, 吴志祥, 孙瑞, 等. 云南不同林龄橡胶林土壤有机碳含量变化及影响因子[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 532. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202010032](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202010032).
- [100] 卢欣晴, 张秀英, 汪振, 等. 中国稻田生态系统固碳效应模拟研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(1): 141. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202210029](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202210029).
- [101] 简兴, 翟晓钰, 王喻, 等. 土地利用方式改变对湿地土壤总有机碳与可溶性有机碳的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(3): 475. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1524.2020.03.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1524.2020.03.13).
- [102] EULISS N H, GLEASON R A, OLNES A, et al. North American prairie wetlands are important nonforested land-based carbon storage sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 361(1/2/3): 179. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2005.06.007](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.007).
- [103] 迟光宇, 王俊, 陈欣, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化[J]. 土壤, 2006, 38(6): 755. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2006.06.016](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2006.06.016).
- [104] 惠若男, 于洪贤, 姚允龙, 等. 退耕还湿对三江平原七星河湿地土壤有机碳累积的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(31): 12311. DOI: [10.3969/j.issn.0517-6611.2013.31.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2013.31.026).
- [105] IOST S, LANDGTAF D, MAKESCHIN F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 245. DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.08.001](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.001).
- [106] 靳振江, 郇继承, 潘根兴, 等. 荆江地区湿地与稻田有机碳、微生物多样性及土壤酶活性的比较[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3773. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2012.18.010](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2012.18.010).
- [107] 韩米雪. 大气CO₂浓度升高对稻田土壤有机碳稳定性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [108] 徐乔, 朱建国, 朱春梧, 等. 大气CO₂浓度升高对水稻土团聚体的分布与有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 989. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2014.06.004](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2014.06.004).
- [109] 刘娟, 韩勇, 蔡祖聪, 等. FACE系统处理三年后淹水条件下土壤CH₄和CO₂排放变化[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 19. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2007.06.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.06.005).
- [110] 刘瑜, 尹飞虎, 高志建, 等. CO₂浓度和施氮量对棉花干物质、有机碳及全氮含量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(11): 28. DOI: [10.15933/j.cnki.1004-3268.2015.11.007](https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2015.11.007).
- [111] PHILLIPS R P, MEIER I C, BERNHARDT E S, et al. Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO₂[J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(9): 1042. DOI: [10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01827.x).
- [112] 赵光影, 刘景双, 张雪萍, 等. CO₂浓度升高对三江平原湿地土壤碳氮含量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 31(2): 56. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2011.02.006](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2011.02.006).
- [113] TERRER C, PHILLIPS R P, HUNGATE B A, et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 599. DOI: [10.1038/S41586-021-03306-8](https://doi.org/10.1038/S41586-021-03306-8).
- [114] 赵广, 张扬健. 大气CO₂浓度升高对土壤碳库稳定性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8493. DOI: [10.20103/j.stxb.202303070424](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202303070424).
- [115] 王卫霞, 杜杰, 刘晓菊, 等. 火干扰对喀纳斯泰加林土壤有机碳的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(1): 112. DOI: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb18080019](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb18080019).
- [116] 王新宇, 包翔, 王瑞利. 火烧对土壤黑碳及有机碳含量的影响[J]. 北方农业学报, 2018, 46(6): 64. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1197.2018.06.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1197.2018.06.13).
- [117] 李媛, 程积民, 魏琳, 等. 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2131. DOI: [10.5846/stxb201112292009](https://doi.org/10.5846/stxb201112292009).
- [118] WANG Q K, ZHONG M C, WANG S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 271: 91. DOI: [10.1016/j.foreco.2012.02.006](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.006).
- [119] BATJES N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks[J]. *Geoderma*, 2016, 269: 61. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.01.034](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034).

责任编辑: 何馨成