

侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳稳定性的研究进展

肖胜生¹, 房焕英², 徐佳文¹, 常梦琦³, 秦晓蕾¹, 彭文杰¹, 刘洪光¹, 沈发兴¹

(1.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,江西省水利科学院,鄱阳湖流域生态水利技术创新中心,南昌 330029;
2.江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室,南昌工程学院,南昌 330099;3.江西农业大学林学院,南昌 330045)

摘要: 探究土壤有机碳(SOC)的组成、来源和稳定性机制是深入认识陆地碳汇功能和应对气候变化的关键。“增加土壤碳汇”与“稳定现存土壤碳汇”都是提升陆地生态系统碳固持能力的重要方面,地位同等重要。与“增汇”研究成果丰硕相比,“稳汇”研究相对薄弱。侵蚀区进行植被恢复可以显著促进 SOC 积累,但由于侵蚀区存在碳素坡面侵蚀损失,其碳素积累效率低于其他生态系统类型区这一重要环节,导致目前有关侵蚀区及其水土保持植被恢复过程中 SOC 动态变化、稳定性及固持长期有效性等问题尚不清楚,微生物介导的 SOC 稳定机制尚未充分揭示。通过简要概括侵蚀区植被恢复过程中土壤碳素的积累效益和影响因素,综述植被恢复对土壤 SOC 及其活性组分稳定性的影响;在简要介绍土壤微生物在调控土壤碳素稳定性重要作用的基础上,梳理了基于微生物“碳泵”理论的土壤有机碳稳定性研究进展,特别是指出了随着植被恢复进程,侵蚀区土壤微生物介导的 SOC 动态变化,总结现有研究的不足。指出今后需要从研究对象(重点是西南石漠化区和南方红壤丘陵区)、研究内容(土壤微生物介导的 SOC 稳定状态和机制)、研究手段(借用微生物碳泵的理念,野外典型样地调查与室内培养手段相结合)和研究土层(20 cm 以下深层次土壤)4 个方面加强研究,以期对相关领域起到一定程度的推动作用。

关键词: 土壤有机碳稳定性; 植被恢复; 侵蚀区; 微生物碳泵

中图分类号: S156.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0001-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.001

Advances of the Soil Organic Carbon Stability Under Vegetation Restoration in Eroded Areas

XIAO Shengsheng¹, FANG Huanying², XU Jiawen¹, CHANG Mengqi³,

QIN Xiaolei¹, PENG Wenjie¹, LIU Hongguang¹, SHEN Faxing¹

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention and Control, Jiangxi Provincial Academy of Water Resources Sciences, Jiangxi Provincial Eco-hydraulic Technology Innovation Center of Poyang Lake Basin, Nanchang 330029; 2.Jiangxi Key Laboratory of Degraded Ecosystem Restoration and Watershed Eco-Hydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099; 3.College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

Abstract: Exploring the composition, source of soil organic carbon (SOC) and its stabilization mechanism is key to deeply understand the carbon sink function of terrestrial ecosystem. Compared with the fruitful achievements of “increasing soil carbon sink”, the “stabilizing soil carbon sink” are poorly understood, especially the SOC stabilization mechanism driven by soil microbial under vegetation restoration in eroded areas has not been fully revealed because of low SOC accumulation efficiency with the SOC loss under soil erosion. Based on a brief summary of the benefits and influencing factors of SOC accumulation in the process of vegetation restoration in eroded areas, the effects of vegetation restoration on the stability of SOC and its active components were reviewed; Based on the brief introduction of the important role of soil microorganisms in regulating SOC stability, the study progress of SOC stability based on soil microbial carbon pump (MCP) theory were summarized. The main research directions in this field in the future were also suggested, including research objects (especially the rocky desertification area in Southwest China and red soil hilly area in South China), research contents (soil microbial mediated SOC stability and regulation mechanism), research meth-

ods (combining field typical sample investigation with indoor microbial culture based the MCP concept) and soil layer (deep soil below 20 cm).

Keywords: soil organic carbon stability; vegetation restoration; eroded area; microbial carbon pump

土壤是陆地生态系统最大的碳库,土壤碳收支的微小变化会显著影响大气碳浓度。自然植被转变为耕地或遭人为严重破坏时,会导致土壤有机碳(SOC)的损失,而适当的管理和植被恢复可以使退化土壤重新吸存 SOC。前期研究^[1-5]结果表明,侵蚀区进行植被恢复可以显著促进 SOC 积累。

探究 SOC 的组成、来源和稳定机制是深入认识陆地生态系统碳汇功能的关键。SOC 库的相对稳定在维持碳素平衡和应对全球气候变化方面发挥着重要作用。与“增加土壤碳汇”研究成果相比,“稳定现存土壤碳汇”研究相对薄弱。稳汇与增汇同等重要。但是目前总体上侵蚀退化土地植被恢复过程中 SOC 动态变化、稳定性及其固持有效性等问题尚不清楚, SOC 的稳定机制尚未充分揭示。近几年兴起的土壤微生物“碳泵”理论为揭示侵蚀区植被恢复过程中 SOC 的稳定机制提供了独特视角和方法^[6-9]。已有研究^[6]指出,土壤微生物群落是退化土地恢复过程中的游戏规则改变者/变局者,为进一步理解微生物介导的 SOC 稳定性提供了最新的视角。

为此,本文综述了侵蚀区植被恢复过程中土壤碳素的积累效益及影响有机碳稳定性的关键因素,并在简要介绍微生物“碳泵”理论框架的基础上,重点梳理了微生物介导的 SOC 稳定性研究进展。最后,从研究对象、研究内容、研究手段和研究土层 4 个方面指出了该领域的薄弱环节。

1 侵蚀区植被恢复过程中 SOC 的积累

1.1 侵蚀区植被恢复过程中 SOC 的积累效益

Lal^[1]认为,退化土壤损失碳的 60%~75%能通过生态恢复重新固定,并估计全球退化土壤的碳吸存潜力高达 $3 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ t/a。另外,相对于植被生物量作为碳的临时库,土壤中累积形成的是一种更理想的相对稳定的碳库^[10]。从我国水力侵蚀区水土保持历史进程来看,植被恢复变化显著的主要是西北黄土高原区、南方红壤丘陵区 and 西南石漠化区 3 个 2 级区。总体上,与黄土高原水土保持植被恢复过程中 SOC 数量和质量的研究成果相比,南方红壤丘陵区 and 西南石漠化区就显得相对薄弱得多。小流域综合治理 40 年来,这 2 个侵蚀区的植被覆盖状况发生了翻天覆地的变化,特别是南方红壤丘陵从曾经的“江南红色沙漠”转变到如今的“绿水青山”。

学者们在黄土高原典型侵蚀区进行了诸多研究。如马祥华等^[11]指出,随着植被的演替恢复,SOC 含量表

现为先减小后增大的趋势。SOC 含量减小时,地上植被参与了 SOC 的消耗,从而提高了植被的丰富度;由于植被的凋落、腐解,SOC 含量提高,这样就形成植被与土壤的正向互动状态。Feng 等^[12]研究证实,退耕还林还草是黄土高原地区生态系统固碳增加的主要原因,2000—2008 年黄土高原生态系统固碳量增加了 96.1 Tg,该区域生态系统已从碳源转变为碳汇。相比于退耕还林等植被人工恢复,退耕还草等植被自然恢复更有利于表层(1 m)土壤 SOC 的积累^[13]。

大量研究^[14-15]表明,随着造林/植被恢复时限的延长,土壤中的碳储量迅速增加,并可以在几十年内恢复到与附近未受干扰森林相当的水平。同时,由于气候条件有利于植物快速生长,这种特点在热带地区表现得更为明显^[16]。Yu 等^[17]研究表明,亚热带森林生态系统具有很高的 CO₂ 吸收强度,其净生态系统生产力 NEP(以 C 计)达到 (362 ± 39) g/(cm² · a),存在一个被忽略的东亚季风区(20°—40°N)碳汇功能区。江西省赣州市是我国南方红壤侵蚀区的典型代表,水平竹节沟+乔灌草混交补植是区域内严重侵蚀地最常见的植被恢复模式。有研究^[5]表明,经过近 40 年的综合治理,植被得到了有效恢复,土壤碳素积累明显。与未治理对照样地相比,治理 4,14,24,34 年后样地 1 m 深度内 SOC 吸存速率分别达到 0.74,0.14,0.54,0.58 t/(hm² · a)。福建师范大学相关团队以长汀为研究区进行了长期研究,何圣嘉等^[18]研究表明,侵蚀退化红壤地建植马尾松林后,林地表层(0—20 cm) SOC 吸存速率在 15~25 年内达到最大,马尾松恢复 30 年后 SOC 吸存速率约为 0.39 t/(hm² · a),自马尾松建植起至演替为当地顶级群落(次生林)全过程中 SOC 平均吸存速率约 0.16 t/(hm² · a)。

另外,关于侵蚀区植被恢复背景下不同层次 SOC 积累的差异(表层土壤碳积累对植被恢复的响应大于深层土壤)^[2,5]、SOC 吸存速率的时间非线性表现(恢复后期 SOC 增加速率低于恢复早期)^[18]、强度侵蚀退化(或者说依然存在较强坡面侵蚀)导致马尾松林地碳素积累效益不明显^[19]等方面也做了深入研究。总体上,侵蚀区植被恢复后土壤碳素积累效益与多种因素有关,如退化程度^[19]、土壤矿物学特征与养分状况(特别是 N、P 养分含量)^[2]和造林时间与恢复年限等^[20]。

1.2 侵蚀区植被恢复过程中土壤碳素积累的影响因素

侵蚀区植被恢复过程中主要通过 3 种途径对土

壤碳素积累产生积极影响;植被恢复畅通了凋落物和细根归还的途径^[3]、土壤结构改善与团聚体保护机制^[21-22]、碳素坡面侵蚀损失得到抑制^[23]。

侵蚀区植被恢复过程中土壤碳素积累效益不明显,或者说与周边未受扰动的次生林相比还存在较大的 SOC 吸存潜力,这主要是因为侵蚀区自然生态环境具有潜在的脆弱性,随坡面径流损失的碳素占有较大比例。Jackson 等^[24]基于对全球 2 700 多个土壤剖面的分析,得到在较为湿润的地区,乔、灌木入侵引起的地上生物量增加有可能被 SOC 的流失所抵消。侵蚀逆境下, SOC 含量主要是 2 种正向输入过程(凋落物分解和细根分解释放)与 2 种负向输出过程(土壤呼吸和侵蚀损失)共同作用的结果。侵蚀劣地植被恢复后,增加了向土壤中输入的碳素,相应增大了土壤呼吸速率以及碳素侵蚀损失的可能性,特别是降雨充沛、山高坡陡的西南石漠化区和南方红壤丘陵山地。以南方红壤区严重侵蚀退化山地为例,其植被恢复措施主要是等腰环山开挖水平竹节沟,辅以乔灌草补植。在这个过程中,工程措施对坡面碳素侵蚀的抑制有可能大于植被重建对土壤碳素的归还作用。下一步要加强这 4 个关键过程综合实证研究,明确侵蚀逆境下 SOC 主要来源的相对贡献以及不同去向的相对比例问题,摸清侵蚀区植被恢复中土壤有机碳的吸存机理。

另外, Dou 等^[19]研究认为,南方红壤侵蚀区植被恢复后非保护性土壤有机碳能够逐渐向保护性有机碳转化,以及土壤老碳分解较慢也是土壤有机碳提高的重要原因。另外,植被恢复过程中由于养分限制^[25]、树种选择不当^[26-27]以及对植物—土壤—微生物相互作用缺乏了解^[28]等也会限制 SOC 积累。

2 SOC 稳定性和固持有效性的关键影响因素

增加陆地生态系统碳汇功能非常重要,但是稳定现存的土壤碳汇同等重要。从缓和大气 CO₂ 浓度上升角度考虑,能在土壤中长时间保存的 SOC 其固碳意义才更大。植被恢复后积累的碳素能否长期储存在土壤中,很大程度上取决于其稳定性,尤其是在人为扰动增加与气候变暖的情况下^[29]。

2.1 植被恢复对 SOC 稳定性的影响

已有研究^[30]表明,随着植被恢复,植物种类组成结构的变化可显著改变凋落物的质量和数量、根构型及其分泌物,显著提高 SOC 的含量、组分和稳定性;红壤侵蚀区的研究^[22]指出,植被恢复初期(7~11 年)主要以非保护性有机碳的形式积累,而随着恢复时间的延长,土壤非保护性有机碳逐渐向保护性有机碳转

化,这有利于土壤有机碳的长期保持。但有研究^[26]认为,得到恢复的森林土壤碳素周转效率仍然较高,从而降低了 SOC 稳定性^[4],如 Poeplau 等^[31]发现,造林有利于稳定碳库转变为活性碳库。

在侵蚀地植被恢复过程中,土壤总有机碳积累的短期变化并不能指示生态恢复对土壤碳动态的影响。因此,识别更敏感的活性有机碳组分有助于阐明土壤有机碳的动态。植被恢复重新建立了凋落物和细根的物质循环途径,特别是逐渐增多的有机物质输入量为微生物提供了可利用的 C 源、N 源,促进了微生物活性及微生物量的升高,从而促进了土壤活性有机碳组分含量。邓翠等^[30]研究表明,马尾松恢复过程中土壤活性碳库在恢复 7~10 年后逐渐向缓效性碳库(物理保护态的团聚体与粉粒和黏粒组合成)转化;惰性碳库储量随恢复年限不断增加,但其分配比例保持较稳定水平。土壤有机碳以可溶性有机碳(DOC)与颗粒态有机碳(POC)积累逐渐转化为缓效性碳库积累为主,进而影响惰性碳库的积累,有利于 SOC 的长期保持。Xiao 等^[5]同在亚热带红壤侵蚀区马尾松林地的研究表明,在恢复 35 年期间,DOC 和微生物量碳(MBC)等活性碳组分一直呈线性增加状态。Liu 等^[32]通过微生物降解培养试验,首次发现随着黄土高原植被演替恢复,可溶性有机质(DOM)的生物降解能力逐渐降低,并对温度变化的承受能力不断增加,进而促进了 DOM 含量的积累,为黄土高原土壤有机质的稳定维持途径提供了理论依据。

2.2 SOC 的保护与稳定机制

土壤碳稳定性取决于 SOC 不同组分的构成及其与环境的相互作用。不同的 SOC 组分有着不同的来源,且对影响因素有着不同的响应机制。总体上, SOC 的保护与稳定受到土壤团聚体、土壤矿物和微生物等环境条件的作用与影响。土壤团聚体能够将 SOC 包裹起来,通过空间上的物理隔离保护,使其免受微生物的分解利用^[33-34]。SOC 的稳定性通常与稳定性团聚体的数量相联系,而土壤团聚体的稳定性受土地利用方式的影响,大团聚体对 SOC 的保护作用较弱,微团聚体对 SOC 的保护相对较强^[35]。除去物理隔离,微团聚体中微生物来源的有机碳还可以与矿物结合形成复合体从而相对稳定地留存在土壤中,即矿物学保护机制在有机碳稳定化过程中也发挥了重要作用^[36]。研究者^[37]运用原位光谱学观测技术研究表明,有机碳在土壤中的长期固持不是由其分子结构决定的,而主要是由其所处生态系统决定。SOC 与无机矿物,特别是纳米尺度的铁铝氧化物通过表面相互作用形成有

机无机复合体,在更长时间尺度上控制着 SOC 固持。

随着研究手段与分析技术的飞速发展,目前对于 SOC 形成和稳定机制的认知发生了巨大的变革,逐渐从早期的腐殖质理论、土壤团聚体保护理论、土壤矿物保护理论等向微生物转化和调控理论转化^[34,38],或者说,SOC 的保护与稳定机制存在多样性及差异性,是团聚体的物理保护—土壤矿物的结合—微生物代谢过程相互作用、相互依存的结果。SOC 能否顺利接触到微生物(即空间不可接近性)以及周围环境条件是否适宜于微生物的分解则成为 SOC 稳定的重要限制因素,积累在更细粒级部分的微生物代谢产物可能具有更长的驻留时间^[39]。

与天然林或未扰动森林相比,侵蚀区人工恢复的森林更应受到关注。生物量碳的积累与 SOC 的积累并不总是同步或等效的,较高的生物量或凋落物产量并不一定意味着较高的 SOC 储量。凋落物质量通过调节凋落物分解过程中的产物去向来控制 SOC 的积累,演替后期的成熟林其高质量的凋落物分解产物向土壤转移的比例更高,土壤碳库拥有更为丰富的有机碳源,且 SOC 的存储环境更加稳定,这可能是原始森林能够在土壤中持续积累 SOC 的原因^[40]。我国南方红壤侵蚀区的研究^[41]表明,森林转换过程中的扰动加速了深层土壤稳定性有机碳的分解,导致人工恢复森林具有更高的微生物可利用碳比例和矿化速率。最近有学者^[42]研究表明,通过汇总分析全球 53 个国家地区、264 个野外研究的近 2.6 万条数据发现,与结构简单的人工林相比,天然林具备更好的碳存储能力。

不同土壤层次 SOC 稳定性也有所差异。Chen 等^[43]在福建首次发现,与表层土壤相比,在严重侵蚀退化地上恢复起来的人工林底层土壤均拥有更高的极易分解有机碳含量和快得多的相对碳矿化速率,其原因可能与小分子量、简单可溶性有机物向底层土壤的选择性迁移、底层土壤中底物与微生物空间分离以及底层土壤中微生物的 r 型生长策略有关。

3 基于微生物“碳泵”理论的 SOC 稳定研究

3.1 微生物“碳泵”理论框架

土壤微生物存在双重身份,既可以作为分解者调控非微生物来源碳的周转,也可以作为贡献者调控微生物来源碳的形成。在厦门大学焦念志“海洋微生物碳泵”(microbial carbon pump, MCP)理念的基础上,中国科学院沈阳应用生态研究所 Liang 等^[8]2017 年首次提出“土壤微生物碳泵”,强调了土壤微生物同

化合成产物是土壤稳定有机碳库的重要贡献者,其概念体系可以较好地阐释 SOC 的来源、形成与截获过程,为揭开微生物介导的固碳过程的真实面纱提供了可能^[9]。

MCP 理论强调的是土壤微生物在有机碳固存中的正效应,其将活性有机碳转化为较为稳定的合成代谢形式,并通过微生物残留物的续埋效应不断输入到稳定土壤有机碳库。相比于土壤 MBC 周转更快、含量较低,微生物残体碳(MRC)在土壤中周转时间更长,对稳定性碳库的形成具有重要贡献,并可表征微生物对 SOC 的长期贡献。氨基糖是目前应用最为广泛的土壤微生物死亡残体的生物标识物^[39],由于氨基糖具有异源性,因此常用氨基葡萄糖/胞壁酸比值指示真菌和细菌对土壤有机碳的相对贡献^[7,44-45]。

3.2 微生物残体碳对 SOC 的贡献

在许多生态系统的研究中 MRC 都呈现出与 SOC 极强的正相关关系,植物残体碳(木质素)与 SOC 负相关,微生物残体是 SOC 积累的稳定组分和重要贡献^[46]。Liang 等^[47]利用吸收马尔科夫链(absorbing markov chain)首次模拟并估算出土壤中 MRC 是 MBC 的 40 倍,并整合估算出温带区农田、草地和森林生态系统表层土壤中 MRC 占 SOC 比例分别为 55.6%,61.8%,32.6%。与之类似的是,Wang 等^[48]也得到全球尺度上农田、草地和森林 0—20 cm 表层土壤中 MRC 对 SOC 的平均贡献分别为 51%,47%,35%,表明 SOC 形成的微生物途径(即微生物残体的续埋效应)在耕地和草地土壤占主要地位,而植物途径(即难分解植物残体的物理迁移)在森林中占主导地位,并且继续得到这种贡献在农田土壤中随土层深度(0—150 cm)的增加而降低,而草地和森林土壤中随土层深度的增加而增加。MRC 不仅是发育良好土壤 SOC 的主要来源,Wang 等^[49]证明了 MRC 也是初始土壤(生物结皮覆盖下黄土高原沙质土壤)SOC 的重要来源。

在土壤微生物中,根系相关的菌根真菌占微生物生物量的 30% 以上,菌根真菌使用植物衍生碳来进行生物量生产和呼吸代谢,将 C 从活菌丝(有机酸和胞外酶等)和死亡菌丝生物量释放到土壤中,直接贡献 POC 和矿质结合态有机碳(MAOC)组分。Saskia 等^[50]在美国印第安纳州的温带落叶林中,通过 ¹³C 和 ¹⁵N 自然丰度分析与氨基糖标志物测定相结合的方法揭示了腐生真菌对 POC 的贡献为 4%~53%,对 MAOC 的贡献为 23%~42%,而外生菌根的贡献则相反。该结果表明,相比于植物残体,真菌对稳定态 SOC 的贡献更大,改变真菌群落可以加强土壤 SOC 长期固存的贡献。

但是由于微生物“碳泵”研究视角起步不久,结论

还存在不一致性,如 Matthew 等^[51]对美国温带森林的培养试验表明,微生物的生长、效率和周转与矿物相关的有机碳呈负相关,微生物残体的来源、有机碳形成的替代途径、激发效应和土壤的非生物特性等因素可以强烈地将微生物的生长、效率和周转与矿物相关的 SOC 分离,微生物残体的大量产生不是温带森林 SOC 持久性的主要驱动因素。

3.3 微生物介导的 SOC 稳定研究

目前,基于微生物“碳泵”理论,研究者对不同生态系统的固碳过程和稳碳机制进行了研究,并对土壤微生物“碳泵”的影响因素进行了深入分析^[49,52-53]。在全球尺度上,降水、温度和土壤 pH 是控制微生物残体的重要气候和环境因素,较低的温度和土壤 pH (如在温带和寒带生态系统中)促进真菌和细菌残体积累^[48]。土壤微生物群落作为土壤 MCP 的核心和载体,微生物残体的产生主要受微生物生长速率(MGR)、微生物碳利用效率(CUE)和微生物生物量周转率(MTR)3 个主要指标控制^[51,54]。MGR、

CUE、MTR 与微生物介导的有机碳截获过程并非简单的线性关联,主要与土壤微生物的化学计量特征密切相关。土壤微生物的化学计量特征可以指示微生物养分需求、代谢过程以及酶学特征等与群落内秉特征相关的过程,有助于判断微生物群落驱动的土壤 MCP 功能对外界干扰的应对策略。尽管这些特征可能是 SOC 形成和分解的核心,但对微生物生理特征的控制及其在环境梯度上对 SOC 的影响还没有得到很好地阐明,阻碍了对 SOC 库如何响应环境变化的预测,这是目前研究的不足之处^[54]。Wang 等^[49] 研究表明,黄土高原沙质土壤裸沙、藻结皮、藻-苔藓结皮、苔藓-藻结皮和苔藓结皮 5 个阶段组成的生物土壤结皮形成序列中,细菌残体主要贡献 MAOC 库,而真菌残体在 POC 中更为丰富,<2% 黏粒含量和微生物 N 是这种黄土高原沙质土壤中稳定碳积累的重要影响因素。依据室内培养试验,有学者^[39,55] 对微生物介导的土壤有机碳形成来源、稳定性进行了一些研究,其研究模式见图 1。

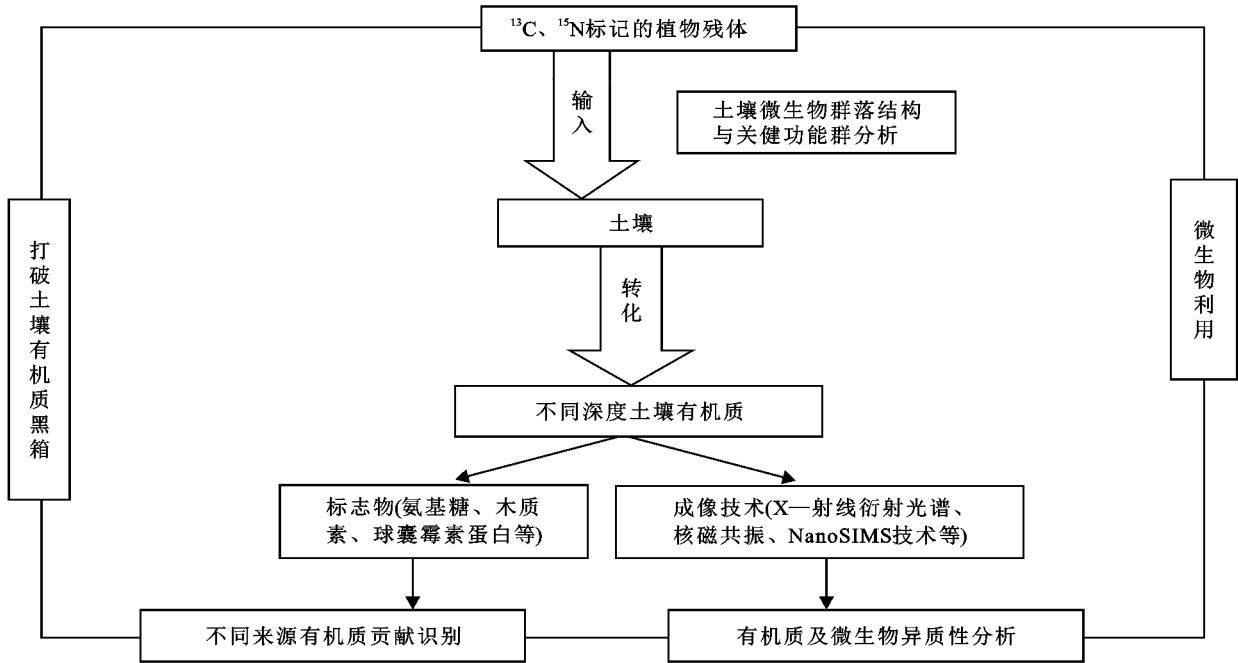


图 1 基于培养试验的土壤有机碳研究模式

培养试验过程中,涉及到的微生物残体碳的积累等关键观测指标计算公式^[55-56]为:

$$\begin{aligned} \text{微生物碳利用效率(CUE)} &= \frac{\text{微生物量}}{\text{微生物量} + \text{CO}_2} \\ \text{微生物碳积累效率(CAE)} &= \frac{\text{微生物量碳(MBC)}}{\text{微生物量碳(MBC)} + \text{CO}_2} \\ \text{微生物碳利用效率(CUE)} &= \frac{\text{PLFA}_{\text{激发}}}{\text{PLFA}_{\text{激发}} + \text{CO}_{2\text{激发}}} \times 100\% \\ \text{微生物碳积累效率(CAE)} &= \frac{\text{氨基糖}_{\text{激发}}}{\text{氨基糖}_{\text{激发}} + \text{CO}_{2\text{激发}}} \times 100\% \\ \text{微生物残体积累效率(NAE)} &= \frac{\text{微生物残体}}{\text{微生物残体} + \text{CO}_2} \end{aligned}$$

基于图 1 中的研究模式,Zhu 等^[55] 在草地和森林生态系统中都进行了相关研究,结果表明,高寒草甸的增温和干旱控制试验通过增加底层土壤氮限制,降低了 CUE,从而降低了微生物“碳泵”效率;亚热带森林样地中,植物途径(植物多样性提高)主导了 0—10 cm 表层土壤 SOC 的积累,而植物物种丰富度的提高促进了 30—40 cm 底层土壤中 DOM 和 N 素的有效性,进一步提高了氨基糖、矿物结合有机质等微生物组分有机碳含量,微生物途径主导了底层土壤 SOC 的积累^[56]。质地不同的土壤中,影响氨基糖积累的环境因子明显不同^[46]。井艳丽等^[57] 研究表明,

在落叶松纯林改造中引入赤杨能显著提升根际及非根际土壤氨基糖葡萄糖含量,并揭示全氮是驱动土壤中氨基糖发生变化的主要因子。

4 研究不足与展望

从前面的分析可以看出,国内外学者针对典型侵蚀区植被恢复过程中 SOC 的积累效益、机制、关键因素等方面做了大量的研究,取得了丰富的研究成果。但同时也清醒地认识到,由于土壤的黑箱特性、有机碳稳定影响因素的复杂性、微生物在有机碳存储作用上的两面性,侵蚀区植被恢复过程中 SOC 的稳定性和固持有效性研究还存在不少薄弱环节,建议重点围绕 4 个方面展开下一步的研究工作。

4.1 研究对象

前期围绕植被恢复对包括 SOC 含量在内的土壤质量的研究主要侧重于黄土高原等侵蚀区,对国内南方红壤丘陵区(花岗岩发育的红壤本身碳密度低)、西南石漠化区(水土流失严重)等其他侵蚀区的研究相对薄弱。这些侵蚀区开展了长时期的水土保持生态恢复工作,植被恢复进程强烈影响了土壤碳素积累机制、过程和效益。特别是南方红壤丘陵是我国仅次于黄土高原的第二大水土流失区。历史上,花岗岩发育的红壤大面积严重退化,碳密度低^[58]。20 世纪 80 年代以来,每平均 5 年 1 个周期,以水平竹节沟+乔灌木混交补植为主要手段的生态恢复与以坡改梯经果林开发为代表的小流域水土保持综合治理在该区域广泛推行,植被覆盖度显著增加,水土流失有效抑制,生态环境明显改善,是非常理想的研究区。

4.2 研究内容

总体上,目前侵蚀区植被恢复过程中研究较多的还是 SOC 及其不同组分的变化,而不同恢复阶段积累的土壤碳素活性如何,是否能够长久保存尚不清楚,特别是微生物介导的 SOC 及其稳定性对植被恢复的响应机制尚未充分挖掘。微生物群落驱动的土壤 MCP 功能的具体评估需要考虑其时间尺度效应,探究不同生态与时间尺度的微生物特征对土壤 MCP 的影响更有助于阐明土壤 MCP 储碳机制与环境响应策略^[59]。因此,以长时间序列水土保持综合治理背景下土壤微生物介导的 SOC 稳定状态和机制为切入点开展研究有助于科学评估侵蚀劣地植被恢复后土壤固持有机碳的质量、效率和时间以及水土保持碳汇功能,也可以加深水土保持与碳循环相互关系的认识。

4.3 研究手段

SOC 的形成与稳定是一个古老且复杂的科学问题。微生物是 SOC 循环过程最关键的驱动者。在复杂的土壤环境中,通过野外调查,借用 MCP 的理念与方法,比较侵蚀区不同植被恢复阶段或群落下微生物量与群落

结构、SOC 及其关键组分、氨基糖等指标的差异,可将植被恢复、微生物过程与 SOC 循环过程三者联系起来;通过盆栽试验,进行¹³C 脉冲标记,模拟侵蚀区不同植被恢复措施或阶段设置不同凋落物输入梯度或过程,进行土壤培养,测定微生物群落结构、氨基糖和碳矿化等指标的变化,监测 MGR、CUE 和 MTR 等指标,可以量化凋落物输入的激发效应和续埋效应,揭示 MCP 机理。野外样地的调查与室内培养试验相结合,应该对验证和解析侵蚀区植被恢复过程中 MCP 调控的 SOC 稳定机制起到很好的作用。

4.4 研究土层

深层土壤(20—100 cm)所储存的 SOC 远超过表层土壤(0—20 cm),但目前关于 SOC 稳定性,包括 MRC 含量及其对 SOC 贡献的研究多数集中在土壤表层,土壤剖面 and 母质中的情况尚未得到充分挖掘^[53,60]。深层土壤中大部分微生物因受到能量限制而处于“碳饥饿”状态或休眠状态,从而使深层 SOC 对环境变化比表层 SOC 更敏感,目前零星的报道证实了这一点^[56,61-62],但总体上这方面研究较为鲜见。有研究^[43]表明,亚热带地区充沛的降雨和强烈的生物地球化学循环过程导致淋溶作用强烈,DOM 的淋溶迁移给深层土壤微生物带来大量的碳源和养分,可能会增加微生物生长和活性,促进 MCP 机制,因此加强南方红壤丘陵和西南石漠化等侵蚀区的相关研究显得更有可行性和必要性。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [2] Gong X, Liu Y Q, Li Q L. Sub-tropic degraded red soil restoration: Is soil organic carbon build-up limited by nutrients supply [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 4: 77-87.
- [3] Huang J Q, Li Z W, Nie X D, et al. Microbial responses to soil rewetting in erosional and depositional environments in relation to the organic carbon dynamics [J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 256-264.
- [4] Zhang H L, Deng Q, Hui D F. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 441: 1-8.
- [5] Xiao S S, Zhang J, Duan J, et al. Soil organic carbon sequestration and active carbon component changes following different vegetation restoration ages on severely eroded red soils in subtropical China [J]. *Forests*, 2020, 11: e1304.
- [6] Coban O, de Deyn G B, van Derploeg M, et al. Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded

- lands [J]. Science, 2022, 375: e6584.
- [7] Liang C, Cheng G, Wixon D L, et al. An Absorbing Markov Chain approach to understanding the microbial role in soil carbon stabilization [J]. Biogeochemistry, 2011, 106: 303-309.
- [8] Liang C, Schimeil J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. Nature Microbiology, 2017, 2: e17105.
- [9] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(5): 680-695.
- [10] Larionova B A A, Rozanova L N, Yevdokmov I V. Land-use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia's South Taiga zone [J]. Tellus, 2003, 55(2): 331-337.
- [11] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 15-22.
- [12] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013, 3: e2846.
- [13] Jin Z, Dong Y S, Wang Y Q, et al. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 485/486: 615-623.
- [14] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks-a meta analysis [J]. Global Change Biology, 2015, 17(4): 1658-1670.
- [15] Wang J, Wang G X, Hu Z Y. Short-term effect of nitrogen addition on microbial and root respiration in an alpine spruce ecosystem [J]. International Journal Bioclimatology, 2017, 21(1): 145-159.
- [16] Martin P A, Newton A C, Bullock J M. Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2014, 281: e20140303.
- [17] Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region [J]. PNAS, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [18] 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等. 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 [J]. 生态学报, 2013, 33(10): 2964-2973.
- [19] Dou X L, Deng Q, Li M. Reforestation of *Pinus massoniana* alters soil organic carbon and nitrogen dynamics in eroded soil in South China [J]. Ecological Engineering, 2013, 2: 154-160.
- [20] Laganier J M, Angers D A, Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 439-453.
- [21] Albrecht A, Kandji S T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 99(1/3): 15-27.
- [22] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 37-44.
- [23] 肖胜生, 汤崇军, 王凌云, 等. 自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移 [J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 874-884.
- [24] Jackson R B, Jay L B, Esteban G J, et al. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands [J]. Nature, 2002, 418: 623-626.
- [25] Li D J, Wen L, Jiang S, et al. Responses of soil nutrients and microbial communities to three restoration strategies in a karst area, southwest China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 456-464.
- [26] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, et al. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [27] Xiong X, Zhang H L, Deng Q, et al. Soil organic carbon turnover following forest restoration in south China: Evidence from stable carbon isotopes [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 462: e117988.
- [28] Chen F L, Zheng H, Zhang K, et al. Changes in soil microbial community structure and metabolic activity following conversion from native *Pinus massoniana* plantations to exotic *Eucalyptus plantations* [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 291: 65-72.
- [29] Van-Groenigen K J, Six J, Harris D, et al. Elevated CO₂ does not favor a fungal decomposition pathway [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 2168-2172.
- [30] 邓翠, 吕茂奎, 曾敏, 等. 红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤有机碳组分变化 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 178-183.
- [31] Poeplau C, Don A, Vesterdal L, et al. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach [J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2415-2427.
- [32] Liu H F, Xu H W, Wu Y, et al. Effects of natural vegetation restoration on dissolved organic matter (DOM) biodegradability and its temperature sensitivity [J]. Water Research, 2021, 191: e116792.
- [33] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [34] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. Nature, 2015, 528: 60-68.
- [35] Li D, Schdel 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: 24-30.
- [36] Mc Carthy J F, Ilavsky J, Jastrow J D, et al. Protection of organic carbon in soil microaggregates via restructuring of aggregate porosity and filling of pores with accumulating organic matter [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 4725-4744.
- [37] 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.
- [38] Kallenbach C M, Frey S D, Grandy A S. Direct evidence for microbial derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: e13630.
- [39] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540.
- [40] Zhou G, Xu S, Ciais P, et al. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation [J]. *National Science Review*, 2019, 6: 746-757.
- [41] Lü M K, Xie J S, Wang C, et al. Forest conversion stimulated deep soil C losses and decreased C recalcitrance through priming effect in subtropical China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(7): 857-867.
- [42] Hua F Y, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches [J]. *Science*, 2022, 376(6595): 839-844.
- [43] Chen Y, Chen G, Robinson D, et al. Large amounts of easily decomposable carbon stored in subtropical forest subsoil is associated with r-strategy-dominated soil microbes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 233-242.
- [44] Ludwig M, Achtenhagen J, Miltner A, et al. Microbial contribution to SOM quantity and quality in density fractions of temperate arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 311-322.
- [45] Shao S, Zhao Y, Zhang W, et al. Linkage of microbial residue dynamics with soil organic carbon accumulation during subtropical forest succession [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 114: 114-120.
- [46] 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: e3480.
- [47] Liang C, Amelung W, Lehmann J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25: 3578-3590.
- [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: e108422.
- [49] Wang B R, Huang Y M, Li N, et al. Initial soil formation by biocrusts: Nitrogen demand and clay protection control microbial necromass accrual and recycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 167: e108607.
- [50] Saskia K, Adrienne B K, Angreas J W, et al. Stable isotopes reveal that fungal residues contribute more to mineral-associated organic matter pools than plant residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 3: e108634.
- [51] Matthew E C, Kevin M G, Katilyn V B, et al. Fast-decaying plant litter enhances soil carbon in temperate forests but not through microbial physiological traits [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: e1229.
- [52] 陈崇瑛, 刘再华. 喀斯特地表水生生态系统生物碳泵的碳汇和水环境改善效应[J]. *科学通报*, 2017, 62(30): 3440-3450.
- [53] 于颖超, 张心昱, 戴晓琴, 等. 亚热带红壤区森林土壤剖面微生物残体碳分布及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 1-10.
- [54] Craig M E, Geyer K M, Beidler K V, et al. Fast-decaying plant litter enhances soil carbon in temperate forests but not through microbial physiological traits [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: e1229.
- [55] Zhu E X, Cao Z J, Jia J, et al. Inactive and inefficient: Warming and drought effect on microbial carbon processing in alpine grassland at depth [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27: 2241-2253.
- [56] Jia Y F, Zhai G Q, Zhu S S, et al. Plant and microbial pathways driving plant diversity effects on soil carbon accumulation in subtropical forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 161: e108375.
- [57] 井艳丽, 刘世荣, 殷有, 等. 赤杨对辽东落叶松人工林土壤氨基糖积累的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2838-2845.
- [58] Xie J S, Guo J F, Yang Z J. Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 53-59.
- [59] Geyer K, Schencker J, Grandy A S, et al. Assessing microbial residues in soil as a potential carbon sink and moderator of carbon use efficiency [J]. *Bio-geochemistry*, 2020, 151: 237-249.
- [60] Rumpel C, Kgel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle [J]. *Plant and Soil*, 2011, 338: 143-158.
- [61] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply [J]. *Nature*, 2007, 450: 277-280.
- [62] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 145-151.