

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.039

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.039

沈秋艳,张叶飞,刘建祥,等.石漠化土壤腐殖质对环境因子的响应及其反馈机制研究进展[J].水土保持学报,2026,40(5):13-21.

Shen Qiuyan, Zhang Yefei, Liu Jianxiang, et al. Research progress on response of humus to environmental factors and its feedback mechanisms in rocky desertification soils[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5):13-21.

石漠化土壤腐殖质对环境因子的 响应及其反馈机制研究进展

沈秋艳¹, 张叶飞^{1,2,3}, 刘建祥¹, 王妍^{1,2,3}, 郑慧蓉¹, 普昊¹

(1.西南林业大学水土保持学院,昆明 650224; 2.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室,昆明 650224; 3.国家林业和草原局云南沾益岩溶生态系统定位观测研究站,云南 曲靖 655500)

摘要: [目的]旨在明确不同环境条件下土壤腐殖质的组分特征、空间分异规律和结构稳定性差异,厘清腐殖质调控土壤团聚结构、改善土壤保水保肥能力的作用路径。[方法]通过梳理国内外相关研究,结合分子生物学、景观生态学、波谱学等多学科理论,总结土壤腐殖质对环境因子的响应及反馈机制研究进展。[结果]石漠化地区土壤腐殖质在不同环境条件下表现出一定的异质性,在不同尺度下这种差异受多种环境因素共同影响。腐殖质形成、迁移、转化和分解过程不仅是对环境因子的响应,而且会对环境因子产生反馈调节,改变土壤环境。[结论]石漠化土壤腐殖质与环境之间复杂的“物理-化学-生物”耦合交互网络主要表现在宏观、中观、微观3个层面,是喀斯特石漠化地区土壤环境为维持生态平衡的自我调节能力的重要体现。未来研究应加强多学科交叉,深化环境因子与腐殖质组分的关联性与互馈机制研究,为石漠化精准治理和土壤碳库管理提供科学依据。

关键词:石漠化; 土壤腐殖质; 环境因子; 响应; 反馈

中图分类号:S153.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)05-0013-09

Research Progress on Response of Humus to Environmental Factors and Its Feedback Mechanisms in Rocky Desertification Soils

Shen Qiuyan¹, Zhang Yefei^{1,2,3}, Liu Jianxiang¹, Wang Yan^{1,2,3}, Zheng Huirong¹, Pu Hao¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2.Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous & Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China; 3.Zhanyi Karst Ecosystem Observation and Research Station, Qujing, Yunnan 655500, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the compositional characteristics, spatial differentiation patterns, and structural stability differences of soil humus under different environmental conditions, and to elucidate the pathways through which humus regulates soil aggregate structure and enhances soil water and nutrient retention capacity. [Methods] This paper summarizes research progress on the response and feedback mechanisms of soil humus to environmental factors by reviewing relevant domestic and international studies and using multidisciplinary theories from landscape ecology, molecular biology, and spectroscopy. [Results] Under diverse environmental conditions, soil humus in rocky desertification areas demonstrates a certain degree of heterogeneity, which is jointly influenced by a variety of environmental factors at different scales. The processes of humus production, migration, transformation, and decomposition are not only a response to environmental factors, but also exert feedback regulation on them, thereby altering the soil environment. [Conclusion] Three levels-macro, meso, and micro-are the main manifestations of the intricate "physical-chemical-biological" coupling and

收稿日期:2026-04-28

修回日期:2026-05-26

录用日期:2026-06-09

网络首发日期(www.cnki.net):2026-08-21

资助项目:云南省科技厅农业联合专项面上项目(202501BD070001-086);云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放课题项目(SBK20240040,SBK20250011);国家自然科学基金项目(31901206);“兴滇英才支持计划”项目

第一作者:沈秋艳(2000—),女,硕士研究生,主要从事石漠化生态系统修复及治理研究。E-mail:18760854897@163.com

通信作者:刘建祥(1976—),男,博士,副教授,研究生导师,主要从事生态修复与评价研究。E-mail:liujxswfu@163.com

张叶飞(1992—),男,博士,助理研究员,主要从事石漠化生态系统修复及治理研究。E-mail:zhangyefei@swfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

interaction network between humus and the environment in rocky desertification soils. This network is an essential example of the soil environment's self-regulatory ability to preserve ecological balance in karst rocky desertification areas. Future research should enhance interdisciplinary collaboration and extend the investigation of the correlations and feedback mechanisms between environmental conditions and humic components, thereby providing a scientific foundation for the precise control of rocky desertification and soil carbon pool management.

Keywords: rocky desertification; soil humus; environmental factors; response; feedback

Received: 2026-04-28

Revised: 2026-05-26

Accepted: 2026-06-09

Online(www.cnki.net): 2026-08-21

土壤石漠化与沙漠化和盐碱化并称为荒漠化防治领域的三大世界性难题,其核心特征是土壤侵蚀与植被退化相互作用,导致土地生产力下降和生态系统功能退化^[1-3]。喀斯特地区受岩溶地貌发育、土层浅薄、土壤空间连续性差和水土流失敏感性强等因素影响^[4-6],生态系统稳定性较低,石漠化一旦发生,往往表现出恢复周期长、治理难度大和退化过程复杂等特点^[7]。土壤腐殖质是土壤有机质的重要组成部分,也是维持土壤肥力和碳库稳定性的关键物质基础,在维持土壤结构稳定、调节养分循环、促进微生物活动和增强土壤碳库稳定性等方面具有重要作用^[8-9]。腐殖质主要包括胡敏酸(HA)、富里酸(FA)和胡敏素(HM)等组分^[10],其含量、组成和结构特征不仅能够反映土壤形成与演化过程,也是判断土壤肥力状况和生态系统恢复程度的重要指标。

在石漠化过程中,植被退化、侵蚀增强和土壤水热条件改变直接影响腐殖质的形成、转化与积累,并进一步改变土壤结构、养分供应和碳固定能力^[11]。已有研究^[12]表明,石漠化地区土壤腐殖质含量与环境因子密切相关。一方面,地形、气候、植被覆盖、土地利用方式、水分状况、pH、孔隙结构和微生物群落等环境因素影响腐殖质的输入、固定、迁移和转化过程;另一方面,腐殖质作为土壤结构和肥力形成的重要物质基础,通过改善土壤团聚体结构、增强持水保肥能力、调节养分有效性和改善微生物生境等方式,对土壤环境产生反馈作用^[13]。可见,石漠化区土壤腐殖质与环境因子之间存在互馈作用,即环境因子驱动腐殖质的形成与转化,腐殖质通过改变土壤结构和养分循环反馈影响土壤环境。

当前研究^[14]多侧重于单一环境因子对腐殖质含量或组分变化的影响,而对腐殖质反向调节土壤的反馈机制关注不足;也有研究^[15-17]涉及石漠化土壤退化与恢复过程中的土壤有机质变化,但腐殖质在其中的调控作用及反馈机制仍需进一步明确。基于此,本文以喀斯特石漠化地区为研究对象,从宏观、中观和微观3个层面系统梳理与石漠化土壤腐殖质相关研究进展,结合分子生物学、景观生态学、波谱学等多学科理论,深

入探讨土壤腐殖质对环境因子的响应及其反馈机制,明确不同石漠化演替阶段、不同地形、不同土地利用方式下土壤腐殖质的组分特征、空间分异规律和结构稳定性等差异,厘清土壤腐殖质调控土壤团聚体结构、改善土壤保水保肥能力的作用路径。研究结果可为喀斯特石漠化地区退化生态系统的土壤质量恢复、生态系统服务功能提升提供理论支撑和实践依据。

1 宏观尺度:石漠化土壤腐殖质的景观格局与区域分布特征

在宏观尺度上,石漠化土壤腐殖质分布表现出明显的区域异质性、景观斑块化和空间不连续性,影响其分布的主要因子及作用路径见表1。Wei等^[18]基于GIS和地理探测器模型分析西南喀斯特石漠化空间分布及其驱动因素表明,地形因子是石漠化空间格局的重要影响因素。结合土壤有机质迁移和积累过程来看,坡度、坡位和海拔等地形条件可通过影响侵蚀、沉积和植被分布间接调控腐殖质空间分布^[19];周红等^[14]研究表明,年平均气温与土壤腐殖质各组分含量呈显著负相关($p < 0.05$),温度升高显著降低腐殖质组分的积累;而年降水量对腐殖质组分的影响未达到显著水平。坡度与坡位通过影响物质迁移和人类活动强度对石漠化程度产生调控作用。在自然演化主导区,坡位越高、坡度越大的区域,物质迁移越频繁,导致石漠化程度加剧;坡下部和谷地既可能因接受坡面物质输入而出现有机质相对富集,也可能因耕作、建设和人为扰动增强而导致土壤结构破坏和腐殖质损失,其净效应依赖于具体的环境条件^[20]。坡耕地、裸地等植被破坏区域植被覆盖率降低,耕作扰动强,侵蚀风险增加,易导致腐殖质流失;而林地、灌草地和封育恢复地具有较高的凋落物输入量和较强的土壤保护作用,能够减弱雨滴击溅和坡面径流,并增加有机质输入,使土壤腐殖质总体呈增加趋势^[21]。坡位越低的区域,人类活动更为频繁,消耗由高坡位迁移到低坡位的堆积物质,从而加重该区域的石漠化程度^[20]。降水和年平均气温共同调控微生物活性与有机质分解速率,影响腐殖质积累。区域降水格局与蒸发散共同决定土壤水分的宏观平衡,进而影响腐殖质的淋溶与积累^[22]。

表 1 宏观尺度石漠化土壤腐殖质分布的主要影响因素及作用路径
Table 1 Key influencing factors and pathways of humus distribution in rocky desertification soils at macro scale

因子类型	指标	对腐殖质分布的主要影响	作用路径
地形因子	坡度、坡位、海拔、地形起伏度	影响表土侵蚀和沉积,决定腐殖质迁移和积累	通过径流和土层厚度变化调控有机质流失与沉积
气候因子	降水、温度、水热等组合	调控植被生长和微生物分解,影响腐殖质矿化	通过调节有机质输入与分解速率,影响腐殖质稳定性
植被因子	植被类型、覆盖度、NDVI	决定凋落物输入及根系残体分布	通过改善土壤结构和团聚体形成促进腐殖质积累
土地利用因子	林地、草地、坡耕地、裸地	影响腐殖质积累或退化	改变扰动强度与有机质输入,降低侵蚀风险
人为因子	封育、退耕还林还草、水土保持工程、计划烧除	促进腐殖质恢复	增加地表覆盖、降低侵蚀、改善土壤结构

宏观尺度的岩石类型与风化程度决定土壤母质的矿物组成和pH背景,进而影响后续腐殖质-矿物的配位反应强度^[23]。植被覆盖度和类型差异通过凋落物输入量和根系分泌物组成,在景观尺度上调控微生物群落的代谢活性与腐殖质合成速率^[24-25]。人类活动引起的土地利用变化、频繁耕作、植被破坏等通过改变地表覆盖和土壤物理状态,显著改变腐殖质的化学组成和结构,火烧后胡敏素含量下降幅度明显大于富里酸和胡敏酸;燃烧强度越大,腐殖质中芳基C含量越低,烷基C含量越高,烷基C比芳基C更稳定^[26]。因此,宏观尺度不仅是腐殖质空间异质性的表现层,更是多因子协同驱动交互过程的起点。石漠化土壤腐殖质分布因地形、气候、植被与人类活动等多因子协同驱动呈现出显著的空间异质性。空间上,腐殖质通常在植被恢复较好、土壤保存条件较优和物质汇聚部位相对富集,而在基岩裸露率高、土层破碎、径流强烈和扰动频繁区域明显降低;时间上,腐殖质随植被恢复和生态治理总体呈增加趋势,但受土层厚度、石漠化程度和土壤保持能力限制,恢复过程具有滞后性和不均衡性。宏观格局为进一步理解中观尺度的剖面分异、根际差异和微观稳定机制提供了区域背景和边界条件。

2 中观尺度:石漠化土壤腐殖质的土壤剖面分异与生态过程

由于喀斯特地质背景的特殊性,土壤剖面常表现出土层浅薄、分布不连续及土-岩交错等特征,局部地区呈“二元结构”或“多元结构”特征,不同微地貌单元的土壤剖面发育存在显著差异。石漠化区土壤腐殖质的分布与动态表现出显著的垂直分异特征,并受到植被、水文、土壤理化性质及微生物活动的综合调控。在不同基岩暴露率的喀斯特石漠化地区,腐殖质含量随土层深度增加而降低,且表现为强烈基岩暴露(SBR)>中度基岩暴露(LBR)>轻度基岩暴露(MBR)>次生林(SF);微生物生物量碳

(MBC)、溶解有机碳(DOC)随基岩暴露率的增加而增加;土壤活性有机碳组分储量随土层深度增加而下降,其中轻组有机碳(LFOC)对植被恢复的响应尤为明显^[27]。土壤水分淋溶与再分布和孔隙结构是驱动腐殖质垂直分异的重要物理过程,喀斯特区裂隙及优先流通道可促进可溶性有机组分向下迁移,使腐殖质在纵向发生再分配^[28]。孔隙结构,尤其是微孔隙通过空间阻隔限制微生物接触,是形成关键物理保护的重要机制^[29-30]。喀斯特区岩-土界面处土壤孔隙分布异质性显著,紧邻基岩的土壤层因水分快速渗漏,腐殖质含量较相邻土壤层低^[31]。土壤水分通过调控氧化还原电位(Eh)和微生物活性影响腐殖质分解速率,当含水量高于田间持水量时,厌氧环境抑制酚氧化酶活性,可使腐殖质矿化速率降低^[32]。在一定条件下,较高土壤含水量可通过降低氧扩散、改变氧化还原环境和限制部分胞外酶活性,减缓有机质矿化,有效地促进腐殖质碳的固定和积累^[3]。

土壤pH通过改变腐殖质分子电荷状态与官能团活性,调控其稳定性和组分比例^[33]。在碱性环境中,腐殖质中的羧基、酚羟基等酸性官能团可能发生去质子化,使分子带负电荷和亲水性增强,从而有利于腐殖酸的分散或溶解^[34]。Hong等^[35]研究发现,石漠化土壤有显著不同的细菌群落,土壤pH和土壤有机碳(SOC)是影响土壤细菌群落的主要因素。植被恢复措施能显著改变土壤真菌群落结构和多样性^[36-37],关键微生物类群在腐殖质动态调控中发挥着重要作用。Zheng等^[38]通过探讨石漠化生态系统中土壤细菌、植物群落和土壤性质之间的相互作用发现,土壤细菌群落结构的变化与植物群落组成和土壤性质之间存在显著相关性。土壤pH不仅直接影响石漠化区土壤微生物的群落构成,还通过调控腐殖质各组分的比例与化学性质,间接塑造其独特的微生物区系。与之相应,关键微生物类群亦通过其代谢活动,反馈调节腐殖质的形成转化与分解路径。这种相互作用构成一个以“pH-腐殖质-微生物”为核心的动态协同调控体系,共同影响土壤养分

循环、有机碳周转及生态功能稳定性,为通过定向调控微生物群落以优化土壤碳周转效率、提升石漠化地区生态修复效果提供重要的理论支撑。

腐殖质通过影响土壤团聚体结构及水文过程,反作用于土壤环境。腐殖质的疏水性组分吸附在矿物颗粒表面形成有机-无机复合体,其疏水特性可减少水分渗透对团聚体的破坏力,有助于土壤大团聚体形成^[39]。有机-矿物复合体和团聚体的形成,能改善土壤孔隙结构和水分保持能力,但其具体作用取决于土壤质地、矿物组成、腐殖质结合形态及水分条件^[40]。侯自航等^[41]研究表明,随着石漠化程度加深,土壤有机质含量逐渐降低,同时土壤毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均显著减小,土壤持水能力随之下降。而腐殖酸与金属离子形成的复合体可填充于土壤颗粒间,形成丰富的微孔隙,从而提高土壤的毛管持水量^[42]。值得注意的是,腐殖质对水分迁移的调控并非单向,腐殖质在一定程度上能有效提高土壤的持水能力,但高水分条件下,腐殖酸和胡敏素组分的分解程度(烷基碳/烷氧碳)均高于低水分条件,显然高湿度不利于土壤腐殖质的碳积累,反而有利于水溶性碳的形成,这种互馈调控过程是土壤自我调节能力的体现^[43]。此外,石漠化过程中伴随的植被退化导致土壤体积质量显著增加,土壤变得更加紧实,耕作或侵蚀产生的机械应力会直接破坏腐殖质-矿物界面结合和团聚体结构,这种物理状态的恶化进一步加剧应力对土壤团聚体的破坏作用。而腐殖质能通过氢键、阳离子桥接及金属离子配位键等多种机制,将分散的矿物颗粒胶结为稳定的腐殖质-矿质复合体。由于腐殖质本身及其胶结形成的团聚体的骨架作用,土壤颗粒间更容易形成和连通大孔隙,增强土壤在雨季的降水入渗能力^[44]。

综上,土壤孔隙结构通过空间阻隔形成物理保护,水分通过调控氧化还原电位和微生物活性影响腐殖质分解速率;土壤 pH 通过改变腐殖质分子电荷状态与官能团活性影响其稳定性,并与微生物群落构成“pH-腐殖质-微生物”协同调控体系;腐殖质通过疏水组分与矿物结合构建水稳性团聚体,调控水分入渗与蒸散。

3 微观尺度:石漠化土壤腐殖质的分子转化与微生物-矿物稳定机制

在微观尺度上,石漠化土壤腐殖质的分子结构特征及其与环境因子的互馈作用机制决定腐殖质的稳定性、转化和功能^[45]。腐殖质组分具有显著不同的分子结构,HA 相较于 FA,具有更高分子量、芳香性和疏水性,而 FA 则通常含有较多羧基、酚羟基等

含氧官能团,水溶性和迁移性更强^[46]。二者在金属络合能力、迁移性和稳定性方面存在明显差异。元素分析揭示腐殖质的化学组成和官能团丰度的变化影响腐殖质的化学稳定性与反应潜能,同时可结合 X 射线光电子能谱(XPS)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)验证官能团的演变过程^[47]。石漠化土壤 HA 的芳香族 C=C 伸缩振动峰强度相较于非石漠化区降低,表示其芳构化程度下降^[48]。¹³C 核磁共振波谱(¹³C NMR)可进一步识别芳香碳、烷基碳、羧基碳等碳骨架组成,从分子层面解释石漠化土壤腐殖质稳定性下降的原因^[49]。而 X 射线衍射则聚焦于腐殖质三维超分子结构解析并能为层间距变化提供证据,结合元素分析、光谱和电镜技术可深入探究腐殖质与矿物的“界面行为”^[50-51]。黏粒矿物如蒙脱石、高岭石通过层间吸附固定腐殖质分子,形成不同结合强度的复合体,此过程也是土壤碳库最重要的物理化学保护机制之一。其保护作用主要体现在物理性阻碍、化学性稳定、生物性隔离 3 个相互关联的层面^[52]。“物理”层面创造空间屏障,阻止生物接触;“化学”层面通过键合作用,改变腐殖质的化学本质,使其变得稳定难降解,二者相辅相成,共同将腐殖质分子从活跃的“生物地球化学循环”池中隔离出来,将其稳定地封存于土壤中。

腐殖质与矿物表面的界面反应及其自身的氧化还原特性显著受 pH、离子强度、氧化还原电位、温度等环境因子调控。铁铝氧化物通过其表面羟基与腐殖质的羧基或酚羟基形成配位键,增强矿物与腐殖质的结合强度,提高矿物表面的有机碳吸附容量和稳定性^[23]。铁(氢)氧化物与腐殖质可通过静电作用、配体交换等多种机制形成复合体,显著增强对重金属离子的吸附能力,从而影响重金属在环境中的迁移、转化和生物效应^[53]。土壤腐殖质主要以化学键合的方式固定在层状硅酸盐矿物表面,这种阳离子桥键并不是腐殖质-矿质复合体形成的唯一途径,离子的类型与价态、溶液的环境条件及腐殖质自身的分子特性均影响其最终的结构稳定性和结合强度^[54]。秦晴晴等^[55]研究指出,腐殖质(HS)含有羧基、酚羟基等多种官能团,能够通过络合、吸附、氧化还原等作用影响重金属离子的赋存形态、活性和迁移转化规律。在厌氧条件下,腐殖质可作为电子穿梭体,先接收来自微生物的电子并还原,随后作为电子供体将电子转移给 Fe^{3+} ,实现电子从微生物到铁(Ⅲ)矿物的传递^[56]。HA 作为可循环的电子穿梭体,既加速有机碳氧化时的电子流动,又驱动 Fe^{3+} 还原,诱导与铁氧化物结合的磷(P)解解释放,调控土壤局

部氧化还原环境。频繁耕作、土地平整、重度火烧和工程破坏等剧烈扰动能显著改变腐殖质的化学组成和结构,从而影响其后续的化学交互行为^[57]。

石漠化过程不仅是植被与土壤的退化,更是地下微生物世界的剧变。此过程常伴随细菌多样性显著下降,其中真菌群落表现出更强的空间异质性^[58]。石漠化土壤中残留的或新输入有机质的分解,起始于微生物分泌的胞外酶^[59]。在石漠化胁迫下,微生物群落为获取稀缺碳源和能量,往往上调这些分解基因的表达,试图从复杂的有机质中“挖掘”养分^[60]。加之石漠化土壤中腐殖质含量较少、稳定性差,这种强烈的分解作用可能反而加速有机碳的分解和矿化,不利于稳定态腐殖质的积累^[61]。HA和FA的形成被认为主要通过微生物体代谢途径和二次合成途径实现^[62]。腐殖质并非惰性的碳库,而是主动参与并调控微生物的生命活动,

这种交互可视为一种“分子水平的相互作用”。分子量较小的FA具有类似醌类的氧化还原活性,能够作为电子穿梭体影响微生物的呼吸链和能量代谢^[63]。石漠化导致的干旱、养分匮乏、高温等胁迫条件,对土壤微生物构成强大的选择压力,塑造其独特的分子适应策略^[64],石漠化土壤微生物对环境胁迫具有主动响应能力。通过加固细胞结构、调节渗透压、优化能量代谢及启动蛋白质保护系统实现适应。这些分子适应策略的协同作用,演化出其在极端胁迫环境下得以存活和繁衍的独特生存智慧,也影响着腐殖质的形成、转化、分解和运移。在微观尺度上,腐殖质自身的分子结构特征是其稳定性的内在基础;黏粒矿物通过物理吸附与化学键合形成的复合体,构建关键的保护性微域;而微生物群落则通过其代谢活性与分子适应策略,成为驱动腐殖质转化与周转的生物执行者(图1)。



图1 土壤腐殖质与环境因子的互馈调节过程机制

Fig.1 The mutual feedback regulation between humus and environmental factors

微生物代谢是促进腐殖质形成的核心,木质素作为腐殖质的关键前体,其降解高度依赖特定微生物群落。黄红丽等^[65]研究黄孢原毛平革菌和栗褐链霉菌对木质素降解及腐殖质形成的影响发现,接种这2种木质素降解菌均能显著提高木质素降解率和腐殖质

产量,黄孢原毛平革菌的降解主要发生在次级代谢阶段,且更倾向于将木质素完全矿化为CO₂;而栗褐链霉菌的降解发生在初级代谢阶段,主要通过改性木质素结构,产生更易转化为腐殖质的前体物质。不同微生物可通过功能互补提高木质纤维素的降解效率。纤

纤维素降解菌分泌纤维素酶,将纤维素水解为可溶性糖,为体系内其他微生物的生长和代谢提供碳源;木质素降解菌通过木质素降解酶促进木质素结构破坏,并对降解过程中产生的酚类中间产物进行进一步转化^[66]。动态通量平衡模型进一步揭示,丙氨酸、谷氨酰胺、草酸和柠檬酸是菌群交叉喂养的关键载体,其浓度梯度调控腐殖质的形成^[67]。铁、锰氧化物可作为电子受体,强化微生物的氧化还原活性。通过 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 循环催化酚类的聚合,使土壤碳储量增加^[68]。

微观尺度上,腐殖质的芳环缩合度与官能团丰度决定其化学稳定性;黏粒矿物通过层间吸附与配位反应形成有机-矿质复合体,提供物理-化学保护;微生物通过胞外酶分泌、代谢适应及电子穿梭等响应石漠化胁迫。这些过程构成以界面配位反应与氧化还原为核心和由微生物代谢与根系分泌物调控网络主导的“结构-保护-代谢”微系统,在分子水平上调控土壤有机碳的固持与流失平衡。

本研究将上述宏观、中观和微观3个尺度整合为腐殖质与环境的交互过程机制(图1)。宏观尺度上的地形、气候、水热条件与人类活动对腐殖质空间分布的调控作用;中观尺度上剖面结构、植被根际输入、土壤团聚体与水分淋溶共同作用于腐殖质的迁移、积累和稳定化过程;微观尺度上腐殖质分子结构、矿物复合体和微生物代谢活动构建“结构-保护-代谢”微系统,进一步影响土壤有机碳的固持与流失。通过该多尺度总览,能够对腐殖质形成、转化和稳定的整体逻辑及跨尺度联系有清晰理解,更好地把握各尺度研究的重点与相互作用。

4 结论与展望

本文聚焦喀斯特石漠化地区土壤腐殖质与环境的交互作用展开系统论述。宏观尺度上,遥感与GIS技术结合地理探测器等方法,明确地形、气候、植被覆盖及人类活动等多因子协同驱动腐殖质分布的空间异质性。中观尺度上,腐殖质呈现显著垂直分异,孔隙结构调控水分运移与入渗;土壤pH通过改变腐殖质分子电荷状态与官能团活性影响其稳定性,并主导细菌群落构成;水分与微生物存在协同效应。微观尺度上,腐殖质分子结构特征决定了其化学稳定性;黏粒矿物通过配位交换、阳离子桥键等机制与腐殖质结合形成有机-矿质复合体,起到物理化学保护作用;微生物通过胞外酶分泌、代谢适应及电子穿梭等方式响应石漠化胁迫。腐殖质的结构特点、理化特征和分解转化路径等因素共同调控土壤有机碳的固持与流失平衡。这种“环境驱动-腐殖质响应-反馈调节环境”过程是喀斯特石漠化地区土壤环境为维持生态平衡自我调节能力的重要体现。

未来应围绕二者的互馈机制研发定向调控土壤腐殖质积累的石漠化修复技术与微生物-矿物联合改良剂提升修复效率,并拓展至石漠化修复过程中土壤碳汇功能提升、退化土壤定向改良和困难立地生态恢复等领域,相关成果将助力喀斯特石漠化地区的生态安全建设与可持续发展,推动治理从“经验驱动”向“机制精准调控”转型。

参考文献:

- [1] Gan Fuwan, Diao Xiang, Tan Kongrong, et al. An evaluation of the use of IMERG products for representing drought in a typical rocky karst region experiencing rocky desertification in Guangxi, China [J]. *Remote Sensing Letters*, 2022, 13(11): 1100-1109.
- [2] 罗旭玲,白晓永,谭秋,等.不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析[J].*生态学报*, 2018, 38(24): 8717-8725.
Luo Xuling, Bai Xiaoyong, Tan Qiu, et al. Effect of lithology background on the correlation between soil erosion and rock desertification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8717-8725.
- [3] Valero A, Jan J, Petrash D A. Anaerobic dissolved As (III) removal from metal-polluted waters by cathode-stabilized Fe(III)-oxyhydroxides [J]. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2023, 9(2): 454-466.
- [4] 彭韬,周长生,宁茂岐,等.基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究[J].*第四纪研究*, 2017, 37(6): 1262-1270.
Peng Tao, Zhou Changsheng, Ning Maoqi, et al. Study on spatial distribution of epikarst zone on plateau karst slope based on ground-penetrating radar [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6): 1262-1270.
- [5] 罗维均,杨开萍,王彦伟,等.喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响[J].*地质科技通报*, 2022, 41(3): 208-214.
Luo Weijun, Yang Kaiping, Wang Yanwei, et al. Influence of different rock-soil fabrics on carbonate weathering carbon sink flux in karst regions [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 208-214.
- [6] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].*生态学报*, 2011, 31(21): 6353-6362.
Fan Feide, Wang Kelin, Xiong Ying, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [7] 孙强强,林听,焦心,等.旱区荒漠生态系统结构与功能稳定性监测及适应性治理[J].*农业工程学报*, 2026, 42(1): 331-341.
Sun Qiangqiang, Lin Xin, Jiao Xin, et al. Monitoring and evaluation of structural and functional stability and adaptive governance in dryland desert ecosystems [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2026, 42(1): 331-341.
- [8] 周正虎,刘琳,侯磊.土壤有机碳的稳定和形成:机制和

- 模型[J].北京林业大学学报,2022,44(10):11-22.
- Zhou Zhenghu, Liu Lin, Hou Lei. Soil organic carbon stabilization and formation: Mechanism and model[J].Journal of Beijing Forestry University,2022,44(10):11-22.
- [9] 张健瑜,李灿,曾和平,等.不同植被类型紫色土腐殖质的剖面分布特征[J].水土保持通报,2019,39(5):85-91.
- Zhang Jianyu, Li Can, Zeng Heping, et al. Distribution characteristics of humus in purple soil profile under different vegetation types[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2019,39(5):85-91.
- [10] 赵楚,盛茂银,李雨萱,等.喀斯特生态系统土壤表面电化学特征及其影响因子[J].土壤学报,2022,59(3):756-766.
- Zhao Chu, Sheng Maoyin, Li Yuxuan, et al. Characteristics of soil electrochemical properties and soil environmental impact factors in karst ecosystem in southwest China[J].Acta Pedologica Sinica,2022,59(3):756-766.
- [11] 杨文博,刘娜,蔡强国,等.水力侵蚀对土壤碳循环及土壤微生物多样性影响的研究进展[J].水土保持学报,2024,38(1):14-21.
- Yang Wenbo, Liu Na, Cai Qiangguo, et al. Research progress on the effects of hydraulic erosion on soil carbon cycle and soil microbial diversity[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(1):14-21.
- [12] 徐新涛,任歌,刘延,等.环境异质性影响土壤微生物群落的研究进展[J].生态科学,2023,42(5):247-256.
- Xu Xintao, Ren Ge, Liu Yan, et al. Advances in the effects of environmental heterogeneity on soil microbial communities[J].Ecological Science,2023,42(5):247-256.
- [13] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
- Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J].Acta Pedologica Sinica,2023,60(3):627-643.
- [14] 周红,何欢,肖蒙,等.云南省森林土壤腐殖质组分特征及影响因素[J].土壤学报,2021,58(4):1008-1017.
- Zhou Hong, He Huan, Xiao Meng, et al. Composition of humus in forest soils of Yunnan Province, China and its influencing factors[J].Acta Pedologica Sinica,2021,58(4):1008-1017.
- [15] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- Dai Quanhou, Yan Youjin. Research progress of karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(2):1-10.
- [16] 段倩倩,杨晓红,黄先智.石漠化地区生态桑林根际土壤微生物资源多样性研究[J].西南大学学报(自然科学版),2017,39(7):25-29.
- Duan Qianqian, Yang Xiaohong, Huang Xianzhi. The diversity of microbial resources in ecological mulberry rhizosphere soil in a rocky desertification area[J].Journal of Southwest University (Natural Science),2017,39(7):25-29.
- [17] 田昌园,张红丽,汪军红,等.近30年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持学报,2024,38(3):37-44.
- Tian Changyuan, Zhang Hongli, Wang Junhong, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):37-44.
- [18] Wei Dengfeng, Chang Yue, Song Danni, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification in Southwest China based on GIS and geodetector[J].Open Geosciences,2024,16:e20220625.
- [19] Waigwa A N, Mwangi B N, Wahiti G R, et al. Variation of morphological and leaf stoichiometric traits of two endemic species along the elevation gradient of Mount Kenya, East Africa[J].Journal of Plant Ecology,2020,13(6):785-792.
- [20] 陈彦君,赵筱青,普军伟,等.滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究[J].中国岩溶,2024,43(2):379-391.
- Chen Yanjun, Zhao Xiaoping, Pu Junwei, et al. Correlation mechanism between rocky desertification degrees and slope position factors in karst mountainous area of southeast Yunnan[J].Carsologica Sinica,2024,43(2):379-391.
- [21] 林哲,邓羽松,王芳,等.壤中流研究进展及其土壤侵蚀效应[J].中国水土保持科学(中英文),2026,24(3):1-16.
- Lin Zhe, Deng Yusong, Wang Fang, et al. Advances in research on subsurface flow and its effects on soil erosion[J].Science of Soil and Water Conservation,2026,24(3):1-16.
- [22] Rzehak T, Praeg N, Zink H, et al. Microbial perspective of inhibited carbon turnover in *Tangelhumus* of the Northern Limestone Alps [J]. Environmental Microbiology Reports,2024,16:e13215.
- [23] Chen Hongfeng, Li Qi, Wang Mingxia, et al. XPS and two-dimensional FTIR correlation analysis on the binding characteristics of humic acid onto kaolinite surface[J].Science of the Total Environment,2020,724:e138154.
- [24] Song Shuzhen, Xiong Kangning, Chi Yongkuan. Response of grassland ecosystem function to plant functional traits under different vegetation restoration models in areas of karst desertification[J].Frontiers in Plant Science,2023,14:e1239190.
- [25] 刘占锋.土壤次生代谢产物:连接微生物残体与土壤有机碳库的生态纽带[J].中国生态农业学报(中英文),2026,34(1):6-11.
- Liu Zhanfeng. Soil secondary metabolites: An ecological link bridging microbial residues and soil organic carbon pools [J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2026,34(1):6-11.
- [26] Yue Xin, Li Shimei, Hussain Q, et al. Transformation of humic substances and functional groups of soil organic carbon after wildfire[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2021,67(1):29-37.
- [27] Zheng Wei, Rao Chengjiao, Wu Qian, et al. Changes in the soil labile organic carbon fractions following bedrock expo-

- sure rate in a karst context[J]. *Forests*, 2022, 13(4): e516.
- [28] 曹成, 李宇, 张烈辉, 等. 润湿性对CO₂溶解封存的影响机制与调控方法研究进展[J]. *天然气工业*, 2024, 44(12): 162-175.
Cao Cheng, Li Yu, Zhang Liehui, et al. Research progress on influence mechanism and control method of wettability on CO₂ dissolution storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(12): 162-175.
- [29] 李渊, 刘子琦. 石漠化区不同土地类型土壤侵蚀与理化性质特征[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(5): 515-523.
Li Yuan, Liu Ziqi. Soil erosion and physicochemical properties of different land types in rocky desertification area[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(5): 515-523.
- [30] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6303-6313.
Sheng Maoyin, Liu Yang, Xiong Kangning. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China karst [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [31] 安迪, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化区岩-土与非岩-土界面土壤孔隙变异及入渗对干湿变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(11): 139-149.
An Di, Peng Xudong, Dai Quanhong, et al. Response of soil pore variation and infiltration to dry-wet changes at rock-soil and non-rock-soil interface in rocky desertification areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(11): 139-149.
- [32] 郝晓地, 唐兴, 曹亚莉. 腐殖质对污泥厌氧消化的影响及其屏蔽方法[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 407-418.
Hao Xiaodi, Tang Xing, Cao Yali. Effects of humic substances on anaerobic digestion of excess sludge and their blocked approaches [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 407-418.
- [33] Mayans B, Pérez-Esteban J, Escolástico C, et al. Evaluation of commercial humic substances and other organic amendments for the immobilization of copper through ¹³C CPMAS NMR, FT-IR, and DSC analyses [J]. *Agronomy*, 2019, 9(11): e762.
- [34] 宋鸽, Ivanobich P A, 石峰. 腐殖质生理活性及其与化学组成关系的研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 598-610.
Song Ge, Ivanobich P A, Shi Feng. Progress on the physiological activity of humic substances and correlation with its chemical composition [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 598-610.
- [35] Hong Chuntao, Shao Qingsong, Qin Wensheng, et al. Bacterial communities are associated with the tuber size of *Tetrastigma hemsleyanum* in stony soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(3): 373-388.
- [36] Wang Junxian, Lan Jiacheng, Long Qixia, et al. Soil organic carbon transfer in aggregates subjected to afforestation in karst region as indicated by ¹³C natural abundance[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 531: e120798.
- [37] Hu Ning, Lan Jiacheng. Impact of vegetation restoration on soil organic carbon stocks and aggregates in a karst rocky desertification area in Southwest China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3): 1264-1275.
- [38] Zheng W, Wu Q, Rao C, et al. Characteristics and interactions of soil bacteria, phytocommunity and soil properties in rocky desertification ecosystems of Southwest China [J]. *Catena*, 2023, 220: e106731.
- [39] Cervera-Mata A, Aranda V, Ontiveros-Ortega A, et al. Hydrophobicity and surface free energy to assess spent coffee grounds as soil amendment: Relationships with soil quality [J]. *Catena*, 2021, 196: e104826.
- [40] 张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 1-9.
Zhang Weijun, Li Shuangyi, Xu Yingde, et al. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9.
- [41] 侯自航, 王忠诚. 湘西慈利县不同石漠化程度下土壤理化性质特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(12): 98-110.
Hou Zihang, Wang Zhongcheng. Soil physical and chemical properties of different rock desertification degrees in Cili County of Xiangxi [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2021, 41(12): 98-110.
- [42] Liu Yong, Wang Long, Liu Chang, et al. Enhanced cadmium removal by biochar and iron oxides composite: Material interactions and pore structure [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 330: e117136.
- [43] Li Cuilan, Gao Shuqing, Zhang Jinjing, et al. Moisture effect on soil humus characteristics in a laboratory incubation experiment [J]. *Soil and Water Research*, 2016, 11(1): 37-43.
- [44] 王帅, 徐俊平, 王楠, 等. FTIR及SEM诊断铁铝锰氧化物参与微生物利用木质素形成矿物-菌体残留物的结构特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2086-2093.
Wang Shuai, Xu Junping, Wang Nan, et al. Structural characteristics of mineral-microbial residues formed by microbial utilization of lignin joined with Fe, Al, Mn-Oxides based on FT-IR and SEM techniques [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2086-2093.
- [45] Masmoudi S, Abid W, Medhioub K, et al. Compost derived from olive mill cake: Effects on isohumic soil quality based on humic acids characterization [J]. *Heliyon*, 2024, 10(16): e36456.
- [46] Pan Ziqian, Dong Yanyan, He Gongxiu, et al. Spatial heterogeneity of soil properties in planted mixed forests in the rocky desertification areas of the Wuling Mountain [J]. *PeerJ*, 2024, 12: e18724.
- [47] Piccolo A, García-Díaz C, Cozzolino V, et al. Varying the hydrophobicity of humic matter by a phase-transfer-catalyzed O-alkylation reaction [J]. *Chemosphere*, 2023, 313: e137599.

- [48] 花莉,金素素,洛晶晶.生物炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J].生态环境学报,2012,21(11):1795-1799.
- Hua Li, Jin Susu, Luo Jingjing. Effect of Bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(11): 1795-1799.
- [49] Deng Hang, Gharasoo M, Zhang Liwei, et al. A perspective on applied geochemistry in porous media: Reactive transport modeling of geochemical dynamics and the interplay with flow phenomena and physical alteration[J]. Applied Geochemistry, 2022, 146: e105445.
- [50] Vishnyakova O, Ubugunov L. Changes in molecular structure of humic substances in cambisols under agricultural use[J]. Agronomy, 2023, 13(9): e2299.
- [51] Bezuglova O. Molecular structure of humus acids in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2019, 182(4): 676-682.
- [52] 方婧,金亮,程磊磊,等.环境中生物炭稳定性研究进展[J].土壤学报,2019,56(5):1034-1047.
- Fang Jing, Jin Liang, Cheng Leilei, et al. Advancement in research on stability of biochar in the environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1034-1047.
- [53] 王龙,马杰,邓迎璇,等.金属离子在铁(氢)氧化物与腐殖质微界面上的吸附机理和模型研究进展[J].农业资源与环境学报,2017,34(5):405-413.
- Wang Long, Ma Jie, Deng Yingxuan, et al. Micro-interfacial mechanism and model of metal ions adsorption on the iron(hydr) oxides and humic substances: A review [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 405-413.
- [54] 魏世勇,谭文峰,刘凡.土壤腐殖质-矿物质交互作用的机制及研究进展[J].中国土壤与肥料,2009(1):1-6.
- Wei Shiyong, Tan Wenfeng, Liu Fan. Advances on the study of mineral-humus interactions in soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(1): 1-6.
- [55] 秦晴晴,张琢,宋子文.腐殖质来源、特征及其与土壤中重金属作用机制的研究进展[J].环境化学,2023,42(6):1899-1910.
- Qin Qingqing, Zhang Zhuo, Song Ziwen. Research progress on sources, characteristics of humus and mechanism of interaction with heavy metals in soil[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(6): 1899-1910.
- [56] 崔东宇,何小松,席北斗,等.堆肥腐熟前后胡敏酸与富里酸的还原容量比较[J].中国环境科学,2015,35(7):2087-2094.
- Cui Dongyu, He Xiaosong, Xi Beidou, et al. The comparison of reduction capacity between humic acid and fulvic acid extracted from the compost[J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2087-2094.
- [57] 周念清,吴延浩,蔡奕,等.湿地关键带中磷与氮、碳循环联动耦合机制[J].地球科学与环境学报,2022,44(1):91-101.
- Zhou Nianqing, Wu Yanhao, Cai Yi, et al. Coupling mechanism of phosphorus and nitrogen, carbon cycles in critical zone of wetland[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 91-101.
- [58] Wang Zilu, Lin Yiping, Wang Kefan, et al. Relative contributions of soil and litter properties to soil microbial community variations during the restoration of larch plantations to mixed forests[J]. Microorganisms, 2025, 13(10): e2359.
- [59] Wang Chao, Wang Xu, Pei Guangting, et al. Stabilization of microbial residues in soil organic matter after two years of decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 141: e107687.
- [60] Sun Caili, Liu Yongwei, Yao Yajuan, et al. Plant-induced nutrient enrichment alters microbial carbon cycling gene expression in Pb-Zn contaminated rhizospheres[J]. Plant and Soil, 2025, 516(2): 1313-1327.
- [61] Wang Yingxin, Zhou Qingping, Chu Jianmin, et al. Interactive effects of plant litter type and yak excrement on litter decomposition in a shrub-encroached Alpine meadow[J]. Functional Ecology, 2025, 39(7): 1799-1814.
- [62] Silverman S N, Wijker R S, Sessions A L. Biosynthetic and catabolic pathways control amino acid $\delta^2\text{H}$ values in aerobic heterotrophs[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: e1338486.
- [63] Jiang Fangzhi, Mu Ziyao, Zhang Chenxu, et al. A comprehensive review on nature-inspired redox systems based on humic acids: Bridging microbial electron transfer and high-performance supercapacitors[J]. Progress in Materials Science, 2026, 156: e101563.
- [64] Srivastava A K, Riaz A, Jiang Junmei, et al. Advancing climate-resilient sorghum: The synergistic role of plant biotechnology and microbial interactions[J]. Rice, 2025, 18(1): e41.
- [65] 黄红丽,刘剑潇,郁红艳,等.木质素降解菌对腐殖质形成的影响的研究[J].高技术通讯,2009,19(2):207-212.
- Huang Hongli, Liu Jianxiao, Yu Hongyan, et al. Research on the effects of two different ligninolytic organisms on humus formation[J]. Chinese High Technology Letters, 2009, 19(2): 207-212.
- [66] Zhai Senmao, Wang Kuang, Yu Fengcun, et al. Effects of *Trichoderma harzianum* combined with *Phanerochaete chrysosporium* on lignin degradation and humification during chicken manure and rice husk composting[J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16: e1515931.
- [67] Peng Qiannan, Zhao Cheng, Wang Xiaopeng, et al. Modeling bacterial interactions uncovers the importance of outliers in the coastal lignin-degrading consortium[J]. Nature Communications, 2025, 16: e639.
- [68] 王帅,徐俊平,窦森,等.不同菌株培养顺序对添加铁铝锰氧化物白浆土腐殖质组成的影响[J].环境科学学报,2018,38(2):696-703.
- Wang Shuai, XU Junping, Dou Sen, et al. Effects of different microbial culture sequences on the humic composition of Albic soil amended with Fe, Al, Mn oxide minerals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 696-703.