

抗冻型人造土冻融适应性及其在边坡植被修复中的应用

高家祯^{1,2}, 周明涛^{2,3}, 陈竣¹, 胡旭东^{2,3}, 胡达天¹

[1.武汉职业技术学院 建筑工程学院, 湖北 武汉 443000; 2.水泥基生态修复技术
湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002]

摘要: [目的] 探究抗冻型人造土冻融适应性及其在高寒地区边坡植被修复中的实践效果, 为高寒地区边坡植被修复工程应用提供理论依据和应用支撑。[方法] 采用室内冻融循环试验剖判人造土在冻融循环60次期间的理化性质变化特征, 结合主成分分析确定室外试验监测指标的选取, 现场取样监测了近4a人造土在西藏高寒地区岩质边坡的工程应用及其植被修复效果, 并与当地天然土作对照分析。[结果] 与天然土相比, 抗冻型人造土的抗冻稳定性和肥力均有显著提升($p < 0.05$), 具体表现在其冻融前后的相对动弹性模量、 >0.25 mm水稳性大团聚体含量、平均重量直径(MWD)、团聚度及有机质、铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾含量显著提升, 而质量损失率和结构破坏率显著降低($p < 0.05$)。主成分分析显示, 室内试验指标中的相对动弹性模量、结构破坏率、pH值和有机质含量与主成分因子的相关性较高, 因此在室外试验中监测这4个指标和植被修复情况。室外监测中发现抗冻型人造土4a内在不同时间段上的结构破坏率均更低, 相对动弹性模量和有机质含量更高; 其边坡植被修复后的植被覆盖率、物种多样性、地上和地下生物量均更佳。[结论] 抗冻型人造土在高寒地区应用时的植被修复效果更佳, 特别是其抗冻耐久性、团聚体稳定性和肥力表现突出, 均优于天然土, 因此其更适宜于边坡植被修复应用。

关键词: 抗冻型人造土; 理化性质; 高寒地区; 边坡植被修复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0070-10

中图分类号: S156.99, X825

文献参数: 高家祯, 周明涛, 陈竣, 等. 抗冻型人造土冻融适应性及其在边坡植被修复中的应用[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 70-79. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.008; Gao Jiazhen, Zhou Mingtao, Chen Jun, et al. Freeze-thaw adaptability of frost-resistant artificial soil and its application to slope vegetation restoration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 70-79.

Freeze-thaw Adaptability of Frost-Resistant Artificial Soil and Its Application to Slope Vegetation Restoration

Gao Jiazhen^{1,2}, Zhou Mingtao^{2,3}, Chen Jun¹, Hu Xudong^{2,3}, Hu Datian¹

[1. Architecture Engineering of Wuhan Polytechnic, Wuhan, Hubei 443000, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique

Using Cement-based Materials (China Three Gorges University), Yichang, Hubei 443002, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China]

Abstract: [Objective] The freeze-thaw adaptability of frost-resistant artificial soil and its application effects in slope vegetation restoration were studied by use of indoor and outdoor tests of various soil physical and chemical indexes in order to provide scientific support and a basis for the application of slope vegetation restoration in an alpine region. [Methods] The physical and chemical properties of soil after 60 freeze-thaw cycles were measured by indoor tests, and representative indexes were selected by principal component analysis for outdoor tests. The practical application effect of artificial soil in Xizang alpine region for four years was monitored by outdoor sampling. Natural soil was used as a control sample during both indoor and outdoor tests. [Results] Compared with natural soil, the freeze-resistant artificial soil had significantly improved its freeze-resistant stability and fertility ($p < 0.05$), which was reflected in that the relative dynamic elastic modulus, >0.25 mm water stable large aggregate content, average weight diameter,

收稿日期: 2023-09-17

修回日期: 2023-11-20

资助项目: 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心开放基金项目“冻融条件下生物炭对水泥基基材工程特性的影响”(2022SNJ12); 国家重点研发计划项目(2017YFC05049-02); 中国华电集团公司科研资助项目(121JD201800018); 武汉职业技术学院校级教科研项目(2023YK024); 中国职业技术教育学会2023年科研项目(ZJ2023B212)

第一作者: 高家祯(1992—), 男(汉族), 湖北省荆门市人, 博士, 讲师, 主要从事边坡生态防护与生态基材改良研究。Email: 740552073@qq.com。

通信作者: 周明涛(1979—), 男(汉族), 湖北省保康县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事边坡生态修复技术研究。Email: zmt@ctgu.edu.cn。

aggregation degree, organic matter, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium content in frost-resistant artificial soil were significantly greater than that in the natural soil before and after freeze-thaw ($p < 0.05$). While the mass loss rate and structural failure rate in frost-resistant artificial soil were significantly decreased. Principal component analysis showed that the relative dynamic elastic modulus, structural failure rate, pH value, and organic matter content in indoor tests were highly correlated with principal component factors. Therefore, these four indicators were selected for outdoor sampling and monitoring of vegetation restoration in the field. The monitoring results showed that the structure failure rate was lower, and the relative dynamic elastic modulus, and organic matter content of frost-resistant artificial soil were greater than for the natural soil at different time periods in four years. In terms of vegetation restoration effect, the vegetation coverage, species diversity, aboveground biomass, and underground biomass for frost-resistant artificial soil were greater than for natural soil. [Conclusion] Frost-resistant artificial soil has better vegetation restoration effect when applied in alpine region, especially its freeze-resistant durability, aggregate stability and fertility are outstanding, which are better than natural soil, so it is more suitable for slope vegetation restoration application.

Keywords: frost-resistant artificial soil; physical and chemical properties; alpine region; slope vegetation restoration

青藏地区水力资源蕴藏丰富,水电开发利用条件便利^[1]。随着流域内水电项目工程的建设,形成了众多裸露边坡,并引起水土流失等一系列不良影响^[2]。西藏大古水电站地处高寒地区,昼夜温差大,降水量少,自然环境极端恶劣,原生生态系统遭受施工干扰破坏后,如仅靠自然力量几乎难以恢复。因此,亟待开发出适宜于高寒地区的边坡植被修复技术。为提升高寒地区边坡植被修复效果,三峡大学研发了一种专利产品—抗冻型生态护坡基材^[3],其是由植生土壤、水泥、有机物料、绿化添加剂、硅粉和棕纤维等材料均匀混合而成的抗冻型人造土。该基材旨在用于高寒地区边坡植被生境的构建,但其在野外现场的实践效果尚缺乏具体数据支撑。

目前,边坡植被修复技术主要有客土喷播技术、植被混凝土生态防护技术等^[4],各技术在自然环境条件优越的南方地区适应性较强^[5],可构建出自然演替的植被^[6]。然而,青藏高寒地区气候寒冷,冻融作用频发,土壤肥力及抗冻融侵蚀性等均会受到严重胁迫^[7],以上边坡植被修复技术的效果并不佳。而针对边坡植被修复效果和土壤质量变化状况的研究成果颇多。如徐慧等^[8]从多个方面评价了公路边坡的植被修复效果,并总结了土壤肥力不仅可土壤质量优劣,亦能表征边坡植被修复效果及生长状况^[9]。针对高寒地区,王佟等^[10]对高原高寒煤矿区土植被恢复技术开展研究,提出了 4 种具有高原高寒特色的生态修复治理模式,并在实践中得到应用。顾汪明等^[11]选取土壤团聚体破坏率、团聚度等指标探讨了冻融作用对土壤团聚体稳定性的不利影响,杜子银^[12]认为冻融过程对高寒地区土壤物理结构、化学成分及植物生长等均有显著影响,并明确指出应重点关注如何减

少冻融期间土壤养分的流失。上述众多研究为边坡植被修复和土壤质量评价提供了宝贵的经验,然而对特殊生态环境高寒地区抗冻型人造土的研究尚较少。因此,本文借鉴前人研究方法,首先在室内进行抗冻型人造土和天然土的冻融模拟试验,对比分析两种土壤不同冻融次数后的抗冻性、肥力等指标差异;同时对选取的指标进行主成分分析,选取几个贡献度高的指标在后续野外试验中使用。本研究以高寒地区西藏大古水电站工区内的岩质边坡为野外试验场地,喷播抗冻型人造土和天然土构建边坡植被,并对选取的土壤指标和植被修复效果进行监测,旨在深入了解这种抗冻型人造土在高寒地区的实践效果,为其广泛工程应用提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 野外试验区概况

大古水电站位于西藏自治区桑日县境内的雅鲁藏布江中游河段,为典型的高山深切峡谷地貌。工区属高原温带半干旱季风气候,降雨集中在年度的 6—9 月;极端最高气温 32.0 °C,极端最低气温 -26.6 °C,年平均气温 5.6 °C;年平均降水量 200.0~540.5 mm,多年平均相对湿度 51%,多年平均风速 1.6 m/s;多年平均蒸发量 2 075.2 mm;年无霜期 100~120 d。工区生态环境脆弱,干旱、寒冷是影响植物生长的两大自然环境因素;区内土壤主要为砂质壤土,岩质边坡基岩为黑云母花岗岩闪长岩。

1.2 研究方法

1.2.1 材料选取 天然土为砂质壤土,取自大古水电站工区内,风干后备用,基本理化性质如表 1 所示。根据

配方规定^[7],将固相原材料砂质壤土、水泥、锯末、绿化添加剂、硅粉和棕纤维按干质量比 100:10:8:5:3:1 的比例均匀混合,配制出抗冻型人造土。其中,水泥选用强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥;锯末选用粒径小

于 2 mm 的杉木锯末;绿化添加剂为发明专利产品(专利号 01138343.7);硅粉粒径 0.1~1.0 μm ,比表面积 20~25 m^2/g ,主要成分二氧化硅含量 $\geq 99.5\%$;棕纤维长度为 2.5~3.5 cm,直径 0.18~2.0 mm。

表 1 试验用砂质壤土基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of sandy loam soil for testing

土壤类型	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH 值	颗粒粒径分布/%				
			> 2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	< 0.075 mm
砂质壤土	1.43	6.7	9.01	53.82	16.79	9.47	10.91

1.2.2 试样制作与室内冻融模拟试验 参照土工试验方法标准(GB/T50123—2019),将上述材料混合均匀后加水制作成 200 cm^3 容积的环刀试样供后续室内试验,试样初始含水率控制在工程应用中的最优含水率 25%。为保证试样的均一性,先按比例配制干料,再按初始含水率加入定量水充分拌和后用击实法装入环刀,可控制所有试样干密度在 1.3 g/cm^3 左右。制作完成后用保鲜膜整体密封,且置入养护箱中以 25 $^{\circ}\text{C}$ 养护 7 d。然后将试样放入土工冻融试验箱,采用冻融试验箱智能控制“气冻—气融”过程,冻融过程适当对试样补充水分,以模拟野外自然条件下的冻融作用。参照大古水电站现场自然环境条件,设定单个冻融循环周期为 24 h,冻、融各 12 h,冻结温度 -20 $^{\circ}\text{C}$,融化温度 20 $^{\circ}\text{C}$,设计 11 个冻融循环频次(0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 次)。每个频次设 6 个平行样,3 个用于土壤团聚体测定,3 个用于养分测定;而抗冻耐久性试验无破损性,可重复试验,需 6 个平行样,因此共需制作 72 个平行样。当冻融达到次数后,将试样取出进行后续各理化指标测定,每次指标测定时均重复 3 次取平均值。

1.2.3 野外样地取样与监测 选取大古水电站工区内的一处岩质边坡进行植被修复样地试验,设置两块试验区,分别采用抗冻型人造土和天然土(当地砂质壤土)作为生态基材构建边坡植被生境,抗冻型人造土配比与室内冻融模拟试验保持一致。两块试验区立地条件一致,即坡向均朝北、坡度约 60 $^{\circ}$ 、坡高约 3.4 m。植被修复施工时间为 2019 年 4 月初,采取机械干喷法进行生态基材喷播,分基层和面层两次喷播,二者喷播厚度分别为 15 和 2 cm,其中面层含多种混合植物种子。植被修复施工完毕,随即对两块试验区开展同样标准的养护管理工作。

养护管理后定期进行取样与植被监测,在 2019 年 6 月下旬第一次取样与监测,每间隔 3 个月取样与监测一次,至 2022 年 12 月止,共取样与监测 15 次。先进行植被监测,再进行取样,每次监测和采样时均

随机选取具有代表性的 6 个 1 m \times 1 m 取样样方,植被监测取 6 处样方的平均值;在植被监测完后使用直径为 5 cm 的土壤采样器采集深度为 5—10 cm 的环刀样品,每一个样方中都用五点取样法选取 5 处植被生长良好的区域作为土壤取样重复点来采集土样,每次取样共取 30 份平行环刀样,去除凋落物、石块等杂物后装入密封袋运至试验室分为 2 份,1 份用来进行抗冻稳定性测定,另 1 份风干后用于化学指标测定,均取平均值作最后结果。

1.3 评价指标与测定方法

1.3.1 土壤抗冻耐久性指标 动弹性模量可检验试样内部结构变化情况,反映强度大小。参照《普通混凝土长期性能和耐久性试验法(GB/J82—85)》,采用共振法利用动弹性模量测试仪进行试样横向基振频率测定,然后按公式(1)计算相对动弹性模量 P :

$$P = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为相对动弹性模量(%); f_n 为 n 次冻融循环后试样的横向基振频率(Hz); f_0 为试样初始横向基振频率(Hz);以 3 个试样的平均值计算。下同。

采用电子天平对冻融后的试样进行称重,按公式(2)计算质量损失率 W_n (%):

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_n 为质量损失率(%); G_0 为试样初始质量(kg); G_n 为 n 次冻融循环后的试样质量(kg)。

1.3.2 团聚体稳定性指标 机械稳定性团聚体粒径分布测定采用干筛法:将风干土样放置于套筛最上层,将套筛放置在振筛机上振荡 10 min,取筛上物称重。水稳性团聚体粒径分布测定采用 Yoder 湿筛法:将干筛后的混合风干土样放入套筛最上层,加水人工震荡 10 min,取筛上物,烘干称重。土壤微团聚体与机械组成采用吸管法测定。

(1) > 0.25 mm 水稳大团聚体含量(%) = > 0.25 mm 团聚体质量/各粒径团聚体质量之和。

(2) 团聚体平均重量直径 MWD(mm), 直接测定。

(3) 团聚体结构破坏率 PAD(%)按公式(3)计算。

$$PAD = \frac{>0.25\text{mm 团聚体含量(干筛-湿筛)}}{>0.25\text{mm 干筛团聚体含量}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: PAD 为团聚体结构破坏率(%)。

(4) 微团聚体类: 团聚度(%) = (>0.05 mm 微团聚体分析值) - (>0.05 mm 土壤机械组成分析值) / (>0.05 mm 微团聚体分析值) $\times 100\%$ 。

1.3.3 土壤化学指标 选取 pH 值, 有机质、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量 6 个指标进行测定。pH 值采用土壤酸碱度计测定, 有机质采用重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 容量-外加热法测定, 铵态氮采用浓硫酸 (H_2SO_4) 消煮-扩散吸收法, 硝态氮采用连续流动分析光度法测定, 速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠 ($NaHCO_3$) 溶液浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾采用 1 mol/L 中性乙酸铵 (CH_3COONH_4) 溶液浸提-火焰光度法测定。

1.3.4 植被恢复状况指标 选取植被覆盖率、地上生物量、地下生物量、物种多样性 4 个指标; 在野外样地试验区直接测量每处样方植物绿叶的垂直投影面积与地表总面积, 两者之比计算出植被覆盖率; 将样方土壤表面以上植株和样方中植物根系收集后, 带回实验室洗净后放入烘箱内在 $70^\circ C$ 下烘干至恒重, 用电子天平称重, 得出地上生物量、地下生物量; 采用高清相机拍照, 通过“形色”软件与网络、图书资料查询辨析, 确定其品名; 统计分析样方中乡土物种, 采用香农-威纳指数 (Shannon-Wiener index) 计算物种多样性。

1.4 数据处理

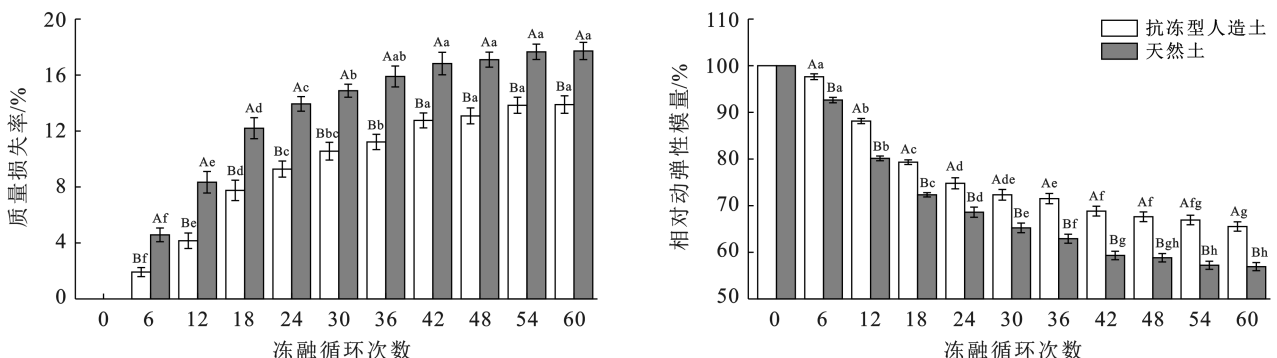
数据统计整理使用 Excel 2020, 采用 Origin 2018

绘制图。采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析, 显著性水平定为 95%。用 SPSS 对室内试验指标进行主成分分析, 发现相对动弹性模量、结构破坏率、pH 值和有机质含量这 4 个指标与主成分因子的相关性较高, 因此在室外试验中选用这 4 个指标来监测土壤应用状况, 并结合植被恢复情况来评价边坡生态修复效果。

2 结果与分析

2.1 土壤抗冻耐久性

2.1.1 室内土壤抗冻耐久性随冻融次数变化 从图 1 可知, 随着冻融循环次数的增加, 抗冻型人造土和天然土的质量损失率均逐渐增加, 而两种土壤的相对动弹性模量均随逐渐减小, 且不同冻融次数间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。原因在于: 反复的冻胀融沉作用导致试样耐久性遭到较为严重的破坏, 水冰相变和水分迁移会使试样内部产生微裂纹, 土壤结构重组; 随着冻融循环次数的增加, 微裂纹不断产生、增多, 且其亦会逐步向纵深发展; 导致试样孔隙率增大, 土壤结构趋向松散, 表面基质不断剥落。故而致试样质量和相对动弹性模量逐渐减小, 质量损失率不断增大, 但变化速率趋于缓慢。一般当试样冻融后的相对动弹性模量下降到 60% 或质量损失率超过 15% 时, 界定试样冻融损坏。对比来看, 两种土壤差异显著 ($p < 0.05$), 抗冻型人造土在经历 60 次冻融循环后未达到损坏标准, 质量损失率仅为 13.9%, 动弹性模量依然有 66%; 而天然土在试验过程中的质量损失较为严重, 动弹性模量下降较多, 其在 42 次冻融循环后便已接近损坏。



注: 不同小写字母表示同一类型土壤在不同冻融次数间显著性差异 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一冻融次数在不同类型土壤间显著性差异 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 试样抗冻性随冻融循环次数变化

Fig.1 Freeze-resistance of sample varies with number of freeze-thaw cycles

2.1.2 室外土壤抗冻性随监测时间变化 土壤的抗冻稳定性关系到生态修复基材能否持久在边坡上保

持一定的抗侵蚀性而不脱落。如图 2 所示, 两种土壤的相对动弹性模量和结构破坏率随时间推移呈现波

动性变化,相对动弹性模量随着年限增加总体呈现逐渐降低的趋势,而结构破坏率逐渐升高。但在每年中都有波动变化,如土壤结构破坏率在每年的12月左右达到波谷,在6月达到波峰。对比来看,抗

冻型人造土的相对动弹性模量显著高于天然土,其结构破坏率显著低于天然土($p < 0.05$);表明抗冻型人造土的团聚程度有所提高,抗分散能力得到了加强,其在高寒地区使用时的抗冻稳定性更好。

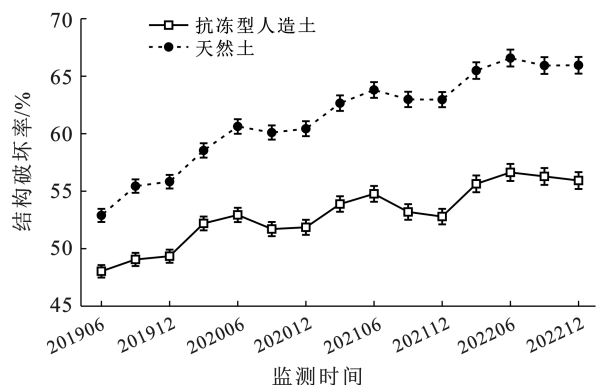
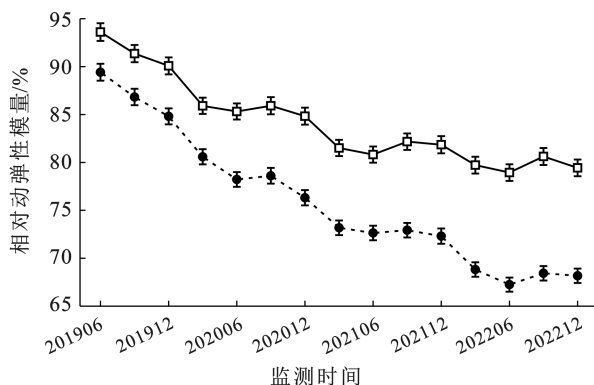


图2 土壤抗冻稳定性指标随监测时间的变化

Fig.2 Changes of soil frost resistance stability indexes with monitoring time

2.2 土壤团聚体稳定性

土壤团聚体稳定性指标与冻融循环次数关系曲线如图3所示。可以看出,抗冻型人造土和天然土的水稳性大团聚体含量、平均重量直径MWD和团聚度均随冻融循环次数的增加而逐渐显著变小,结构破坏率逐渐增加。因为反复的冻融循环作用导致试样团聚体结构不断分散和重聚^[13],大粒径团聚体颗粒分散为小颗粒,其含量不断减少,同时MWD值和团聚

度也下降。对比来看,抗冻型人造土在冻融前后的各个团聚体稳定性指标均显著优于天然土($p < 0.05$),且其在经历60次冻融后各团聚体指标下降的幅度更小。抗冻型人造土和天然土的水稳大团聚体含量、MWD值和团聚度相对于未冻融前,其下降率依次为33.9%和51.8%,35.7%和52.4%,30.7%和51.9%。因为抗冻型人造土中掺入的水泥和棕纤维能较大地提升土壤的力学性能和团聚度,提升土壤抗冻稳定性。

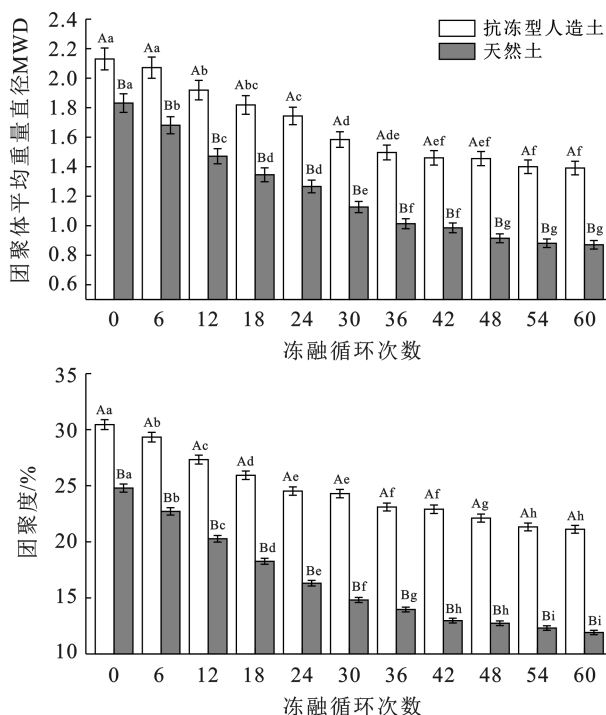
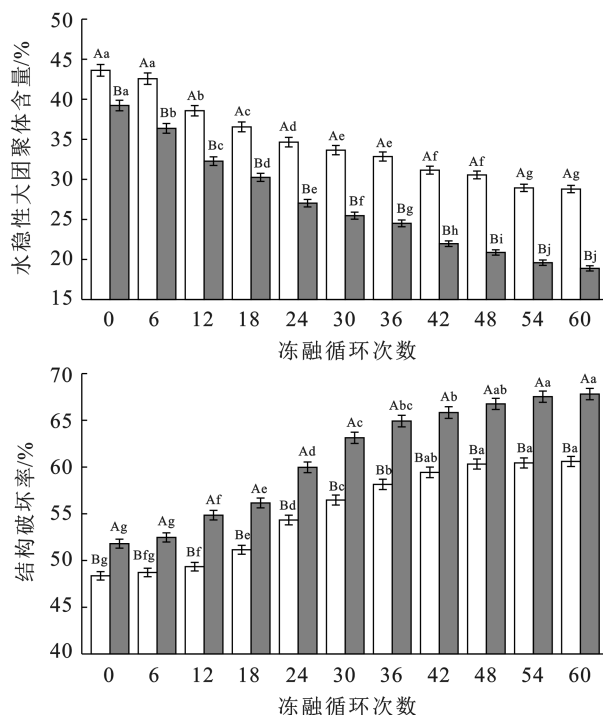


图3 试样团聚体稳定性指标随冻融循环次数变化

Fig.3 Changes of sample aggregate stability index with number of freeze-thaw cycles

2.3 土壤化学指标

2.3.1 室内土壤肥力随冻融次数变化 如图 4 所示,抗冻型人造土和天然土的确态氮、铵态氮、速效磷和速效钾含量随冻融次数的增加而逐渐显著下降,且下降趋势逐渐趋于稳定,表明冻融作用对土壤的退化作用逐渐减弱。冻融循环下,土壤中微生物新陈代谢缓慢,导致土壤中养分含量降低,且土壤中养分含量还会随着融水而流失。

对比来看,抗冻型人造土冻融前后的养分含量均

显著高于天然土的营养含量($p < 0.05$);且抗冻型人造土冻融后下降的幅度相对较小。在冻融循环 60 次后,天然土试样的铵态氮、速效磷和速效钾含量分别下降了 28.4%,26.1%和 16.8%;而抗冻型人造土的分别下降了 15.6%,21.3%和 12.1%。因为抗冻型人造土掺入的绿化添加剂含有大量养分和微生物,可直接提升土壤初始养分含量,且掺入的硅粉具有较好的吸附能力^[14],能保留土壤中的养分,降低土壤各养分含量在冻融中的流失。

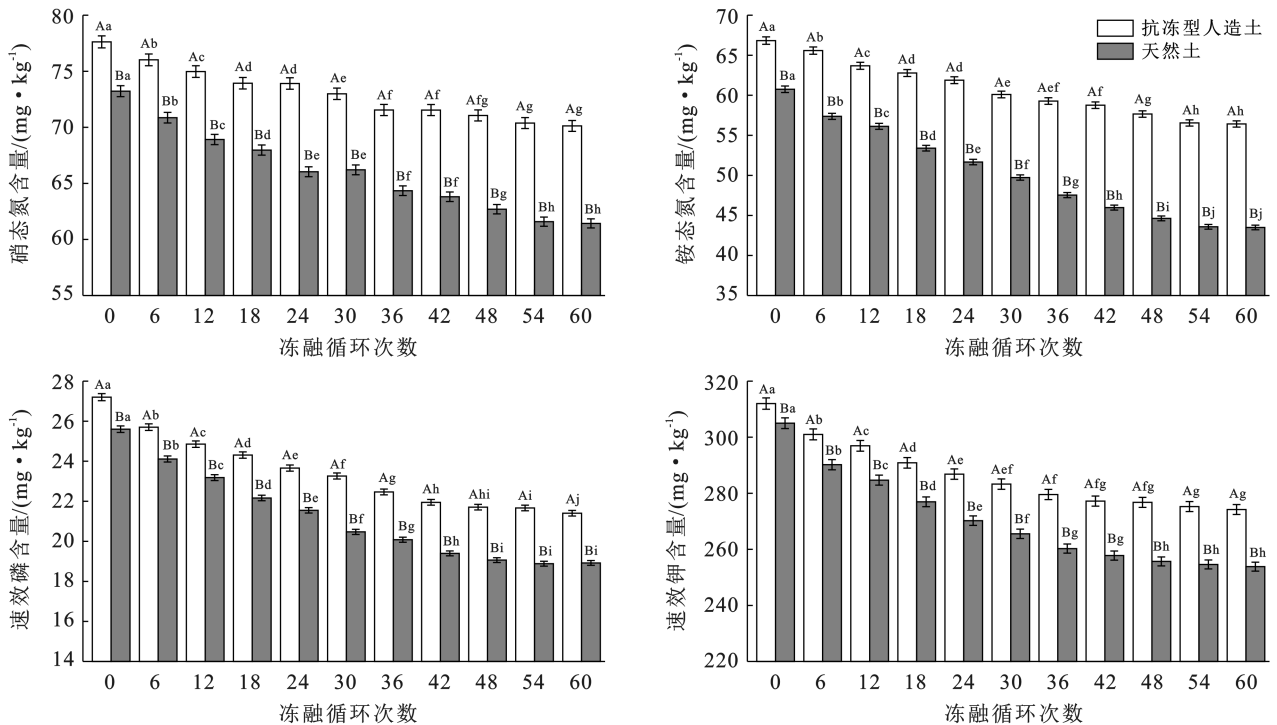


图 4 试样养分含量随冻融循环次数的变化

Fig.4 Changes of nutrient content in samples with number of freeze-thaw cycles

2.3.2 室内土壤 pH 值和有机质含量随冻融次数变化 从图 5 可知,抗冻型人造土的 pH 值在未冻融前远大于天然土,且抗冻型人造土和天然土的 pH 值均呈现逐渐下降的趋势。抗冻型人造土 pH 值的下降幅度较大,原因可能在于其掺入了较多水泥,初期水化反应产生大量 OH^- ,呈现出碱性,随后 OH^- 在冻融循环中与其他阳离子中和,导致其浓度下降^[15-17],进而 pH 值逐渐降低。两组试样的有机质含量随着冻融循环的增加而逐渐下降,在 42 次后趋于稳定。抗冻型人造土冻融前后的有机质含量均显著高于天然土($p < 0.05$),且 60 次冻融后抗冻型人造土的有机质含量下降幅度较小,比冻融前下降了 36.4%,低于天然土的 47.3%。原因在于抗冻型人造土中掺入的锯末可使直接提升土壤养分含量,而硅粉的吸附性又可增加土壤对碳源等元素的固持能力。

2.3.3 室外土壤 pH 值和有机质含量随监测时间变化 两种土壤的 pH 值和有机质含量变化如图 6 所示。对比来看,抗冻型人造土的 pH 值在前期的降低速度较快,由于抗冻型人造土中掺入的水泥呈碱性,使得使用初期半年内的 pH 值远高于天然土,而后随着水泥减少,碱性逐渐衰减,pH 值逐渐降低^[18-20]。而天然土的 pH 值随着时间推移逐渐略微下降,相对比较平稳,这是因为天然土的成分比较单一,仅受到植被和外界环境影响。随着植物发芽生长,植物根系分泌的酸性物质和冻融作用均会略微降低土壤 pH 值,随着植被情况趋于稳定,pH 值也稳定在 7 左右。抗冻型人造土和天然土的有机质含量在使用初期相差不大,在近 1 a 后抗冻型人造土有机质含量才大幅升高,其逐渐远高于天然土,这是因为掺入的有机锯末和棕纤维在土中要经过长时间的腐烂降解,才会转化

为有机质^[21], 掺入的绿化添加剂含有丰富微生物菌剂也会促进土壤中各种养分和有机质含量的增长。而天然土的有机质含量增加得比较缓慢, 因为在生态

修复的第一年植被刚刚生长, 需要消耗的土壤养分含量比较多, 同时植株凋落物和根系腐烂形成腐殖质的耗时比较长, 一般在翌年才导致有机质含量有所增加。

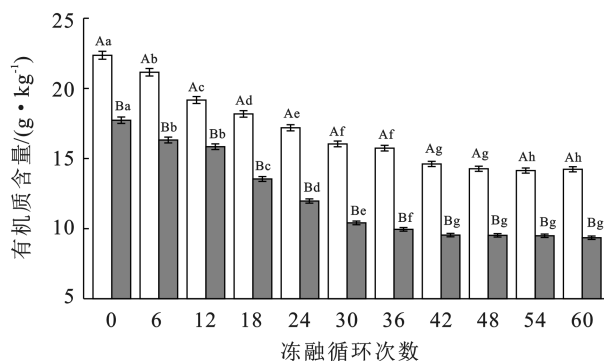


图 5 试样 pH 值和有机质含量随冻融循环次数的变化

Fig.5 Variation of pH value and organic matter content of samples with number of freeze-thaw cycles

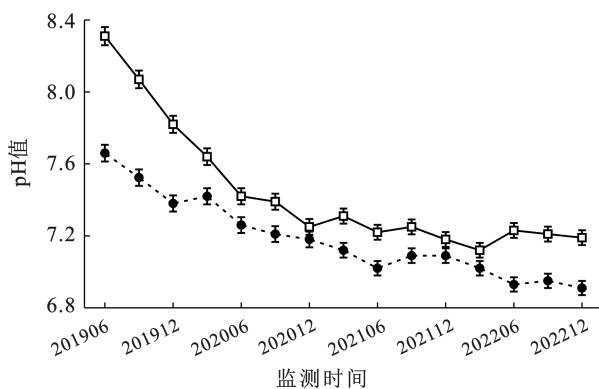
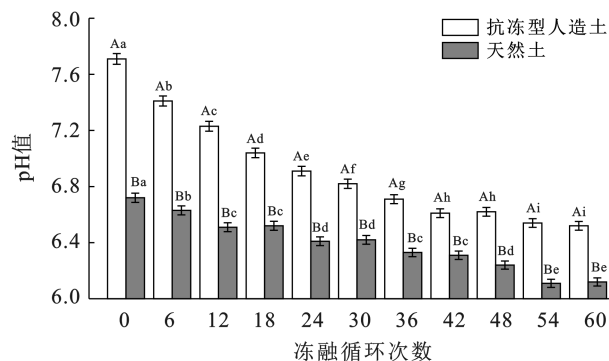
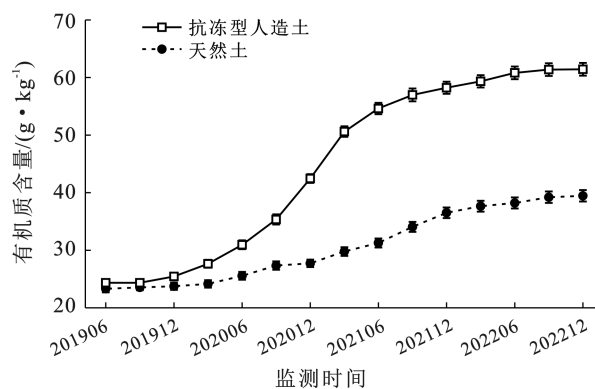


图 6 土壤 pH 值与有机质含量随监测时间的变化

Fig.6 Changes of soil pH value and organic matter content with monitoring time



2.4 植被修复效果

图 7 为边坡植被修复状况。两种土壤边坡的植被覆盖率、物种多样性和地上、地下生物量的变化较为相似, 均随着时间的推移呈现逐渐增长的趋势; 且 4 个指标每年间有一定的波动变化, 其均在每年的 9 月左右最高, 而在翌年 3 月深冬左右最低, 说明在夏末初秋时节植被的恢复效果均最佳。这与该地区的气候变化有关, 冬季气温寒冷, 不适宜植物生长繁育; 翌年春季万物复苏, 从 4 月起逐步发芽返青, 同时西藏地区 6—9 月处于雨季、温度较高, 促进了植物的生长繁育。其中, 物种多样性在早期第二年时有一定减少, 可能是修复喷播的植被物种包括先锋物种和土中自带乡土物种, 在植被生长和自然更替下, 先锋物种未能适应高寒地区自然环境, 且风和动物等外界条件干扰下, 大多退化, 逐渐被当地环境的乡土物种所取代; 随着时间增长, 植被演化增多, 植被多样性又逐渐增加。两种土壤对比来看, 抗冻型人造土的植被覆盖率、物种多样性、地上和地下生物量在不同时间测

定下均高于天然土。抗冻型人造土的植被覆盖率、物种多样性最高值分别可达到 85% 和 2.25, 而天然土的植被覆盖率、物种多样性最高仅为 54% 和 1.57, 地上和地下生物量均仅达到抗冻型人造土的 60%~70%。

3 讨论

已有众多学者研究^[22-23]表明, 边坡植被修复的成功与否主要在于坡面土壤的稳定性、肥力和植被生长情况。在高寒地区开展植被修复时, 营造抗冻稳定性强和肥力高的基材土壤是其前提条件, 而植被生长恢复是观察边坡修复情况最直观的指标。这 3 者是相互影响的, 土壤肥力能增加有机质含量与保障植物快速生长, 有机质中的有机胶体具有胶结和团聚作用^[24], 可增加土壤黏结力, 有利于土壤大团聚体形成^[25], 并最终提高土壤稳定性, 而生长的植物根系可增强土壤抗侵蚀能力^[16], 植物叶片可减弱降雨溅蚀, 均可有效减少边坡水土流失^[26]。较多的植被又可促进土壤中有机质能快速积累增长^[22], 形成土壤养分

的良性循环。本文研究表明,抗冻型人造土的稳定性、团聚体状况和肥力各项指标均更佳,更易与植被形成良性循环,因此在高寒地区使用时的植被修复效果也较好。分析原因,因为抗冻型人造土配制时加入了水泥、锯末、绿化添加剂、硅粉和棕纤维。首先,加入的水泥在土中遇水发生反应生成 CaCO_3 ,产生大量凝胶和晶体等化合物。这些化合物将微团聚体凝

聚起来,相互胶结成结晶网与坚固致密的大团聚体结构,从而提高了土壤强度^[17];其次,硅粉的加入可以疏松土壤,提高土壤通气性,增加土壤孔隙度^[18],减少冻胀融沉作用对土壤结构的负面影响;再者,棕纤维的添入增加了土壤颗粒间的连接性^[19],提高了土壤的抗剪力学强度;最后,锯末和绿化添加剂能增加土壤的有机质和养分含量^[21]。

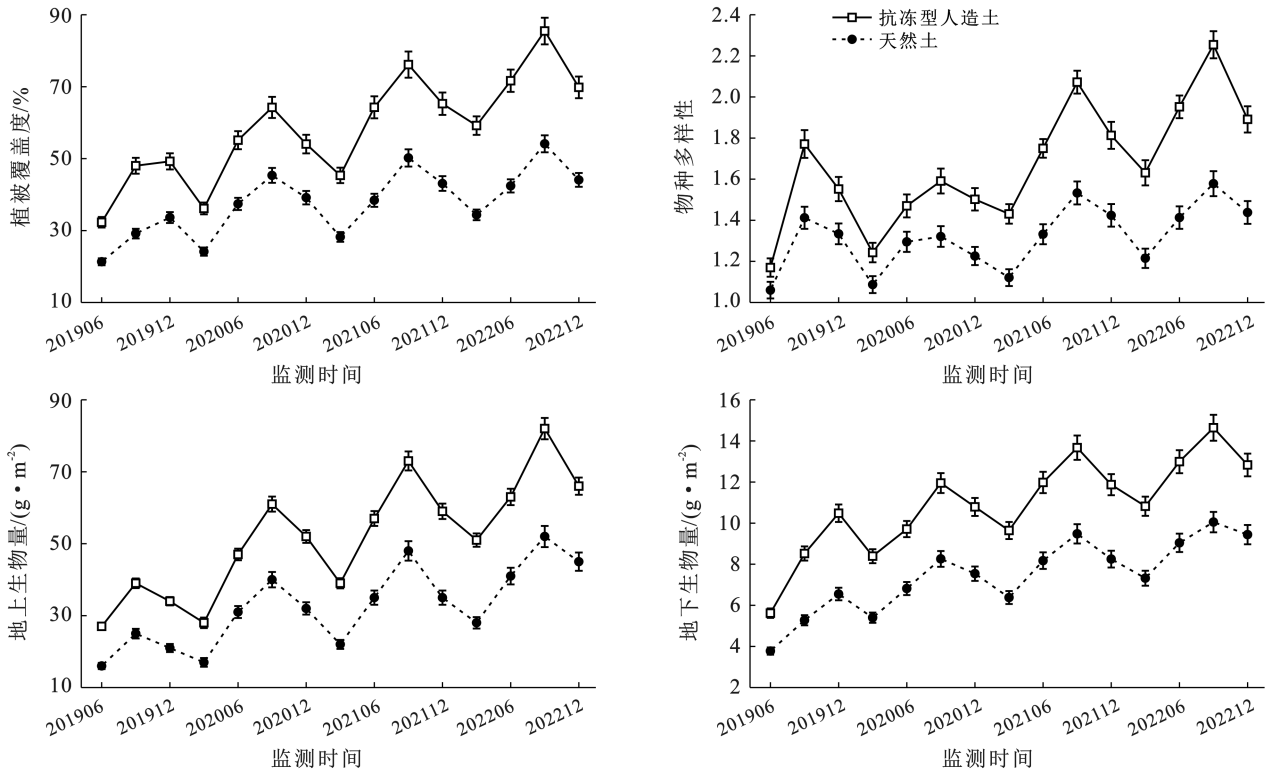


图 7 植被覆盖率、种类和修复状况随监测时间的变化

Fig.7 Changes of vegetation coverage, species and restoration status with monitoring time

本文还观察到两种土壤的稳定性和植被修复效果均在每年的 6—9 月最高,12—3 月最低。因为土壤团聚体会随着环境、植物生长状况变化而发生团聚和分散。由于土壤冬季受到冻融作用,其团聚体逐渐分散,因此在冬季时,土壤相对动弹性模量降低,结构破坏率增加;而春、夏季由于植被发芽,植物根系生长虽然对土壤颗粒有穿插、挤压作用,促使土壤孔隙率增加,但根系分泌物对土壤颗粒的聚合起到胶结凝聚作用,且植被根系的形成可加固土壤^[16],对团聚体有较强的聚合作用;土壤团聚体状况又会影响土壤的稳定性,因此两种土壤指标测定每年均呈现波动性的变化。主成分分析也表明,相对动弹性模量、结构破坏率、pH 值、有机质 4 个指标可最好地评价土壤理化性质。这与前人对于天然土的研究结果相似^[27],本文研究结果证实抗冻型人造土与天然土理化性质的评价方法基本一致。所以在以后的研究中可用上述这

4 个指标来评价抗冻型人造土基材的性质。

根据中华人民共和国能源行业现行标准《水电工程陡坡植被混凝土植被修复技术规范》(NB/T 35082—2016)^[28],土壤质量是植被修复效益评价的关键指标,合理的土壤质量是植物持续健康生长的必要条件。该标准规定土壤中氮、磷和钾的含量应分别大于 0.06,0.02 和 0.01 mg/g,pH 值为 6.0~8.5。本研究室室内情况表明,抗冻型人造土使用时各项指标均能满足要求,且其抗冻耐久性、团聚体稳定性和肥力状况均显著高于一般天然土,室外植被恢复情况也表明,采用抗冻型人造土作为基材构建岩质边坡植被生境效果更好,边坡植被覆盖率更高,且物种较为丰富;采用天然土的边坡坡面植被覆盖率较低,且植物物种亦较单调。综上所述,抗冻型人造土在高寒地区的实际应用中其效果更佳,具备更好的前景。后续可继续进行实地监测,以监测抗冻型人造土的长期使用效果。

4 结论

(1) 与天然土相比,抗冻型人造土的冻融适应性有显著改善;表现在其冻融后的抗冻耐久性、团聚体稳定性和肥力显著优于天然土。

(2) 主成分分析表明相对动弹性模量、团聚体结构破坏率、pH值和有机质含量这4个指标与主成分因子的相关性较高,以后可用这4个指标结合植被恢复情况来评价边坡生态修复效果。

(3) 在高寒地区工程区内,抗冻型人造土4a内不同时间段上的抗冻耐久性和肥力均更高于天然土,且其在岩质边坡应用时的植被修复效果亦更佳,表明抗冻型人造土更适宜于在岩质边坡上营造抗冻能力更强的植被生境。

(4) 抗冻型人造土在配制时掺入的水泥、硅粉和棕纤维使其抗冻耐久性有较大的提升;而掺入的锯末、绿化添加剂使其肥力有较大的增加,综合现有行业标准,抗冻型人造土适合在高寒地区边坡上使用。下一步可进行更多地区的长期监测。

参考文献(References)

[1] 袁建新,易志坚,王寿宇.青藏高原及其周边地区水电工程建设中的地质挑战[J].工程地质学报,2016,24(5):847-855.
Yuan Jianxin, Yi Zhijian, Wang Shouyu. Geological challenges in construction of hydropower projects in Qinghai-Tibet plateau and its surrounding areas [J]. Journal of Engineering Geology, 2016,24(5):847-855.

[2] Li Xiaolin, Zhang Jin, Xu Linyu. An evaluation of ecological losses from hydropower development in Tibet [J]. Ecological Engineering, 2015,76:178-185.

[3] 周明涛,许文年,胡欢,等.一种抗冻型生态护坡基材[P].中国:201310469088.7,2016-01-27.
Zhou Mingtao, Xu Wennian, Hu Huan, et al. A frost resistant ecological slope protection substrate [P]. China, 201310469088.7, 2016-01-27.

[4] 许文年,夏振尧,周明涛,等.植被混凝土生态防护技术理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
Xu Wennian, Xia Zhenyao, Zhou Mingtao, et al. Theoretical and Practical Application of Vegetation Concrete Ecological Protection Technology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.

[5] 朱兆华,赵其国,赖庆旺,等.我国南方工程边坡土壤生态修复技术创新的认知与实践[J].土壤,2017,49(4):643-650.
Zhu Zhaohua, Zhao Qiguo, Lai Qingwang, et al. Cognition and practice on technological innovation of ecological restoration of engineering slope soil in South China [J]. Soils, 2017,49(4):643-650.

[6] Cheng Hu, Xu Wennian, Luo Ting, et al. Microbial functional diversity as affected by different engineered eco-restoration methods at Xiangjiaba hydropower station [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020,146(3):04019125.

[7] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
Chen Tongde, Jiao Juying, Wang Haolin, et al. Progress in research on soil erosion in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):547-564.

[8] 徐慧,吕庆,杨雨荷,等.边坡植被重建效果评价:研究进展与展望[J].生态学杂志,2022,41(3):589-596.
Xu Hui, Lyu Qin, Yang Yuhe, et al. Evaluation of slope re-vegetation effect: Research progress and prospect [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022,41(3):589-596.

[9] Li Ruirui, Kan Shasha, Zhu Mengke, et al. Effect of different vegetation restoration types on fundamental parameters, structural characteristics and the soil quality index of artificial soil [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:11-23.

[10] 王佟,杜斌,李聪聪,等.高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术[J].煤炭学报,2021,46(1):230-244.
Wang Tong, Du Bin, Li Congcong, et al. Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(1):230-244.

[11] 顾汪明,周金星,王彬,等.冻融循环作用对黑土水稳性团聚体特征的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(4):45-52.
Gu Wangming, Zhou Jinxing, Wang Bin, et al. Effects of freeze-thaw cycle on the characteristics of black soil water-stable aggregates [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(4):45-52.

[12] 杜子银.冻融作用对高寒草地土壤理化和生物学性质的影响[J].生态环境学报,2020,29(5):1054-1061.
Du Ziyin. Effects of freeze-thaw action on soil physico-chemical and biological properties in the alpine grasslands [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5):1054-1061.

[13] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等.冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):57-65.
Sun Baoyang, Wu Zhiguang, Li Zhanbin, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(11):57-65.

[14] 张瑶瑶,姜凌,李梦帆,等.氨基功能化微硅粉的制备及其对镉污染土壤的钝化效果研究[J].安全与环境学报,2023,23(4):1270-1279.

- Zhang Yaoyao, Jiang Ling, Li Mengfan, et al. Preparation of amino functionalized microsilica powder and its passivation effect on cadmium contaminated soil [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023,23(4):1270-1279.
- [15] 车东日,罗春泳,沈水龙.水泥混合上海黏土 pH 值和电导率与强度特性研究[J].*岩土力学*, 2012, 33(12): 3611-3615.
- Che Dongri, Luo Chunyong, Shen Shuilong. Relationship between pH value and electrical conductivity and strength characteristics of cement treated Shanghai clayey soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12):3611-3615.
- [16] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].*水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273,298.
- Liu Junyang, Zhou Zhengchao, Su Xueming. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(3):267-273,298.
- [17] Suksiripattanapong C, Jenpiyapong K, Tiyasangthong S, et al. Mechanical and thermal properties of lateritic soil mixed with cement and polymers as a non-bearing masonry unit [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022,16: e00962.
- [18] Premkumar R, Hariharan P, Rajesh S. Effect of silica fume and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of GGBS based geopolymer concrete [J]. *Materials Today:Proceedings*, 2022,60:211-215.
- [19] 李丽华,万畅,刘永莉,等.玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J].*武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(1): 102-106.
- Li Lihua, Wan Chang, Liu Yongli, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017,50(1):102-106.
- [20] 保琼莉,刘宗阳,王柯,等.硫酸铁复配石灰、水泥对锑矿区周边土壤锑形态分布的影响及生态风险评价[J].*农业环境科学学报*, 2022,41(8):1730-1738.
- Bao Qiongli, Liu Zongyang, Wang Ke, et al. Effects of $Fe_2(SO_4)_3$ combined with solidification agents on the distribution of different antimony forms and ecological risk in antimony-contaminated soil around an antimony mining area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022,41(8):1730-1738.
- [21] Akinpelumi B E, Olatunji O A. Effects of sawdust soil amendment on the soil, growth and yield of *Solanum esculentum* Linn. in waste engine oil-polluted soil [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2015,7(2):128-136.
- [22] 刘谣,焦泽彬,谭波,等.川西亚高山森林凋落物去除对土壤腐殖质动态的影响[J].*植物生态学报*, 2022, 46(3):330-339.
- Liu Yao, Jiao Zebin, Tan Bo, et al. Litter removal effects on dynamics of soil humic substances in subalpine forests of Western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022,46(3):330-339.
- [23] 王军.九寨沟震后受损边坡类型划分与植被修复研究[D].四川 成都:成都理工大学,2021.
- Wang Jun. Study on the Classification of damaged slope and ecological restoration after earthquake in Jiuzhai Vally, Sichuan Province, China [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2021.
- [24] 魏彬萌,王益权,李忠徽.种植苹果树对渭北果园土壤胶结物质分布的影响[J].*中国生态农业学报*, 2018, 26(11):1692-1700.
- Wei Binmeng, Wang Yiquan, Li Zhonghui. Effects of planting apple trees on distribution of soil cementing materials in Weibei apple orchards [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2018,26(11):1692-1700.
- [25] 刘鸿涛,郑纪勇,李高亮,等.晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J].*农业环境科学学报*, 2021, 40(1):137-143.
- Liu Hongtao, Zheng Jiyong, Li Gaoliang, et al. Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2021,40(1):137-143.
- [26] 邵奕铭,高光耀,刘见波,等.自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应[J].*生态学报*, 2022,42(1):322-331.
- Shao Yiming, Gao Guangyao, Liu Jianbo, et al. Effects of vertical cover structure of grass and shrub on reducing runoff and soil loss under natural rainfall in the loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):322-331.
- [27] Zhang Baojun, Zhang Guanghui, Yang Hanyue, et al. Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2019,182:104170.
- [28] 水电水利规划设计总院.水电工程陡边坡植被混凝土植被修复技术规范:NB/T35082—2016[S].北京:中国电力出版社,2016.
- Hydropower and Water Resources Planning and Design Institute. Technical specification for vegetation concrete restoration of steep slopes in hydropower engineering: NB/T35082—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.