

董凌勃, 邓蕾, 吕倾子, 韩柯宇, 上官周平. 植被恢复对土壤铁结合态有机碳的影响机制研究进展[J]. 土壤学报, 2026,
DONG Lingbo, DENG Lei, LÜ Qingzi, HAN Keyu, SHANGGUAN Zhouping. Research Progress on the Mechanisms of Vegetation
Restoration Affecting Soil Fe-Bound Organic Carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

植被恢复对土壤铁结合态有机碳的影响机制研究进展*

董凌勃^{1, 2, 3, 4}, 邓蕾^{2, 3, 5†}, 吕倾子^{2, 5}, 韩柯宇^{2, 3}, 上官周平^{2, 3, 5}

(1. 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019; 2. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西杨凌 712100; 4. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古根河 022350; 5. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 铁结合态有机碳(Fe-OC)是土壤有机碳(SOC)库的重要组成部分, 因其较高的占比和相对稳定性在土壤碳循环中发挥着关键作用。植被恢复作为提升土壤碳储量、缓解气候变化的有效策略, 其对土壤碳库的影响及驱动机制备受关注。本文综述了近年来关于植被恢复对土壤 Fe-OC 影响的研究, 系统梳理了植被恢复下铁氧化物与 SOC 的结合方式, 阐明了植被恢复下 Fe-OC 动态变化规律及其关键影响因素, 深入剖析了植被恢复对 Fe-OC 形成、积累和稳定的影响机制。同时, 总结了当前研究存在的问题与不足, 提出未来研究需拓展多气候研究区覆盖范围, 精准量化植物与微生物源贡献比例, 解析土壤微生物功能在 Fe-OC 形成与稳定中的作用, 综合纳入全球变化复杂因子模拟复合情景下土壤 Fe-OC 的动态变化, 系统揭示植被恢复调控 Fe-OC 动态的内在机制。本文有助于深化对植被恢复调控土壤碳循环过程的全面理解, 为制定应对气候变化的土壤碳汇管理策略提供重要的科学依据。

关键词: 植被恢复; 铁结合态有机碳; 土壤有机碳; 铁氧化物; 土壤微生物; 土壤 pH

中图分类号: S157; S718 文献标志码: A

Research Progress on the Mechanisms of Vegetation Restoration Affecting Soil Fe-Bound Organic Carbon

DONG Lingbo^{1, 2, 3, 4}, DENG Lei^{2, 3, 5†}, LÜ Qingzi^{2, 5}, HAN Keyu^{2, 3}, SHANGGUAN Zhouping^{2, 3, 5}

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation) Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. National Field Scientific Observation and Research Station of Greater Khingan Forest Ecosystem, Genhe, Inner Mongolia 022350, China; 5. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil iron-bound organic carbon (Fe-OC) is a quantitatively important and exceptionally stable fraction of the soil organic carbon (SOC) pool. Owing to its relatively high proportion and stability, it plays a key role in mediating the soil carbon cycle and sustaining long-term carbon sequestration. As an effective strategy for enhancing soil carbon sequestration capacity and alleviating the adverse impacts of climate change, vegetation restoration has garnered increasing attention regarding its

*国家自然科学基金项目(42277471)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42277471)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 董凌勃(1997—), 男, 陕西眉县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土壤固碳过程与机制研究。E-mail: dlb1004757659@163.com
收稿日期: 2025-09-22; 收到修改稿日期: 2026-02-03; 网络首发日期(www.cnki.net):

impacts on soil carbon dynamics and the underlying mechanisms. This review systematically synthesized recent research findings pertaining to the influences of vegetation restoration on soil Fe-OC. First, it sorted out the basic characteristics of Fe-OC, clarifying that Fe-OC binds to iron oxides primarily through adsorption and coprecipitation processes, and meanwhile identified two major formation pathways: microbial-mediated transformation of organic substrates and direct adsorption of plant-derived dissolved organic matter. On this basis, it elucidated the dynamic patterns of Fe-OC under vegetation restoration, its changes are regulated by soil texture and vegetation type (Fe-OC tends to accumulate in coarse-textured soils but decreases in fine-textured soils, and forestland exhibits a stronger Fe-OC accumulation effect than grassland and shrubland). Further, it analyzed key influencing factors, including the composition and molecular properties of SOC, the speciation and reactivity of iron oxides, as well as soil microbial traits, and interpreted the coupled regulatory mechanisms through which vegetation restoration governs the formation, accumulation, and stability of Fe-OC from physical processes (soil aggregate formation and soil moisture regime regulation), chemical reactions (shifts in SOC molecular structure and iron valence transformation), and biological activities (microbial metabolic processes and organic acid exudation). Also, this review identified the existing knowledge gaps and limitations in current research, and proposed that future studies should expand the coverage of diverse climatic zones, accurately quantify the relative contribution ratios of plant- and microbe-derived carbon to Fe-OC pools, strengthen the analysis of the role of soil microbial functions in the formation and stabilization of Fe-OC, and integrate the complex drivers of global change to simulate Fe-OC dynamics under multifactorial scenarios. Only through such comprehensive and interdisciplinary approaches can the intricate mechanistic responses of Fe-OC to vegetation restoration be fully unveiled. This review delineates prospective research directions for the study of soil Fe-OC dynamics under vegetation restoration, facilitates a more comprehensive understanding of the impacts of vegetation restoration on the soil carbon cycle, and provides an important scientific basis for formulating soil carbon sink management strategies to address global climate change.

Key words: Vegetation restoration; Iron-bound organic carbon; Soil organic carbon; Iron oxides; Soil microorganisms; Soil pH

土壤是陆地生态系统中最大的碳库, 在 0~1 m 深度储存了约 1500 Pg 有机碳 (SOC), 其动态变化直接调控大气二氧化碳 (CO₂) 浓度波动, 进而影响全球气候变化^[1-2]。SOC 具有独特的物理化学稳定性与生物代谢周转特性, 在植物生长、地气交换以及气候调节等诸多生态过程中发挥着关键作用^[3-4]。尤其在当前气候变化和土地利用变化复合影响背景下, 亟需提升 SOC 储量并保持其稳定性, 因此, 阐明 SOC 的动态过程及其驱动机制对科学评估陆地生态系统碳循环具有重要意义^[2, 5-6]。

铁 (Fe) 氧化物对 SOC 的矿物保护作用是维持 SOC 长期稳定性的关键机制之一^[7-8]。Fe 氧化物通过吸附或共沉淀作用与 SOC 紧密结合, 形成稳定性相对较高的铁结合态有机碳 (Fe-OC), 这种结合作用能有效降低 SOC 的生物有效性, 延长其在土壤中的存留时间, 从而促进 SOC 的长期积累^[9-11]。在陆地生态系统中, 约 33% 的 SOC 以 Fe-OC 的形式存在, 其动态变化显著调控 SOC 的稳定性与碳循环过程^[8]。因此, 阐明土壤 Fe-OC 的动态变化机制, 是揭示 SOC 长期稳定性的核心科学问题。

植被恢复是当前改善生态环境、提升土壤碳固存、缓解全球气候变化最有效的途径之一^[6, 12-13]。在过去数十年间, 中国陆地生态系统的年均碳汇能力约为 0.2~0.25 Pg, 植被恢复是该碳汇形成的核心驱动因素^[14]。尽管 Fe 氧化物与 SOC 结合会增强 SOC 的稳定性, 但在植被恢复过程中, SOC 组分、Fe 氧化物形态及其他环境因子的协同演变, 均对 Fe-OC 的动态产生显著影响^[6, 15]。因此, 有必要阐明植被恢复驱动下的 Fe-OC 动态轨迹与机制, 这对于深化土壤碳循环复杂性的理解、精准评估植被恢复的碳固存效应具有重要意义。

本文综述了近年来关于植被恢复过程中土壤 Fe-OC 动态及其驱动机制的研究进展, 系统梳理了植被恢复下 Fe-OC 动态特征与关键影响因素, 深入剖析了植被恢复对 Fe-OC 形成、积累和稳定性的核心作用机制。同时, 总结了当前研究存在的问题与不足, 并提出了未来需重点加强的研究方向, 旨在为理解植被恢复对土壤碳循环的影响机制、制定应对气候变化的土壤管理策略提供理论依据与

科学支撑。

1 土壤铁结合态有机碳在地球化学循环中的作用

1.1 土壤铁结合态有机碳的稳定性与功能

土壤 Fe-OC 是指土壤中与 Fe 氧化物紧密结合的 SOC 组分,通常采用连二亚硫酸钠-柠檬酸三钠-碳酸氢钠 (DCB) 提取法进行测定^[7, 16]。相较于游离态 SOC, Fe-OC 的生物有效性低、化学稳定性高,其在土壤中的停留时间显著长于土壤碳库的平均水平^[16-17]。室内培养试验已为此提供直接证据:向土壤中添加 Fe (II) 可显著促进 Fe-OC 的形成,使 SOC 矿化量降低至未添加 Fe (II) 对照组的 87%,直接证实了 Fe-OC 对 SOC 矿化的抑制效应^[9]。作为 SOC 的重要组成部分,Fe-OC 含量的增加不仅能直接提升土壤碳储量,还可作为胶结剂促进土壤团聚体的形成,为 SOC 提供物理保护,进一步促进土壤碳积累^[8, 18]。Fe-OC 还会通过影响土壤养分的转化效率与可利用性,影响微生物活性及群落组成,间接调控 SOC 的固存^[9, 16, 18]。

1.2 铁氧化物与有机碳的结合方式

Fe 氧化物与 SOC 的结合主要通过吸附和共沉淀两种方式实现^[7, 19-20]。其中,吸附作用是指 SOC 与 Fe 氧化物表面的基团发生配体交换,而共沉淀作用则涉及 pH 变化和氧化还原电位改变,形成非溶解性的 Fe (III) -有机配体复合物^[7, 10, 19]。在吸附过程中,活性 Fe 氧化物与其能固持的最大 SOC 量的比值(碳铁摩尔比)最高为 1,而在共沉淀过程中,碳铁摩尔比可达 6~10,此时, SOC 不仅会被吸附在 Fe 氧化物表面,还会进入矿物内部或堵塞矿物表面的反应位点^[7, 19]。因此,碳铁摩尔比可有效反映土壤中 Fe 氧化物与 SOC 的结合形式。当碳铁摩尔比小于 1 时,表明 Fe 氧化物与 SOC 的结合以吸附作用为主;当比值大于等于 6 时,以共沉淀作用为主;介于 1~6 时,表明两种结合方式同时存在^[7, 10]。此外,与吸附作用相比,共沉淀作用形成的 Fe-OC 的稳定性更强,在相同碳铁比率条件下,共沉淀态的 Fe-OC 在解吸过程中释放的 SOC 量显著低于吸附态 SOC^[19]。

1.3 土壤铁结合态有机碳的主要形成途径

土壤 Fe-OC 的形成主要通过两种途径:(1) 溶解性有机质和植物根系沉积物直接被 Fe 氧化物吸附^[18, 21-22]; (2) 溶解性有机质与植物残体经过微生物转化后形成的代谢产物与 Fe 氧化物结合^[18, 23]。当前多数研究认为, Fe 氧化物倾向于保护经过微生物修饰的碳组分,并明确指出微生物源碳是 Fe-OC 的主要来源^[15, 24]。例如,植物残体的输入显著增加了 Fe-OC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,表明 Fe-OC 中的微生物源碳比例增加,光谱分析结果也发现, Fe 氧化物与微生物衍生有机物结合得更为紧密^[24]。然而,土壤中植物源溶解性有机物与根沉积物可通过 Fe 氧化物的吸附作用直接形成 Fe-OC,该过程无需经过微生物体内周转与体外修饰,具有更高的结合效率^[21-22, 25]。因此,植物源溶解性有机物对 Fe-OC 形成的贡献同样不可忽视。尽管目前已明确微生物源碳是 Fe-OC 的主要来源,植物源溶解性有机物也是其重要组成部分,但目前尚无针对性研究量化两者对 Fe-OC 的具体贡献比例,该科学缺口亟待填补。

2 植被恢复下土壤铁结合态有机碳的演变特征

2.1 植被恢复对土壤铁结合态有机碳的影响

植被恢复后土壤 Fe-OC 的变化趋势并非单向增加或减少,而是受土壤质地的调控。在粗质地土壤中,植被恢复通常会促进 Fe-OC 积累;而在细质地土壤中,则倾向于导致 Fe-OC 降低,且随着土壤砂粒含量升高,植被恢复对 Fe-OC 的积累效率逐渐增强^[15, 26]。例如,植被恢复后黑垆土(砂粒含量约 10% (激光粒度仪测定结果,下同))地区的 Fe-OC 含量下降了 15%;黄绵土(砂粒含量约 25%)地区增加了 67%;沙土(砂粒含量约 95%)地区则增加了 650%。该差异主要是因为细质地土壤中,植被恢复造成了更多活性 Fe 氧化物的损失,且草酸对 Fe-OC 的破坏作用更强,从而削弱了其稳

定性与积累能力^[15]。

植被恢复后 Fe-OC 对 SOC 贡献的变化趋势与 Fe-OC 含量类似,表现出随着土壤砂粒含量增加而积累效率不断增加的趋势。具体而言,植被恢复后黑垆土地区 Fe-OC 占比降低了 38%,黄绵土地区无显著变化,而沙土地区增加了 192%^[26]。此外,碳铁摩尔比的变化趋势与 Fe-OC 含量基本一致,原因在于游离氧化铁(Fe_d)受植被恢复扰动有限,变化幅度远小于 Fe-OC,而碳铁摩尔比是通过 Fe-OC 与 Fe_d 计算获得的,因此,其变化趋势与 Fe-OC 含量基本一致^[7,26]。植被恢复对 Fe-OC 的影响还具有显著的垂直分异特征,其影响强度沿剖面逐渐减弱^[26-27]。例如,植被恢复后 0~20 cm 土层的 Fe-OC 增加了 67%,而 20~60 cm 土层的 Fe-OC 无显著变化,这主要是因为凋落物与细根输入集中在表层,对表层土壤理化性质和微生物活性的影响更为显著,从而使表层 Fe-OC 对植被恢复的响应更敏感^[26]。

2.2 植被恢复类型对土壤铁结合态有机碳的影响

植被恢复对土壤 Fe-OC 的影响也会因植被类型不同而存在显著差异。草地、灌木和林地是最典型的三种植被恢复类型,已有研究证实三者均能显著提高 Fe-OC 含量,但林地对 Fe-OC 的积累效应最强,草地和灌木的积累作用相对较弱^[15,26]。这种积累效应的分异主要归因于不同植被类型在物质输入种类与数量上的差异:林地通过输入更多柠檬酸,促进溶解性有机碳(DOC)和微生物量碳显著积累,为 Fe-OC 的形成提供了有利条件;而草地的草本植物会释放更多的草酸,对 Fe-OC 的形成具有一定抑制效应^[15,28-29]。此外,林地对 Fe-OC 占比的提升能力也高于灌木和草地^[26]。这主要是因为林地拥有更高的凋落物生物量,其分解过程中产生的有机物质单分子或片段更易与 Fe 氧化物结合;同时林地的 DOC 占比相对较高,土壤 pH 更接近中性,这些条件共同促进了土壤 Fe-OC 占比的增加^[18,25-26]。

2.3 植被恢复对土壤铁结合态有机碳来源的影响

植物源溶解性有机物、根沉积物以及微生物代谢产物,均是 Fe-OC 的重要组成部分^[18,25]。已有研究普遍认为微生物源碳是 Fe-OC 的主要来源^[24,30]。然而,植被恢复会向土壤输入大量植物源溶解性有机物与根沉积物,这些组分与 Fe 氧化物结合效率更高,可能改变 Fe-OC 的来源组成^[15,21,31]。鉴于微生物源碳与植物源碳的稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异,通过分析 Fe-OC 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的动态变化即可明确植被恢复对其来源的影响^[24,32]。若 Fe-OC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随植被恢复降低,则表明植物源碳对 Fe-OC 的贡献增加;反之,则意味着微生物源碳的贡献提升。基于多种土壤类型的观测结果发现,植被恢复后 Fe-OC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著升高,表明在植被恢复过程中微生物源碳是 Fe-OC 的主要来源^[15]。其核心原因在于,SOC 的积累以微生物源碳为主要形式;尽管植物源溶解性有机物和根沉积物与 Fe 氧化物的亲和性更强,但其绝对输入量远低于土壤中已积累的微生物源碳,因此,未能改变微生物源碳对 Fe-OC 的主导贡献^[15,21,33]。然而,上述结论主要基于暖温带样带的研究数据,现有研究对亚热带、温带、寒温带等其他气候区的覆盖仍存在明显不足,导致当前结论的区域普适性受到限制。

3 植被恢复下土壤铁结合态有机碳动态的影响因素

Fe-OC 虽被视为土壤碳库中稳定性较高的关键组分,但在植被恢复过程中,SOC 及其组分特征、Fe 氧化物形态、微生物活性、有机酸含量、土壤 pH 条件及土壤水分状况等关键因子的变化,会调控 Fe-OC 的积累与周转^[15,18,26]。

3.1 有机碳及其组分

SOC 的数量和形态是调控 Fe-OC 动态的关键因素,而植被恢复会通过植物残体与根沉积碳输入、微生物代谢驱动及矿物保护等途径,提升 SOC 含量并重塑其形态^[6,15,18]。首先,植被恢复带来的大量 SOC,为 Fe-OC 的形成提供了丰富的潜在碳源,其中,低分子量溶解性有机物与微生物源碳是 Fe-OC 的主要前体,可直接促进 Fe-OC 积累^[18,26,34]。一项野外观测研究发现,尽管植被恢复降低

了 Fe 氧化物总量, 但 Fe-OC 含量却显著增加, 其核心原因在于植被恢复增加了 Fe 氧化物可结合的碳源, 提升了单位 Fe 氧化物所结合的 SOC 量, 植被恢复后碳铁摩尔比的升高即为直接证据^[26]。此外, 农田、草地、灌木和林地生态系统的碳铁摩尔比普遍低于 6, 表明当前 Fe 氧化物表面仍存在大量未被 SOC 占据的活性位点, Fe 氧化物的固碳潜力远未饱和^[8]。因此, SOC 含量的提升有望促进 Fe-OC 的进一步积累。

其次, 植被恢复通过重塑 SOC 的形态组成与分子特征, 调控 Fe 氧化物与 SOC 的结合效率, 进而影响 Fe-OC 的动态变化^[15, 18, 35]。在该过程中, 植被恢复一方面输入大量植物源溶解性有机物, 另一方面, 通过增强微生物活性、促进微生物源碳的合成, 二者共同改变了 SOC 的组成^[28, 33]。其中, 植物分泌的低分子量化合物和溶解性有机物可被 Fe 氧化物直接吸附形成 Fe-OC^[15, 18, 21]。但土壤中绝大部分 SOC 需经微生物体内转化或体外修饰后, 才能与 Fe 氧化物高效结合, 形成 Fe-OC^[18, 36]。多项研究已证实, Fe 氧化物对溶解性有机物的直接吸附作用, 以及植被恢复后 Fe-OC 的增量碳主要来源于微生物源碳, 这直接印证了 SOC 形态在 Fe-OC 形成中的关键作用^[15, 24]。此外, SOC 的分子结构也会影响其与 Fe 氧化物的结合效率, 其中, 具有芳香结构的 SOC 与 Fe 氧化物的亲和力更高^[15, 35, 37]。最新研究发现, 植被恢复过程中芳香结构碳的积累, 正是 Fe-OC 显著提升的重要驱动因素^[15]。室内控制实验进一步发现, 当 Fe 氧化物与溶解性有机物发生共沉淀时, 高芳香特性的溶解性有机质会优先与 Fe 结合^[35, 37]。上述研究共同为 SOC 形态与分子特征调控 Fe-OC 动态的机制提供了直接实证支持。

3.2 铁氧化物

铁氧化物的丰度与形态同样是驱动 Fe-OC 动态变化的关键因子^[16, 18, 26]。充足的 Fe 氧化物能为 SOC 提供大量吸附与共沉淀的结合位点, 促进 Fe-OC 的积累^[8, 26, 34]。以湿地生态系统为例, 其碳铁摩尔比常高于 6, 表明 Fe 氧化物的反应点已趋近饱和, 此时 Fe 氧化物丰度成为限制 Fe-OC 进一步积累的关键因子^[8, 26]。Fe 氧化物的形态则通过影响其与 SOC 的结合效率, 调控 Fe-OC 的动态^[15, 18-19]。土壤中 Fe 氧化物主要以 Fe_d、无定形铁 (Fe_o) 和络合铁 (Fe_p) 这三种形态存在, 其中 Fe_o 和 Fe_p 属于活性 Fe 组分, 具有比表面积大、活性高的特点, 相较 Fe_d 可结合更多 SOC, 对 SOC 的稳定和固持贡献更为显著^[15, 18, 38]。此外, Fe 价态差异也显著影响 Fe 氧化物的固碳能力: Fe (III) 相较于 Fe (II) 具有更高比表面积、更多正电荷及更强的 SOC 亲和力, 可通过吸附与共沉淀作用固定更多的 SOC^[16, 18-19]。因此, Fe (II) 的氧化通常会促进 Fe-OC 的积累, 而 Fe (III) 的还原则会降低土壤 Fe-OC 含量^[16, 39]。植被恢复会通过外源有机质输入与土壤结构重塑, 显著改变 Fe 氧化物的丰度与形态, 进而调控 Fe-OC 的动态^[15, 18]。最新的一项研究为此提供了实证, 其结果显示, 植被恢复通过输入新鲜有机质驱动 Fe (III) 还原, 同时通过增加土壤孔隙度加剧活性 Fe 氧化物淋溶损失, 最终导致 Fe-OC 含量下降^[15]。

3.3 微生物特征

植被恢复还通过调控微生物生物量、代谢活性及群落组成, 间接驱动 Fe-OC 动态变化^[6, 15, 40]。微生物在生长和繁殖过程中会产生大量经体内周转和体外修饰的代谢产物, 即微生物源碳^[41]。这些产物富含多种官能团, 对 Fe 氧化物亲和力高, 能够通过吸附或共沉淀作用与 Fe 氧化物紧密结合, 促进 Fe-OC 的形成^[23, 25]。随着植被恢复, 植物源有机物输入量增加, 土壤结构与 pH 条件得到改善, 这会显著提升微生物生物量与代谢活性, 进而提高微生物代谢产物的产量, 促进 Fe-OC 的积累^[6, 15, 24]。此外, 微生物代谢过程中分泌的有机酸还会影响 Fe 氧化物有效性, 进一步调控 Fe-OC 的形成与稳定^[24, 42]。

土壤中部分微生物可直接参与 Fe 的氧化还原反应, 进而调控 Fe-OC 的动态^[43-44]。例如, 好氧环境下的 Fe (II) 氧化细菌 (如 *Mariprofundus*、*Leptothrix* 和 *Sideroxydans*), 能够利用氧气和水将 Fe (II) 氧化为 Fe(III) 氢氧化物^[45-46]。另有部分微生物 (如 *Rhodospseudomonas palustris* TIE-1、*Chlorobium ferrooxidans* 和 *Thiodictyon* sp. F4) 甚至可以在缺氧条件下利用光能将 Fe (II) 氧化为低结晶度的 Fe (III) 氧化物^[18, 47]。与此同时, 土壤中还广泛存在 *Geobacter*、*Shewanella*、*Clostridium*、*Desulfotribrio*

和 *Spirochaetes* 等 Fe (III) 还原菌, 这些微生物以 Fe (III) 作为最终电子受体, 以 SOC 为氧化电子供体, 通过呼吸作用实现 Fe 的还原^[47-48]。因此, 植被恢复可通过重塑微生物群落组成、改变铁氧化物形态来调控 Fe-OC 动态。然而, 在植被恢复过程中, 这些 Fe 氧化还原菌的群落结构演变规律及其代谢功能在 Fe-OC 动态调控中的具体作用仍不明确, 导致对植被恢复下 Fe-OC 变化的微生物学调控机制理解不足。

3.4 土壤有机酸

在植被恢复过程中, 植物为高效获取土壤养分, 会分泌大量有机酸, 重塑根际土壤的有机酸组成^[15]。这些有机酸不仅可通过调节 Fe 矿物的有效性影响 Fe-OC 的动态, 还可通过调控微生物活性及其代谢产物的产生, 进一步影响 Fe-OC 的形成^[29, 49, 50]。例如, 有机酸中的草酸可溶解 Fe 矿物, 破坏 Fe-OC 复合体, 抑制 Fe-OC 的积累^[49-51]。一项草酸添加实验研究表明, 草酸的引入会促使 SOC 从 Fe 矿物的保护状态中释放, 降低 Fe-有机复合物的含量^[49, 52]。与之相反, 柠檬酸则能增强 Fe 矿物有效性, 强化 Fe 矿物与 SOC 的结合, 促进 Fe-OC 的形成^[29]。此外, 这些有机酸作为微生物可利用的优质碳源, 能够吸引微生物聚集, 刺激其代谢活性与生物量积累, 促进微生物代谢物的生产, 进而促进 Fe-OC 的形成^[15, 31, 50]。因此, 植被恢复引起土壤有机酸的变化对 Fe-OC 具有促进形成和抑制分解的双重作用^[15]。

3.5 土壤 pH

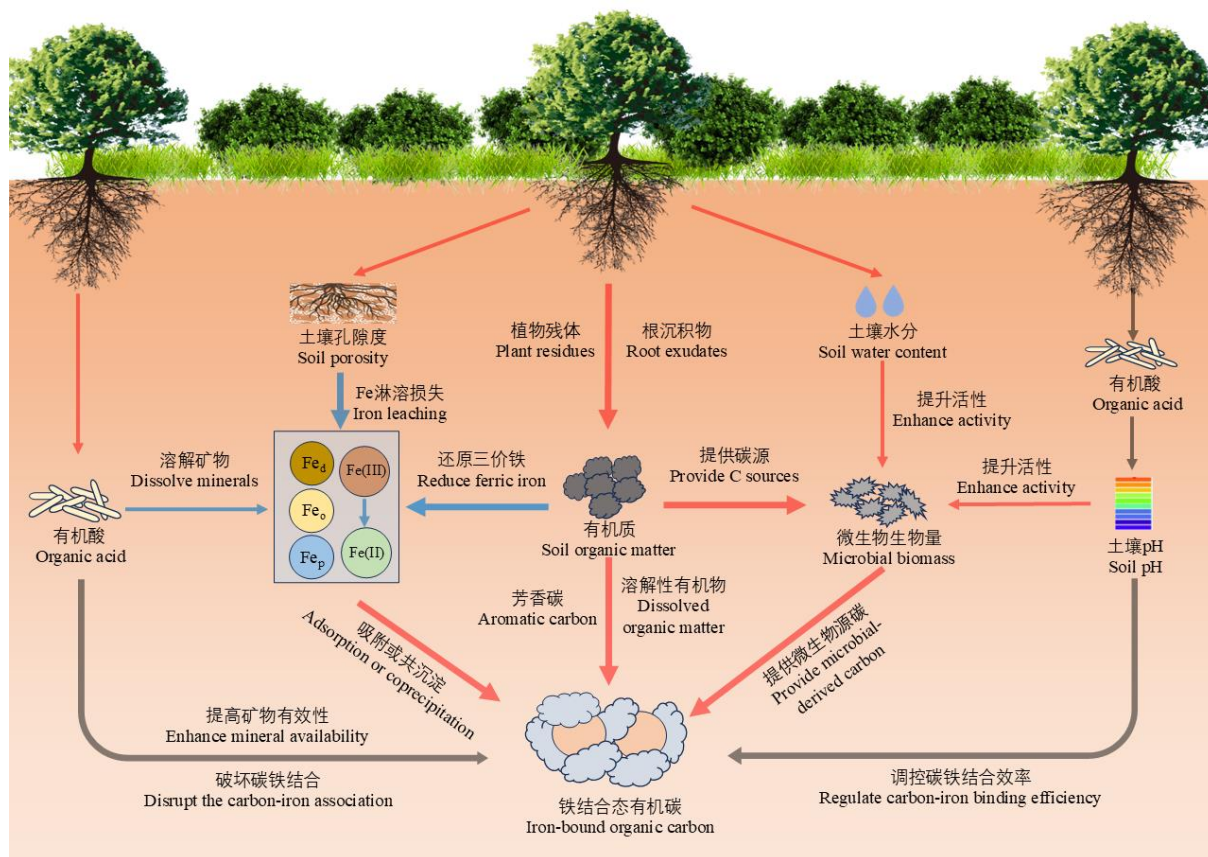
土壤 pH 的演变是植被恢复调控 Fe-OC 动态的另一关键因素^[18, 34, 53]。首先, pH 下降可显著提升 Fe 氧化物的溶解度与反应活性, 为 Fe-OC 的形成提供有利条件^[18, 54]。其次, pH 降低会导致 Fe 矿物表面质子化, 增加其正电荷密度, 进而促进 Fe 氧化物通过吸附或共沉淀作用固定更多 SOC^[18, 53]。已有研究表明, 土壤碳铁摩尔比随 pH 降低而升高, 该现象直接佐证了低 pH 环境会提高 Fe 氧化物对 SOC 的固持效率^[53]。此外, pH 还可通过调节微生物群落结构与活性, 影响 SOC 及其组分的动态变化, 间接驱动 Fe-OC 的周转^[18, 28, 55]。具体而言, 适宜的 pH 变化通常会提高微生物的活性, 促进其代谢产物的生成, 同时推动 SOC 及其组分的积累, 进而为 Fe-OC 的形成与稳定提供支撑^[28, 33]。在植被恢复过程中, 植物会通过养分吸收与根系分泌物释放等生理过程, 主动调节根际阴阳离子平衡, 重塑土壤 pH 微环境, 实现对 Fe-OC 动态的精准生物调控^[56-57]。如近期一项研究^[15]指出, 植被恢复显著促进了 Fe-OC 的积累, 而土壤 pH 的降低是其主要驱动因素。

3.6 土壤水分

植被恢复通过冠层截留、延长水分入渗时间及重塑土壤结构等途径, 显著改变土壤水分状况, 进而调控 Fe-OC 的形成与稳定^[13, 16, 39]。在大部分区域, 植被恢复可充分发挥其水源涵养功能, 显著提高土壤水分含量^[13, 15]。一般而言, 土壤水分增加会提升微生物的活性, 加速植物残体的分解, 促进微生物代谢产物和残体的产生, 从而有利于 Fe-OC 的积累^[13, 15, 33]。然而, 在水分含量较高的土壤环境中, 土壤水分持续升高会降低土壤氧气有效性, 不仅会抑制微生物活性、减缓微生物代谢产物和残体的产生, 还会促使部分 Fe (III) 被还原为固碳能力较弱的 Fe (II), 进而对 Fe-OC 的积累产生负面效应^[15, 26]。相反, 当此类区域土壤水分降低时, 氧气有效性提高, Fe (II) 可重新被氧化为 Fe (III), Fe-OC 的形成随之增强^[16, 39]。尽管植被恢复引发的水分变化对 Fe-OC 的影响已在区域尺度上得到验证, 但调控该过程正负效应转换的土壤水分阈值仍不明确, 亟需进一步研究予以量化界定。

4 植被恢复对土壤铁结合态有机碳的影响机制

植被恢复通过调控 SOC、Fe 氧化物、微生物活性、pH 及水分状况等关键土壤因子, 对 Fe-OC 的动态平衡产生重要影响, 这些影响既有促进 Fe-OC 积累的积极效应, 也存在导致其损耗的负面作用 (图 1)^[15, 58]。各因素之间相互交织、共同作用, 使得植被恢复对 Fe-OC 的调控效应在不同环境条件下表现出显著差异。就作用路径而言, 相关过程可从物理、化学和生物学三个方面进行概括。



注: Fe_d , 游离氧化铁; Fe_o , 无定形铁; Fe_p , 络合铁; $Fe(III)$, 三价铁; $Fe(II)$, 二价铁。红色线条表征促进 Fe-OC 积累的路径, 蓝色线条表征促进 Fe-OC 解体的路径, 黑色线条表征对 Fe-OC 存在正负双向影响的路径; 线条粗细反映路径的相对重要程度, 粗线代表核心途径, 细线代表次要途径。Note: Fe_d , free iron oxide; Fe_o , amorphous iron; Fe_p , complexed iron; $Fe(III)$, ferric iron; $Fe(II)$, ferrous iron.

The red lines represent pathways that promote Fe-OC accumulation, blue lines represent pathways that accelerate Fe-OC decomposition, and black lines represent pathways with both positive and negative effects on Fe-OC. The thickness of lines reflects the relative importance of pathways: thick lines indicate core pathways, while thin lines indicate secondary pathways.

图 1 植被恢复对土壤铁结合态有机碳 (Fe-OC) 的影响路径概念图

Fig 1. Conceptual diagram of the impact pathways of vegetation restoration on soil iron-bound organic carbon

4.1 植被恢复对土壤 Fe-OC 动态变化的物理驱动机制

植被恢复通过多重物理途径对 Fe-OC 的动态变化产生显著调控作用 (图 1)。首先, 植被恢复通过降低土壤容重而加剧 Fe 氧化物淋溶损失, 对 Fe-OC 的积累产生抑制效应。在植被恢复过程中, 植物输入的有机质与根系分泌物可与土壤黏粉粒结合形成团聚体结构, 显著降低土壤容重并提升孔隙度^[59-60]。而土壤孔隙度提升会拓宽水分在剖面中的运移通道, 加剧表层 Fe 氧化物淋溶损失, 减少可参与 Fe-OC 形成的 Fe 氧化物数量, 进而抑制表层 Fe-OC 的形成与积累^[26, 61]。此外, 植被恢复还会通过化学途径进一步放大该效应, 植物与微生物分泌的草酸等低分子量有机酸可溶解部分与 SOC 结合的 Fe 氧化物, 提高 Fe 氧化物的可溶性与淋溶潜力, 进一步加剧其淋溶损失^[49]。已有研究证实, 草地、灌木及林地恢复在多种土壤类型中均能通过降低土壤容重而显著减少土壤 Fe 氧化物含量 (包括 Fe_o 和 Fe_p 等活性 Fe 组分), 对 Fe-OC 的积累产生负面影响^[26, 61]。

其次, 植被恢复可通过驱动团聚体的形成与稳定, 间接促进 Fe-OC 的积累。植物根系分泌物与残体分解产生的有机质通过黏结作用, 结合根系的物理缠绕效应, 共同推动土壤团聚体的形成^[59, 62-63]。一方面, 团聚体可将不稳定的 DOC 和 SOC 包裹在团聚体内部, 减少其与微生物的接触, 降低碳的生物可利用性, 促进 SOC 与 DOC 的积累^[6, 59]; 另一方面, 团聚体的形成可提高土壤的稳定性与抗侵蚀能力, 有效减少土壤侵蚀造成的 SOC 和 DOC 损失, 进一步丰富土壤中可参与 Fe-OC 形成

的碳源储备^[63-64]。上述两条路径均以 SOC 和 DOC 积累为核心纽带, 为 Fe-OC 形成提供了必要的物质基础, 最终实现 Fe-OC 的累积。

此外, 植被恢复还通过增加土壤水分含量促进 Fe-OC 的积累。作为保持水土、涵养水源的关键措施, 植被恢复可有效提升表层土壤含水量^[13, 15]。植被冠层的遮阴作用、凋落物层的覆盖效应及地表草本植物的拦截作用, 可减少土壤水分蒸发并延长降雨入渗时长^[13, 63, 65]; 同时, 植被恢复增加的土壤孔隙度进一步提升了土壤入渗与持水能力, 从而协同增加土壤水分含量^[66]。在土壤未达到过湿状态(非积水、通气良好)且原有水分低于限制阈值时, 土壤水分条件的改善可为微生物创造更适宜的生存环境, 显著提升微生物活性与生物量, 进而通过增加微生物源碳供给, 促进 Fe-OC 积累^[15, 58]。该过程本质上是物理途径与生物途径的协同作用, 即植被通过物理阻隔与改良土壤结构增加土壤水分, 水分再进一步驱动微生物生物量与活性提升, 两大途径相互耦合, 共同促进 Fe-OC 的积累。

4.2 植被恢复对土壤 Fe-OC 动态变化的化学驱动机制

植被恢复通过改变 SOC 分子结构、Fe 氧化物形态及土壤 pH 等化学性质, 调控 Fe-OC 动态变化(图 1)。首先, 植被恢复通过改变 SOC 储量和官能团的组成, 直接调控 Fe-OC 的形成与积累^[15, 59, 67]。植物通过光合作用固定大气 CO₂, 部分碳以根沉积物的形式直接进入土壤, 增加 SOC 和 DOC 储量; 另一部分碳则储存在植物体内, 待凋落物与死亡根系经微生物分解后, 进一步补充 SOC 与 DOC 库, 为 Fe-OC 的形成提供充足的碳源底物^[6, 31, 68]。就分子结构特征而言, Fe 氧化物对芳香结构 SOC 具有更强的亲和性, 其含量的提升通常有利于 Fe-OC 的形成^[15, 34, 67]。由于芳香结构 SOC 分解难度大、稳定性强, 植被恢复通常会提高芳香族碳的相对含量, 强化 Fe 氧化物与 SOC 的结合效率, 最终促进 Fe-OC 的积累, 该机制已在多种土壤类型的研究中得到证实^[15]。

其次, 植被恢复通过改变 Fe 氧化物形态调控 Fe-OC 的动态^[26]。植被恢复输入的新鲜有机质是土壤中的重要还原性底物, 其携带的半胱氨酸、精氨酸和组氨酸等氨基酸的特定官能团可将土壤中部分 Fe(III) 还原为 Fe(II); 结合前文所述的植被恢复提升土壤含水量这一物理途径, 会进一步加剧该还原过程, 降低 Fe 氧化物与 SOC 的结合效率^[25, 69]。尽管植被恢复可通过改善土壤结构、增加土壤孔隙度和提高土壤中的氧气含量, 在一定程度上促进 Fe(II) 氧化为 Fe(III), 但该氧化效应远不及有机质介导的 Fe(III) 还原作用显著^[39, 60, 64]。当前多数研究证实, 植被恢复总体上以 Fe(III) 还原为 Fe(II) 氧化物的形态转化为主导方向, 同时伴随 Fe 氧化物淋溶, 进一步降低了可参与 Fe-OC 形成的有效 Fe 源^[15, 26, 44]。这两个过程的共同作用, 对 Fe-OC 的积累产生显著的负面影响。

此外, 植被恢复通过调节土壤 pH 来影响 Fe-OC 动态^[15]。在植被恢复过程中, 植物在吸收养分时释放的 H⁺、HCO₃⁻ 或 OH⁻, 以及根系分泌物的直接作用调控根际土壤 pH; 植物残体输入也能通过影响土壤氮素的硝化与氨化过程间接改变 pH^[56-57]。在酸性或碱性退化土壤中, 植被恢复通常具有酸碱缓冲效应, 促使土壤 pH 向中性方向转变^[26, 56]。具体而言, 在碱性退化土壤中, 植被恢复可降低土壤 pH, 提高 Fe 氧化物与 SOC 的结合效率, 促进 Fe-OC 的积累^[15]。例如, 黄绵土(碱性土壤)区域的植被恢复通过降低土壤 pH, 直接提高碳铁结合效率(表现为碳铁摩尔比升高), 显著促进 Fe-OC 的积累^[15]。此外, 植被恢复引起的 pH 变化还可通过生物途径间接调控 Fe-OC 动态, 如土壤 pH 改善后微生物生物量与活性显著提升, 加速微生物代谢过程并产生更多代谢产物, 为 Fe-OC 的形成与积累提供有利条件^[15, 28, 58]。

4.3 植被恢复驱动土壤 Fe-OC 动态变化的生物机制

植被恢复还通过改变微生物属性与有机酸含量影响 SOC 与 Fe 氧化物的结合过程, 调控 Fe-OC 的动态变化(图 1)。在植被恢复过程中, 前文所述的植物残体与根沉积物输入、土壤水分条件与 pH 的改善, 可显著提升土壤微生物生物量与活性^[28, 70]。该变化不仅能加速凋落物与死亡根系的分解转化, 还能促进微生物合成对 Fe 氧化物具有高亲和力的代谢产物, 为 Fe 氧化物提供更多可结合的碳源, 从而促进 Fe-OC 积累^[18, 28, 33]。已有研究证实, 微生物生物量是 Fe-OC 积累的关键驱动因子, 且植被恢复在多种土壤类型中均能通过提升微生物生物量实现 Fe-OC 的积累^[15]。

其次, 植物在获取养分时分泌低分子量有机酸, 会重塑土壤有机酸的组成与含量特征, 并通过

影响 Fe 氧化物与 SOC 的结合效率间接调控 Fe-OC 的动态变化^[29, 49]。植物的定植通常会使土壤中草酸与柠檬酸含量提升, 但二者对 Fe-OC 的作用存在明显差异, 草酸含量的升高会加剧对已有 Fe-OC 的破坏, 抑制 Fe-OC 积累; 柠檬酸含量提升则能提高 Fe 矿物的有效性, 促进 SOC 与 Fe 氧化物结合, 促进 Fe-OC 形成^[15, 29, 51]。因此, 植被恢复所引发的土壤有机酸变化, 对 SOC-Fe 矿物组合同时具有促进形成和驱动分解的双重作用^[71]。值得注意的是, 这种作用具有土壤依赖性, 细质地土壤中草酸对 Fe-OC 的破坏作用更为强烈, 粗质地土壤中柠檬酸的促进效应更为显著^[15]。此外, 这些低分子量有机酸可作为微生物生长的碳源底物, 提升微生物生物量与活性, 形成 Fe-OC 积累的正反馈^[31]。

总体而言, 植被恢复对 Fe-OC 的调控本质是物理、化学、生物机制下多重促进效应与抑制效应的耦合平衡过程 (图 1)。前文所述路径中, 促进效应主要体现为植物残体和根沉积物输入带来的溶解性有机物和芳香碳供给、水分与 pH 协同提升微生物活性并生成高亲和性代谢产物, 以及柠檬酸强化碳铁结合效率; 抑制效应则表现为 Fe 氧化物淋溶损失、Fe (III) 还原主导的形态转变, 以及草酸对碳铁结合体的破坏作用。两类效应的主导性具有土壤类型依赖性, 在粗质地、低 Fe 含量土壤中, 碳源补给与微生物介导的高亲和性碳源生成效应占主导地位, 植被恢复整体有利于 Fe-OC 积累; 而在细质地、活性 Fe 高含量土壤中, Fe 氧化物淋溶、Fe (III) 还原及草酸的破坏作用更突出, 可能削弱甚至逆转促进效应^[15, 25]。综合现有研究可知, Fe 氧化物的数量与形态、溶解性有机物及芳香碳含量、微生物生物量等参数是调控 Fe-OC 动态的核心驱动因子。植被恢复通过调控这些核心因素组成的关键路径, 在 Fe-OC 耦合平衡中发挥着更为关键的作用^[15, 24, 34]。

5 研究存在的问题与展望

植被恢复作为提升土壤碳汇功能的核心生态工程, 其对土壤 Fe-OC 的调控效应与机制是土壤生态学及全球碳循环领域研究的关键议题。尽管已有研究深入探讨了植被恢复下土壤 Fe-OC 的动态特征及驱动机制, 但受研究尺度局限、技术方法制约及环境复杂性影响, 仍存在显著的知识缺口, 具体表现为气候区覆盖尚未全面、植物与微生物源碳的贡献比例缺乏量化、Fe-OC 动态的微生物调控路径尚不明确、土壤水分阈值效应未被厘清、全球变化与植被恢复的交互作用未得到充分关注^[8, 11, 16]。下文将围绕上述研究不足逐一阐明未来研究重点, 为完善 Fe-OC 循环理论体系与提升生态工程固碳效益评价提供参考。

5.1 不同气候区植被恢复对土壤 Fe-OC 影响的研究

就研究空间覆盖而言, 当前关于植被恢复对 Fe-OC 影响的研究结论, 受限于现有研究的空间布局, 核心数据支撑主要集中于暖温带样带, 尚未充分覆盖热带、亚热带和北方寒带等关键生态区。这些区域的气候条件、土壤母质及植被特性与暖温带存在本质差异, 导致土壤 Fe-OC 对植被恢复的响应模式与现有结论产生显著分异^[26, 53]。该客观研究现状使得现有结论的空间代表性与机制普适性存在局限性, 难以准确揭示全球尺度下植被恢复过程中 Fe-OC 动态变化的普遍规律及驱动机制。未来研究需针对上述空间覆盖不足的问题, 拓展研究尺度, 系统覆盖上述关键生态区, 通过对比不同关键生态区的环境与植被特征, 深入分析 Fe-OC 对植被恢复的响应模式及区域分异规律, 为阐明全球尺度植被恢复下 Fe-OC 动态变化的核心规律及关键调控机制提供理论与数据支撑。

5.2 植被恢复下植物源与微生物源碳对土壤 Fe-OC 贡献的研究

在碳源贡献方面, 当前研究已证实微生物源碳是植被恢复过程中 Fe-OC 的主要来源, 而植物源溶解性有机物也是其重要组成部分, 但尚未有研究明确量化这两类碳源对 Fe-OC 库的具体贡献比例^[4, 15]。该研究缺口既阻碍了对 Fe-OC 形成累积主导驱动因子及差异化作用路径的精准识别, 也限制了相关生态过程模型的参数优化与碳汇潜力评估的准确性。未来研究可通过稳定同位素标记技术, 量化微生物源碳与植物源溶解性有机物对 Fe-OC 的贡献比例, 明确两类碳源在 Fe-OC 积累过程中的相对重要性^[32], 并结合分子生物学与光谱学手段, 进一步揭示不同碳源与铁氧化物的结合机制及稳定性差异, 为精准调控 Fe-OC 库动态、提升土壤碳汇功能提供理论支撑。

5.3 植被恢复下土壤 Fe-OC 动态的微生物调控机制研究

植被恢复下微生物显著影响 Fe-OC 的动态。尽管已有研究证实, 微生物群落结构与代谢活性可通过调控 Fe 氧化物形态、SOC 组分等关键因子间接影响 Fe-OC 动态, 但植被恢复如何调控微生物群落的演变, 以及微生物通过何种代谢功能转变来驱动 Fe-OC 的形成、积累与分解, 其具体路径尚未明确, 导致对植被恢复下 Fe-OC 变化的微生物学调控机制仍缺乏深入解析^[15, 18]。未来研究应整合宏基因组高通量测序、功能基因芯片等分子生物学技术与微生物生理代谢分析方法, 系统解析植被恢复对微生物群落结构及功能基因表达的调控效应, 阐明微生物碳利用效率演变、代谢功能转化及群落结构变化调控 Fe-OC 动态的内在机制, 最终揭示植被恢复影响 Fe-OC 动态的完整路径。

5.4 植被恢复背景下 Fe-OC 动态响应的土壤水分阈值研究

现有研究已在区域尺度证实植被恢复驱动的土壤水分变化会显著影响 Fe-OC 的积累与周转, 但该影响的正负效应及作用强度依赖于原土壤水分状况。目前, 调控这一正负效应转换的土壤水分阈值尚未被明确界定, 导致难以精准预判不同水分条件下植被恢复对 Fe-OC 库的调控方向与强度^[15, 27]。该认知缺口既限制了对 Fe-OC 积累机制的深度解析, 也为干旱半干旱区等水分敏感区域通过植被恢复来优化土壤碳汇功能带来理论与实践层面的挑战。未来研究可结合室内控制试验与野外定位观测, 设置梯度化土壤水分处理, 量化植被恢复背景下 Fe-OC 积累与分解正负效应转换的土壤水分阈值区间; 同时整合土壤理化性质分析、微生物群落测序及光谱学技术, 深入揭示该水分阈值形成的关键驱动因子与内在调控机制, 为精准提升水分敏感区域土壤碳汇功能提供科学依据。

5.5 全球变化背景下植被恢复对土壤 Fe-OC 影响的研究

气候变暖、降水格局重构、氮沉降加剧及土地利用变化等全球变化因子, 可通过改变土壤温湿度微环境、调控微生物活性与功能, 影响植物有机酸分泌及铁氧化物活性, 重塑 SOC 与铁氧化物的结合过程, 进而改变植被恢复对 Fe-OC 的原有调控规律^[6, 25, 72]。现有研究在探讨植被恢复对 Fe-OC 动态的影响时, 普遍忽略了全球变化这一关键背景, 导致现有理论难以支撑全球变化情景下生态系统的科学管理与固碳潜力精准预测, 进而限制了对土壤碳循环未来演变趋势的准确把握及植被恢复固碳效益的科学评估。未来需将全球变化因素纳入分析框架, 通过跨区域、长时序、多因子控制实验, 模拟温度升高、降水模式改变、极端天气事件频发等典型情景, 深入解析其与植被恢复的交互作用对 Fe-OC 形成路径、转化过程及稳定机制的综合调控效应, 为精准预测全球变化背景下植被恢复的固碳潜力、制定气候适应性土壤碳管理策略提供理论支撑。

参考文献(References)

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [2] Minasny B, McBratney A B, Arrouays D, et al. Soil carbon sequestration: Much more than a climate solution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(48): 19094-19098.
- [3] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 391-398.
- [4] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions[J]. *Science*, 2022, 377(6606): 603-608.
- [5] Basile-Doelsch I, Balesdent J, Pellerin S. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(21): 5223-5242.
- [6] Deng L, Liu Y L, Li J W, et al. Effect of vegetation restoration on soil carbon sequestration: Dynamics and its driving mechanisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2): 1-10. [邓蕾, 刘玉林, 李继伟, 等. 植被恢复的土壤固碳效应: 动态与驱动机制[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 1-10.]
- [7] Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, et al. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron[J]. *Nature*, 2012, 483(7388): 198-200.
- [8] Jia N, Li L, Guo H, et al. Important role of Fe oxides in global soil carbon stabilization and stocks[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10318.
- [9] Wen Y, Zang H D, Ma Q X, et al. Is the 'enzyme latch' or 'iron gate' the key to protecting soil organic carbon in peatlands?[J]. *Geoderma*,

2019, 349: 107-113.

- [10] Longman J, Faust J C, Bryce C, et al. Organic carbon burial with reactive iron across global environments[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(11): e2022GB007447.
- [11] Chen C M, Hall S J, Coward E, et al. Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2255.
- [12] Deng L, Liu S G, Kim D G, et al. Past and future carbon sequestration benefits of China's grain for green program[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 47: 13-20.
- [13] Zeng Y, Yang X K, Fang N F, et al. Large-scale afforestation significantly increases permanent surface water in China's vegetation restoration regions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 108001.
- [14] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65(5): 861-895.
- [15] Dong L B, Hu W F, Wang D F, et al. Effect of vegetation restoration on soil iron-associated carbon dynamics: Insights from different soil textures[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2024, 129(9): e2024JG008278.
- [16] Wang Y Y, Wang H, He J S, et al. Iron-mediated soil carbon response to water-table decline in an Alpine wetland[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15972.
- [17] Wang Y Y, Liu X Q, Zhang X Y, et al. Evaluating wetland soil carbon stability related to iron transformation during redox oscillations[J]. *Geoderma*, 2022, 428: 116222.
- [18] Song X X, Wang P, van Zwieten L, et al. Towards a better understanding of the role of Fe cycling in soil for carbon stabilization and degradation[J]. *Carbon Research*, 2022, 1(1): 5.
- [19] Chen C M, Dynes J J, Wang J, et al. Properties of Fe-organic matter associations *via* coprecipitation versus adsorption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(23): 13751-13759.
- [20] Tian Y H, Xu Y, Hou J T, et al. Advances in understanding the interaction between soil iron oxides and organic carbon and its effect on carbon stabilization[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(3): DOI:10.11766/trxb202502020044.[田熠辉, 许运, 侯静涛, 等. 土壤铁氧化物与有机碳的耦合机制及其对碳固持的研究进展[J/OL]. *土壤学报*, 2026, 63(3): DOI:10.11766/trxb202502020044.]
- [21] Villarino S H, Pinto P, Jackson R B, et al. Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions[J]. *Science Advances*, 2021, 7(16): eabd3176.
- [22] Cotrufo M F, Haddix M L, Kroeger M E, et al. The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 168: 108648.
- [23] Klink S, Keller A B, Wild A J, et al. Stable isotopes reveal that fungal residues contribute more to mineral-associated organic matter pools than plant residues[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 168: 108634.
- [24] Hu W F, Li Q, Wang W Q, et al. Straw mulching decreased the contribution of Fe-bound organic carbon to soil organic carbon in a banana orchard[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 194: 105177.
- [25] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [26] Dong L B, Li J J, Wang D F, et al. Vegetation restoration in the coarse-textured soil area is more conducive to the accumulation of Fe-associated C[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 61(9): 2061-2074.
- [27] Huang X Y, Li W S, Qin G M, et al. Mangrove restoration enhances blue carbon sequestration and its stability in a subtropical tidal wetland[J]. *Functional Ecology*, 2025, 39(9): 2437-2451.
- [28] Dong L B, Fan J W, Li J W, et al. Forests have a higher soil C sequestration benefit due to lower C mineralization efficiency: Evidence from the central Loess Plateau case[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 339: 108144.
- [29] Yu G H, Xiao J, Hu S J, et al. Mineral availability as a key regulator of soil carbon storage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(9): 4960-4969.
- [30] Wan D, Ye T H, Lu Y, et al. Iron oxides selectively stabilize plant-derived polysaccharides and aliphatic compounds in agricultural soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(6): 1153-1163.
- [31] Panchal P, Preece C, Peñuelas J, et al. Soil carbon sequestration by root exudates[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 749-757.

- [32] Deng L, Wang K B, Tang Z S, et al. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 235-244.
- [33] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [34] Wang S M, Jia Y F, Liu T, et al. Delineating the role of calcium in the large-scale distribution of metal-bound organic carbon in soils[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(10): e2021GL092391.
- [35] Du Y X, Ramirez C E, Jaffé R. Fractionation of dissolved organic matter by co-precipitation with iron: Effects of composition[J]. *Environmental Processes*, 2018, 5(1): 5-21.
- [36] Islam M R, Singh B, Dijkstra F A. Stabilisation of soil organic matter: Interactions between clay and microbes[J]. *Biogeochemistry*, 2022, 160(2): 145-158.
- [37] Adhikari D, Zhao Q, Das K, et al. Dynamics of ferrihydrite-bound organic carbon during microbial Fe reduction[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 212: 221-233.
- [38] Duan X, Li Z, Liu M, et al. Progress of the iron-mediated soil organic carbon preservation and mineralization[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(2): 202-211. [段勋, 李哲, 刘淼, 等. 铁介导的土壤有机碳固持和矿化研究进展[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(2): 202-211.]
- [39] Jiang Z H, Liu Y Z, Lin J D, et al. Conversion from double-rice to maize-rice increases iron-bound organic carbon by “iron gate” and “enzyme latch” mechanisms[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 105014.
- [40] Lin Q H, Tian D, Gao F, et al. Effects of returning farmland to forest and grassland on soil bacteria: A case study in Bashang area, China[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 307-313. [林权虹, 田地, 高菲, 等. 坝上地区退耕还林还草措施对土壤细菌的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 307-313.]
- [41] 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 & Biochemistry*, 2021, 162: 108422.
- [42] Su X L, Qu C C, Kang J, et al. Microorganisms drive the formation of mineral-associated organic carbon in soils[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(22): 3327-3338. [苏兴雷, 渠晨晨, 康杰, 等. 微生物驱动土壤矿物结合态有机碳的形成[J]. *科学通报*, 2024, 69(22): 3327-3338.]
- [43] Kappler A. Geomicrobiological cycling of iron[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 59(1): 85-108.
- [44] Liu F H, Zhu K C, Wang Z Q, et al. Production of reactive oxygen species and its role in mediating the abiotic transformation of organic carbon in sandy soil under vegetation restoration[J]. *Carbon Research*, 2023, 2(1): 35.
- [45] Weiss J V, Rentz J A, Plaia T, et al. Characterization of Neutrophilic Fe(II)-Oxidizing Bacteria Isolated from the Rhizosphere of Wetland Plants and Description of *Ferritrophicum radicolagen*. nov. sp. nov., and *Sideroxydans paludicolasp*. nov[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(7/8): 559-570.
- [46] Emerson D, Field E K, Chertkov O, et al. Comparative genomics of freshwater Fe-oxidizing bacteria: Implications for physiology, ecology, and systematics[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 254.
- [47] Melton E D, Swanner E D, Behrens S, et al. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2014, 12(12): 797-808.
- [48] Lipson D A, Jha M, Raab T K, et al. Reduction of iron (III) and humic substances plays a major role in anaerobic respiration in an Arctic peat soil[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, 115(G4): 2009JG001147.
- [49] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 588-595.
- [50] Dennis P G, Miller A J, Hirsch P R. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities?[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 72(3): 313-327.
- [51] Ding Y, Ye Q T, Liu M Q, et al. Reductive release of Fe mineral-associated organic matter accelerated by oxalic acid[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142937.
- [52] Yuan Y S, Zhang Z L, Chen L J, et al. Facilitated destabilization of physicochemically protected soil organic matter by root-derived low-molecular-weight organic acids[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(6): 1677-1686.

- [53] Ye C L, Huang W J, Hall S J, et al. Association of organic carbon with reactive iron oxides driven by soil pH at the global scale[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2022, 36(1): e2021GB007128.
- [54] Ye C L, Chen D M, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: Plant, microbial and geochemical controls[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(8): 1162-1173.
- [55] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3591.
- [56] Hong S B, Piao S L, Chen A P, et al. Afforestation neutralizes soil pH[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 520.
- [57] Xu J M, Tang C, Chen Z L. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(4): 709-719.
- [58] Xiao H B, Li Z W, Dong Y T, et al. Changes in microbial communities and respiration following the revegetation of eroded soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 30-37.
- [59] Deng L, Kim D G, Peng C H, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3974-3984.
- [60] Yudina A, Kuzyakov Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores[J]. *Geoderma*, 2023, 434: 116478.
- [61] Zhang Q, Han G L. Contribution of natural and agricultural activities on Fe dynamics: Insights from Fe isotope in soils under different land-use types[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 358: 108705.
- [62] Wang Q K, Zhang X, Yang W, et al. Effects of different types of vegetation restoration on soil pore characteristics in Benggang erosion areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1282-1293. [王乾坤, 张歆, 杨伟, 等. 亚热带崩岗侵蚀区不同植被恢复类型对土壤团聚体孔隙特征的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1282-1293.]
- [63] Zheng J Y, Zhao J S, Shi Z H, et al. Soil aggregates are key factors that regulate erosion-related carbon loss in *Citrus* orchards of Southern China: Bare land vs. grass-covered land[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107254.
- [64] Dong L B, Li J W, Liu Y L, et al. Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: Evidence from the Central Loess Plateau case[J]. *Catena*, 2022, 208: 105734.
- [65] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [66] Liao Y, Dong L B, Li A, et al. Soil physicochemical properties and crusts regulate the soil infiltration capacity after land-use conversions from farmlands in semiarid areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130283.
- [67] Wang A N, Zha T G, Zhang Z Q. Variations in soil organic carbon storage and stability with vegetation restoration stages on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2023, 228: 107142.
- [68] Wu Y L, Min X, Sai S, et al. Soil C, N and P contents and their stoichiometry under different artificial vegetation types in agro-pastoral zone of northern China: A case study of Wuchuan County[J]. *Soils*, 2024, 56(4): 873-878. [吴叶礼, 闵雪, 赛硕, 等. 北方农牧交错带不同人工植被类型土壤碳氮磷及其化学计量特征——以武川县为例[J]. *土壤*, 2024, 56(4): 873-878.]
- [69] Bhattacharyya A, Schmidt M P, Stavitski E, et al. Ligands representing important functional groups of natural organic matter facilitate Fe redox transformations and resulting binding environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 251: 157-175.
- [70] Shi P, Qin Y L, Liu Q, et al. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135507.
- [71] Shabtai I A, Hafner B D, Schweizer S A, et al. Root exudates simultaneously form and disrupt soil organo-mineral associations[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 699.
- [72] Li J W, Wu J Z, Liang C, et al. Global change reshapes microbial residues and plant lignin components in soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(41): 21967-21977.

(责任编辑: 陈荣府)