https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.123

高寒山区TBM洞渣土坡面植物-微生物固土与抗侵蚀机制

罗正宇[1,2],裴向军[1,2,3*],韩洪瑞[1],谢永芳[1],邹 桐[1],闫国茹[1]

1. 成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059
2. 成都理工大学国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室,四川成都 610059
3. 天府永兴实验室,四川成都 610213

摘 要: 针对青藏高原隧道掘进机(Tunnel Boring Machine,简称TBM)洞渣边坡结构松散、养分贫乏及植被恢复困难等问题,评估了植物-微生物联合修复在边坡固土抗蚀方面的作用.采用室内盆栽和野外边坡试验,设置对照组(CK)及枯草芽孢杆菌(K)、地衣芽孢杆菌(DY)、解淀粉芽孢杆菌(JD)、黑曲霉(H)、哈茨木霉(HC)共5种微生物处理组,测定养分、酶活、植物生长和坡面水动力指标.研究表明:植物-微生物联合处理通过促进根系发育、提高酶活和改善养分条件,对坡面水动力特征产生综合影响,从而提升边坡抗侵蚀能力.径流功率最大削减97.36%,阻力系数最大增幅486.26%.为高寒高海拔山区TBM弃渣体边坡的生态修复与水土保持提供了有效的技术方案.

关键词: 植物-微生物互作;群落结构;边坡抗侵蚀;根系结构;生态修复;土壤保持.

中图分类号: P69 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3320-12 **收稿日期:** 2025-08-31

Plant-Microbe Interactions in Soil Stabilization and Erosion Control on TBM Muck Slopes in Alpine Regions

Luo Zhengyu[1,2], Pei Xiangjun[1,2,3*], Han Hongrui[1], Xie Yongfang[1], Zou Tong[1], Yan Guoru[1]

1. *College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2. *State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
3. *Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu* 610213, *China*

Abstract: This study aims to evaluate the effects of plant-microbe combined remediation on soil stabilization and erosion resistance of TBM muck slopes on the Qinghai-Xizang Plateau, where slope materials are loose in structure, deficient in nutrients, and difficult to revegetate. Indoor pot experiments and field slope trials were conducted. A control (CK) and five microbial treatments were established, including *Bacillus subtilis* (K), *Bacillus licheniformis* (DY), *Bacillus amyloliquefaciens* (JD), *Aspergillus niger* (H), and *Trichoderma harzianum* (HC). Soil nutrients, enzyme activities, plant growth, and slope hydrodynamic parameters were measured. The results show that the plant-microbe combined treatments improved root

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2024YFF1307804);国家自然科学基金项目(No. 42207231).

作者简介: 罗正宇(1987-),男,实验师,主要从事生态地质环境保护与修复方面的研究.ORCID:0000-0002-4142-0007. E-mail:luozhengyu15@cdut.edu.cn

* **通讯作者:** 裴向军,ORCID:0009-0007-6529-2605. E-mail:pxj@cdut.edu.cn

引用格式: 罗正宇,裴向军,韩洪瑞,谢永芳,邹桐,闫国茹,2026.高寒山区TBM洞渣土坡面植物-微生物固土与抗侵蚀机制.地球科学,51(9):3320-3331.

Citation: Luo Zhengyu, Pei Xiangjun, Han Hongrui, Xie Yongfang, Zou Tong, Yan Guoru, 2026. Plant-Microbe Interactions in Soil Stabilization and Erosion Control on TBM Muck Slopes in Alpine Regions. *Earth Science*, 51(9): 3320-3331.

development, enhanced enzyme activities, and ameliorated nutrient conditions, thereby exerting integrated effects on slope hydrodynamic characteristics and ultimately increasing slope erosion resistance. Runoff power was reduced by up to 97.36%, while the resistance coefficient increased by up to 486.26%. The findings provide an effective technical approach for the ecological restoration and soil and water conservation of TBM waste-muck slopes in alpine and high-altitude regions.

Key words: plant-microbe interactions; community structure; slope erosion resistance; root architecture; ecological restoration; soil conservation.

近年来,随着川藏交通廊道等重大工程建设的推进,高寒高海拔地区隧道工程受到强震活动频繁和生态地质环境脆弱等多重约束(杜闯东等,2021).在地形条件和生态保护要求的共同作用下,以环境扰动较低为特征的TBM施工逐渐得到广泛应用.与钻爆法相比,TBM洞渣颗粒组成和形态特征差异明显,粗粒料粒径相对较小,且多呈扁平状,渣体结构稳定性较差,在水力冲蚀作用下易发生细粒迁移和骨架失稳(Zhou *et al.*,2023;董自涛等,2026).此外,TBM洞渣多以花岗岩类混杂岩为主,养分含量低、微生物多样性不足,在自然条件下植被定植困难,生态修复难度较大(王忠钊等,2024).当前,针对坡面水土流失防治,虽已形成植被护坡、工程结构及水利措施等多种技术手段,但其防治效果往往随时间和空间条件变化而减弱(张铭海,2024).因此,亟须探索适用于高寒山区TBM洞渣边坡的近自然修复途径,以提升边坡生态恢复和水土保持的长期稳定性.

植物在扰动边坡固土稳坡和浅层侵蚀防控中具有重要作用(Wu *et al.*, 2023).筛选并种植适宜的植物群落不仅能够实现工程堆渣体边坡快速复绿,还可通过凋落物输入和根系分泌改善渣土质量,提高渣土中微生物数量和活性,从而增强坡面抗水土流失能力(Li *et al.*, 2024a; Wang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).与此同时,根际促生微生物能够改善渣土理化性质,调节细菌和真菌群落结构,提高土壤肥力,并通过影响植物根系生长增强保水固土作用,减少浅层水土流失(陈丁亿等,2026).因此,植物与微生物联合修复是一种具有应用潜力的环境友好型生态修复方式,可用于贫瘠土壤熟化、快速建植和浅层侵蚀防控(Zhou *et al.*, 2025).在这一过程中,微生物可促进渣土中矿质养分活化,改善养分结构,营造植物适生环境(Pradhan *et al.*,2025);同时,植物与微生物之间的互作还可能通过影响根系生长和分泌特征,提高边坡固土能力并改善生态环境质量(石振明等,2025).

解淀粉芽孢杆菌可通过提高植物抗氧化酶活性、分泌植物激素等途径增强植物耐逆性,进而促进植物生长(杨雪等,2026).地衣芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌兼具解磷、解钾、分泌促生物质及拮抗病原菌等功能,能够改善土壤肥力并促进植物健康生长(Rowińska *et al.*, 2025).此外,黑曲霉和哈茨木霉等功能真菌可通过分泌有机酸活化难溶矿物,提高渣土中速效养分含量(Luo *et al.*, 2024).然而,目前关于不同功能微生物参与高寒山区TBM洞渣边坡修复的研究仍较少,尤其缺乏对其在渣土改良、植物生长促进及坡面抗侵蚀效应方面的系统比较.

综上,针对高寒山区TBM洞渣土养分匮乏、水土流失风险高、植被恢复困难及微生物活性较低等问题,本文选取高羊茅、黑麦草和披碱草3种抗逆性较强、分布广泛的速生禾本科植物,结合枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、黑曲霉和哈茨木霉等功能微生物,开展室内盆栽与野外边坡试验.通过测定渣土养分特征、酶活性、植物生长指标及坡面水动力参数,分析不同菌剂处理对TBM洞渣边坡固土抗蚀性能的影响,阐明植物与功能微生物联合修复对边坡改良的作用特征.研究结果可为高寒高海拔山区TBM洞渣边坡生态修复与水土保持提供理论依据和技术参考.

1　材料与方法

1.1　试验设计

本研究依据罗正宇等(2023)的研究结果,选取高羊茅、黑麦草和披碱草按6∶3∶1比例(草籽质量比)混播开展试验,并将该混播方案用于室内盆栽和TBM洞渣土堆积体边坡样方.试验共设6个处理组,即对照组(CK)以及枯草芽孢杆菌处理组(K)、地衣芽孢杆菌处理组(DY)、解淀粉芽孢杆菌处理组(JD)、黑曲霉处理组(H)和哈茨木霉处理组(HC).

室内盆栽试验每个处理组设置10个重复,共60盆.每盆按0.8 g播种量播撒高羊茅、黑麦草和披碱草混合种子.分别挑取5种微生物菌种接种于LB液体培养基中.细菌置于37 ℃恒温摇床中活化,真菌置于28 ℃恒温摇床中活化,振荡转速均为180 r/min,活化时间均为12 h.活化后的菌液用超纯水稀

释至10^8 cfu/mL备用.植物萌发后,各处理组每盆分别施加10 mL相应菌液.试验期间模拟当地降雨条件,每盆每日补水83 mL.试验自植物萌发起连续进行120 d,每30 d补施1次同体积菌液.

野外边坡试验沿用盆栽试验的处理设置.试验小区采用木板分隔,单个小区面积为6 m×0.5 m.各小区按20 g/m^{2}播种量均匀撒播混合草种.菌液施用量按盆栽试验中单盆施用量等比例换算后施加于相应处理小区.试验持续120 d,每30 d补施1次同体积菌液.依据研究区年均降雨强度,设置6 L/min、10 L/min和15 L/min三个放水流量,分别代表低、中、高3个降雨强度水平,用于分析不同微生物处理下坡面径流侵蚀特征的变化.

1.2 指标采集及测定

植物生长120 d后,随机选取室内盆栽试验各处理组中的5盆进行破坏性取样,每盆测定3株植物.株高和最大根长采用游标卡尺测定,并计算平均值;地上和地下生物量采用烘干法测定,同时计算根冠比.根系经清水冲洗后立即扫描,并利用Win-RHIZO软件分析总根长、总根表面积、总根体积、平均根直径、根系分叉数和根尖数.取样后同步采集根际土壤样品,其中一部分风干后分别过2 mm、1 mm和0.25 mm筛备用,用于土壤理化性质和酶活性测定;另一部分置于−20 ℃冰箱中保存,用于微生物群落分析.

参照Li *et al.*(2024b)的方法,土壤pH采用电位法测定,全氮、全磷、速效磷、铵态氮和硝态氮采用全自动间断化学分析仪(CleverChem Elfin)测定,全钾采用火焰光度计(NI-UGGX-900)测定,有效钾采用M3浸提法测定(土壤质量:浸提液体积=1:10(g/mL),浸提温度20~25 ℃),土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定.土壤碱性磷酸酶(ALP)、过氧化氢酶(S-CAT)、蔗糖酶(S-SC)、纤维素酶(S-CL)和脲酶(S-UE)使用索莱宝科技有限公司(北京)提供的土壤酶活性检测试剂盒测定.土壤细菌和真菌群落结构分析分别基于16S rRNA和ITS高通量测序.其中细菌群落以515F和907R为引物进行扩增,真菌群落以ITS区引物进行扩增,并借助QIIME2平台完成微生物数据分析.

野外边坡种植试验中,各处理小区划分为6 m×0.5 m的条状样地(图1).试验开始前按照设计流量调节放水强度,所用流量计量程为0~18 L/min,精度等级为±5%.各处理组测得的坡面水动力学指标和侵蚀速率见表1.

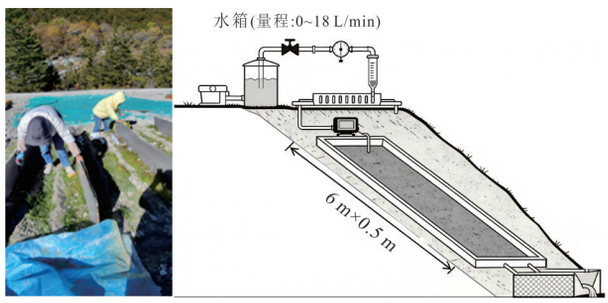


图1 野外边坡试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of a field slope test

表1 水力水动力学指标

Table 1 Hydraulic and hydrodynamic parameters

指标	公式	单位	参考文献
侵蚀速率	$SLR=\frac{M_s}{dLt}$	m/s	
雷诺数(Re)	$Re=\frac{v\times R}{\mu}$	无量纲	
弗劳德数(Fr)	$Fr=\frac{V}{\sqrt{gh}}$	无量纲	Guo *et al.*,2024;陈岳岩等,2025
阻力系数(f)	$f=\frac{8gRJ}{v^2}$	无量纲	
径流剪切力(τ)	$\tau=\rho_w gRJ$	N/m^2	
径流功率(ω)	$\omega=\tau v$	N/(m·s)	

1.3 数据处理与分析

土壤理化性质、土壤酶活性及植被特征等定量数据采用SPSS 26.0(IBM Corp., Armonk, NY, USA)进行统计分析,并通过单因素方差分析检验不同微生物处理间的差异显著性.数据可视化采用GraphPad Prism 10.1.2完成.微生物群落数据的可视化分析在Genescloud云平台完成.

采用R Studio 4.4.1中的lavaan包构建结构方程模型,以揭示微生物、植物生物量、根系结构、土壤酶活性、土壤养分与抗侵蚀性之间的作用路径.模型通过逐步删除非显著路径进行优化,最终采用Fisher's C统计量评价拟合效果:当Fisher's C检验结果$p>0.05$时,可认为模型与观测数据拟合良好.

2 结果

2.1 靶向微生物菌剂影响下土壤微生物群落变化特征

为比较不同菌剂处理下渣土微生物群落的特征差异,对细菌和真菌群落进行了组间分析.

α 多样性分析结果见图 2a. 与 CK 处理组相比，各菌剂处理组细菌和真菌群落的丰富度(Chao1 指数)和多样性(Simpson 指数)整体呈下降趋势. 门水平群落组成见图 2b. 细菌群落的优势菌门主要为变形菌门(Proteobacteria)，真菌群落的优势菌门主要为子囊菌门(Ascomycota)，且不同处理组间相对丰度存在差异.

β 多样性分析结果表明，PCoA 排序图中各处理组样点分布较为分散，组间分异较明显(附图 1). 进一步选取各处理组中相对丰度排名前 20 的细菌门和真菌门作为核心类群进行分析，其相对丰度见图 3. 不同菌剂处理改变了门水平上细菌和真菌核心类群的组成及其相对丰度. 细菌群落中，JD 处理组的壁菌门(Patescibacteria)和拟杆菌门(Bacteroidota)相对丰度较高，K 处理组的厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度较高；真菌群落中，JD 处理组的梳霉门(Kickxellomycota)相对丰度较高，H 处理组的球囊菌门(Glomeromycota)相对丰度较高，DY 处理组的担子菌门(Basidiomycota)相对丰度较高.

2.2　靶向微生物菌剂影响下碎石土理化性质变化特征

土壤养分变化见图 4. 相较于 CK 处理组，各菌剂处理均在不同程度上提高了渣土有机碳含量，其中 H 处理组增幅最大，为 75.6%，且与 CK 处理组差异显著($p<0.05$). 各微生物处理下 TBM 洞渣 pH 均呈下降趋势. 铵态氮含量方面，H 处理组与 CK 处理组差异显著($p<0.05$). 速效磷含量在各加菌处理组中均有不同程度增加，其中 HC 处理组显著高于 CK 处理组($p<0.05$). 全磷、全氮和全钾含量在各处理组间差异均不显著(附图 2).

土壤酶活性是反映土壤生物学过程的重要指标，其变化见图 5. 与 CK 处理组相比，K、JD 和 DY 处理组的蔗糖酶活性较高；JD、H 和 HC 处理组的脲酶活性增加. 过氧化氢酶活性在 HC 和 DY 处理组中降低，其余处理组均呈上升趋势. 碱性磷酸酶活性在各处理组中均有所提高，其中 JD 处理组最高，K 处理组最低.

2.3　靶向微生物菌剂影响下植物生长变化特征

植物根系生长特征见图 6. 与 CK 处理组相比，各菌剂处理下植物总根长、平均根直径和根表面积整体呈增加趋势，其中真菌处理组整体高于细菌处理组，但处理组间差异均不显著. 根体积除 DY 处理组略低于 CK 处理组外，其余处理组均有所增加，其中 H 处理组显著高于 CK 处理组($p<0.05$). 根尖数和根分支数在真菌处理组中整体较高，其中 H 和 HC 处理组的根系分叉数均显著高于 CK 处理组($p<0.05$).

植物生物量变化见图 6. 与 CK 处理组相比，各菌剂处理均提高了植物地上生物量，且差异显著($p<0.05$)；真菌处理组整体高于细菌处理组. 地下生物量在各菌剂处理组中整体呈增加趋势，但处理组间差异不显著. 根冠比方面，除 DY 和 JD 处理组外，其余处理组的根冠比均大于 1.

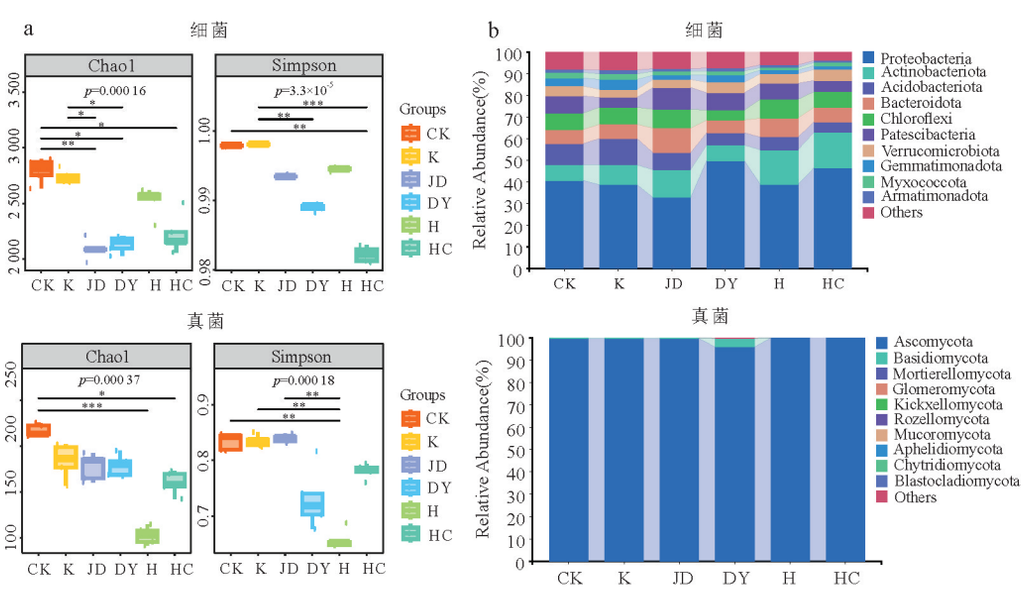


图 2　微生物群落 α 多样性及门类相对丰度变化

Fig.2　Changes in microbial community α-diversity and relative abundance of phyla

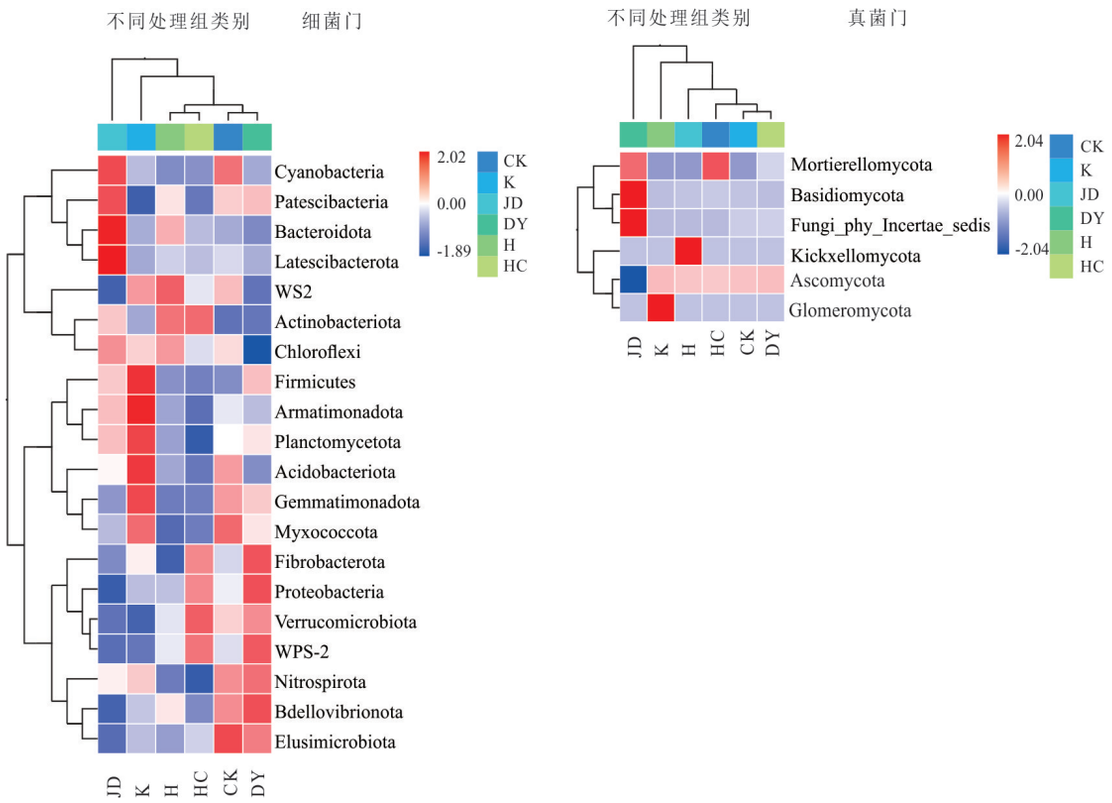


图 3 微生物群落标志物种组成

Fig.3 Composition of microbial community indicator species

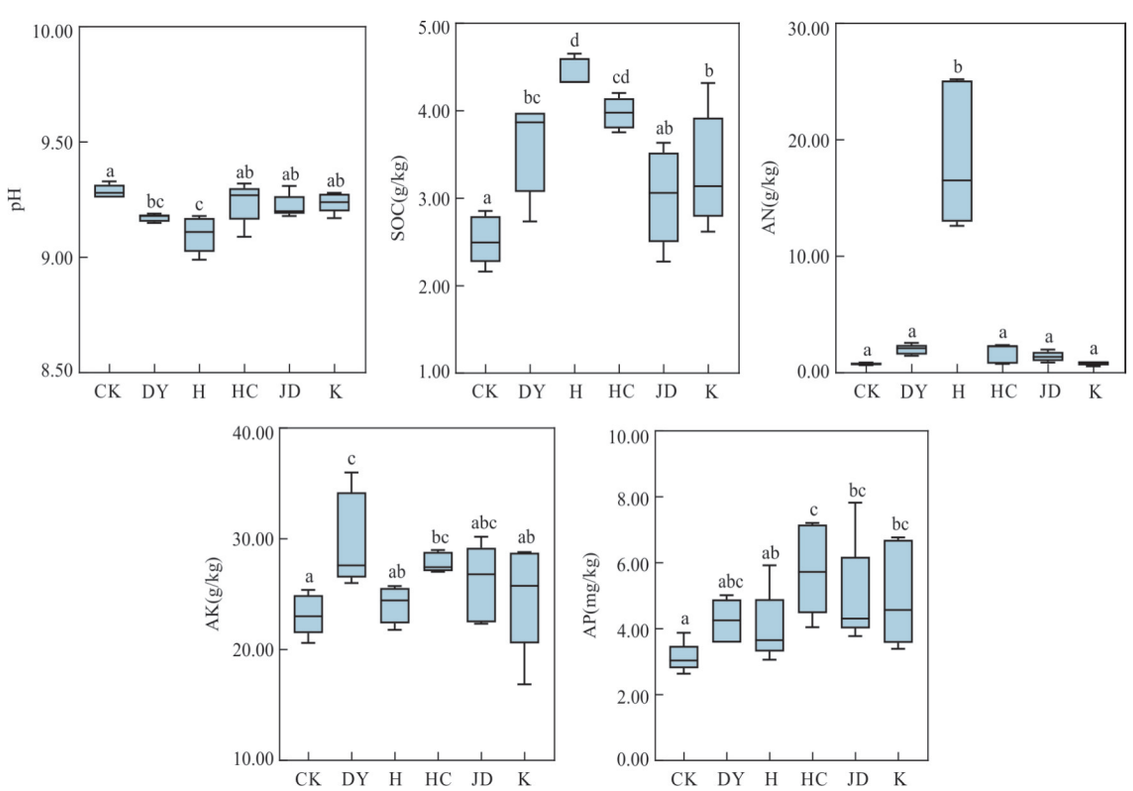


图 4 微生物影响下 TBM 洞渣理化性质变化

Fig.4 Changes in the physicochemical properties of TBM muck under microbial influence

不同字母表示两组之间存在显著性差异($p<0.05$),SOC:有机碳;AN:铵态氮;AK:速效钾;AP:速效磷

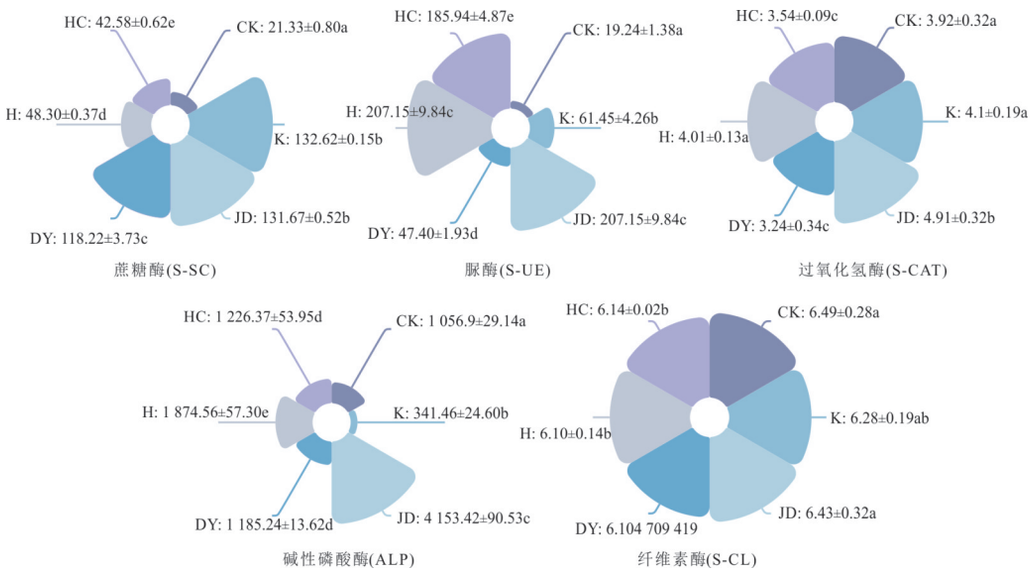


图 5　微生物影响下土壤酶活性变化

Fig.5　Changes in soil enzyme activity under microbial influence

单位均为(U/g),不同字母表示两组之间存在显著性差异($p<0.05$)

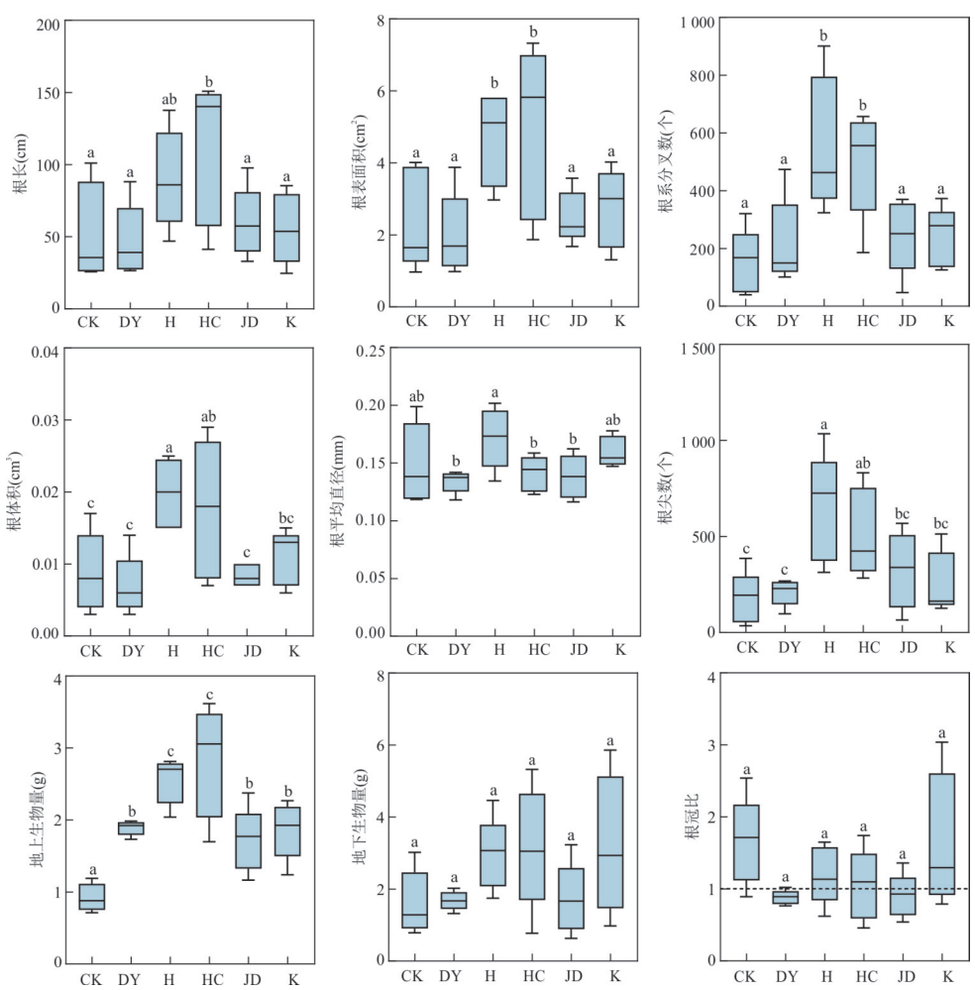


图 6　不同处理下植物生物量及根系结构变化特征

Fig.6　Changes in plant biomass and root architecture under different treatments

不同字母表示两组之间存在显著性差异($p<0.05$)

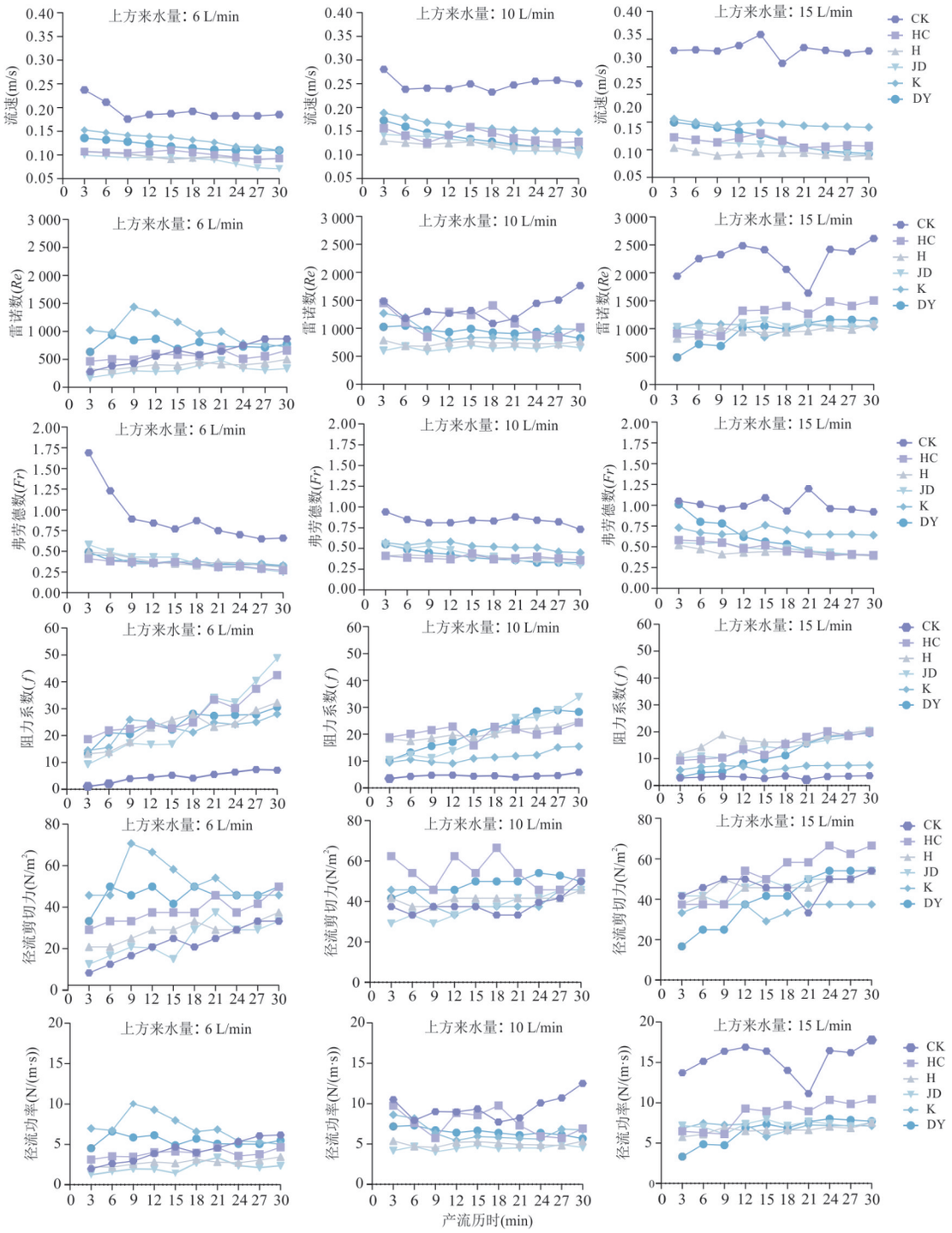


图 7 不同处理下边坡水力及水动力学参数特征

Fig.7 Characteristics of hydraulic and hydrodynamic parameters of slopes under different treatments

2.4 靶向微生物菌剂作用下植物根系坡面抗侵蚀特征

坡面水动力学参数变化见图 7. 与 CK 处理组相比，各菌剂处理组阻力系数(f)整体较高，弗劳德数(Fr)、径流功率(ω)、雷诺数(Re)和径流流速整体较低，其中 6 L/min 条件下径流功率降幅较大. 随着来水流量增加，各处理组的 Fr、ω、径流剪切力和 Re 均呈增大趋势. 中、低流量条件下，各处理组径流多表现为层流、缓流状态(Fr<1.0)；15 L/min 条件下，部分处理组转变为急流和紊流状态，Re 为 1 938.29～2 612.33. 在 15 L/min 条件下，Re 降幅为 44.98%～57.78%，Fr 降幅为 32.66%～62.06%. 不同菌剂处理

组间存在差异,其中真菌处理组的 *Re* 和 *Fr* 整体低于细菌处理组及 CK 组;在 6、10 和 15 L/min 流量下,径流功率降幅最大的处理组分别为 HC、JD 和 H 处理组.

3　讨论

3.1　靶向微生物对微生物群落的影响

研究表明,在植物-微生物联合处理条件下,不同靶向微生物处理对细菌和真菌群落的调控效应存在明显差异,TBM 洞渣土中细菌和真菌群落 α 多样性整体呈下降趋势.植物根系分泌物可影响根际微生物群落更新,并促进常驻根际微生物群落形成(Veresoglou *et al.*, 2022).因此,在原生 TBM 洞渣土这一养分贫乏、微生物本底较弱的基质条件下,人工干预后根际微生物数量及组成的差异性变化,与土壤养分状况、根际分泌物及其他微环境因子的共同调控有关(Emmett *et al.*, 2021).

K 处理组中细菌和真菌 OTU 数均有所增加(图 8),表明枯草芽孢杆菌施加后可能通过促进胞外酶和促生代谢产物分泌,改善根际养分与碳源供给,从而有利于根际微生物定殖(Li *et al.*, 2023).而其余处理则表现出细菌与真菌响应不同步的现象,说明不同功能菌剂对根际群落具有差异化筛选作用(Díaz *et al.*, 2024).同时,细菌群落共有 OTU 数明显高于真菌群落,而真菌群落各处理组间特有 OTU 数比例较高.细菌群落具有较强的核心稳定性,真菌群落则对不同靶向微生物处理及根际微环境变化更为敏感(Nie *et al.*, 2025).由此可见,在 TBM 洞渣土基质条件下,植物-微生物联合修复并非单纯增加微生物数量,而是通过根际筛选作用驱动不同类群的定向重组.

3.2　TBM 洞渣土抗侵蚀性能的植物-微生物协同作用机制

为分析植物-微生物互作对 TBM 洞渣土抗侵蚀性能的影响路径,本研究构建了包含生物量、微生物群落、根系结构、渣土养分、酶活性和抗侵蚀性 6 个一级指标的结构方程模型(图 9).

结果表明,TBM 洞渣土抗侵蚀性的提升主要受植物生物量、根系结构和土壤酶活性的共同驱动.其中,生物量对根系结构具有显著促进作用,且生物量、根系结构和酶活性均对抗侵蚀性表现出直接正向影响.植物生长及根系发育是增强坡面稳定性的关键因素,植物根系通过对土体的加筋固持作用以及根系-土壤互作,显著提升了坡面稳定性(石振明等,2025).同时,发达的根系不仅通过物理加筋效应增强坡面稳定性,还通过调节酶活性和养分循环进一步提升坡面的抗侵蚀能力(Li *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2023).在土壤过程方面,酶活性增强

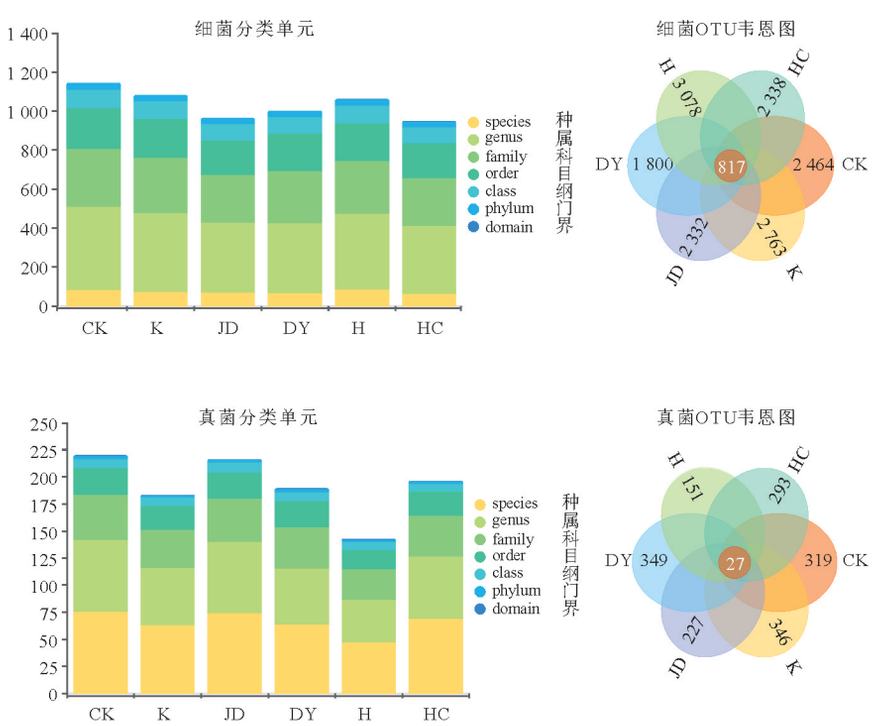


图 8　不同微生物对土壤微生物群落结构影响

Fig.8　Effects of different microorganisms on soil microbial community structure

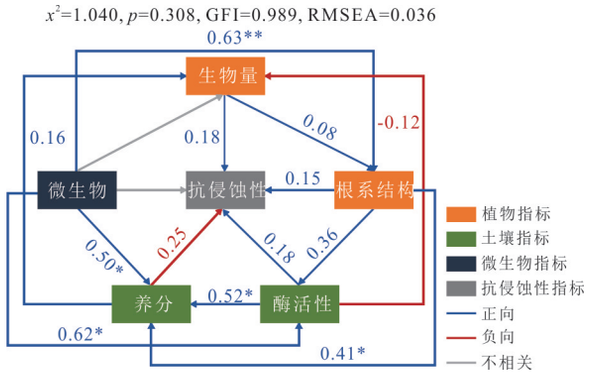


图 9 土-植-微生物与土壤抗侵蚀能力的关系

Fig.9 Relationship between soil-plant-microbe interactions and soil erosion resistance

*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$

直接促进养分释放与转化,并对抗侵蚀性产生正向作用.而养分指标与抗侵蚀性呈负相关趋势,表明在植被恢复初期或养分快速转化阶段,增加的养分主要用于植物生物量积累和根系构建,因此与坡面抗侵蚀性呈现阶段性响应差异(Rivier *et al.*, 2022).此外,虽然微生物与抗侵蚀性之间未表现出显著的直接联系,但微生物可通过调节酶活性和根系结构,间接影响抗侵蚀性,并进一步作用于坡面稳定性(全民等,2024).

3.3 植物主导下洞渣土坡面抗侵蚀的水动力调控机制

雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)是表征坡面径流流型与流态的重要参数(冯君园等,2015).本研究中,加菌处理组的 Re 和 Fr 整体低于 CK 处理组,径流多表现为层流、缓流状态,而 CK 处理组在高流量条件下更易出现急流和紊流特征.随着上方来水流量增加,各处理组均出现不同程度的紊流特征,但在菌剂处理条件下,由于植被长势较好、地表覆盖增加且根系固土作用增强,Re 增幅相对较小,在一定程度上可缓冲来水增强对坡面径流流态的不利影响(兰泽凡等,2024).

坡面阻力系数(f)、径流剪切力(τ)和径流功率(ω)是表征坡面侵蚀过程的重要水动力参数(张荣华等,2018).已有研究表明,植被可通过改变坡面水流结构、增加水流阻力来减弱径流侵蚀,同时植物根系还可提高坡面抗蚀能力(张旭昇等,2012).本研究中,在3种上方来水流量条件下,坡面径流经过植被后,水流连续性受到干扰,流动路径趋于复杂,从而增加了水流阻力并削弱了径流动能,因此加菌处理组的 f 值均高于 CK 处理组(赵杰和邵龙潭,2007;夏加国等,2017;谢云和岳天雨,2018).同时,各处理 τ 均随产流历时延长而增大,ω 随来水流量增加而升高;但与 CK 组相比,加菌处理组 ω 整体较低,说明植物-微生物联合处理有效削弱了径流对坡面的侵蚀和搬运能力(覃小华等,2017).

总体来看,植物-微生物联合处理通过促进植物生长、增强根系固土作用并调节坡面水动力过程,共同提高了 TBM 洞渣土坡面的抗侵蚀能力.植物根系可通过增强土体黏聚力、改善水分保持和促进有机质积累等途径降低土体可蚀性,从而减弱土壤侵蚀(Gan *et al.*, 2013).与此同时,微生物在根土复合体中通过与植物根系互作产生代谢产物,其中多糖类胶结物质可与土壤颗粒结合形成较稳定的胶体结构,改善土体微观结构并提高土壤持水能力(Peng *et al.*, 2022).此外,功能微生物还可通过促进养分活化、改善基质条件和增强植物生长,为坡面水动力削减和抗侵蚀能力提升提供基础支撑.由此表明,在 TBM 洞渣土坡面抗侵蚀过程中,植物发挥主导作用,微生物则通过改善土体环境和促进植物生长起到协同增效作用.

4 结论

本研究针对高寒高海拔山区 TBM 隧道洞渣土结构松散、养分贫乏和微生物多样性不足等问题,系统评估了植物-微生物联合修复对坡面固土与抗侵蚀的作用机制,为高寒高海拔山区 TBM 弃渣边坡生态修复与水土保持提供科学依据和技术支撑.主要结论如下:

(1)植物-微生物联合处理促进了植物生长,并重塑了 TBM 洞渣土根际微生物群落结构.

(2)靶向微生物菌剂处理提高了 TBM 洞渣土生物学活性和养分有效性,促进了有机碳积累及速效磷、速效钾活化,并改善了洞渣土基质条件.

(3)植物-微生物联合处理有效调节了坡面水动力过程.加菌处理可增强水流阻滞作用,削弱径流冲刷与搬运能力,使阻力系数整体升高,而雷诺数、弗劳德数和径流功率整体降低;其中,真菌处理在稳定径流流态和降低侵蚀动力方面更具优势.

(4)结构方程模型结果表明,TBM 洞渣土抗侵蚀性的提升受植物生物量、根系结构和土壤酶活性的共同驱动.植物发挥主导作用,微生物通过促进酶活性、养分活化和植物生长发挥协同增效作用,最终形成“生物量提升-根系

强化-水动力削减”的协同固土与抗侵蚀机制.

附图见https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.123.

References

Chen, D. Y., Zhang, X. F., Huang, J. R., et al., 2026. Effects of Plant Growth‐Promoting Rhizosphere on Growth, Physiological Adaptability and Soil Properties of Osmanthus Fragrans. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Sciences Edition*), 50(2): 196—204 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. Y., Ma, B. H., Luan, X. L., et al., 2025. Response of Erosion Processes and Hydrodynamic Indicators to Inflow Patterns on Engineering Accumulation Slopes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 39(5): 92—104 (in Chinese with English abstract).

Díaz, A. S. L., Minchev, Z., Raaijmakers, J. M., et al., 2024. Impact of Bacterial and Fungal Inoculants on the Resident Rhizosphere Microbiome and the Volatilome of Tomato Plants under Leaf Herbivory Stress. *FEMS Microbiology Ecology*, 100(2): fiad160. https://doi.org/10.1093/femsec/fiad160

Dong, Z. T., Luo, J., Pei, X. J., 2026. Study on Mechanical Properties and Strength Differentiation Formation Mechanism of TBM Muck with Different Rock Contents. *Journal of Railway Science and Engineering*, Online. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43‐1423/u.T20251718 (in Chinese with English abstract).

Du, C. D., Zhou, L. J., Duo, S. J., et al., 2021. Consideration of TBM Adaptability and Selection for Sichuan‐Tibet Railway Tunnels and Countermeasures for Unfavorable Geologies. *Tunnel Construction*, 41(6): 897—912 (in Chinese with English abstract).

Emmett, B. D., Lévesque‐Tremblay, V., Harrison, M. J., 2021. Conserved and Reproducible Bacterial Communities Associate with Extraradical Hyphae of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *The ISME Journal*, 15(8): 2276—2288. https://doi.org/10.1038/s41396-021-00920-2

Feng, J. Y., Cai, Q. G., Li, Z. X., et al., 2015. Research Progresses of Melt Water Erosion in the High Altitude and Cold Regions of China. *Research of Soil and Water Conservation*, 22(3): 331—335 (in Chinese with English abstract).

Gan, Y. D., Jia, Y. W., Wang, K., 2013. Modeling Infiltration‐Runoff under Multi‐Layered Soil during Rainfall. *Advanced Materials Research*, 864—867: 2392—2402. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.864‐867.2392

Guo, Y. L., Zhao, Y. G., Ji, J. Y., et al., 2024. Maintaining Biocrusts in Grasslands above a Threshold Coverage is Vital for Soil Erosion Control in Drylands. *CATENA*, 246: 108403. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108403

Lan, Z. F., Tian, X. J., Niu, Y. F., et al., 2024. Evaluation on Soil Erosion Based on RUSLE Model in the Yarlung Zangbo River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 31(3): 20—29 (in Chinese with English abstract).

Li, B., Zhao, L. X., Liu, D. X., et al., 2023. *Bacillus Subtilis* Promotes Cucumber Growth and Quality under Higher Nutrient Solution by Altering the Rhizospheric Microbial Community. *Plants*, 12(2): 298. https://doi.org/10.3390/plants12020298

Li, Q., Liu, G. B., Zhang, Z., et al., 2017. Relative Contribution of Root Physical Enlacing and Biochemistrical Exudates to Soil Erosion Resistance in the Loess Soil. *CATENA*, 153: 61—65. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.037

Li, T., Wang, S. C., Zhao, L. Q., et al., 2024a. Improvement of Soil Nutrient Cycling by Dominant Plants in Natural Restoration of Heavy Metal Polluted Areas. *Environmental Research*, 263: 120030. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120030

Li, X. R., Shi, F., Zhou, M., et al., 2024b. Migration and Accumulation of Microplastics in Soil‐Plant Systems Mediated by Symbiotic Microorganisms and Their Ecological Effects. *Environment International*, 191: 108965. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108965

Luo, Z. Y., Han, H. R., Yao, H., et al., 2024. Effects of Artificially Modified Microbial Communities on the Root Growth and Development of Tall Fescue in Nutrient‐Poor Rubble Soil. *Plants*, 13(23): 3307. https://doi.org/10.3390/plants13233307

Luo, Z. Y., Han, H. R., Wang, S. R., et al., 2023. Grass Configuration Based on Analytic Hierarchy Method for Residue Field Remediation. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 54(6): 683—692 (in Chinese with English abstract).

Nie, H., Shi, Y. X., Yang, X. X., et al., 2025. Microbial Inoculant-Induced Modifications of Rhizospheric Metabolites and Microbial Communities Enhance Plant Growth. *Plant and Soil*, 512(1): 619—637. https://doi.org/10.1007/s11104-024-07102-x

Peng, X. Y., Liu, J. F., Cheng, X., et al., 2022. Dynamic Modelling of Soil-Rock-Mixture Slopes Using the Coupled DDA‐SPH Method. *Engineering Geology*, 307: 106772. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106772

Pradhan, N., Singh, S., Saxena, G., et al., 2025. A Review on Microbe-Mineral Transformations and Their Impact on Plant Growth. *Frontiers in Microbiology*, 16: 1549022. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1549022

Qin, X. H., Liu, D. S., Song, Q. H., et al., 2017. Reliability Analysis of Bedrock Laminar Slope Stability Considering Variability of Saturated Hydraulic Conductivity of Soil under Heavy Rainfall. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(6): 1065－1073 (in Chinese with English abstract).

Quan, M., Du, X. P., Bi, Y. L., 2024. Effects of AMF Inoculation on Root and Aggregate Stability of Three Plant Species in Open Pit Dump. *Research of Soil and Water Conservation*, 31(3): 187－194 (in Chinese with English abstract).

Rivier, P. A., Jamniczky, D., Nemes, A., et al., 2022. Short-Term Effects of Compost Amendments to Soil on Soil Structure, Hydraulic Properties, and Water Regime. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70 (1): 74－88. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0004

Rowińska, P., Sypka, M., Białkowska, A. M., et al., 2025. Evaluating Soil Bacteria for the Development of New Biopreparations with Agricultural Applications. *Applied Sciences*, 15(12): 6400. https://doi. org/10.3390/app15126400

Shi, Z. M., Zhu, X., Liu, M. M., et al., 2025. Research on Shear Resistance of Rooted Soil under Freeze-Thaw Cycles Based on DEM. Earth Science50(10): 3761－3775 (in Chinese with English abstract).

Veresoglou, S. D., Li, G. C., Chen, J. J., et al., 2022. Direction of Plant‐Soil Feedback Determines Plant Responses to Drought. *Global Change Biology*, 28(13): 3995－3997. https://doi.org/10.1111/gcb.16204

Wang, Y. J., Gong, H. R., Zhang, Z. X., et al., 2024. Effects of Microbial Communities during the Cultivation of Three Salt‐Tolerant Plants in Saline‐Alkali Land Improvement. *Frontiers in Microbiology*, 15: 1470081. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1470081

Wang, Z. Z., Wang, Z. H., Wang, S. Y., et al., 2024. Study on Resource Utilization of TBM Muck in Granite Stratum in Urban Area. *Science and Technology & Innovation*, (22): 22－25 (in Chinese with English abstract).

Wu, D., Wang, W. X., Yao, Y. P., et al., 2023. Microbial Interactions within Beneficial Consortia Promote Soil Health. *Science of the Total Environment*, 900: 165801. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165801

Xia, J. G., Hu, R. L., Qi, S. W., et al., 2017. Large-Scale Triaxial Shear Test of Soil‐Rock Mixture with Extra-Diameter Particles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(8): 2031－2039 (in Chinese with English abstract).

Xie, Y., Yue, T. Y., 2018. Application of Soil Erosion Models for Soil and Water Conservation. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(1): 25－37 (in Chinese with English abstract).

Yang, X., Li, J. N., Wang, B., et al., 2026. Bacillus Amyloliquefaciens Enhances the Drought Tolerance of Oat Plants by Regulating the Expression of Plant Growth-Promoting Genes. *Acta Microbiologica Sinica*, 66(4): 1871－1889 (in Chinese with English abstract).

Zhang, M. H., 2024. Research on the Application of Gabion Net Stone Cage Ecological Slope Protection in Mountain Torrent Ditch Treatment Engineering. *Engineering and Technological Research*, 9(17): 111－113 (in Chinese with English abstract).

Zhang, R. H., Jing, S. S., Zhang, H. D., et al., 2018. Runoff and Sediment Yield Characteristics on Waste Soil and Slag Formed from Railway Construction in Jiaodong Peninsula Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(3): 80－85 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X. L., Fu, Y. M., Pei, Q. H., et al., 2024. Study on the Root Characteristics and Effects on Soil Reinforcement of Slope-Protection Vegetation in the Chinese Loess Plateau. *Forests*, 15(3): 464. https://doi. org/10.3390/f15030464

Zhang, X. S., Xue, T. Z., Ma, C., et al., 2012. Impacts of Rainfall Intensity and Grass Coverage on Runoff and Sediment Yield on Typical Slopingl Land. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(6): 66－70 (in Chinese with English abstract).

Zhao, J., Shao, L. T., 2007. Stability Analysis of Embankment and Excavation Slope. *Rock and Soil Mechanics*, 28(5): 944－950 (in Chinese with English abstract).

Zhou, C., Qian, J. G., Yin, Z. Y., et al., 2023. Effect of Particle Shape and Bedding Angle on Suffusion in Gap-Graded Granular Soils by Coupled CFD-DEM Method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 47(8): 1373－1398. https://doi.org/10.1002/nag.3519

Zhou, F. P., Guo, M. N., Liu, W. S., et al., 2025. Synergistic Roles of Plant-Microbe Interactions and Soil Aggregate Dynamics in the Phytostabilization of Ion‐Adsorption Rare Earth Tailings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(30): 12046－12056. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c03646

Zhu, L., Zhao, Y. X., Yao, X. W., et al., 2023. Inoculation

Enhances Directional Humification by Increasing Microbial Interaction Intensity in Food Waste Composting. *Chemosphere*, 322: 138191. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138191

中文参考文献

陈丁亿, 张小凤, 黄九荣, 等, 2026. 植物根际促生菌对桂花生长、生理适应性及土壤性状的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 50(2): 196－204.

陈岳岩, 马宝红, 栾新龙, 等, 2025. 工程堆积体坡面侵蚀过程及水动力指标对入流形式的响应. 水土保持学报, 39(5): 92－104.

董自涛, 罗璟, 裴向军, 2026. 不同含石量 TBM 洞渣力学特性及强度分异形成机制研究. 铁道科学与工程学报, 知网首发. https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20251718

杜闯东, 周路军, 朵生君, 等, 2021. 川藏铁路隧道 TBM 适应性选型分析及不良地质对策与思考. 隧道建设(中英文), 41(6): 897-912.

冯君园, 蔡强国, 李朝霞, 等, 2015. 高海拔寒区融水侵蚀研究进展. 水土保持研究, 22(3): 331－335.

兰泽凡, 田小靖, 牛祎凡, 等, 2024. 基于 RUSLE 模型的雅鲁藏布江流域土壤侵蚀评价. 水土保持研究, 31(3): 20－29.

罗正宇, 韩洪瑞, 王思睿, 等, 2023. 基于层次分析法弃渣场修复的禾本科植物配置. 沈阳农业大学学报, 54(6): 683－692.

覃小华, 刘东升, 宋强辉, 等, 2017. 强降雨条件下考虑饱和渗透系数变异性的基岩型层状边坡可靠度分析. 岩土工程学报, 39(6): 1065－1073.

全民, 杜昕鹏, 毕银丽, 2024. 露天矿排土场接种 AMF 对 3 种植物根系发育与土壤团聚体稳定性的影响. 水土保持研究, 31(3): 187－194.

石振明, 朱鑫, 刘毛毛, 等, 2025. 基于离散元的冻融循环作用下根土复合体抗剪特性研究. 地球科学, 50(10): 3761－3775.

王忠钊, 王振华, 王少勇, 等, 2024. 城区花岗岩地层 TBM 渣土资源化利用研究. 科技与创新 (22): 22－25.

夏加国, 胡瑞林, 祁生文, 等, 2017. 含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究. 岩石力学与工程学报, 36(8): 2031－2039.

谢云, 岳天雨, 2018. 土壤侵蚀模型在水土保持实践中的应用. 中国水土保持科学, 16(1): 25－37.

杨雪, 李嘉楠, 王博, 等, 2026. 解淀粉芽孢杆菌增强燕麦干旱适生性及促生基因分析. 微生物学报, 66(4): 1871－1889.

张铭海, 2024. 格宾网石笼生态护坡在山洪沟治理工程中的应用研究. 工程技术研究, 9(17): 111－113.

张荣华, 荆莎莎, 张洪达, 等, 2018. 胶东铁路弃土弃渣体产流产沙特征. 水土保持学报, 32(3): 80－85.

张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等, 2012. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响. 干旱区资源与环境, 26(6): 66－70.

赵杰, 邵龙潭, 2007. 填筑和开挖边坡的稳定性分析. 岩土力学, 28(5): 944－950.