https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.284

冻融环境陡立边坡生态修复植生层优化及性能演化

陈慧娥，吕宏泽，杜 华*

吉林大学建设工程学院，吉林长春 130026

摘 要：为明确陡立边坡生态修复植生层的有效组成及其性质在冻融环境下的演化规律，结合陡立坡面附着试验及植生试验优化植生层配比，通过直剪试验明确冻融条件下土体黏结特性的变化．结果表明，生物炭可提升土体植生性能；添加黏结剂、保水剂后，聚丙烯酰胺的加入不利于植物生长．最优植生层组成为0.8%海藻多糖、1%羧甲基纤维素、1.5%生物炭．冻融20次后基质土黏聚力损失率是重构植生层黏聚力损失率的1.27～2.93倍．低含水率条件有利于冻融过程中土体黏结特性的维持．黏结剂和保水剂形成的胶结结构有效维持了重构植生层的稳定性，使其抗冻融劣化能力显著优于基质土．该成果可为季冻区陡立边坡生态修复基材配比及工程防护提供理论依据．

关键词：生态修复；陡立边坡；植生层组成；冻融循环；黏聚性；微观结构．

中图分类号：P66 **文章编号：**1000－2383(2026)09－3361－17 **收稿日期：**2025－08－29

Research on Optimization of Planting Layer Materials and Performance Evolution in Ecological Restoration of Steep Slopes in Freeze-Thaw Environments

Chen Hui'e, Lü Hongze, Du Hua*

College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, *China*

Abstract: To clarify the effective composition of the vegetation layer for ecological restoration of steep slopes and the evolution patterns of vegetation layer properties under freezing-thawing conditions, the changes in soil cohesion characteristics under freezing-thawing conditions were clarified through direct shear tests, combined with the attachment test on the steep slope surface, vegetation test and the optimized vegetation layer ratio. The results show that biochar can improve the vegetation performance of the soil; the addition of polyacrylamide is not conducive to plant growth after adding binder and water-retaining agent. The optimal vegetation layer composition is 0.8% seaweed polysaccharide, 1% carboxymethyl cellulose, and 1.5% biochar. After 20 freeze-thaw cycles, the loss rate of soil cohesion in the substrate soil is 1.27－2.93 times that of the reconstructed vegetation layer. Low water content conditions are conducive to maintaining the soil cohesion characteristics during the freeze-thaw process. The cohesive structure formed by the binder and water-retaining agent effectively maintains the stability of the reconstructed vegetation layer, and its anti-freeze-thaw deterioration ability is significantly better than that of the substrate soil. The findings can provide a theoretical basis for the material ratio of ecological restoration vegetation layer and engineering protection for steep slopes in the seasonally frozen areas.

基金项目：国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007102).

作者简介：陈慧娥(1978－)，女，教授，主要从事特殊土工程性质及改良处理、土力学、土体微观结构特征等方面的基础应用与研究工作．ORCID：0000-0003-0073-5480. E-mail：chenhe@jlu.edu.cn

*通讯作者：杜华，ORCID：0009-0008-2098-8788. E-mail: duhua@jlu.edu.cn

引用格式：陈慧娥，吕宏泽，杜华，2026.冻融环境陡立边坡生态修复植生层优化及性能演化．地球科学，51(9)：3361－3377.

Citation: Chen Hui'e, Lü Hongze, Du Hua, 2026. Research on Optimization of Planting Layer Materials and Performance Evolution in Ecological Restoration of Steep Slopes in Freeze-Thaw Environments. *Earth Science*, 51(9): 3361－3377.

Key words: ecological restoration; steep slope; composition of plant layer; freeze-thaw cycle; cohesion; microstructure.

0 引言

公路建设、采矿工程、隧道开挖等施工活动会形成大量岩质边坡,造成土壤流失、植被匮乏等问题,不仅影响景观效果,还会导致地质灾害的发生(卢涛,2015;陈珲等,2024).传统护坡技术可以保证边坡的稳定性,但不注重植被恢复(Wei *et al.*, 2021).在绿色发展理念的指导下,生态修复技术被逐渐应用到边坡防护当中.客土喷播作为生态修复技术的一种,利用液压喷播技术将配置好的土壤喷播到岩质边坡表面,形成植生层土体.这种方法能为植物生长提供稳定的环境(Gao *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2022),且随着植物的生长,植物根系不断延伸,可以增强边坡加固的效果.

除基质土外,边坡生态修复植生层重构过程中还需添加黏结剂和保水剂等功能材料(蓝群力等,2019;陈欣然和周述美,2023).黏结剂提供土体强度,同时增强了土和岩质坡面之间的黏结力,传统的黏结剂以水泥为主(Liu *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023).保水剂通常为絮凝状的化学聚合物,具有优良的吸水性和持水能力(Gao *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2022),其通过自身的亲水结构以及对土体孔隙结构的改善,增强了土体的保水能力.(Xu *et al.*, 2017)为植物生长提供水分.此外,土体pH值调节剂及孔隙结构调节剂也常用于植生层性质改良,通过调节土壤的酸碱环境及改善土体结构促进植物生长(Paschke *et al.*, 2000).

目前,植生层材料的组成仍以传统护坡材料为主(Hong and Lee, 2016; Huang, 2021).尽管这些材料在提升边坡稳定性方面表现出一定的有效性,但其对植被恢复的促进作用有限,有时可能会加剧环境的退化.

相比之下,采用环境友好型材料进行植生层重构,不仅能有效维持边坡浅层土体的稳定性,还可以显著促进植被的恢复与生态系统的重建(Dong *et al.*, 2019).海藻多糖(SP)作为一种高分子化学黏结剂,具有良好的胶结效果,同时能在自然环境中降解,具有环境友好性(Zhu *et al.*, 2023;许文盛等,2024).近年来羧甲基纤维素(CMC)因具有良好的吸水性和黏附性、无毒无害且不污染环境的特点(Ali, 2011; Xu *et al.*, 2017),被广泛用于边坡生态修复工程中.玉米秸秆生物炭(BC)在调节土壤pH值的同时,可提供植物生长所需的微量元素,促进植物生长(Shen *et al.*, 2023; Sheng *et al.*, 2023).聚丙烯酰胺(PAM)是一种线性高分子聚合物,可以增加土壤中的团粒数,提高孔隙结构的稳定性(Paschke *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2017;宋泽卓等,2024),是常用的土壤改良剂.环境友好型材料为生态修复工程提供了更为可持续的解决方案,实现了工程稳定性与生态效益的协同优化.

现有边坡生态修复的对象多聚焦于坡度小于45°的中缓坡或缓坡(卢涛, 2015; Kong *et al.*, 2022),相关的基材配比以稳定缓坡为前提.然而,在山区公路和矿山排土场等工程中,坡度60°及以上的陡立岩质边坡普遍存在.这类边坡植生修复难度大,土体易失稳,基于现有缓坡修复技术形成的植生层在黏结强度、保水性能等方面无法满足陡立边坡的修复要求.目前陡立边坡生态修复方面的研究侧重于基岩稳定与植被优化(王冲等,2025;张鹏程等,2025),会对植生层性质关注较少.因此需要突破缓坡治理经验,寻求新的适合陡立岩质边坡的植生层配置方案.

冻融条件下,土体结构发生变化,对植生层的附着稳定性产生影响,进而劣化修复工程的效果.近年来,关于冻融循环作用下岩土体性质变化的研究已取得丰富成果.宋俊等(2025)开展了边坡模型的冻融试验,指出冻融过程中土的水冰相变和水分迁移是导致边坡滑移的主要原因.研究表明,冻融循环次数与土体的抗剪强度大致呈负相关关系,冻融循环同样会破坏土体的保水保肥性能.冻融过程对土体性质的影响程度与土体初始含水率、干密度、受力状态、物质组成等因素密切相关(Wang *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2021).然而,重构植生层土体与普通工程土体存在显著差异,其所添加的功能性材料在冻融循环条件下对土体工程性质的影响仍不明确.因此,结合陡立边坡生态修复的实际需求,系统研究冻融循环条件下植生层的性质演化规律,具有重要的理论价值和实践意义.

基于上述讨论,现有研究仍存在以下不足:(1)传统的植生层组成材料对生态恢复的作用有限;(2)较少考虑陡立边坡条件下植生层的有效附着问题;(3)添加的外源物质在冻融循环条件下对土体

性质的影响仍不明确等.本文采用环境友好型材料重配植生层,通过室内实验,结合陡立边坡的附着特征和植生性能,确定了重构植生层有效的物质组成.采用能够实现有效附着和高效植生的材料组成方案配制植生层土体,以植生层土体黏聚力作为其黏结特性的表征指标,探究了冻融循环条件下植生层性能的演化规律.此外,通过扫描电子显微镜试验,从微观角度揭示了冻融条件下植生层黏结性能演化的微观机制.研究成果可为陡立边坡生态修复工程基材配比方案优化及后期养护方案和防护措施的制定提供参考依据.

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

配制植生层所用基质土取自吉林省延边朝鲜族自治州安图县永庆乡,取点坐标为128°23′58.52″E,42°33′57.74″N,取样点地理位置及现场如图1所示.

土样的基本性质、粒度组成及易溶盐含量见表1~2,土样中黏粒占比22.92%,粉粒占比74.97%,砂粒占比2.11%,土中易溶盐总量为587.310~595.980 mg/kg,含量约为0.06%.

结合前人研究成果,考虑环境友好需求,植生层土体配置外掺剂时,选用海藻多糖(SP)作为黏结剂,海藻多糖在改善土体黏聚性的同时,能够提升土壤的水稳性,减少土壤水蚀产沙量(丁文峰等,2021);选用羧甲基纤维素(CMC)作为保水剂,其掺入土中能对土壤颗粒产生包裹效应,同时降低土壤的渗透性,使颗粒间产生链式连接,提高土壤的水稳性(杨晴雯等,2019);选用玉米秸秆生物炭(BC)调节pH值;聚丙烯酰胺(PAM)用于土体结构改良.各材料性质和实物图如图2所示.

1.2　实验方案

1.2.1　植生性能试验　以海藻多糖、羧甲基纤维素、聚丙烯酰胺、生物炭作为配置植生层的功能材料与基质土拌合,形成喷播材料.用亚克力板、60目砂纸和三维土工网垫建立室内小型边坡模型(图3a),其中边坡整体由亚克力板搭建而成,砂纸贴在坡面模拟岩质边坡粗糙表面(宋泽卓等,2023;刘瑾等,2026),最后在坡面附着三维土工网垫.坡角设

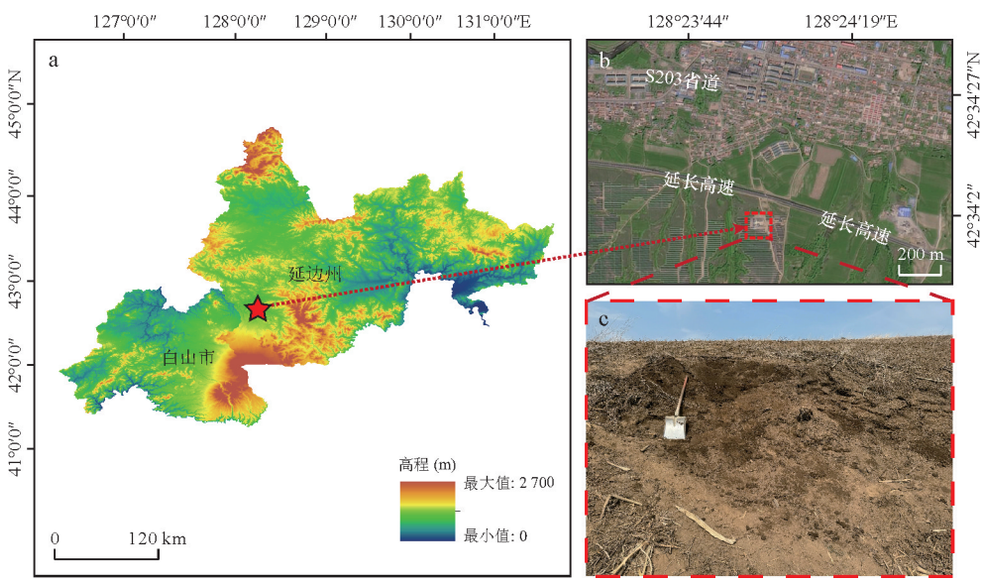


图1　取样点位置及现场环境

Fig.1　Sampling point location and on-site environment

表1　土的基本性质及粒度成分

Table 1　The basic properties and particle size composition of soil

天然密度 ρ(g/cm^3)	天然含水率 ω(%)	土粒比重 G_s	液限 w_l(%)	塑限 w_p(%)	pH值	不同粒度占比(%)		
						0.075~2.000 mm	0.005~0.075 mm	<0.005 mm
1.82	26.8	2.70	35.2	24.7	6.10	2.11	74.97	22.92

表 2 土中易溶盐含量

Table 2 The content of soluble salts in the soil

总量(mg/kg)	各离子分量(mg/kg)							
	Na^+	K^+	Ca^+	Mg^+	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-
587.310～595.980	209.070～210.910	3.705～10.530	13.200	8.050	100.800	0.000	30.255	222.230

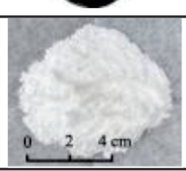
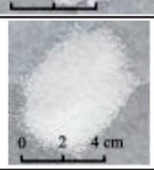
外加剂名称	实物图	状态、颜色	溶解性	酸碱性	稳定性
海藻多糖 (SP)		淡黄色粉末	易溶于水	pH=5~7	高温下结构易破坏
羧甲基纤维素 (CMC)		白色粉末	易溶于水形成透明粘稠液体	pH=5~7	耐酸碱性较好、但高温易降解
聚丙烯酰胺 (PAM)		白色细颗粒	易溶于水形成粘稠液体	pH=5~7	高温易水解降解
生物炭 (BC)		黑色粉末	难溶或不溶于水	pH=8~12	耐酸碱、高温下结构稳定

图 2 重构植生层配置外加剂实物图及其性质

Fig.2 The physical diagram and properties of the external admixture for the plant layer configuration

置为 60°,代表陡立条件.结合前人研究成果(Sheng *et al.*, 2023)及预实验结果,确定海藻多糖、羧甲基纤维素、聚丙烯酰胺、生物炭的质量配比分别为 0.4%～0.8%、1%、1%、1.5%,设置六组实验方案配置泥浆拌料(表 3).泥浆拌料浓度(泥浆中土的质量比)控制在 50%～70%.模拟施工过程,将泥浆拌料喷播在边坡模型表面,在坡面形成干密度为 1.3 g/cm^3 的重构植生层.结果表明,当黏结剂海藻多糖的掺入量为 8%时(第二、三、四组),土体可以稳定地附着在室内边坡表面,且能达到重构植生层所需的 10 cm 厚度要求(如图 3c～3e 所示).第一组基质土由于黏聚性不足,无法喷播到坡面上,第五组和第六组植生层在喷播到 7 cm 厚度时出现明显的裂隙和滑移,无法达到 10 cm 厚度.因此,后续以前四组方案进行土体植生试验,每组设置两个平行试验,探究外加剂对植物生长性能的影响.其中第一组用作对照组.

将土样风干后研碎,过 2 mm 筛,添加各类外加剂配置 4 组植生层土体.考虑到实际工程中喷播完成后的水分流失情况,植生实验中控制各组植生层

表 3 室内边坡附着试验各组配比方案

Table 3 The various ratio schemes for the plant performance test groups

	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组
SP(%)	0	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4
CMC(%)	0	1	1	1	1	1
PAM(%)	0	1	1	0	1	1
BC(%)	0	1.5	0	1.5	1.5	1.5

含水率为 30%.每组在 20 cm×10.6 cm×12 cm 的种植箱中铺设 10 cm 厚的土层,并在表层 2 cm 范围内播种,控制种植箱中土的干密度为喷播时土的干密度.播种草籽选用高羊茅和白三叶两种草籽,高羊茅和白三叶均为多年生草本植物,根系发达,均有良好的耐寒性,白三叶的固氮能力能为高羊茅的生长提供养分,高羊茅的直立生长也可降低白三叶早期被侵蚀的风险(卢涛, 2015; 杜文志等, 2023).草籽播种密度控制在 20～30 g/cm^3(Xu *et al.*, 2017).播种前期采用 5 cm×5 cm 样方在每种植生层中随机选取三个样方,人工统计样方内高羊茅和白三叶总体

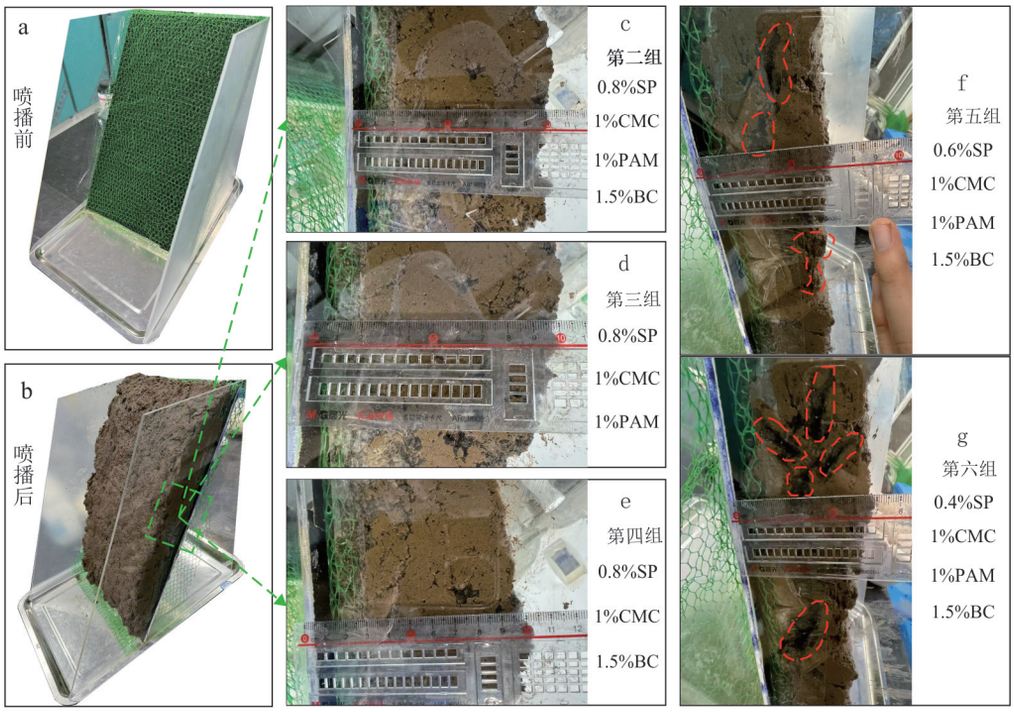


图 3　边坡模型及不同条件植生层土体附着情况

Fig.3　Slope model and the attachment conditions of the vegetation layer soil under different conditions

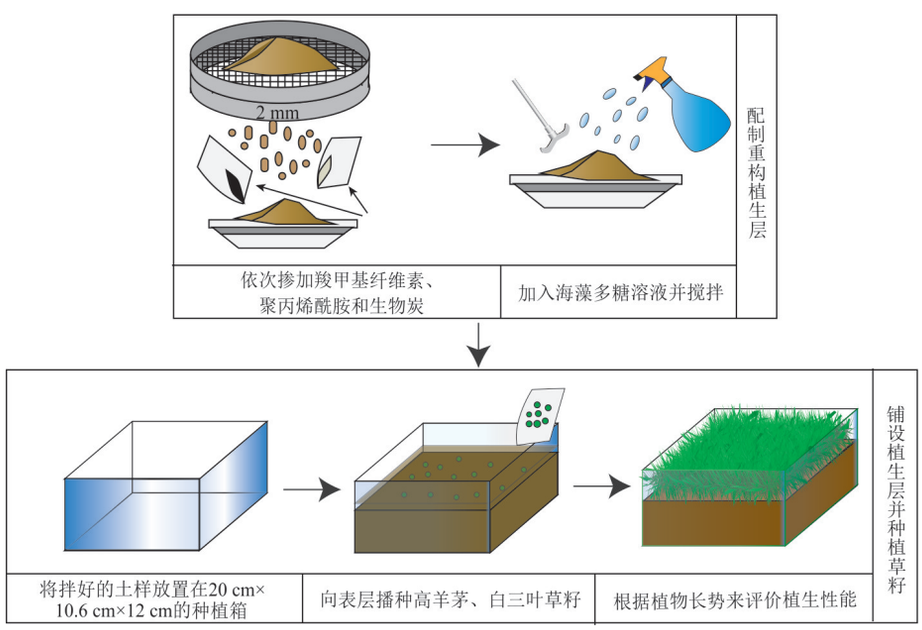


图 4　植生性能试验流程

Fig.4　Planting performance test procedure

出苗数,结合样方中实际播种数,按照(出苗数/播种数)×100% 计算发芽率.记录每组植生层的发芽时间等信息.在种子发芽前每天浇水.待植物生长时,适当调整浇水频率,定期记录植物的高度和覆盖情况,比较各组植物的长势情况.植生性能试验流程如图 4 所示.

1.2.2　冻融条件下土体黏结特性测试　根据植生性能试验结果,确定植生层的配置方案.植生层土体的黏结特性以直接剪切试验确定的土体黏聚力来表征.制备直径为 61.8 mm、高为 20 mm 的试样,试样的干密度控制为 1.3 g/cm^3.实际工程中,土体饱和状态呈动态变化,为明确土体冻结时含水率差

异对其性质的影响，每组土样含水率设置为8%、13%、18%、23%、28%.参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123－2019)、依据研究区气温数据及前人研究经验(Hu *et al.*, 2017; Qin *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2023)，冻融循环试验中冻结温度为－20 ℃，融化温度为室温，冷冻12 h、融化12 h为一次冻融循环.在冻融循环过程中，采用保鲜膜与密封器封装试样，以减少水分改变对实验结果的影响.研究表明，冻融次数在5～9次时对土体的物理力学性质影响最为显著(王平等，2018)，设定冻融循环次数为0、1、3、5、10、20次，达到规定冻融循环次数后进行直剪试验.

1.2.3 扫描电镜实验 扫描电镜实验采用PROX电镜能谱一体机，探究冻融条件下基质土及最优配置组合植生层微观结构特征的变化，以及不同初始含水率条件对土体结构的影响.将试样切成约1 cm×1 cm×1 cm的立方体土块，将土块进行液氮冷冻处理并抽真空使其干燥.然后将土块沿某一边中点掰断，露出未扰动的结构面作为观测面，随后进行粘样、喷金处理，用扫描电镜进行观测.

2 实验结果与分析

2.1 功能材料对植物生长的影响

图5和图6汇总了不同时期各组植生层的植株高度、植被覆盖情况.两种植株生长特性存在差异：高羊茅叶片直立，白三叶以匍匐茎扩展为主，且易被高羊茅叶片遮住，导致白三叶株高难以精准测量，且匍匐生长特性使“株高”并非反映生长状态的最优指标.因此结合实验结果统计不同时期植物的发芽率及长势较好的高羊茅草的平均株高，如图7所示.

可以看出，基质土的发芽时间最短，为3 d.第三组和第四组的发芽时间是7 d，是四个组别中发芽时间最长的.

播种15 d后，基质土的发芽率在90%以上，高羊茅草的株高已经达到6～7 cm，白三叶草株高也已达到3 cm左右.第二组和第四组的发芽率相近，均在70%左右，高羊茅株高也相近，均在7 cm左右；白三叶草的长势，第四组要略优于第二组.而第三组中两种草的长势均较差.

播种30 d后，第二组和第四组的发芽率在90%以上，达到了基质土的发芽率水平.第二组高羊茅草整体株高达到了11 cm，与第四组的高羊茅株高相近，第四组白三叶植物的长势优于第二组.第三组的发芽率及株高结果仍为四个组别中最差的.

播种50 d后，基质土种植的植物出现了萎蔫、发黄的现象，株高略有下降，这是因为基质土的保水性很弱，仅依靠基质土本身的性能不足以维持植物长时间的生长.第二组和第四组高羊茅株高达到了18 cm，其中第二组个别株高度超过20 cm，第四组白三叶的株高和叶片尺寸均优于第二组.第二组和第四组与基质土相比，植物没有萎蔫、发黄的现象.第三组在播种50 d后高羊茅株高仅为12 cm左右，并且高羊茅和白三叶的发芽率均较低.

总体来讲，虽然在前30 d内，基质土的发芽时间更早，植物长势更好，但由于基质土的保水性较弱，仅依靠原有的植生性能并不能保障植物长时间稳定生长，随着时间的推移，植物出现萎蔫、泛黄的现象.第三组由于没有添加生物炭，植生层土体pH值呈弱酸性，且缺少生物炭所提供的有机碳和微量元素，导致植物发芽、生根困难.这表明生物炭可大幅提升重构植生层的植物生长适宜性.第二组和第四组的高羊茅长势相近，但第四组的白三叶草的长势更好，植物整体的覆盖度更优，说明不加入PAM时，植生层土体的孔隙结构合理，适合植物的生长，再添加PAM时不会进一步改善植生层的结构，相反过量添加PAM可能会堵塞植生层孔隙，阻碍植物根系的发育(梅岭等，2023).因此，针对所研究的基质土，重构植生层的有效配置方案为：0.8%海藻多糖(SP)、1%羧甲基纤维素(CMC)和1.5%生物炭(BC).

2.2 冻融循环对植生层黏结特征的影响

2.2.1 黏聚力的变化规律 由不同配置条件下植物的生长实验结果可知，生物炭对重构植生层土壤植生性能的提升具有显著的促进作用.因此，冻融条件下植生层黏结特性试验中将生物炭作为植生层组分中的必需物质，在海藻多糖、羧甲基纤维素等功能材料存在的前提下，探究聚丙烯酰胺对植生层性能的影响.设置三组试验(表4)，其中第一组为对照组.不同冻融条件下三组植生层土体的黏聚力随含水率的变化情况如图8所示.

由图8可以看出，相同冻融次数、相同含水率条件下，第二组和第三组的黏聚力均大于基质土的黏聚力.第二组和第三组植生层由于含有海藻多糖、羧甲基纤维素等物质，可以在土中形成胶结结构，提升了土体结构的稳定性，从而具有较高黏聚力.此外，总体来讲，第二组植生层的黏聚力比第三组植生层的黏聚力略高.第二组植生层中添加了1%的聚丙烯酰胺，该物质既可以填充孔隙，也可以增

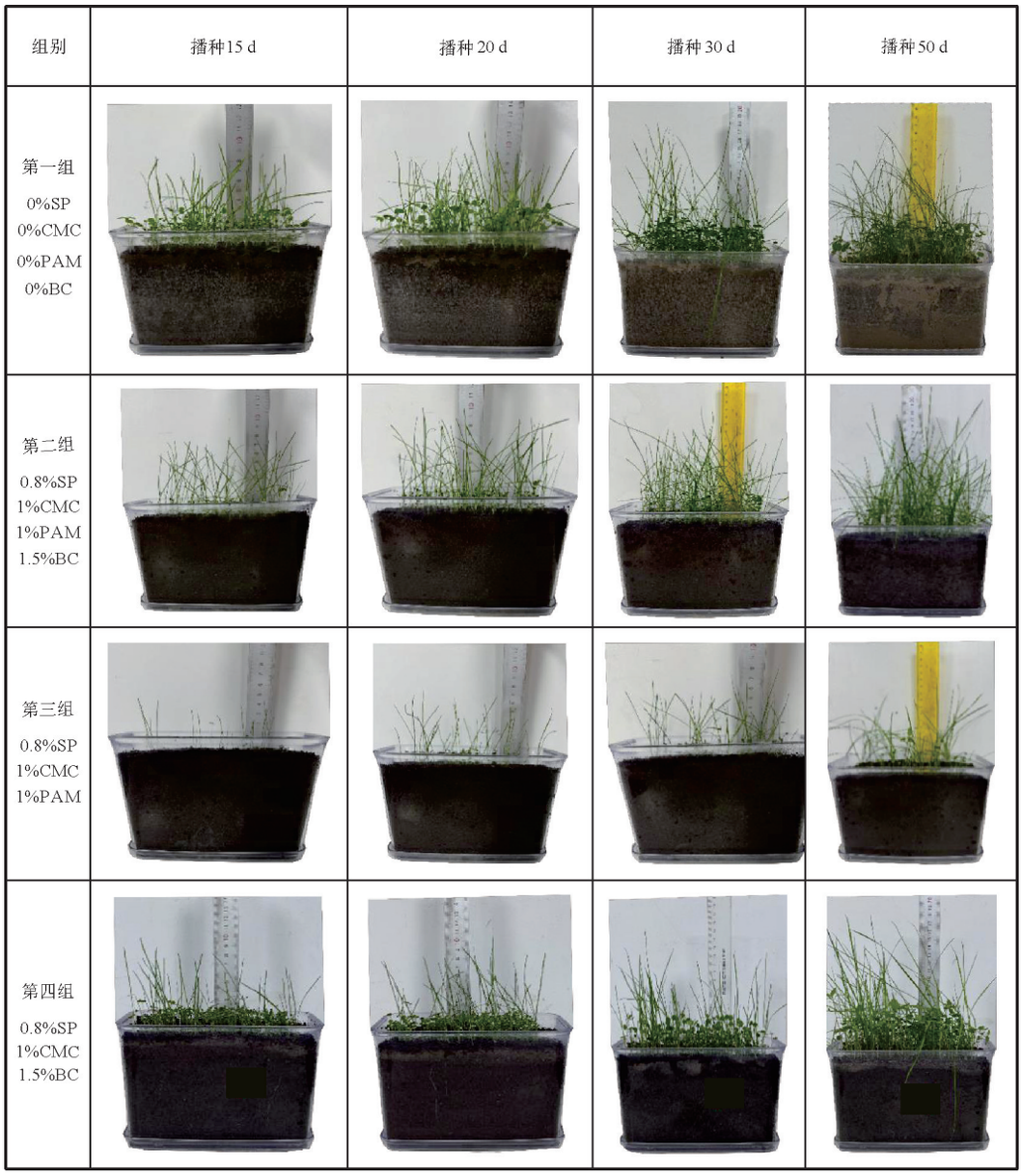


图5　各组植生层播种后不同时期植物株高情况

Fig.5　The plant height conditions of each group at different times after sowing

大土颗粒间的黏结力(Xu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2023),宏观上表现为第二组植生层黏聚力大于第三组植生层黏聚力.但这种增大效果并不显著,对植生层黏聚力的提升程度有限,且2.1节研究表明其植生效果较差.因此综合考虑成本、植生性能及土体黏结特征,对于研究所用基质土,聚丙烯酰胺不适合用于配制重构植生层土体.

当冻融次数一定时,随着含水率的增加,各组植生层黏聚力均呈现逐渐降低的趋势.这是因为对于基质土来讲,其细粒含量较高,颗粒间由结合水连接形成的黏结力是其黏聚力的主要组成之一,其随含水率的增大逐渐减小(朱秋雷等,2018);对于重构植生层土体来讲,其黏聚力随含水率增大而降低,一方面源于基质土结合水黏结力的减少,另一方面是因为所加入的黏结剂等物质在高含水率条件下浓度降低,其所发挥的作用逐步减弱.

不同含水率条件下,三组植生层黏聚力随冻融循环次数变化如图9所示.

图9表明,当含水率一定时,随着冻融循环次数的增加,各组植生层的黏聚力总体呈现出先减小后趋于稳定的变化规律,冻融循环前5次时黏聚力降低较为明显.以w=13%为例,冻融5次后,基质土

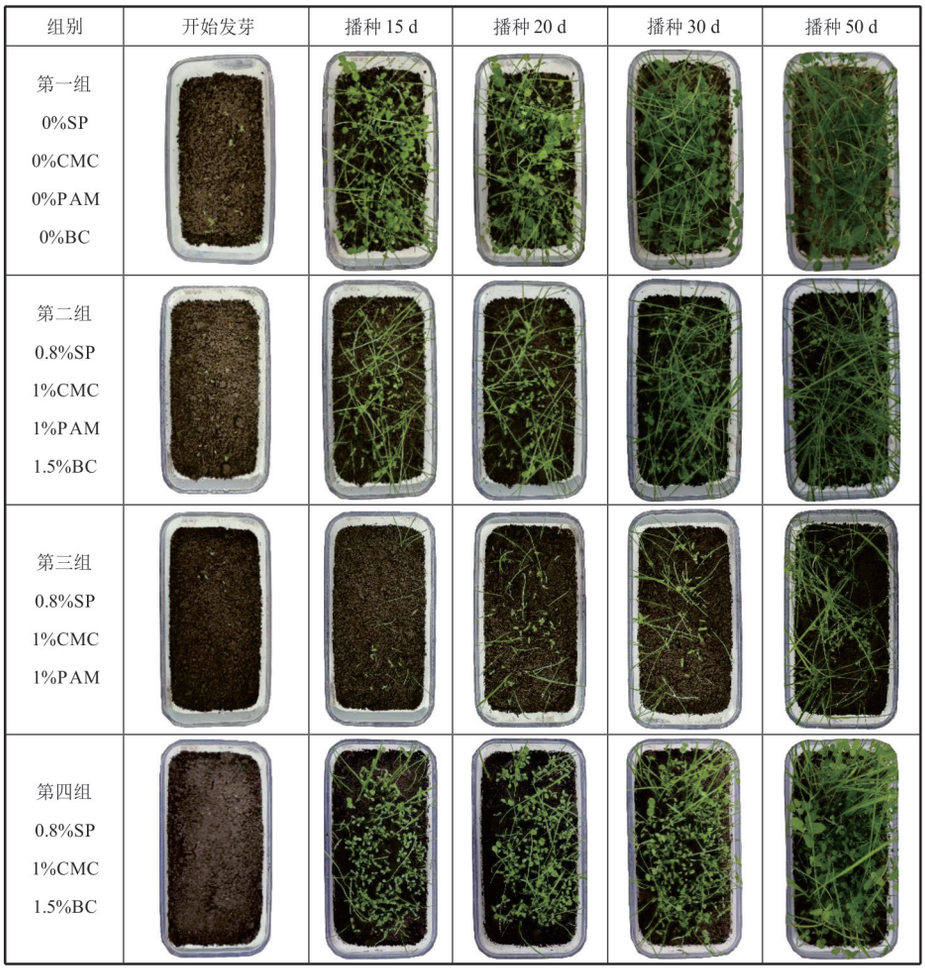


图 6 各组植生层播种后不同时期植物覆盖情况

Fig.6 The plant coverage conditions at different times after sowing in each group

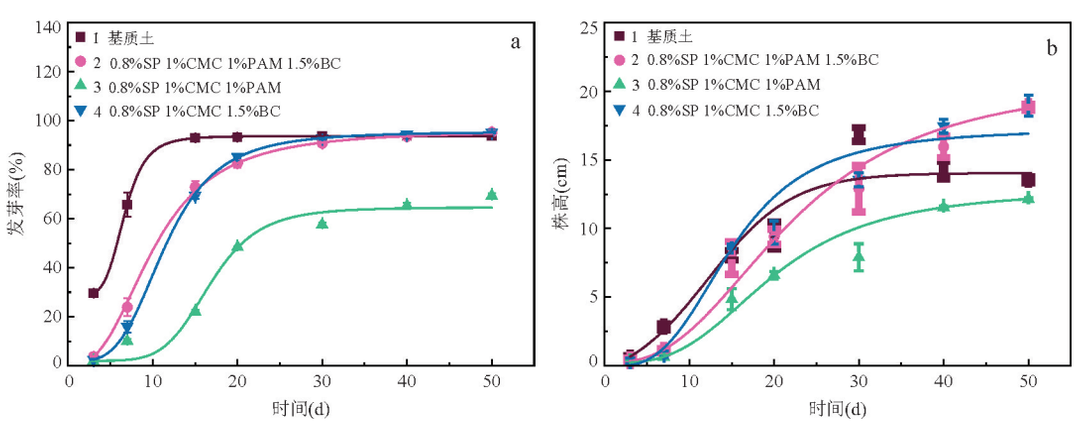


图 7 不同组别植物发芽率和高羊茅株高

Fig.7 The germination rates of plants in different groups and the height of tall fescue plants

黏聚力衰减量占总衰减量的 74.6%，第二组植生层黏聚力衰减量占总衰减量的 79.7%，第三组植生层黏聚力衰减量占总衰减量的 88.3%. 当冻融循环 10 次之后，黏聚力趋于平稳. 冻结过程中，孔隙水相变成冰晶，孔隙体积扩大，融化时孔隙不能完全恢复到原状，使得土体内部结构疏松，同时破坏了土颗粒间原有的结构连接. 上述过程在冻融初期表现强烈，使土体黏聚力急剧降低；随着冻融循环不断进行，土体结构逐渐趋于稳定，黏聚力趋于平稳.

此外，三组植生层土体因含水率不同所造成的

表 4　冻融条件植生层黏聚特性研究试样方案

Table 4　Research on the cohesive properties of the planting layer under freeze-thaw conditions design scheme

	第一组	第二组	第三组
SP(%)	0	0.8	0.8
CMC(%)	0	1	1
PAM(%)	0	1	0
BC(%)	0	1.5	1.5

黏聚力差异在冻融循环前后的变化不同.基质土在未冻融时,最低与最高含水率条件下黏聚力相差 51.8 kPa,当冻融次数达到 20 次时,其差值为 18 kPa;第二组植生层土体未冻融时,最低与最高含水率条件下黏聚力相差 60.65 kPa,当冻融次数达到 20 次时,其差值为 53.7 kPa;第三组植生层土体未冻融时,最低与最高含水率条件下黏聚力相差 59.3 kPa,当冻融次数达到 20 次时,其差值为 53.5 kPa.这表明随着冻融循环次数的增加,基质土不同含水率条件下试样间黏聚力差异减小,而第二组和第三组植生层土体不同含水率下黏聚力差异虽减小但变化幅度不大.这说明冻融循环弱化了基质土初始

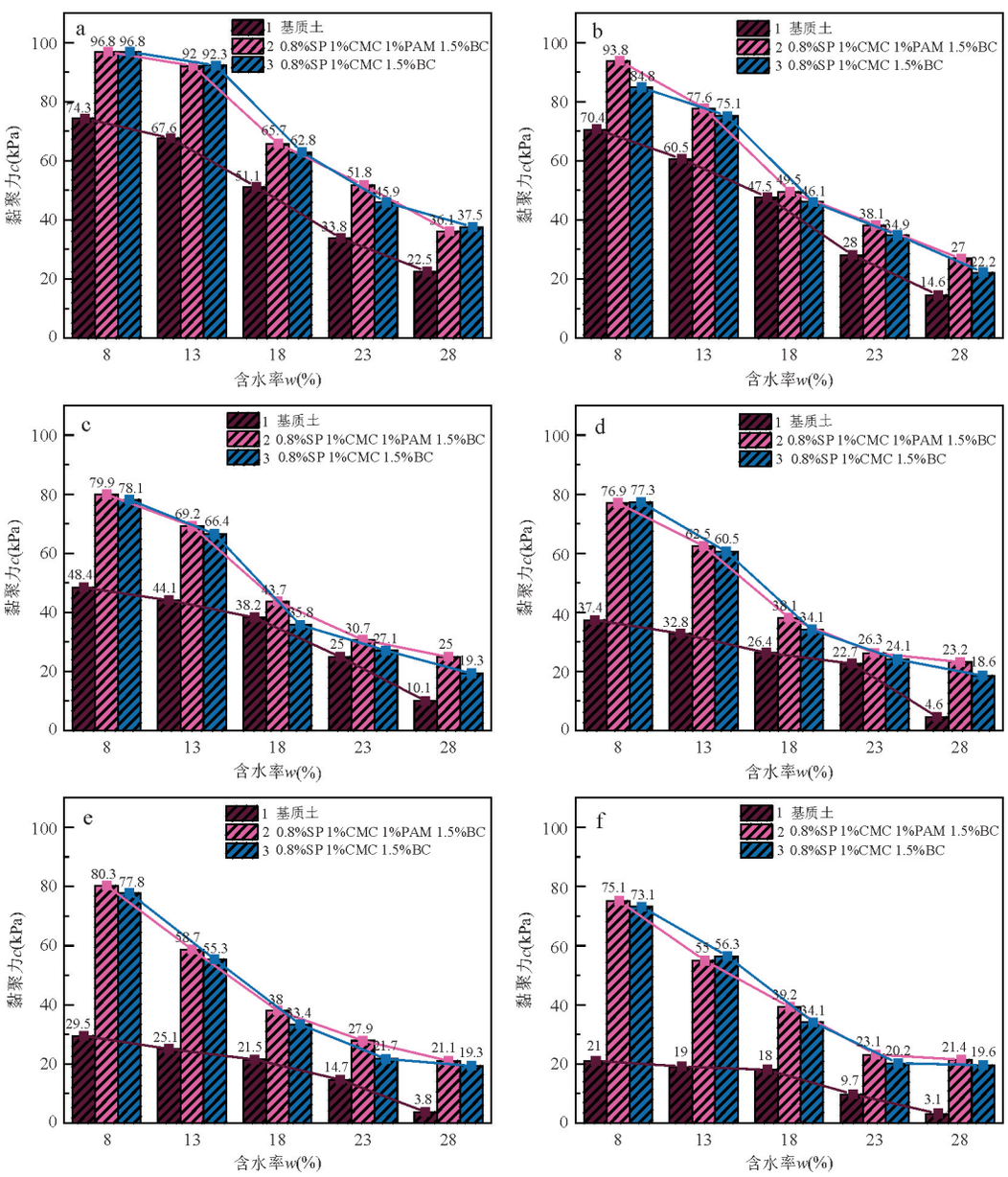


图 8　不同冻融循环次数下各植生层黏聚力随含水率的变化

Fig.8　The variation of cohesion in each vegetation layer with respect to moisture content under different freeze-thaw cycles

图 a～f依次为冻融循环 0、1、3、5、10、20 次

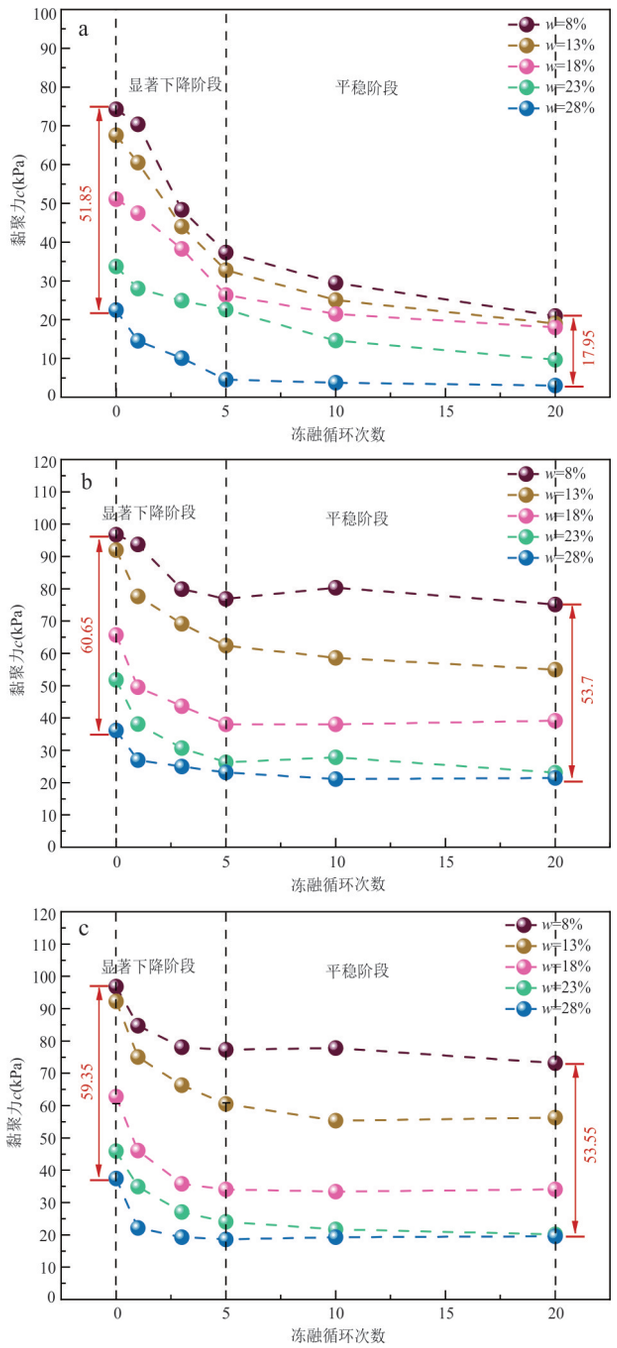


图 9 不同含水率条件下各植生层黏聚力随冻融循环次数变化

Fig.9 The cohesion of each vegetation layer changes with the number of freeze-thaw cycles under different moisture contents

a. 基质土；b. 0.8%SP、1%CMC、1%PAM 和 1.5%BC；c. 0.8%SP、1%CMC 和 1.5%BC

含水率对黏聚力的影响程度，第二组和第三组植生层中黏结剂、保水剂等物质通过建立胶结、填充孔隙等方式增强了植生层结构的稳定性，对冻融循环作用下不同含水率试样黏聚力差异的变化起到缓冲作用，使不同含水率试样黏聚力变化趋势较一致.

2.2.2 黏聚力损失率变化规律 由前述结果可知，冻融条件下植生层土体黏结特性劣化，且三组植生层不同含水率条件下土体黏聚力劣化效果不同，为进一步对其进行量化评价，从黏聚力损失率的角度分析冻融循环对各组植生层黏结特征的影响，定义公式(1)为黏聚力损失率：

$$\delta=\frac{c_0-c_i}{c_0}\times 100\%(i=1,3,5,10,20), \quad (1)$$

其中，c_0 为未冻融时土的黏聚力，单位是 kPa；c_i 为冻融循环 i 次后土的黏聚力，单位是 kPa；δ 是黏聚力损失率，单位是%. 各含水率条件下黏聚力损失率随冻融循环次数变化如图 10 所示.

由图 10 可以看出，20 次冻融循环结束后，基质土黏聚力损失率显著大于第二组和第三组植生层黏聚力损失率. 这说明第二组、第三组植生层受冻融劣化程度弱于基质土，黏结剂、保水剂等物质在冻融过程中能够与土颗粒保持相对稳定的结构状态，约束土颗粒位移和孔隙扩张，减少黏聚力损失. 但在 5 种含水率条件下，冻融前期存在基质土黏聚力损失率小于第二组、第三组植生层或与之相近的情况. 笔者认为是因为冻融前期第二组和第三组植生层中黏结剂或保水剂与土颗粒尚未形成稳定的结构，此时土体结构对冻融作用较为敏感，因此表现为冻融初期黏聚力损失率与基质土相近. 但多次冻融后植生层中黏结剂及保水剂逐渐发挥作用，在冻融劣化及材料强化双重效果的综合影响下，第二组及第三组黏聚力损失率显著低于基质土. 因此海藻多糖、羧甲基纤维素、聚丙烯酰胺等物质可以显著降低植生层的冻融劣化程度，其与土体充分作用后再经历冻融循环，将有益于维持植生层黏结特征的稳定性.

第二组植生层与第三组相比，低含水率条件下黏聚力损失率相差不大，但高含水率条件下第三组植生层黏聚力损失率大于第二组植生层. 尽管第二组植生层比第三组多添加 1% 聚丙烯酰胺，但低含水率时土体中孔隙水较少，产生的胶结作用有限(刘振兴等，2025)，冻融循环对二者黏聚力损失率影响程度接近；随着含水率的提升，外源物质与水结合形成较稳定的胶结结构，因此高含水率条件下第三组黏聚力损失率大于第二组.

三组植生层黏聚力损失率随冻融循环次数的增加先增大后趋于平稳，第二组和第三组植生层黏聚力损失率在冻融前 5 次时增大较为明显，基质土在冻融循环 10 次之后黏聚力损失率才逐渐趋于平

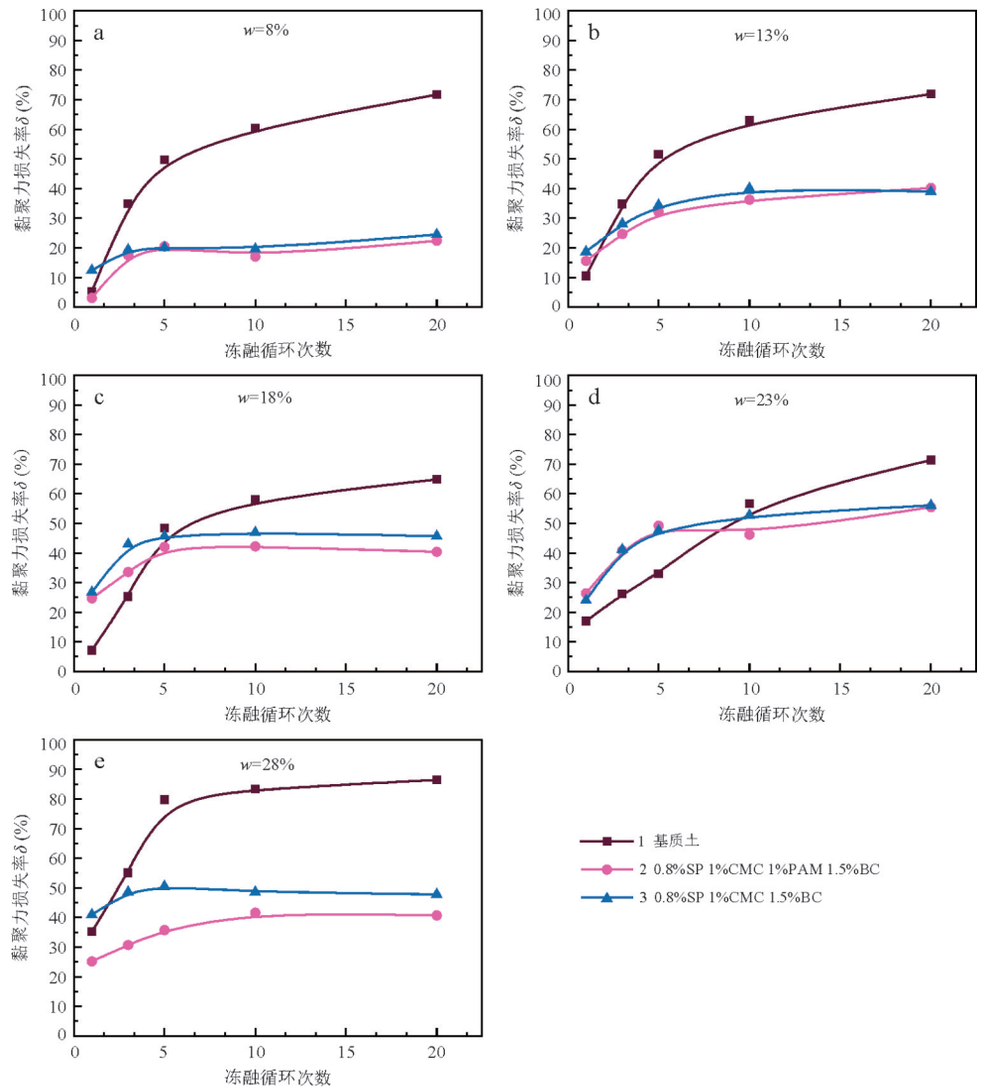


图 10　各含水率下三组植生层黏聚力损失率随冻融循环次数的变化

Fig.10　The loss rate of cohesion in the three groups of plant layers under different moisture contents changed with the number of freeze-thaw cycles

稳.这也说明外加的功能材料有助于降低冻融过程对植生层土体黏结性能的劣化作用.

此外,各组试样黏聚力损失率随含水率增大均呈总体增大的趋势,这说明冻结过程开始前,土体中较低的含水率有利于其黏结特性的维持.因此,在实际工程中建议加强植生层土体含水状态的监测,采取相应措施控制降温前土体含水率的增高,以保证植生层土体在经历冻融循环后的有效黏结.

3　微观机理分析

植生实验及力学试验结果表明,生物炭可以显著提升植生层的植生性能,添加聚丙烯酰胺(PAM)一定程度上不利于植物的生长且对植生层黏聚力的提升有限.因此,确定的最优重构植生层配比条件为0.8%海藻多糖、1%羧甲基纤维素、1.5%生物炭.同时,试样黏结特征表明,随着冻融循环次数及含水率的增大,各组试样的黏聚力变化总体呈减小趋势.故以基质土和最优配比重构植生层为对象,选取含水率为8%、18%、28%以及冻融循环次数为0、1、10次的代表性试样进行微观结构测试,以分析试样植生性能及冻融条件下黏结特性的形成机制.结果见图11~图13.

图11为含水率相同时基质土与最优配比重构植生层在未冻融时的微观结构,用以明确外加功能物质对土体结构特征的影响.

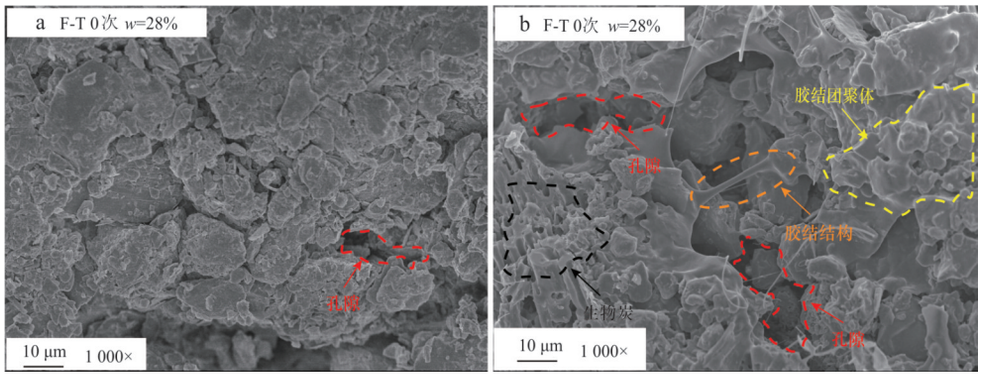


图 11 28% 含水率条件下未冻融时基质土 a 与最优配比重构植生层 b 微观结构

Fig.11 The microstructure of the substrate soil under a moisture content of 28% without freeze-thaw and the optimal weight-reduced vegetated layer

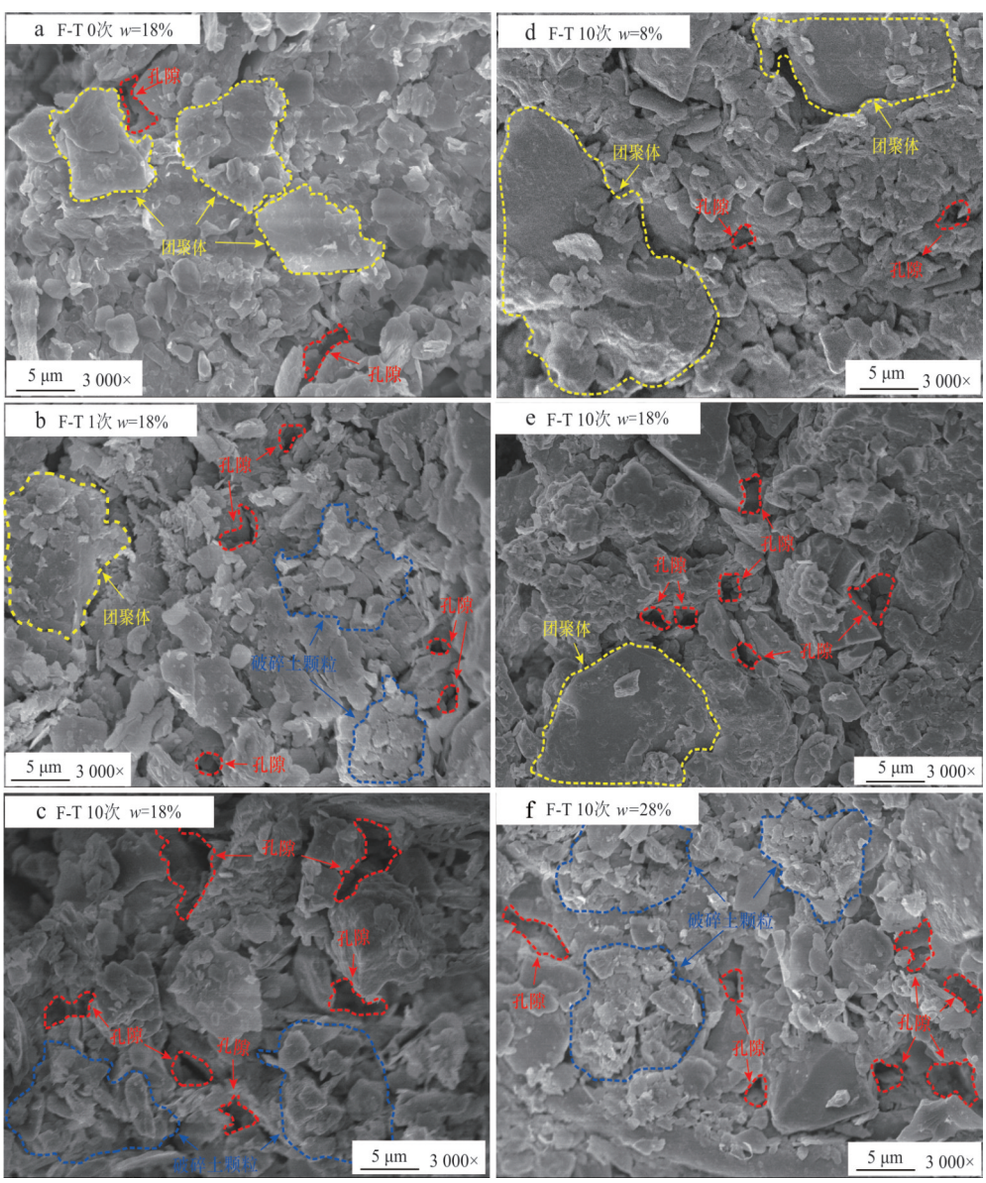


图 12 不同含水率、不同冻融循环次数条件下基质土微观结构特征

Fig.12 Microscopic structural characteristics of the soil matrix under different moisture contents and different numbers of freeze-thaw cycles

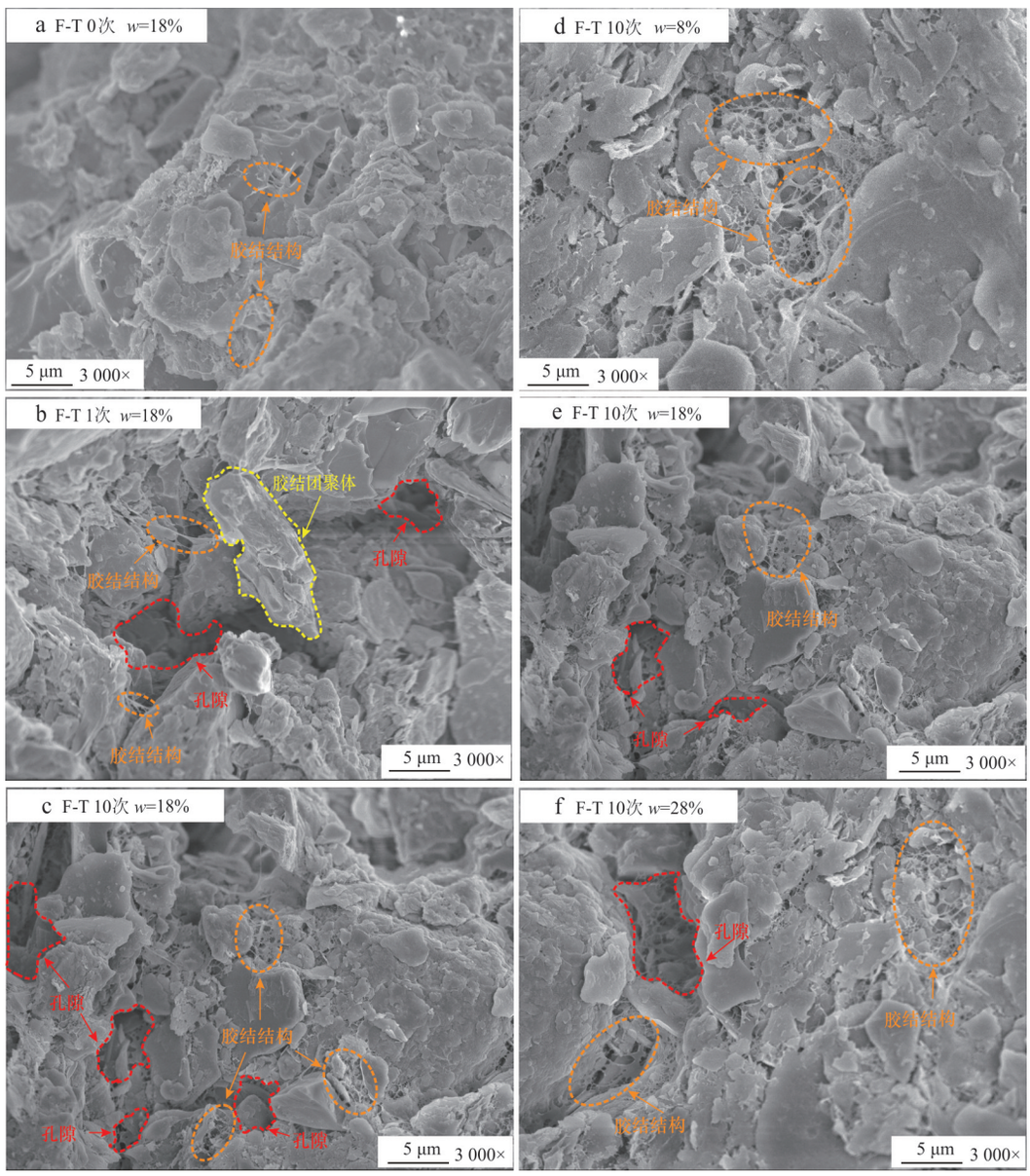


图 13　不同含水率、不同冻融循环次数下最优配比重构植生层微观结构特征

Fig.13　Microscopic structural of optimal proportion soil structure layer under different moisture contents and different freeze-thaw cycle times

由图 11 可知,未冻融时基质土呈团聚状结构,颗粒完整,无明显破碎现象,颗粒之间排列较紧密.而重构植生层细颗粒团聚化程度较基质土更高,可见由外加剂胶结形成的团聚体,相对基质土,大孔隙含量较高,土体结构相对松散.同时,土体中生物炭在调节土体 pH 值的同时,增强了其结构的疏松程度,适合植物根系的生长.此外,在颗粒间及孔隙中存在胶结物质的黏结,有效提升了土体强度.

图 12a～12c 为含水率一定冻融次数不同时基质土的微观结构照片,以分析冻融循环次数对土体结构以及物理力学性能的影响;图 12d～12f为冻融循环次数一定含水率不同时基质土的微观结构照片,以分析相同冻融循环次数下不同含水率对土体结构的影响.

由图 12 可知,当含水率一定时,冻融前期基质土中存在一定的团聚体,土颗粒以粉粒和黏粒为主,团聚体较为完整,无明显破碎现象,单元体之间以面面接触为主.随着冻融循环的进行,孔隙水固液相变,冻结时水凝结成冰产生冻胀力,团聚体开始破碎,细颗粒逐渐增多并重新排列,粒间孔隙数量不断增加,土颗粒排列逐渐松散,粒间黏结力减弱,土体内部结构完整性减弱,宏观上表现为土的强度降低、黏聚力显著下降.冻融循环次数相同时,

低含水率下基质土结构较为紧密,团聚体较为完整,无明显破碎和裂隙,随着含水率的逐渐增大,孔隙增多.这是因为在低含水率时,冻结时水冰相变产生的冻胀力弱,对土体结构的破坏程度相对较小,黏聚力降低幅度较小;随着含水率的增大,孔隙水含量增多,低温时水凝结成冰产生的冻胀力增大,对土颗粒以及颗粒间胶结的破坏程度增加,土体结构更加松散,因此黏聚力下降显著.

图13a～13c为0.8%海藻多糖、1%羧甲基纤维素、1.5%生物炭条件下植生层土体在含水率一定时不同冻融循环次数植生层的微观结构图;图13d～13f为0.8%海藻多糖、1%羧甲基纤维素、1.5%生物炭条件下植生层土体在冻融次数一定时不同含水率植生层的微观结构图.

由图13可知,随着冻融循环次数的增加,植生层虽有孔隙数量的增加及孔径的增大,但相对基质土,其结构整体损伤程度较小.明显可见土颗粒间或孔隙中的胶结物质,这是因为黏结剂与保水剂遇水形成胶状物质,填充土体孔隙或包裹在土颗粒表面,形成稳定的凝胶网络,增强了颗粒间的黏结力,这种作用削弱了冻融循环对植生层性能的劣化,在宏观上表现为土的初始黏聚力较大,经历冻融循环作用后黏聚力损耗程度小.相同冻融循环条件下,随着含水率的增大,植生层孔隙虽逐渐增多,但在凝胶结构的胶结作用下,也只是小部分的孔隙被连通,土颗粒排列较相同条件下的基质土(图13d～13f)损伤程度较低,结构完整性较强,颗粒间能够保持良好的黏结特性,维持了较好的结构稳定性,因而植生层黏聚力降低程度较小.

4 结论

本文通过重配植生层土体,探究不同外源物质对植生层植生性能的影响,明确不同植生层黏结特性对冻融循环作用的响应规律,最后从微观角度对实验结果进行机理分析,所得结论如下:

(1)生物炭能够显著提高植生层的植生性能.在添加黏结剂海藻多糖、保水剂羧甲基纤维素的基础上,过度添加土壤改良剂聚丙烯酰胺会抑制植物的生长.基质土中植物前期长势较好.最终确定0.8%海藻多糖、1%羧甲基纤维素和1.5%生物炭为有效的植生层配置方案.

(2)黏结剂、保水剂等物质可以提高植生层的黏结性.未冻融及冻融20次条件下,重构植生层试样的黏聚力分别是基质土试样黏聚力的1.30～3.48倍、1.67～6.32倍.随着冻融循环次数的增加,植生层黏聚力先降低后平稳.随着含水率的增大,植生层的黏聚力呈现降低的趋势.重构植生层和基质土的黏聚力损失率随冻融循环次数的增加而增大,但重构植生层黏聚力损失率显著低于基质土.

(3)试样微观结构特征表明,最优基材配比植生层的细颗粒团聚程度更加明显,形成了适宜植物根系生长的颗粒间孔隙结构.黏结剂和保水剂形成的凝胶网格,通过包裹土颗粒及形成团聚体的形式增强了颗粒间的胶结,因此重构植生层土相对基质土,其黏结性受冻融损伤程度更低.

本研究主要探讨了重构植生层土体本身在冻融条件下的性质变化,尚未涉及植物根系的效应.为进一步提升研究结论的工程实践指导意义,后续将重点开展含根系土体在冻融条件下的物理力学性质演化研究,以揭示植被-土体复合系统在寒区环境中的响应机制,为生态护坡方案设计提供依据.

References

Ali, L. K. M., 2011. Significance of Applied Cellulose Polymer and Organic Manure for Ameliorating Hydro-Physico-Chemical Properties of Sandy Soil and Maize Yield. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(6): 23－35.

Chen, H., Cui, Y. H., Wang, H. M., et al., 2024. Advances in Mines Ecological Restoration and Carbon Sequestration Potential. *Earth Science*, 49(12): 4594－4607 (in Chinese with English abstract).

Chen, X. R., Zhou, S. M., 2023. Research on Field Test of Compound Vegetation Layer Ecological Slope Protection Technology in High Altitude Areas. *Engineering and Technological Research*, 8(14): 185－187 (in Chinese with English abstract).

Ding, W. F., Lin, Q. M., Li, H., et al., 2021. Effects of Seaweed Polysaccharide Resists on the Erosion Process of Red Soil Slope. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(1): 108－115 (in Chinese with English abstract).

Dong, Y. P., Shao, Y. F., Liu, A. J., et al., 2019. Insight of Soil Amelioration Process of Bauxite Residues Amended with Organic Materials from Different Sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(28): 29379－29387. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06007-y

Du, W. Z., Chen, C. Q., Pang, X. Y., et al., 2023. Re-

search Progress on Vegetation Restoration of Road Slopes in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 34(12): 3437－3446 (in Chinese with English abstract).

Gao, G. J., Yuan, J. G., Han, R. H., et al., 2007. Characteristics of the Optimum Combination of Synthetic Soils by Plant and Soil Properties Used for Rock Slope Restoration. *Ecological Engineering*, 30(4): 303－311. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.01.011

Hong, S. H., Lee, E. Y., 2016. Restoration of Eroded Coastal Sand Dunes Using Plant and Soil-Conditioner Mixture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113: 161－168. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.021

Hu, G. J., Zhao, L., Wu, X. D., et al., 2017. Comparison of the Thermal Conductivity Parameterizations for a Freeze-Thaw Algorithm with a Multi-Layered Soil in Permafrost Regions. *Catena*, 156: 244－251. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.011

Huang, Y. Y., 2021. Destruction Process and Restoration Countermeasures of the Ecological Environment of a Comprehensive Geological Structure. *Earth Sciences Research Journal*, 24(4): 429－437. https://doi.org/10.15446/esrj.v24n4.92387

Kong, L. L., Wang, X. M., Guo, W. C., et al., 2022. Effects of Municipal Solid Waste on Planting Properties and Scouring Resistance of Vegetation Concrete (Wuhan, China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13): 8143. https://doi.org/10.3390/ijerph19138143

Lan, Q. L., Zhang, X. T., Bian, L. B., et al., 2019. Study on Vegetation Restoration Structure and Material Properties of High and Steep Rock Slopes. *Materials Review*, 33(S2): 143－146 (in Chinese with English abstract).

Li, X. Y., Qin, Z. P., Tian, Y., et al., 2022. Study on Stability and Ecological Restoration of Soil-Covered Rocky Slope of an Abandoned Mine on an Island in Rainy Regions. *Sustainability*, 14(20): 12959. https://doi.org/10.3390/su142012959

Liu, D. X., Liu, D. Y., Gao, J. Z., et al., 2022. Influence of Addition of Two Typical Activated Carbons on Fertility Properties and Mechanical Strength of Vegetation Concrete under Freeze-Thaw Conditions. *Science of the Total Environment*, 838: 156446. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156446

Liu, J., Huang, T. W., Che, W. Y., et al., 2026. Development of an Adjustable Hydrogel Material for Ecological Restoration in the Qinling Mountains: Reconstructed Performance and Microscopic Mechanism. *Earth Science*, 51(2): 419－431 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z. X., Wang, J., Cui, P., et al., 2025. Experimental Study on Response of Strength Characteristics of Glacier Tills to Temperature in Southeast Tibet. *Earth Science*, 50(1): 322－335 (in Chinese with English abstract).

Lu, T., 2015. Stability Research of Vegetative Soil Layer by Anchor-Geomat Spraying Ecological Slope Protection Based on Experiments and Numerical Simulation (Dissertation). Qingdao University of Technology, Qingdao (in Chinese with English abstract).

Mei, L., Chen, Y. X., Wang, L., et al., 2023. Experimental Analysis on the Ratio of Green Spraying Substrate Composed of Dredging Soil. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(1): 135－144 (in Chinese with English abstract).

Paschke, M. W., DeLeo, C., Redente, E. F., 2000. Revegetation of Roadcut Slopes in Mesa Verde National Park, U.S.A. *Restoration Ecology*, 8(3): 276－282. https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80039.x

Qin, Z. P., Lai, Y. M., Tian, Y., et al., 2021. Effect of Freeze-Thaw Cycles on Soil Engineering Properties of Reservoir Bank Slopes at the Northern Foot of Tianshan Mountain. *Journal of Mountain Science*, 18(2): 541－557. https://doi.org/10.1007/s11629-020-6215-z

Shen, Y. F., Li, Q., Pei, X. J., et al., 2023. Ecological Restoration of Engineering Slopes in China—A Review. *Sustainability*, 15(6): 5354. https://doi. org/10.3390/su15065354

Sheng, M. H., Ai, X. Y., Huang, B. C., et al., 2023. Effects of Biochar Additions on the Mechanical Stability of Soil Aggregates and Their Role in the Dynamic Renewal of Aggregates in Slope Ecological Restoration. *Science of the Total Environment*, 898: 165478. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165478

Song, J., Singh, J., Teng, J. D., et al., 2025. Experimental Study on Freeze-Thaw Deformation Mechanism of Cut Slope Considering Water Migration and Ice Formation. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 56(5): 1886－1899 (in Chinese with English abstract).

Song, Z. Z., Liu, J., Mei, H., et al., 2023. Experimental Study on Ecological Restoration of Rock Slope with Xanthan Gum-Clayey Soil Composite Substrate. *Journal of Central South University* (*Science and Technology*), 54(5): 1978－1989 (in Chinese with English abstract).

Song, Z. Z., Liu, J., Wang, Z., et al., 2024. Experimental Study on Dry Shrinkage Cracking of Sisal fiber-Polyacrylamide Modified External Soil. *Journal of Engineering Geology*, 32(1): 28－38 (in Chinese with

English abstract).

Wang, C., Zhang, Y. F., Yu, D. L., et al., 2025. Optimized Plant Allocation for Ecological Restoration of Highly-Steep Rocky Slopes in North China. *Science of Soil and Water Conservation*, 23(3): 164－175 (in Chinese with English abstract).

Wang, P., Guo, W. J., Li, H. F., et al., 2018. Effect of Cyclic Freezing and Thawing on Physical and Mechanical Properties of Soft Soil. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 35(7): 79－83 (in Chinese with English abstract).

Wang, T., Li, P., Li, Z. B., et al., 2019. The Effects of Freeze-Thaw Process on Soil Water Migration in Dam and Slope Farmland on the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 666: 721－730. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.284

Wang, Y., Liu, J., Lin, C., et al., 2022. Polyvinyl Acetate-Based Soil Stabilization for Rock Slope Ecological Restoration. *Journal of Environmental Management*, 324: 116209. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116209

Wei, C. G., Huang, K. C., Zhang, N., et al., 2021. Discussion on Ecological Protection Technology of High and Steep Slope of Expressway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632(2): 022022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/2/022022

Xu, H., Li, T. B., Chen, J. N., et al., 2017. Characteristics and Applications of Ecological Soil Substrate for Rocky Slope Vegetation in Cold and High-Altitude Areas. *Science of the Total Environment*, 609: 446－455. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.156

Xu, W. S., Liu, Y. S., Wang, K., et al., 2024. Experimental Study on a New Spray-Mixed Vegetation Substrate for Ecological Restoration of High and Steep Red Soil Slopes. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 41(11): 56－64 (in Chinese with English abstract).

Yang, Q. W., Pei, X. J., Huang, R. Q., 2019. Silty Sand Stabilized by Modified Carboxymethylcellulose: Water Stability and Mechanism of Stabilization. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 36(12): 107－112, 120 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. S., Chen, J. S., Zhou, T. L., et al., 2023. Effects of Freeze-Thaw Cycling on the Engineering Properties of Vegetation Concrete. *Journal of Environmental Management*, 345: 118810. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118810

Zhang, L., Gao, F., Liu, D. Y., et al., 2023. Estimating Sheet Erosion on Purple Soil Hillslope Treated with Polyacrylamide (PAM) in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49: 101510. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101510

Zhang, P. C., Dong, M. L., Lu, G., et al., 2025. Research on Anchorage Support Effect of High Steep Vertical Rock Slope Based on Indoor Similarity Test. *Coal Geology of China*, 37(1): 27－34 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Q. L., Han, A. G., Ren, G. M., 2018. Effect of Soils of Different Fine Grain Content on Shear Strength under Different Water Content. *Journal of Tianjin University of Technology*, 34(5): 46－51 (in Chinese with English abstract).

Zhu, X. F., Zheng, J. Q., Gao, Y. L., et al., 2023. Application of Biological Glue-Clay Composite Substrate in Slope Ecological Restoration. *Polymers*, 15(18): 3763. https://doi.org/10.3390/polym15183763

中文参考文献

陈珲，崔一涵，汪海明，等，2024. 矿山生态修复及其固碳潜力研究进展. 地球科学，49(12): 4594－4607.

陈欣然，周述美，2023. 高海拔地区复合植生层生态护坡技术现场试验研究. 工程技术研究，8(14): 185－187.

丁文峰，林庆明，李昊，等，2021. 海藻多糖抗蚀剂对红壤坡面侵蚀过程的影响. 农业工程学报，37(1): 108－115.

杜文志，陈超群，庞学勇，等，2023. 我国道路边坡植被修复的研究进展. 应用生态学报，34(12): 3437－3446.

蓝群力，张新天，卞立波，等，2019. 高陡岩石边坡植被恢复组合结构与材料性能研究. 材料导报，33(S2): 143－146.

刘瑾，黄庭伟，车文越，等，2026. 面向秦岭生态修复的可调型水凝胶材料构建：重构性能与微观机理. 地球科学，51(2): 419－431.

刘振兴，王姣，崔鹏，等，2025. 藏东南地区冰碛土强度特性对温度响应试验研究. 地球科学，50(1): 322－335.

卢涛，2015. 岩质边坡锚杆-土工网垫喷播植草生态护坡植生层稳定性试验及数值模拟研究(硕士学位论文). 青岛：青岛理工大学.

梅岭，陈虞祥，王雷，等，2023. 疏浚土配制喷播绿化基质的配比试验研究. 土木与环境工程学报(中英文)，45(1): 135－144.

宋俊，Singh, J.，滕继东，等，2025. 考虑水分迁移与成冰作用的路堑边坡冻融变形机制试验研究. 中南大学学报(自然科学版)，56(5): 1886－1899.

宋泽卓，刘瑾，梅红，等，2023. 黄原胶-黏土复合基材岩坡生态修复试验研究. 中南大学学报(自然科学版)，54(5): 1978－1989.

宋泽卓，刘瑾，王梓，等，2024. 剑麻纤维-聚丙烯酰胺改良客土干缩开裂试验研究. 工程地质学报，32(1): 28－38.

王冲，张钰锋，于得龙，等，2025. 华北高陡岩质边坡生态修

复的植物优化配置. 中国水土保持科学(中英文), 23(3): 164－175.

王平, 郭伟杰, 李洪峰, 等, 2018. 冻融循环对软土力学性质的影响分析. 长江科学院院报, 35(7): 79－83.

许文盛, 刘尧松, 王可, 等, 2024. 红壤高陡边坡新型生态修复喷混植生基材试验. 长江科学院院报, 41(11): 56－64.

杨晴雯, 裴向军, 黄润秋, 2019. 改性钠羧甲基纤维素加固粉砂土水稳性及稳定机理分析. 长江科学院院报, 36(12): 107－112, 120.

张鹏程, 董梦龙, 卢刚, 等, 2025. 基于室内相似试验的高陡直立岩质边坡锚固支护效应研究. 中国煤炭地质, 37(1): 27－34.

朱秋雷, 韩爱果, 任光明, 2018. 不同含水率下细粒含量不同对土的抗剪强度的影响. 天津理工大学学报, 34(5): 46－51.