

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.001; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.001.

雷磊, 王良, 樊成虎, 等. 黄土边坡微生物矿化加固及植被恢复试验[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 227-234, 242.

Lei Lei, Wang Liang, Fan Chenghu, et al. Microbial solidification reinforcement and vegetation restoration of loess slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 227-234, 242.

黄土边坡微生物矿化加固及植被恢复试验

雷磊^{1,2}, 王良^{1,2}, 樊成虎³, 刘子瑞³, 宋洋⁴, 薛倩楠⁵, 田堪良^{6,7}, 段金贵^{6,8}

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 国网(西安)环保技术中心有限公司, 西安 710100;
3. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710100; 4. 国网陕西省电力有限公司安康水力发电公司, 陕西 安康 725009;
5. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司, 西安 710048; 6. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
7. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 8. 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: [目的] 研究黄土边坡微生物矿化加固及植被恢复, 为黄土边坡的加固及坡面土壤侵蚀防治提供新方法和新技术。 [方法] 采用微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 技术对黄土边坡进行矿化加固处理, 并在加固黄土边坡上进行植被恢复, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 和光学显微镜, 从微观角度探究 MICP 技术对黄土边坡矿化加固的作用机制, 并统计分析了加固黄土边坡的植被恢复效果。 [结果] 采用 MICP 技术对黄土边坡进行加固处理后, 在坡面上生成的固化层将松散且相邻的土壤颗粒胶结在一起, 使黄土坡面形成一个整体, 固化层最大厚度为 0.23 cm, 平均厚度为 0.21 cm; 加固黄土边坡恢复植被后第 60 天, A1, A2, B1, B2, A1B1, A2B2 各区域内植被成活率比 A0, B0, A0B0 各区域分别显著提高 26.66%, 20%, 37.5%, 25%, 33.33%, 25% ($p < 0.05$), 第 60 天后, 各区域内植被的成活率均差异显著, 而且固化后加保水剂的 A1, B1, A1B1 各区域内植被的成活率最高; 固化后加保水剂的 B1 和 A1B1 区域内紫穗槐高度和地径的生长变化量最大, 且固化后加保水剂的 A1, B1, A1B1 各区域内麦冬草和紫穗槐的生长状况最好。 [结论] 采用 MIC 技术可以有效固化黄土坡面, 与植被恢复技术相结合, 既能防治土壤侵蚀, 又能恢复生态环境。这种综合防治措施为黄土边坡水土流失防治与生态修复提供了良好的技术支持。

关键词: 黄土边坡; 微生物矿化; 加固技术; 植被恢复; 边坡防护

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0227-08

Microbial solidification reinforcement and vegetation restoration of loess slope

Lei Lei^{1,2}, Wang Liang^{1,2}, Fan Chenghu³, Liu Zirui³,

Song Yang⁴, Xue Qiannan⁵, Tian Kanliang^{6,7}, Duan Jingui^{6,8}

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 2. State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technology Center Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 4. Ankang hydroelectric power company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Ankang, Shaanxi 725009, China; 5. Xi'an Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 6. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 7. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 8. Xifeng Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station, Yellow River Water Conservancy Commission, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the reinforcement of loess slope by microbial solidification and vegetation restoration, and to provide new methods and technologies for the reinforcement of loess slope and the prevention and control of slope soil erosion. [Methods] The Microbially Induced Calcite

收稿日期: 2023-10-31

修回日期: 2023-11-23

资助项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目“陕北地区电网工程水土流失及次生灾害风险识别与治理关键技术研究与应用”(5226KY22000K)

第一作者: 雷磊(1985—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电网环水保技术研究。E-mail: ll2494590@163.com

通信作者: 段金贵(1997—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持工程及技术研究。E-mail: djingui@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Precipitation (MICP) technology was used to strengthen the solidification of loess slope, and vegetation restoration was carried out on the solidified loess slope. The mechanism of MICP technology on solidification reinforcement of loess slope was investigated from the microscopic point of view by using scanning electron microscopy and optical microscopy. The vegetation restoration effect of solidified loess slope was statistically analyzed. [Results] After solidifying the loess slope with MICP technology, the solidified layer formed on the slope cemented the loose and adjacent soil particles together to form a whole loess slope. The maximum thickness of the solidified layer was 0.23 cm. The average thickness was 0.21 cm. On the 60 days after vegetation restoration, the survival rate of vegetation in A1, A2, B1, B2, A1B1 and A2B2 was significantly ($p < 0.05$) increased by 26.66%, 20%, 37.5%, 25%, 33.33% and 25%, respectively, compared with A0, B0 and A0B0. After the 60 days, the survival rate of vegetation in each region was significantly different and the survival rate of vegetation in A1, B1 and A1B1 regions with water-retaining agent after solidification was the highest. The growth changes in height and ground diameter of *Amorpha fruticosa* in the B1 and A1B1 regions with addition of water retaining agents after solidification were the largest. The growth of *Amorpha fruticosa* and *Ophiopogon* in each area of A1, B1 and A1B1 after solidification with water-retaining agent was the best. [Conclusions] MICP technology can effectively solidified loess slope, and combined with vegetation restoration technology, it can not only prevent soil erosion, but also restore the ecological environment. This comprehensive control measures provide good technical support for soil erosion control and ecological restoration of loess slope.

Keywords: loess slope; microbial mineralization; strengthening technique; vegetation restoration; slope protection

随着社会经济和工程技术的快速发展,我国各类工程建设与日俱增,在黄土高原地区,在工程建设的过程中形成大面积的人工裸露黄土边坡^[1],导致黄土边坡坡体的稳定性降低,再加上受到降雨冲刷、人类活动、冻融以及风力侵蚀等各因素的影响,极易发生垮塌、滑坡、崩塌等水土流失现象^[2-4],而滑坡已成为黄土高原地区最严重的地质灾害,严重威胁当地居民的生命财产安全,制约黄土高原地区经济发展^[5-7]。黄土边坡的治理防护一直都是黄土高原地区工程建设的重点和难点,传统的治理措施包括工程措施、林草措施和农业措施,传统的防治措施对黄土边坡的治理均取得良好的成效,但存在工程量大,成本高,周期长等不足之处^[8-10]。微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP)技术为黄土边坡的加固和防护提供了新的思路和方法,该技术利用脲酶菌等微生物,通过微生物的矿化作用,在土壤颗粒之间的空隙中生成碳酸钙结晶,将松散且相邻的土壤颗粒胶结在一起,形成一个整体,从而可以提高黄土边坡的抗侵蚀强度和稳定性^[11-12]。景天宇等^[13]利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对黄河泥沙样进行灌浆固结试验,研究发现可以提高泥沙的抗剪强度和无侧限抗压强度;Li 等^[14]将不同配比的粉煤灰加入膨胀土中,利用 MICP 技术处理之后发现粉煤灰浓度为 25% 时,固化试件的无侧限抗压强

度比对照试件提高了 1 倍;王怀星^[15]利用 MICP 技术对黄土土样进行不同次数的固化处理,结果发现随着固化处理次数的增加,固化黄土土样的渗透性逐渐降低,但抗侵蚀性能却随着固化处理次数的增加而逐渐增强;袁翔等^[16]利用 MICP 技术对巴东组第三段软弱夹层土体进行加固试验,结果发现利用 MICP 技术可以有效提高软弱夹层土体的抗剪强度,改良岩土体的工程地质性质;段金贵等^[17]利用 MICP 技术对黄土坡面进行固化处理,发现 MICP 技术能够有效地提高黄土坡面的抗侵蚀性能,随着固化处理次数的增加,坡面的总产沙量逐渐减少;谢约翰等^[18]利用 MICP 技术对黏性土进行改性处理,用以改善其水稳性与抗侵蚀能,结果发现 MICP 改性土样能较好地保持原始结构,水稳性更强,提高了土体的稳定性;张世参等^[19]利用 MICP 技术对风积沙土进行固化处理,结果发现 MICP 技术可以提高风积沙土的无侧限抗压强度,明显改善风积沙土的工程性质。

目前,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术已较为成熟,在上述研究中,MICP 技术多应用于砂土等粗粒土方面的研究,对黄土丘陵沟壑区黄土边坡的矿化加固研究较少。基于此,笔者利用巴氏芽孢杆菌,对黄土丘陵沟壑区黄土边坡进行矿化加固,固化处理完成后,在固化黄土边坡进行植被恢复,利用扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜,从微观角度探究

MICP 技术对黄土边坡矿化加固的作用机制,将 MICP 技术与植被恢复技术相结合,形成黄土边坡综合防治措施,以期为黄土丘陵沟壑区黄土边坡的加固和土壤侵蚀防治提供新方法和新技术。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验选定的试验区位于陕西省咸阳市杨陵区五泉镇中国科学院水利部水土保持研究所马超岭生产建设项目水土流失野外科学试验站(107°59′51″E, 34°19′28″N),该地区为大陆性季风气候,海拔 431~559 m,多年平均气温 12.9℃,最高气温可达 42℃,最低气温可达-19.4℃,降雨多集中于春秋两季,年均降雨量 635.1 mm,年均蒸发量 1 505.3 mm,受地形影响,以东风和西风为主导风向。该试验区内有人工建造的不同坡度的黄土边坡和不同规格的标准径流小区,为各种试验研究提供了便利的科研条件。

1.2 试验材料

1.2.1 巴氏芽孢杆菌菌液 固化试验选用的脲酶菌为巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*, 编号 ATCC 11859)好氧,化能异养型,革兰氏阳性,细胞形状呈杆状,长约 2~3 μm,适宜生长温度 15~37℃,菌种源自美国菌种保藏中心。固化黄土边坡需要大量的巴氏芽孢杆菌菌液,先将菌种用固体培养基进行活化后,再采用大豆胰蛋白胨琼脂(CASOAGAR)培养基,进行培养扩繁。大豆胰蛋白胨琼脂培养基的配比为尿素(Urea)20 g、酪蛋白胨 15 g、大豆蛋白胨 5 g、氯化钠 5 g、琼脂 20(仅在固体培养基中添加)、蒸馏水 1 L。培养基高温灭菌冷却至室温后进行菌种接种,接种后的培养基在温度为 30℃,转速为 200 r/min 的恒温震荡培养箱中培养 48 h,在培养的过程中有刺激性气味产生,培养好的菌液呈浅黄色,置于 4℃的冰箱保存备用。

1.2.2 胶结液 在进行固化试验时,需要加入胶结液,胶结液的作用主要是为矿化加固过程提供钙源和尿素,Abo-el-enein 等^[20]研究发现,在固化过程中使用氯化钙做钙源能够获得较好的固化效果,固化的物理力学性能相对更佳。王怀星^[15]利用 MICP 技术对黄土进行固化后研究发现,采用 1.2 mol/L 的氯化钙和尿素混合液做胶结液时固化的效果最佳。因此,本试验胶结液采用 1.2 mol/L 氯化钙和尿素混合液,氯化钙和尿素的摩尔比为 1:1。

1.2.3 保水剂 本试验采用的保水剂为沃特新型多功能保水剂(林业专用),产自胜利油田长安控股集团有限公司,成分为聚丙烯酰胺和氯化钾,钾盐型,含有

氮、磷、钾铁、锰、锌等营养元素,pH:6~8,吸水倍数:自来水 200 倍,脱盐水 300~1 500 倍,小颗粒(20~40 目),能快速吸收灌溉水和雨水,在植物根系周围形成“微型水库”,能吸收肥料并缓慢释放,增加肥效,还能有效抑制土壤中有菌的生长和繁殖,保护植物根系。

1.2.4 植被 黄土边坡进行固化处理后,需要进行植被恢复,本试验选用的植被为紫穗槐和麦冬草。

1.2.5 试验区土壤基本理化性质 在试验区的黄土边坡现场采取土壤样品,带回室内实验室进行基本理化性质分析,所取土壤为黄土,天然含水率 12.5%,干密度 1.53 g/cm³,比重为 2.71,有机质含量为 6.31 g/kg,颗粒组成为>0.075(15.7%),0.075~0.005(73.7%),<0.005(9.6%),液限 34.5%,塑限 18.1%,塑性指数 16.4%,按塑性指数分类为粉质黏土。

1.3 试验方法

1.3.1 黄土边坡的微生物固化试验 试验于 2022 年 4—9 月进行。黄土边坡微生物矿化加固现场试验的主要工艺流程为选择试验区→选取固化黄土边坡→划分固化区域→坡面平整→喷洒菌液和胶结液→覆盖塑料薄膜静置。在试验区选择一个坡度为 25°的人工黄土边坡进行固化处理,边坡长 4 m,宽 7 m,将边坡划分为 3 个区域,分别为 A 区、B 区和 AB 区,每个区域的长为 4 m,宽为 2 m,再在各个区域内划分出长 1 m,宽 2 m 的 3 个小区,分别编号 A1, A2, A0, B1, B2, B0, A1B1, A2B2, A0B0, 共计 9 个小区,其平面设计见图 1。区域划分完成后,分别在 A1, A2, B1, B2, A1B1 和 A2B2 区域内进行固化处理,固化处理的次数为 5 次,其中 A0, B0 和 A0B0 为对照组,不进行固化处理。为了方便固化操作,在横向修筑宽 0.3 m 的水平阶,在纵向修筑宽 0.3 m 的阶梯,将室内培养好的巴氏芽孢杆菌菌液和配置好的胶结液用 PVC 桶带到野外试验区,在运输过程中对菌液进行遮光处理,避免太阳直射。固化试验过程中,菌液的用量为 1 L/m²,胶结液的用量为 2 L/m²,首先用喷壶将菌液均匀喷洒在黄土坡面上,覆盖塑料薄膜静置 2 h,让菌液更好地渗入并减少蒸发散失,静置 2 h 后,再用喷壶均匀喷洒胶结液,喷洒完成后覆盖塑料薄膜静置,让菌液与胶结液在坡面上充分接触并发生反应,再进行下一次固化处理,本试验固化处理次数为 5 次,每次固化处理的时间间隔为 24 h。

1.3.2 固化黄土边坡的植被恢复试验 黄土边坡微生物固化处理完成之后,在固化坡面上进行植被恢复试验,固化黄土边坡植被恢复现场试验的主要工艺流程为坡面打孔→种植植被→植被养护。选用的植被为麦冬草和紫穗槐见图 1。在 A 区域内单独种植麦

冬草,B 区域内单独种植紫穗槐,在 AB 区域内麦冬草和紫穗槐间种,其中在 A2,B2,A2B2 区域内种植植被时分别添加保水剂。种植方式为打孔种植,种植穴的直径约 10 cm,麦冬草种植孔的深度约 8 cm,横向间距 30 cm,纵向间距 40 cm;紫穗槐种植孔的深度约15 cm,横向间距 50 cm,纵向间距 40 cm,保水剂的用量为麦冬草 20 g/株,紫穗槐 40 g/棵,施用方法为根施,将保水剂与土壤参拌混合均匀填埋于植被根系周围,压实覆土略高于地面,然后进行充分灌溉。固化坡面植被种植完成后,为了保证植被的成活率,需要进行养护,种植后每隔一天浇水一次,每次浇水的量不能过多,养护一周之后,适当延长浇水时间间隔,养护两周后不再进行养护,让其在自然状态下生长。

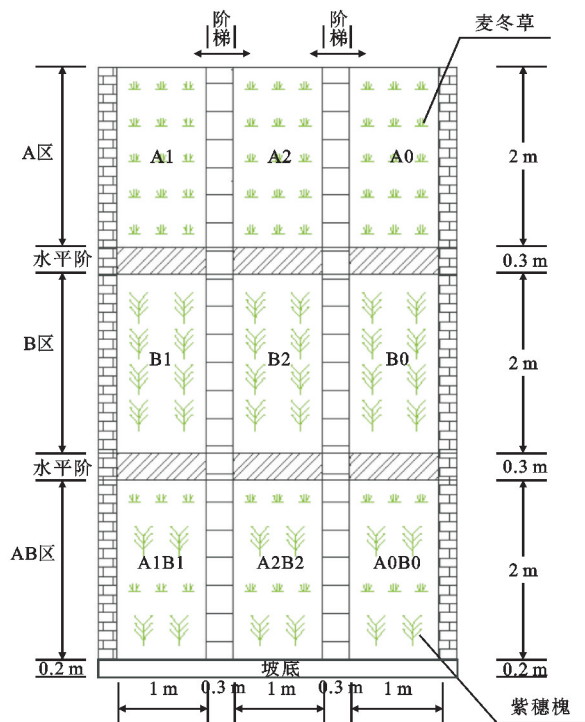


图 1 黄土边坡微生物固化及植被恢复试验平面设计
Fig. 1 Plane design of Microbial Solidification and Vegetation Restoration Experiment on Loess Slope

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2018 软件对试验数据进行整理分析,使用 AutoCAD 2018, Origin 2018 软件作图,使用 SPSS 2018 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 巴氏芽孢杆菌的生长特性

2.1.1 巴氏芽孢杆菌的浓度、pH 值随培养时间的变化 在制备巴氏芽孢杆菌菌液过程中,每隔 2 h 用紫外分光光度计测定其 OD₆₀₀ 值,即菌液在 600 nm 波长紫外光照射下的吸光度值,间接表示巴氏芽孢杆菌

的浓度,并同时用 pH 计测定其 pH 值,每次测定 3 个重复,取均值。测得菌液的 pH 值和 OD₆₀₀ 值随培养时间的变化曲线如图 2 所示。菌液的 OD₆₀₀ 值和 pH 值随培养时间的变化趋势基本相同,菌液 OD₆₀₀ 值和 pH 值在 0~2 h 内几乎没有发生变化,巴氏芽孢杆菌的生长缓慢,OD₆₀₀ 值在 2~30 h 内迅速增长,巴氏芽孢杆菌的生长速度处于对数期,细菌大量繁殖,分泌大量的高活性脲酶,水解尿素产生大量的 NH₄⁺ 和 CO₃²⁻,使得菌液的 pH 值在 2~8 h 内迅速增长,8~32 h 内增长缓慢,两者在 32 h 后均趋于稳定,原因是随着培养时间的增加,培养基中的营养物质被细菌消耗殆尽,细菌的数量不再增加,最终 OD₆₀₀ 稳定在 2.15 左右,pH 值稳定在 9.1 左右,在后续细菌制备培养过程中,将细菌的培养时间定为 34 h。

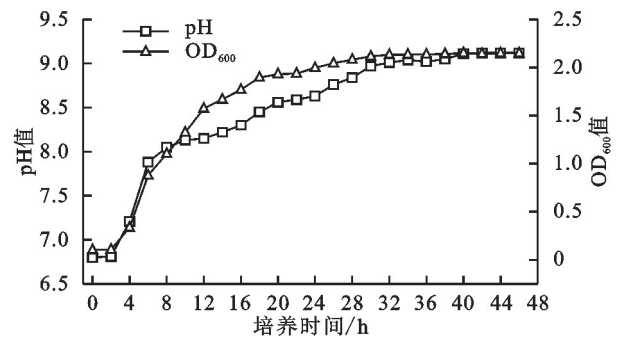


图 2 菌液 pH 值和 OD₆₀₀ 值随培养时间的变化
Fig. 2 The bacterial liquid OD₆₀₀ and pH value with the change time of the cultivation time

2.1.2 脲酶的活性 巴氏芽孢杆菌会分泌高活性脲酶,脲酶的活性是影响微生物矿化作用的重要因素之一,脲酶水解尿素产生 NH₄⁺ 和 CO₃²⁻,使得菌液的导电性增强,因此通过使用电导率仪测定菌液电导率的变化来间接地表示脲酶的活性,测得菌液电导率值如表 1 所示。脲酶的活性与电导率的变化速率成线性相关,菌液单体脲酶活性为菌液脲酶活性与菌液 OD₆₀₀ 值的比值来表示,计算得菌液的脲酶活性为 5.77 mS/(cm · min),单体脲酶活性为 2.65 mS/(cm · min)。

$$U=11.11c \quad (1)$$

式中:U 表示脲酶的活性[mS/(cm · min)];c 表示电导率的变化速率(mS/cm)。

表 1 电导率测定值

Table 1 Bacterial fluid conductivity measurement value

时间/min	0	1	2	3	4	5
电导率/(mS · cm ⁻¹)	4.91	4.98	5.04	5.08	5.11	5.17

2.2 黄土边坡的微生物固化效果

黄土边坡固化处理完成以后,在坡面上生成一定厚度的固化层,在各固化区域内取样,利用游标卡尺对各个试验区域内固化层的厚度进行测量,最大厚度

为 0.23 cm,各个试验区内固化层平均厚度为 0.21 cm。为了进一步探究固化处理前后黄土边坡黄土土样内部微观结构的变化和生成的碳酸钙晶体的分布情况,在试验区域现场采取原状土样和固化层样品,通过光学显微镜(蔡司 AXIO Scope. A1 型)对黄土边坡原状土试样和固化层试样进行微观结构分析,得到黄土边坡黄土样固化处理前后表面形态的变化情况如图 3 所示,没有进行固化处理的黄土边坡,其表面土壤颗粒松散,土壤颗粒相互分离,没有连接成一个整体,土壤中因存在不同类型的矿物质而呈现出不同的颜色。进行固化处理的黄土边坡表面在巴氏芽孢杆菌与胶结液的作用下生成大量白色透明的碳酸钙晶体,这些晶体填充在土壤颗粒之间的空隙中,将松散且相邻的土壤颗粒连接成一个整体,在黄土边坡表面形成一层致密的固化层。

通过扫描电子显微镜(SEM, JSM-6360LV 型)对固化层试样进行分析后得到固化层试样电子显微镜图像如图 4 所示,土壤颗粒表面和相邻土壤颗粒之间的空隙中生成大量的碳酸钙晶体,晶体大多数呈块状,大致呈斜方六面体型,直径在 3~8 μm ,将相邻且松散的土壤颗粒胶结在一起,形成一个整体,而且在晶体的表面有一定数量的孔洞,这是巴氏芽孢杆菌死亡后留下来的孔洞。

A 原状土微观结构放大200倍 B 固化层微观结构放大200倍

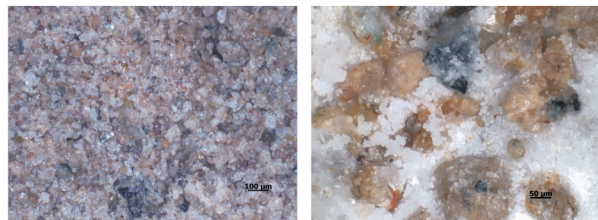


图 3 原状土样和固化层试样光学显微镜图像

Fig. 3 Optical microscope images of undisturbed and solidified soil samples

A 固化层试样放大500倍 B 固化层试样放大2000倍

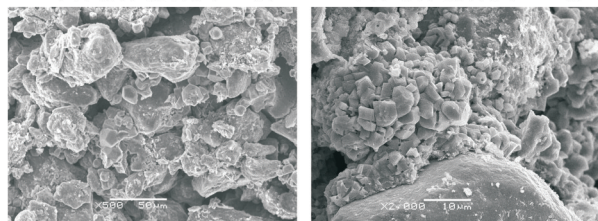


图 4 固化层试样电子显微镜图像

Fig. 4 Electron microscope image of solidified layer specimen

2.3 固化黄土边坡植被恢复效果

2.3.1 植被成活率随时间的生长变化 固化黄土边坡植被恢复完成后,坡面植被经过养护后,分别在第 7 天、第 30 天、第 60 天和第 90 天统计各个区域内植

被的成活率,得到固化处理对黄土边坡各区域内植被的成活率的影响如表 2 所示。在植被恢复完成后的第 7 天,各个区域内植被的成活率均为 100.00%,A, B, C 各区域内植被的成活率无显著差异,植被没有出现死亡,原因是在这期间,对植被进行了浇水养护,而且麦冬草和紫穗槐都是常绿植被,在第 7 天死亡特征不明显;A1, A2, A0 区域第 30 天的植被成活率分别为 93.33%, 93.33%, 86.67%, 比 A0 区域分别显著 ($p < 0.05$) 提高 6.66%, 6.66%, A1 和 A2 区域间差异不显著;B1, B2, B0 区域第 30 天的植被成活率分别为 100.00%, 87.50%, 87.50%, B1 区域第 30 天的植被成活率比 B2, B0 区域分别显著提高 12.50%, 12.50%, B2 和 B0 区域间差异不显著;A1B1, A2B2, A0B0 区域第 30 天的植被成活率分别为 91.66%, 91.66%, 79.17%, 比 A0B0 区域分别显著提高 12.49%, 12.49%, A1B1 和 A2B2 区域间差异不显著。60 d 以后,各个区域内植被的成活率均差异显著, A1, A2, B1, B2, A1B1, A2B2 区域第 60 天后植被的成活率比 A0, B0, A0B0 区域分别显著高 26.66%, 20%, 37.5%, 25%, 33.33%, 25%, 而且固化后加保水剂的 A1, B1, A1B1 区域内植被的成活率比固化区域内植被的成活率都高。由此可知,固化区域和固化加保水剂区域植被的成活率显著高于对照区域,这表明固化处理和固化处理后加保水剂能够显著提高坡面植被的成活率,当植被种植 14 d 后,不再进行养护,植被在自然状态下生长,固化黄土边坡植被恢复的时间为 2022 年 4 月,植被生长过程中,环境温度逐渐升高,降雨量不足,坡面水分蒸发强,对于固化区域和固化后加保水剂的区域,固化层能够减少坡面水分的蒸发,而且保水剂能够吸收水分,在植物根系周围形成一个微型水库并且能够反复吸水,从而保证了植物生长所需要的水分,没有加保水剂的固化区域,虽然固化层可以减少坡面水分的蒸发,但其成活率比加保水剂的区域低,所以,固化后加保水剂的区域,植被的成活率最高。

2.3.2 植被覆盖度随时间的生长变化 固化黄土边坡植被恢复完成后,在统计植被成活率的同时,每隔 30 d 统计各个区域内植被的覆盖度,得到固化处理对黄土边坡植被的覆盖度的影响如表 3 所示,并利用大疆无人机(INSPIRE1RAW)航拍观察黄土边坡植被的生长情况。在前 90 d 内, A1, A2, B1, B2, A1B1, A2B2 各个区域植被的覆盖度增长幅度均很小,第 90 天, A0 区域植被覆盖度为 80%, 比 A1 和 A2 区域分别显著 ($p < 0.05$) 提高 65%, 60%, A1 和 A2 区域间差异不显著; B0 区域植被覆盖度为 45%, 比 B1 和 B2 区域分

别显著提高 30%,25%,B1 和 B2 区域间差异显著;A0B0 区域植被覆盖度为 35%,比 A1B1 和 A2B2 区域分别显著提高 20%,20%,A1B1 和 A2B2 区域间差异不显著。90 d 以后,各个区域内植被的覆盖度均差异显著。原因是在前 90 d 内,各个固化区域内由于固化层的存在,杂草萌发后不能够突破固化层,抑制了杂草的生长,而各对照组区域杂草的生长由于没有受到抑制作用,生长速度快,而且在坡面植被生长的前期,紫穗槐和麦冬草的生长速度慢,150 d 后,各对照组区域的植被覆盖度均达到 100%,各对照区域的杂草生长到一定阶段后,开始向固化区域延伸生长,而且在后期,坡面植被的生长速度也加快,所以各固化区域植被的覆盖度增长速度比生长前期更快。

表 3 各区域内植被覆盖度随时间的生长变化
Table 3 The change of vegetation coverage with time in each region

处理	0 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
A1	10	10b	10b	15b	25c	35c	60c
A2	10	10b	10b	20b	70b	90b	90b
A0	10	25a	45a	80a	100a	100a	100a
B1	5	5b	10b	15c	25c	50c	75c
B2	5	5b	10b	20b	60b	80b	85b
B0	5	15a	25a	45a	100a	100a	100a
A1B1	5	5	10	15b	40c	70c	75c
A2B2	5	5	10	15b	60b	80b	80b
A0B0	5	5	15	35a	98a	100a	100a

2.3.3 紫穗槐高度和地径随时间的生长变化 使用卷尺和游标卡尺每隔 30 d 测量坡面中 B1,B2,B0,A1B1,A2B2,A0B0 各区域内紫穗槐的高度和地径,取均值作为各区域内紫穗槐的高度和地径随时间的生长变化,其中移栽未成活的紫穗槐的高度和地径不纳入计算中。由表 4—5 可知,第 0—60 天内,各区域内紫穗槐的高度和地径的生长变化均比较缓慢,第 60—180 天内,B1,B2,A1B1,A2B2 各区域内紫穗槐生长速度比各对照组均快,生长高度差异大,第 180 天时,各区域内紫穗槐的平均高度分别为 82.10 cm,62.20 cm,46.70 cm,70.30 cm,65.50 cm,45.30 cm,与第 0 天的高度相比,分别长高 45.70 cm,23.70 cm,7.00 cm,30.00 cm,27.40 cm,7.60 cm,其中 B1,B2 区域紫穗槐平均高度的变化量是 B0 区域的 6.5 倍、3.4 倍,B1 区域紫穗槐平均高度的变化量是 B2 区域的 1.9 倍,A1B1,A2B2 区域内紫穗槐平均高度的变化量是 A0B0 区域的 3.9 倍、3.6 倍,A1B1 区域内紫穗槐平均高度的变化量是 A2B2 区域的 1.1 倍。第 180 天时,各区域内紫穗槐的平均地径分别为 7.03 mm,6.28 mm,5.98 mm,7.29 mm,7.01 mm,4.96 mm,与第 0 天的地径相比,分别增长 2.27 mm,1.76 mm,

表 2 各区域内植被成活率随时间的生长变化
Table 2 The change of vegetation survival rate with time in each region

处理	7 d	30 d	60 d	90 d
A1	100.00	93.33a	93.33a	93.33a
A2	100.00	93.33a	86.67b	86.67b
A0	100.00	86.67b	66.67c	66.67c
B1	100.00	100.00a	100.00a	100.00a
B2	100.00	87.50b	87.50b	87.50b
B0	100.00	87.50b	62.5c	62.50c
A1B1	100.00	91.66a	91.66a	91.66a
A2B2	100.00	91.66a	83.33b	83.33b
A0B0	100.00	79.17b	58.33c	58.33c

注:表中小写字母表示 $p<0.05$,下同。

0.75 mm,1.92 mm,1.40 mm,0.54 mm,其中 B1,B2 区域内紫穗槐平均地径的变化量是 B0 区域的 3 倍、2.3 倍,B1 区域内紫穗槐平均地径的变化量是 B2 区域的 1.3 倍,A1B1,A2B2 区域内紫穗槐平均地径的变化量是 A0B0 区域的 3.5 倍、2.6 倍,A1B1 区域紫穗槐平均高度的变化量是 A2B2 区域的 1.4 倍,180 d 后,各区域内紫穗槐的高度和地径基本不再变化,由此可知,固化区域的紫穗槐的高度和地径变化明显高于对照组,且固化后加保水剂的区域内紫穗槐的高度和地径高于固化后不加保水剂的区域,产生上述的原因是,在生长前期,紫穗槐移栽后需要一定时间恢复,而且环境温度低,降雨少,60—180 d,固化区域由于固化层的存在抑制了杂草的生长,对照区域杂草生长旺盛,与紫穗槐竞争水分和养分,对照区域内紫穗槐的生长缓慢,B1,A1B1 区域在固化后添加了保水剂,不仅可以保存一定的水分,而且可以缓慢释放一定的养分供给紫穗槐生长,所以固化后加保水剂的 B1,A1B1 区域内紫穗槐的生长速度最快,长势最好,高度和地径均高于其他区域,180 d 后,生长的时间为秋天,植被生长缓慢,紫穗槐高度和地径基本不再发生变化。

表 4 各区域内紫穗槐高度随时间的生长变化
Table 4 The change of *Amorpha fruticosa* growth

height with time in each region cm						
天数/d	B1	B2	B0	A1B1	A2B2	A0B0
0	36.40	38.50	39.70	40.30	38.10	37.70
30	38.20	39.30	40.10	42.80	39.20	38.90
60	40.20	40.80	41.00	43.90	40.80	40.40
90	45.70	43.10	42.80	45.30	43.20	41.50
120	50.40	46.30	43.90	49.40	47.30	42.30
150	61.30	52.80	44.50	60.50	56.80	43.90
180	82.10	62.20	46.70	70.30	65.50	45.30
210	85.70	64.50	47.50	73.50	67.60	46.50

表 5 各区域内紫穗槐地径随时间的生长变化
Table 5 The change of *Amorpha fruticosa* ground

diameter with time in each region mm						
天数/d	B1	B2	B0	A1B1	A2B2	A0B0
0	4.76	4.52	5.23	5.37	5.61	4.42
30	4.92	4.67	5.29	5.43	5.69	4.49
60	5.18	4.91	5.48	5.74	5.83	4.57
90	5.24	5.01	5.69	5.99	5.97	4.68
120	5.88	5.39	5.78	6.25	6.17	4.76
150	6.76	6.01	5.89	7.08	6.84	4.85
180	7.03	6.28	5.98	7.29	7.01	4.96
210	7.19	6.35	6.01	7.40	7.14	5.01

3 讨论

利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对野外的黄土边坡进行固化处理,在巴氏芽孢杆菌与胶结液的相互作用下生成大量白色透明的碳酸钙晶体,这些白色的碳酸钙晶体填充在土壤颗粒之间的空隙中,将坡面上相邻且松散的土壤颗粒胶结在一起,从而在坡面上可以形成一定厚度的固化层^[21],而且固化处理过程中在坡面上可以明显看到由白色碳酸钙晶体生成^[15]。坡面植被恢复后,在植被生长的过程中,由于坡面降雨的冲刷作用,各个区域内均出现了侵蚀沟,但各对照组区域内冲刷形成的侵蚀沟比其他区域内冲刷形成的侵蚀沟的宽度、深度和长度均更宽、更深、更长。这表明对坡面进行固化处理可以提高坡面的抗冲刷性能^[21-22],原因是固化处理将相邻松散的土壤颗粒胶结在一起,形成的固化层将坡面黏结为一个整体,提高了坡面的整体强度,从而可以减少坡面的土壤侵蚀。

固化以及固化后添加保水剂可以明显提高各区域内植被的成活率,而且固化后添加保水剂的各区域内植被的成活率最高,原因可能是固化处理后形成的固化层可以减少坡面水分的蒸发散失,而且由于固化层的存在,能够抑制坡面杂草的生长,麦冬草和紫穗槐能够获得更多的水分和养分,添加保水剂的区域,

保水剂可以快速吸收并保存坡面降雨,提高植被根系周围的土壤含水率,在植被的根系周围形成一个微型水库^[23],当植被生长需要水分时,又能缓慢释放,既能保证植被正常生长所需水分,又能减少水分因蒸发、渗漏等损失,而且保水剂还能能为植被的生长提供一定的养分,所以固化后添加保水剂的各区域内植被的成活率最高,生长状况最好。

将微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术与植被恢复技术相结合用于黄土丘陵沟壑区黄土边坡的治理防护是一种良好的选择,先对黄土边坡进行固化处理,再进行植被恢复,在坡面上形成综合防治措施,从而达到持续有效的坡面综合防治效果。而且 MICP 技术在固化坡面的过程中,不会产生污染环境的有害产物,环保节能,还具有施工操作简单、反应快、成本低等特点^[24],具有一定的推广应用前景。

4 结论

(1) 利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术对黄土边坡进行矿化加固处理后,可以在黄土坡面上生成一定量的碳酸钙结晶,生成的碳酸钙结晶将松散且相邻的土壤颗粒胶结在一起,在坡面上形成一层致密的固化层,固化层最大厚度为 0.23 cm,平均厚度为 0.21 cm。

(2) 固化黄土边坡恢复植被后统计各区域内植被的成活率,A1,A2,B1,B2,A1B1,A2B2 各区域内第 60 天植被的成活率比 A0,B0,A0B0 各区域分别显著提高 26.66%,20%,37.5%,25%,33.33%,25%,植被恢复第 60 天后,各区域内植被的成活率均差异显著,而且固化后加保水剂的 A1,B1,A1B1 各区域内植被的成活率最高。

(3) 固化黄土边坡进行植被恢复后,统计各区域内植被的生长状况,各固化区域内植被覆盖度均低于各对照组区域,固化后加保水剂的 B1 和 A1B1 区域内紫穗槐高度和地径的生长变化量最大,且固化后加保水剂的 A1,B1,A1B1 各区域内麦冬草和紫穗槐的生长状况最好。

(4) 将 MICP 技术与植被恢复技术相结合,形成坡面综合防治措施,可以为黄土丘陵沟壑区黄土边坡的加固和土壤侵蚀的防治提供新思路 and 新技术,具有一定的实际应用价值和前景。

参考文献(References):

- [1] 魏亚妮,范文,麻广林.黄土高原马兰黄土微结构特征及湿陷机理[J].地球科学与环境学报,2022,44(4):581-592. Wei Y N, Fan W, Ma G L. Characteristics of micro-structure and collapsible mechanism of Malan loess in Loess Plateau, China[J]. Journal of Earth Sciences and

- Environment, 2022, 44(4):581-592.
- [2] 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等. 黄土地区地质灾害链研究初探[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1):117-122.
Zhu X H, Peng J B, Tong X, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1):117-122.
- [3] 唐东旗, 姚秀芳, 焦玲, 等. 工程开挖尺度对黄土边坡稳定性影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6):1151-1155.
Tang D Q, Yao X F, Jiao L, et al. Influence of engineering excavation scale on loess slope stability[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6):1151-1155.
- [4] 杨涛, 李明俐, 孙东, 等. 黄土高陡塬坡降雨侵蚀机制及生态防治技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32):14518-14526.
Yang T, Li M L, Sun D, et al. The rainfall erosion mechanism of the high and steep slope in loess tableland and ecological control technology[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(32):14518-14526.
- [5] Peng J B, Fan Z J, Wu D, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. Engineering Geology, 2015, 186:79-90.
- [6] Wang G L, Li T L, Xing X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(12):7933-7944.
- [7] 冉林, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 甘肃黑方台“10·5”黄土滑坡启动及运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6):1-9.
Ran L, Ma P H, Peng J B, et al. The initiation and motion characteristics of the “10·5” loess landslide in the Heifangtai platform, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6):1-9.
- [8] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7398-7409.
- [9] 叶建军. 边坡生态护面方法探讨[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5):215-219.
Ye J J. Discussion on methods of slope surface ecological protection[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5):215-219.
- [10] 肖衡林, 马强, 叶建军, 等. 水泥泥炭与纤维基干喷生态护坡基材配方优化及现场试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2):221-227.
Xiao H L, Ma Q, Ye J J, et al. Optimization on formulation of peat-fiber-cement-based dry-sprayed substrate for slope ecological protection by site experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2):221-227.
- [11] 陈育民, 张书航, 丁绚晨, 等. 微生物加固钙质砂强度演化过程的环剪试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4):10-17.
Chen Y M, Zhang S H, Ding X C, et al. Ring shear test study on strength evolution process of microbial reinforced calcareous sand[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(4):10-17.
- [12] Ercole C, Cacchio P, Cappuccio G, et al. Deposition of calcium carbonate in Karst caves: role of bacteria in Stiffe's Cave[J]. International Journal of Speleology, 2001, 30A(1/4):69-79.
- [13] 景天宇, 姜哈琳, 李振山. 微生物诱导碳酸钙沉淀固结黄河泥沙试验研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(11):11-16.
Jing T Y, Jiang H L, Li Z S. Experimental study on solidification of Yellow River sediment through microbial induced carbonate precipitation[J]. Yellow River, 2019, 41(11):11-16.
- [14] Li M M, Fang C L, Kawasaki S, et al. Fly ash incorporated with biocement to improve strength of expansive soil[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):2565.
- [15] 王怀星. 黄土的微生物固化及抗侵蚀性能试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
Wang H X. Experimental study on microbial solidification and corrosion resistance of loess[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [16] 袁翔, 滕伟福, 俞伟, 等. MICP技术对巴东组第三段软弱夹层土体的加固试验研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5):101-106, 130.
Yuan X, Teng W F, Yu W, et al. Experimental study on reinforcement of weak intercalated layer in the third member of Badong Formation based on MICP technology[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5):101-106, 130.
- [17] 段金贵, 王怀星, 姚姬璇, 等. 黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5):33-40.
Duan J G, Wang H X, Yao J X, et al. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and erosion resistance of loess slope surface[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5):33-40.
- [18] 谢约翰, 唐朝生, 刘博, 等. 基于微生物诱导碳酸钙沉积技术的黏性土水稳性改良[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2019, 53(8):1438-1447.
Xie Y H, Tang C S, Liu B, et al. Water stability improvement of clayey soil based on microbial induced calcite precipitation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2019, 53(8):1438-1447.

- (1):25-31.
- Cui L, Ma T F, Halilhashi • Yibati, et al. Effects of acidifier types and dosage on cotton growth[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023,60(1):25-31.
- [21] 马琴,刘小雨,冉瑾怡,等.磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率[J].植物营养与肥料学报,2020,26(6):1047-1058.
- Ma Q, Liu X Y, Ran J Y, et al. Improving phosphorus use efficiency of spring maize by reducing phosphate fertilizer rate and replacing urea with ammonium sulfate in dryland of Northwest China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020,26(6):1047-1058.
- [22] Yu X J, Chen Q, Shi W C, et al. Interactions between phosphorus availability and microbes in a wheat-maize double cropping system: a reduced fertilization scheme [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022,21(3): 840-854.
- [23] White P J, Hammond J. The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions[M]. Dordrecht: Springer, 2008.
- [24] Vázquez E, Benito M, Espejo R, et al. No-tillage and liming increase the root mycorrhizal colonization, plant biomass and N content of a mixed oat and vetch crop [J]. Soil and Tillage Research, 2020,200:104623.
- [25] 张淑彬,王幼珊,殷晓芳,等.不同施磷水平下 AM 真菌发育及其对玉米氮磷吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):649-657.
- Zhang S B, Wang Y S, Yin X F, et al. Development of arbuscular mycorrhizal(AM) fungi and their influences on the absorption of N and P of maize at different soil phosphorus application levels [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017,23(3):649-657.
- [26] Ikoyi I, Fowler A, Storey S, et al. Sulfate fertilization supports growth of ryegrass in soil columns but changes microbial community structures and reduces abundances of nematodes and arbuscular mycorrhiza [J]. Science of the Total Environment, 2020,704:135315.
- [27] Huo W G, Chai X F, Wang X H, et al. Indigenous arbuscular mycorrhizal fungi play a role in phosphorus depletion in organic manure amended high fertility soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022,21(10): 3051-3066.
- [28] 程文龙,李敏,王慧,等.深耕配合施用有机肥提高 15—30 cm 土层小麦根长密度[J].植物营养与肥料学报, 2023,29(7):1280-1289.
- Cheng W L, Li M, Wang H, et al. Deep tillage combined with organic fertilizer improves the root length density of wheat in 15—30 cm soil layer[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,29(7):1280-1289.
- [29] Lyu Y, Tang H L, Li H G, et al. Major crop species show differential balance between root morphological and physiological responses to variable phosphorus supply[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:1939.

~~~~~

(上接第 234 页)

- [19] 张世参,骆亚生,田堪良,等.风积沙的微生物固化试验研究[J].人民黄河,2021,43(10):144-149,160.
- Zhang S C, Luo Y S, Tian K L, et al. Experimental study on microbial solidification of aeolian sand [J]. Yellow River, 2021,43(10):144-149,160.
- [20] Abo-El-Enein S A, Ali A H, Talkhan F N, et al. Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation[J]. Hbrc Journal, 2012,8(3):185-192.
- [21] 程瑶佳,唐朝生,泮晓华,等.微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):1010-1018.
- Cheng Y J, Tang C S, Pan X H, et al. Experimental study on erosion resistance improvement in loess through coupled microbial mineralization(MICP)-sand paving[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022,42(5):1010-1018.
- [22] 刘诗雅,刘家庆,周成,等.边坡植被恢复中 MICP 表层矿化格构填土的水土保持模型试验[J].岩土工程学报,2022,44(S1):29-34.
- Liu S Y, Liu J Q, Zhou C, et al. Soil and water conservation model test of mineralized lattice fill on MICP surface in slope vegetation restoration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(S1):29-34.
- [23] 张玉斌,景泉,崔金虎,等.富钼专用保水剂对东北典型土壤保墒性能及大豆幼苗生长的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(1):63-69.
- Zhang Y B, Jing Q, Cui J H, et al. Effects of molybdenum-rich super absorbent polymers on soil water retention and soybean seedling growth in typical soils of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(1):63-69.
- [24] 钱春香,王安辉,王欣.微生物灌浆加固土体研究进展[J].岩土力学,2015,36(6):1537-1548.
- Qian C X, Wang A H, Wang X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(6):1537-1548.