

边坡植被恢复中微生物固化生态基材的配方优化

王浩¹, 李流芳¹, 严华祥¹, 豆红强¹, 吴志刚²

(1.福州大学紫金地质与矿业学院, 福建福州 350108; 2.福建省高速公路养护工程有限公司, 福建福州 350005)

摘要: [目的] 探究胶结液浓度、植物纤维、复合微生物肥料及保水剂对微生物固化生态基材强度的提升效果, 研究不同配比基材的植物适生性能, 筛选出最佳的边坡绿化基材配方, 为新型生态基材制备与边坡植被修复提供理论支持和实践指导。[方法] 以胶结液浓度、植物纤维、复合微生物肥料、保水剂为影响因素开展正交试验制备微生物固化生态基材, 对比不同配比基材的抗剪强度, 并通过高清显微镜分析微生物固化生态基材强度提升的微观机理; 采用盆栽试验研究高羊茅和紫花苜蓿在不同配比基材的出苗特征和植被生长情况; 基于抗剪强度特征和植物生长情况, 通过熵值法筛选最优的基材配方。[结果] ①微生物固化对基材的抗剪强度提升具有显著作用, 黏聚力提升 179.78%~355.65%, 内摩擦角增加 35.69%~58.97%。②胶结液浓度是影响植物出芽时间和出苗率最为显著的因素, 随着胶结液浓度的升高, 出芽时间出现延迟, 出苗率明显降低。③基材组植物的生长指标均明显优于对照组, 高羊茅在胶结液浓度 0.2 mol/L, 植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 1:2:0.09 的配比基材中生长发育最好; 紫花苜蓿在胶结液浓度 0.2 mol/L, 植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 3:1:0.06 的配比基材中生长发育最好。[结论] 微生物固化生态基材的抗剪强度较基质土有显著提升, 其中 0.2 mol/L 为最佳胶结液浓度。在该浓度下, 适用于高羊茅和紫花苜蓿的最优配比(植物纤维:复合微生物肥料:保水剂)分别为 1:2:0.09 和 3:1:0.06。

关键词: 微生物固化; 生态基材; 配比优化; 植被修复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0159-12

中图分类号: X43

文献参数: 王浩, 李流芳, 严华祥, 等. 边坡植被恢复中微生物固化生态基材的配方优化[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 159-170. Wang Hao, Li Liufang, Yan Huaxiang, et al. Optimization of microbial-enhanced ecological substrate formulations for slope vegetation restoration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 159-170. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.017; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.017.

Optimization of microbial-enhanced ecological substrate formulations for slope vegetation restoration

Wang Hao¹, Li Liufang¹, Yan Huaxiang¹, Dou Hongqiang¹, Wu Zhigang²

(1.Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2.Fujian Expressway Maintenance Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350005, China)

Abstract: [Objective] The effects of cementation solution concentration, plant fibers, microbial fertilizers and superabsorbent polymers on the mechanical and ecological properties of microbial-enhanced ecological substrates were analyzed. The adaptability of plants to substrates with different ratios was investigated, and the best formula of slope greening substrate was selected, in order to provide theoretical support and practical guidance for the preparation of novel ecological substrates and slope vegetation restoration. [Methods] An orthogonal test was performed to evaluate the influence of cement concentration, plant fiber, compound microbial fertilizer and superabsorbent polymers on microbial-enhanced ecological substrate. Thereafter, the shear strength of the substrate with different proportions was compared, and the micro-mechanism of the strength improvement of the microbial-enhanced ecological substrate was analyzed by a high-definition microscope. A pot experiment was conducted to study the seedling emergence characteristics and vegetation growth of tall fescue and alfalfa in different substrate ratios. Based on the characteristics of shear strength and

收稿日期: 2024-10-10

修回日期: 2024-11-28

采用日期: 2024-11-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“强降雨条件下阶梯状茶园边坡的水文响应及浅层失稳机制”(42477165); 福建省科技厅产学研创新项目“复杂环境下建筑弃土场灾变机制及风险防控关键技术”(2022Y4002); 福建省交通运输科技项目“新型低碳装配式锚固结构智能建造成套技术研发与应用”(202202); 水利部重大科技项目“南方山丘区输变电工程水土流失防控及碳汇潜力评价研究”(SKS-2022085)

第一作者: 王浩(1978—), 男(汉族), 江苏省盐城市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究。Email: h_wang@126.com.

plant growth, the optimal substrate formula was screened using the entropy method. [Results] ① The microbial curing significantly improved the shear strength of the substrate, and increased cohesion and the internal friction angle by 179.78%—355.65% and 35.69%—58.97%, respectively. ② The concentration of cementing solution was the most significant factor affecting the emergence time and rate of plants; as the concentration of the cementing solution increased, the time to emergence increased and the emergence rate decreased significantly. ③ The growth indices of the plants in the substrate group improved significantly compared to those in the control group. The growth and development of tall fescue were best in the substrate with a cementing solution concentration of 0.2 mol/L, and the mass ratio of plant fiber, compound microbial fertilizer, and superabsorbent polymers of 1 : 2 : 0.09. Alfalfa had the best growth and development in the substrate with a cementing solution concentration of 0.2 mol/L, and plant fiber, compound microbial fertilizer, and superabsorbent polymers mass ratio of 3 : 1 : 0.06. [Conclusion] The shear strength of microbial-solidified ecological substrates was significantly higher than that of the matrix soil, and 0.2 mol/L was the best cementing solution concentration. At this concentration, the optimal ratios (plant fiber: composite microbial fertilizers: superabsorbent polymers) for tall fescue and alfalfa were 1 : 2 : 0.09 and 3 : 1 : 0.06, respectively.

Keywords: microbial-enhanced; ecological substrate; formulation optimization; vegetation restoration

由于大规模工程建设的需要,大量开挖边坡破坏了当地原有植被覆盖层,形成了整片或局部的裸露区域,这些区域在降雨冲刷条件下往往发生严重的水土流失^[1-2]。植被护坡是一种通过在裸露坡面种植植被以达到恢复边坡生态和增强边坡稳定性的绿色技术,经过一百多年的发展,目前已形成较完整的理论体系,并在工程中得到广泛的应用^[3-4]。其中,挂网喷播技术以效率高、适用性广、绿化效果好等技术优势在植被护坡体系中脱颖而出,为边坡裸露区水土流失防治提供了技术支撑。

然而,由于植物生长前期尚未形成稳定的根系系统,在雨水冲刷作用下绿化基材往往会出现脱落、流失等问题,严重影响喷播生态修复效果。针对基材的抗冲刷问题,众多研究人员进行了大量的试验研究^[5-7]。高桂娟等^[8],Lou Guochong 等^[9]通过掺入水泥和粉煤灰等无机材料提升绿化基材的强度和稳定性,但是该类无机材料的使用会导致 pH 值显著上升,产生土壤硬化问题,从而影响植物的生长发育,需要额外的添加剂进行改良;刘冠宏等^[10]、田祥磊^[11]、宋泽卓等^[12]分别以聚丙烯酰胺、黄原胶等有机材料作为黏结剂,通过增强黏聚力进而提升基材的抗冲刷性能,但是该类有机材料易受到环境因素影响而降解或失去黏结性能。可见,当前的研究尚需进一步深入,绿化基材的强度提升和抗冲刷问题仍是喷播技术研究的重要方向。

微生物固化是一种利用微生物介导合成碳酸钙的方法,具有高效、可控、生态友好等特点,被岩土工程界所广泛关注和研究^[13]。段金贵^[14]使用 MICP 技术对黄土进行固化处理,发现密度 1.33 g/cm³ 的黄土固化后保水性能有所改善,各固化黄土区域内恢复

植被的成活率均明显优于对照区域;陈焱等^[15]通过向塔基弃土添加微生物矿化菌液和胶结液使其整体更加密实,减少了因雨水侵蚀造成的水土流失;李中义等^[16]采用微生物固化技术加固粉土坡面,并通过种植试验验证了高羊茅在固化坡面具有良好的适生性,出苗率可达到 80% 以上。可见,微生物固化既能提升土体的强度和抗冲刷能力,又具备与植被护坡结合的潜力,目前已取得了一定的研究进展。但是,当前成果大多集中于在固化土层理化性质的改良和简单的种植试验,少有研究将微生物固化应用到绿化基材的制备中。

基于上述研究,本研究将微生物固化与基材配比结合,开展微生物固化生态基材的配比优化试验研究。基于正交试验,对比不同配比基材的抗剪强度,并借助高清显微镜分析其强度提升的微观机理;通过盆栽试验研究不同配比基材的出苗特征和植被生长情况,最后通过熵值法筛选适用于不同植物的最优基材配比。研究成果可为新型生态基材制备与边坡植被修复提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样 本次研究所用土样为取自福州大学校内某滑坡的粉质黏土,土样质地均匀,杂质含量少,取回后依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测试其物理性质,具体见表 1。土样的级配情况见图 1。计算得不均匀系数 C_u 为 6.21,曲率系数 C_c 为 1.09,级配良好。取回后将土样放入烘箱以 105 °C 烘烤 24 h 后碾碎,使用 2 mm 标准筛筛分,取小于 2 mm 的土样用于作为基质土。

表 1 试验土样物理参数

Table 1 Physical parameters of test soil samples

天然含水率 $w/\%$	天然密度(ρ)/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度(ρ_d)/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限 (w_L)/%	塑限 (w_P)/%	比重 (G_s)
21.12	1.74	1.37	38.6	24.2	2.68

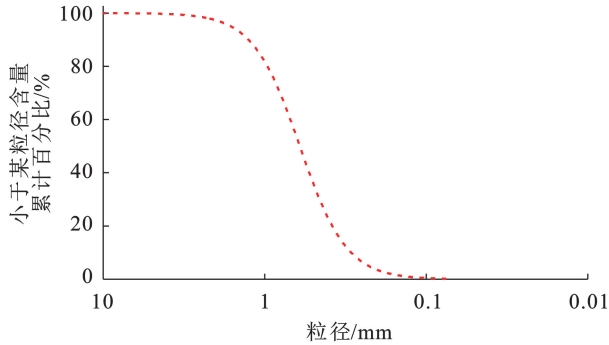


图 1 试验土样级配曲线

Fig.1 Gradation curve of tested soil sample

1.1.2 试验菌种和胶结液 试验所用菌种为巴氏生孢八叠球菌 (*Sporosarcina pasteurii*, 编号: ATCC 11 859), 购自福建省微生物研究所, 经 $\text{NH}_4\text{-YE}$ 培养基(酵母浸粉 20 g/L, 硫酸铵 10 g/L, Tris-buffer 0.13 mol/L, pH 值 9.0)活化后, 30 °C, 150 转/min, 培养 24 h, 扩培至 2 000 ml, 随后接种至含有发酵培养基(酵母浸粉 20 g/L, 硫酸铵 10 g/L, pH9.0)的培养系统中以 30 °C 发酵 48 h, 随后用化工桶分装, 冷藏于 4 °C 的冰箱中备用, 测得菌液 OD600 值为 1.22。所用胶结液为氯化钙和尿素摩尔浓度比 1:1 的混合溶液, 将相应质量的氯化钙和尿素固体称量后放入锥形瓶中加水溶解, 静置备用。

1.1.3 试验草籽 选用高羊茅和紫花苜蓿作为试验草籽。其中, 高羊茅属于禾本科, 根系发达, 具有极强的抗逆性与抗病性, 可在贫瘠土地中顽强生长; 紫花苜蓿属于豆科, 叶片宽大, 主侧根系发达, 能吸收深层土壤水分, 具备良好的耐旱性和抗逆性。

1.1.4 其他基质材料 所用植物纤维为稻草纤维与稻壳质量比 1:1 的混合农业废弃物。稻草纤维长度 1~2 cm, 用于改善基质土壤团粒结构; 稻壳长约 10 mm, 宽约 1~3 mm, 密度较低, 具有多孔性, 可以增加土壤的疏松度和通透性。复合微生物肥料是由多种功能菌、有机肥料和化学肥料搅拌混合而成的复合型肥料, 可以将土壤的有机质转化形成腐殖质, 有助于提升肥力, 促进植物生长发育。保水剂为聚丙烯酸钾, 能吸收相当自身重量成百倍的水分, 吸水后形成稳定的凝胶状物质, 不易分解或溶解, 可以有效地保持水分。

1.2 试验方案

2024 年 3 月至 6 月于福州大学科技园开展微生物固化生态基材的配比优化试验, 本次试验选取胶结液浓度(A)、植物纤维(B)、复合微生物肥料(C)、保水剂(D)作为正交试验因素, 设计 4 因素 3 水平正交试验, 各因素与对应水平见表 2。基材配比方案见表 3, 将基质土、植物纤维、复合微生物肥料、保水剂等材料按照相应比例混合, 每 10 kg 基材中分别掺入 1 L 的微生物菌液和胶结液, 混合搅拌后得到微生物固化生态基材, 对照组 0# 为不添加任何材料的基质土。

表 2 正交试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	A 胶结液浓度/ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	B 植物 纤维/%	C 复合微生物 肥料/%	D 保水剂/ %
1	0.1	1.00	1.00	0.03
2	0.2	2.00	2.00	0.06
3	0.3	3.00	3.00	0.09

表 3 基材配比试验方案

Table 3 Test scheme of substrate ratio

组别	A 胶结液浓度/ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	B 植物 纤维/%	C 复合微生物 肥料/%	D 保水剂/ %
0#	—	—	—	—
1#	0.1	1.00	1.00	0.03
2#	0.1	2.00	2.00	0.06
3#	0.1	3.00	3.00	0.09
4#	0.2	1.00	2.00	0.09
5#	0.2	2.00	3.00	0.03
6#	0.2	3.00	1.00	0.06
7#	0.3	1.00	3.00	0.06
8#	0.3	2.00	1.00	0.09
9#	0.3	3.00	2.00	0.03

1.3 试验方法

1.3.1 直剪试验 直剪试验是获取土体抗剪强度参数最常用的方法, 本次试验所用仪器为 ZJ-D 型应变控制式直剪仪, 测力计量程为 10 mm, 其分度值为 0.01 mm, 位移传感器精度为 0.001 mm。将试验组基材与基质土制备成直径 6.18 cm, 高度 2 cm 的标准环刀样, 养护 7 d 后, 按照 100, 200, 300, 400 kPa 分别设置竖向荷载, 剪切速率 0.80 mm/min, 每间隔 0.80 mm 位移读取测力计量表一次, 直至试样剪破。

1.3.2 微观试验 为分析基质土与不同配比基材的微观结构特征, 将剪破后的环刀试样置于 2.0 M 像素的高清 CCD 工业显微镜下观察其内部微观形貌, 显微镜最大可放大 100 倍。

1.3.3 盆栽试验 使用透明亚克力板方形盒作为种植盆开展高羊茅和紫花苜蓿的盆栽试验,记为 G 组和 Z 组,尺寸为 15 cm×15 cm×15 cm,盆内土分上下两层,下层为基质土,约厚 8 cm,上层为微生物固化生态基材,约厚 5 cm,将基质土与基材装盆后,每盆均匀撒播 100 粒种子,随后浇水至饱和。

出芽时间与出苗率采用观测法和计数法测定;基材累计蒸发量通过测试试验期间基材重量的减少量可得;植株高度通过五点取样法在每盆盆栽中随机选取 10 株植物,采用刻度尺测量后取其均值可得;根系长度通过将植物取出洗净后,随机选取 10 株植物采用刻度尺测量后取其均值可得;覆盖度通过相机垂直拍摄不同生长期盆栽的植被覆盖情况,将图片经过二值化处理后使用 Python 程序计算可得。

1.4 评价方法

评价绿化基材的整体效果,遴选最优的基材配方是保证边坡生态修复效果的关键。常用的评价方法包括 AHP 分析法、综合指数法以及熵值法等。其中,熵值法相较于其他赋权法具有评价客观、操作简便等优势,可以避免人为评判而产生的主观误差。因此,本研究选用熵值法作为评价方法,具体步骤如下:

(1) 为避免各指标量纲差异造成的影响,需对各指标的原始数值进行标准化处理,依据对结果的好坏分为正向指标和负向指标。计算公式为:

正向指标标准化:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (1)$$

负向指标标准化:

$$X'_{ij} = \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个样本、第 j 个指标的原始数值; X'_{ij} 为第 i 个样本、第 j 个指标标准化后的数值。标准化后的数值可能为 0,为了使后续数据处理有意义,对标准化后的数值进行平移。平移公式为:

$$X''_{ij} = X'_{ij} + B \quad (3)$$

式中: X''_{ij} 为平移后的数值; B 为平移幅度,为尽可能地降低原始数据误差, B 取值为 0.001。

(2) 计算第 j 个指标下,第 i 个样本占该指标的比重 p_{ij} 。计算公式为:

$$p_{ij} = \frac{X''_{ij}}{\sum_{i=1}^n X''_{ij}} \quad (4)$$

式中: n 为样本个数。

(3) 计算第 j 个指标的熵值 e_j 。计算公式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

(4) 计算第 j 个指标的差异系数 g_j 。计算公式为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

(5) 计算第 j 个指标的权重 w_j 。计算公式为:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (7)$$

式中: m 为指标个数。

(6) 计算各样本的综合指数 s_i 。计算公式为:

$$s_i = \sum_{j=1}^m w_j X''_{ij} \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 抗剪强度

在边坡生态修复工程中,基材层常常由于自身强度不足而发生降雨侵蚀,导致草籽和营养物质随坡面径流流失,影响生态恢复的效果。基材抗剪强度反映了其抵抗破坏和侵蚀的性能,增强基材的抗剪强度有助于提升喷播坡面的抗冲刷稳定性,降低待修复边坡发生水土流失的可能性^[17-18]。将微生物固化生态基材制备成标准环刀样后进行剪切试验,结果见图 2 和图 3。

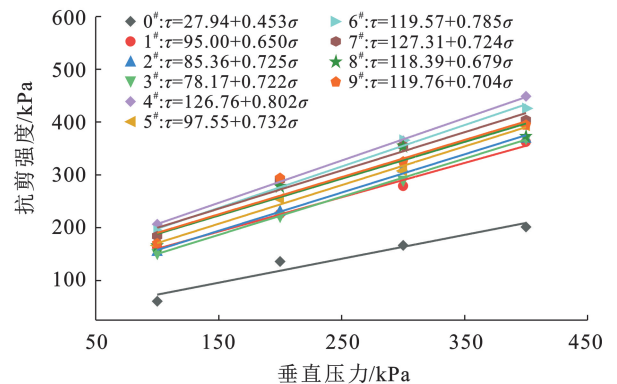


图 2 抗剪强度与垂直压力的关系

Fig.2 Relationship between shear strength and vertical pressure

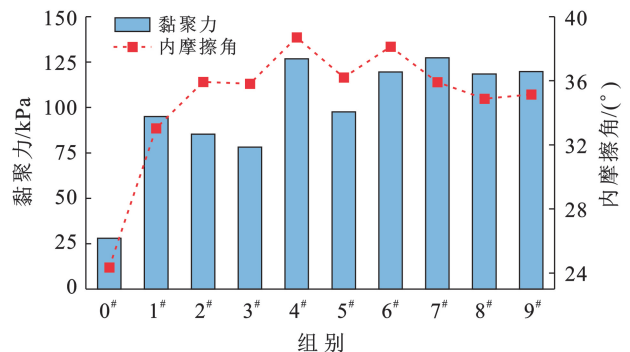


图 3 抗剪强度参数变化曲线

Fig.3 Variation curve of shear strength parameters

从图 3 中可以看出,微生物固化基材与基质土间抗剪强度存在明显差异。掺入基材后黏聚力由对照 27.94 kPa 增加到 78.17~127.31 kPa,提升 179.78%~355.65%,增强效果十分显著,其中 7[#], 4[#], 9[#] 分别占据前三;在内摩擦角方面,对照组 0[#] 为

24.35°, 基材组为 33.04°~38.71°, 提升 35.69%~58.97%。综合来看,4[#] 组基材在黏聚力和内摩擦角方面均具有明显优势。

不同水平因素影响下基材的黏聚力和内摩擦角变化见图 4。

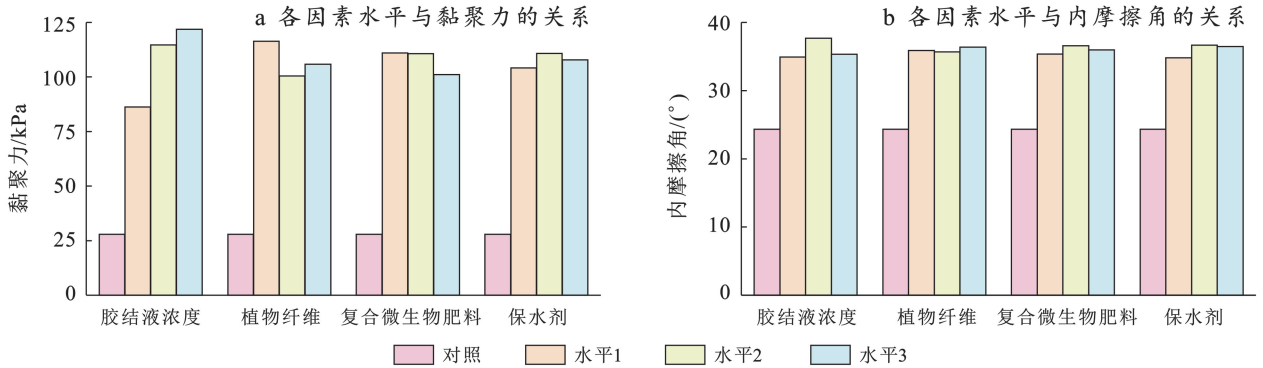


图 4 各因素水平与抗剪强度的关系

Fig.4 Relationship between levels of each factor and shear strength

由图 4a 可见,黏聚力的影响因素为:A(胶结液浓度)>B(植物纤维)>C(复合微生物肥料)>D(保水剂)。可见,胶结液浓度和植物纤维含量是对基材黏聚力影响最显著的因素。黏聚力与胶结液浓度呈明显线性相关,胶结液浓度增大,引入的钙离子增加,生成的碳酸钙结晶越多,微生物固化效果越强。随着植物纤维的增加,基材黏聚力呈现先减小后增大的趋势,当纤维含量为 2% 时,黏聚力处于最低值。总的来看,基材黏聚力的显著提升,一方面是因为微生物固化作用产生的碳酸钙结晶充填了基材孔隙,增强了基质材料之间的黏结效果;另一方面是由于植物纤维的加筋作用,极大地改善了基材的团粒结构和孔隙分布,使得基材的整体强度得到增强。

由图 4b 可见,内摩擦角的影响因素为:A(胶结液浓度)>D(保水剂)>C(复合微生物肥料)>B(植物纤维)。由此可见,微生物固化对基材黏聚力和内摩擦角的提升都具有显著效果,与夏振尧等^[19]喻成等^[20]的研究结果具有一致性。保水剂是影响内摩擦角的第二大因素,随着掺入量的增加,内摩擦角先增大后减小。这是因为适量掺入聚丙烯酸钾能够增加基材中水稳性团粒体的数量;而过量掺入聚丙烯酸钾产生大量胶凝物质,导致基材的孔隙度增加,降低了基质材料间的接触,使得内摩擦角有所降低。

2.2 微观结构

微生物固化基材的抗剪强度较基质土有显著的提高,将剪切后试样置于高清显微镜下放大 40 倍观察,微观结构见图 5。

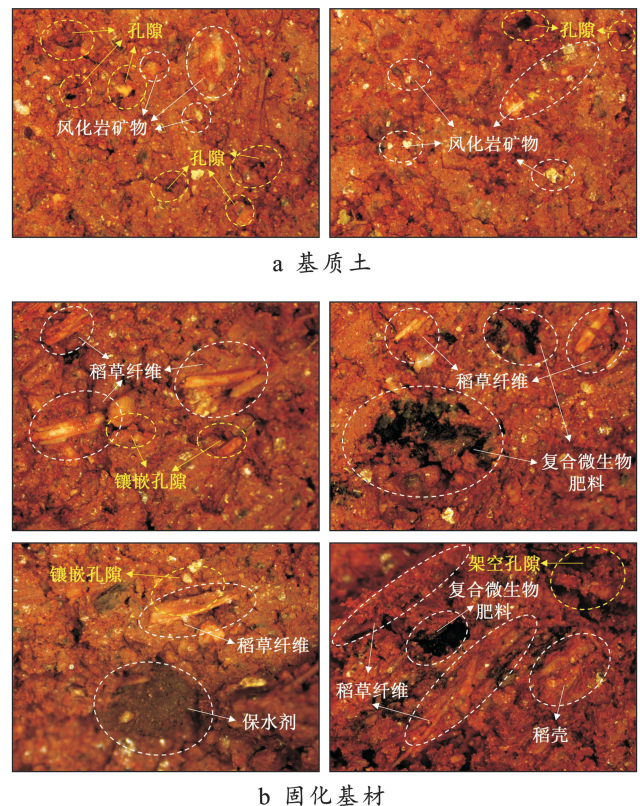


图 5 高清显微镜下试样微观结构

Fig.5 Microstructure of samples under high-definition microscope

由图 5a 可见,基质土中成分主要为土颗粒及部分风化岩小颗粒,彼此之间联结紧密,局部存在团聚体间形成的大孔隙,整体结构紧密,在一定程度上会阻碍植物的呼吸作用。从图 5b 中可以看出,稻草纤维和稻壳在基材内部交错、搭接,形成稳定的纤维架

构。当受到外界作用时,纤维加筋作用能够通过基材颗粒与纤维之间的咬合摩擦抑制破裂面的进一步发展^[21-22]。复合微生物肥料与保水剂混合后形成的基材与纤维架构紧密连接,使得基材的整体强度性能得到提升。此外,保水剂在吸收充足水分后会膨胀形成保水的凝胶状物质,零散分布于基材中,有效地改善了微生物固化生态基材的通气性和质地,有利于植物生长。

基材的内部孔隙可依据徐盼盼等^[23-24]的定性分类标准划分为架空孔隙、镶嵌孔隙、胶结孔隙,具体见表 4。其中,架空孔隙是由不同基质材料通过支架接触形成的具有一定尺寸的空隙,具有孔径大,连通性好,透水性较强等特点。镶嵌孔隙为基质材料相互穿插而形成的长条状孔隙,孔径较小,连通性和透水性良好,能够在外力作用下保持结构稳定,不易被破坏。胶结孔隙形成于微生物诱导产生的小颗粒碳酸钙胶结物或者凝块内,孔径小,连通性差,但孔隙结构稳定,水不易在该类型孔隙中渗流。可见,将微生物固化应用于基材制备中可以形成具备一定土体强度且兼有多孔透气特性的新型生态基材,为植被生长发育提供养分充足、性质稳定的生长环境。

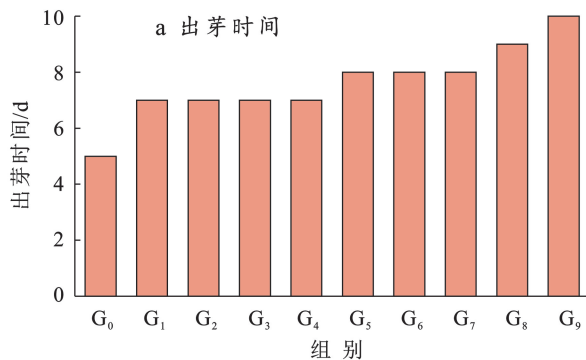


表 4 基材孔隙类型分类

Table 4 Classification of substrate pore types

定性分类	架空孔隙	镶嵌孔隙	胶结孔隙
概化模型示意图			

2.3 植物生长情况

2.3.1 出芽时间与出苗率 由图 6a 可见,未添加任何基材的对照组 G₀ 在播种 5 d 后开始萌发,出芽时间最早,基材组的出芽时间呈现随着胶结液浓度升高依次延迟,较 G₀ 组延后 2~5 d。从高羊茅出苗率曲线图 6b 中可以看出,生长期前 21 d 为高羊茅的快速出芽期,21 d 后出苗率增长缓慢,基本稳定。生长期 28 d 时,出苗率大小为: G₅ > G₄ > G₂ > G₃ > G₆ = G₀ > G₁ > G₇ > G₈ > G₉, 除 G₇, G₈, G₉ 外,其他组的出苗率均达到 70% 以上,可见高羊茅在较低浓度的胶结液环境中表现出很好的适生性。在 0.3 mol/L 浓度环境中, G₇, G₈, G₉ 的出苗率分别为 62%, 50%, 41%, 较对照组减少了 9%~30%, 表明较高浓度的胶结液会对高羊茅的出苗造成明显的负面影响。

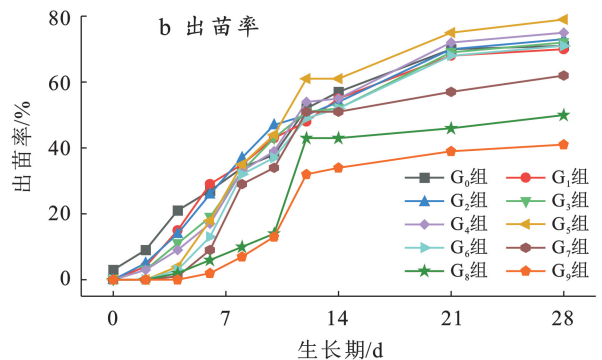


图 6 高羊茅出苗情况

Fig.6 Seedling emergence of tall fescue

紫花苜蓿的出苗情况具体见图 7,整体出苗特征与高羊茅相似。对照组 Z₀ 出芽时间最早,为播种后 3 d,基材组依次有所延迟,较 Z₀ 晚 2~5 d。紫花苜蓿在生长期前 14 d 内出苗率快速增长,14 d 后基本趋于稳定。生长期 28 d 时,出苗率大小为: Z₀ > Z₆ > Z₄ > Z₇ > Z₂ > Z₃ > Z₁ > Z₅ > Z₈ > Z₉。可以看出,基材组的出苗率均低于对照组 Z₀,其中 Z₈ 和 Z₉ 都低于 50%。与对照组 Z₀ 相比,基材组的出苗率减少 10%~42%,表明微生物固化生态基材会对紫花苜蓿的萌发造成不利影响。此外,可以发现紫花苜蓿在微生物固化土

中的适生性弱于高羊茅。

对植物出苗率进行极差分析,结果见表 5。结果表明,影响高羊茅出苗率的因素为: A(胶结液浓度) > C(复合微生物肥料) > B(植物纤维) > D(保水剂),影响紫花苜蓿出苗率的因素为: D(保水剂) > A(胶结液浓度) > B(植物纤维) > C(复合微生物肥料),有利于两种植物出苗的最佳基材配比均为 A₂B₁C₃D₂。

可见,胶结液浓度在植物出苗率的影响因素中较为突出,植物的出苗率随着胶结液浓度升高而呈现先

增加后降低,胶结液超过 0.3 mol/L 后植物的出苗率会出现显著下降,与赵志杰等^[25]、孔剑捷等^[26]的研究结论一致。较高浓度胶结液会抑制植物出苗的主要原因有如下两个方面:一方面是胶结液浓度的提高带入了更多的营养盐,导致胶结液渗透势的下降,对植

物造成渗透胁迫,影响植物对外界水分的吸收^[27];另一方面是较高浓度胶结液的渗入会改变环境土体的 pH 值,对植物产生碱胁迫,打破植物细胞内的电荷平衡和 pH 值内稳态,阻碍植物对水和营养物质的吸收^[28]。

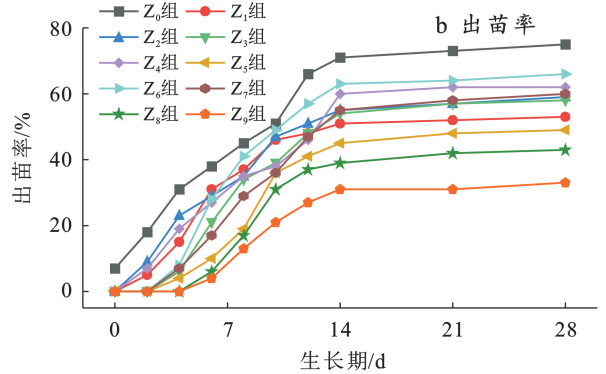
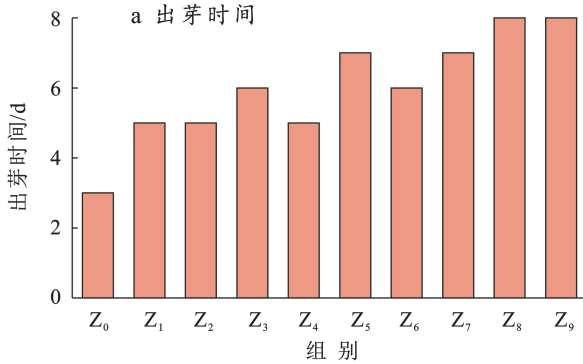


图 7 紫花苜蓿出苗情况

Fig.7 Seedling emergence of alfalfa

表 5 植物出苗率极差分析结果

Table 5 Range analysis results of plant emergence rate

植物类型	各水平出苗率 均值/%	因素			
		A	B	C	D
高羊茅	k_1	71.7	69.0	63.7	63.3
	k_2	75.0	67.3	63.0	68.7
	k_3	51.0	61.3	71.0	65.7
	R	24.0	7.7	8.0	5.4
	影响因素次序	A>C>B>D			
	最佳组合	A ₂ B ₁ C ₃ D ₂			
紫花苜蓿	k_1	56.7	58.3	54.0	45.0
	k_2	59.0	50.3	51.3	61.7
	k_3	45.3	52.3	55.7	54.3
	R	13.7	8.0	4.4	16.7
	影响因素次序	D>A>B>C			
	最佳组合	A ₂ B ₁ C ₃ D ₂			

2.3.2 基材蒸发量 植物出苗和生长均需要大量的水分,无法满足水分供给则难以形成植被群落,所以保水性能成为基材配比中的重要一环。由于前期植物生长发育不完全,不存在明显的蒸腾作用,所需的水分相差不大,种植两种植物的试验组蒸发特征具有相似性(见图 8)。

可以看出,对照组 G₀ 和 Z₀ 的累计蒸发量始终大于其他同批试验组,10 d 时,G₀ 和 Z₀ 的累计蒸发量分别为 300.62,266.01 g,G₈ 和 Z₈ 的蒸发量最小,10 d 累计蒸发量分别为 235.24,213.93 g,较对照组分别减小 21.75%和 19.58%,证明该配比下基材具有优良的保水特性,抗旱性能优越。基材蒸发量的减少,其一是由于聚丙烯酸钾在吸收大量水分后形成凝胶状物质,有效减少水分的流失;其二是因为微生物固化作用产生的沉淀结晶充填了基材中的微小孔隙,堵塞了水分蒸发的通道,从而减少了水分的蒸发。

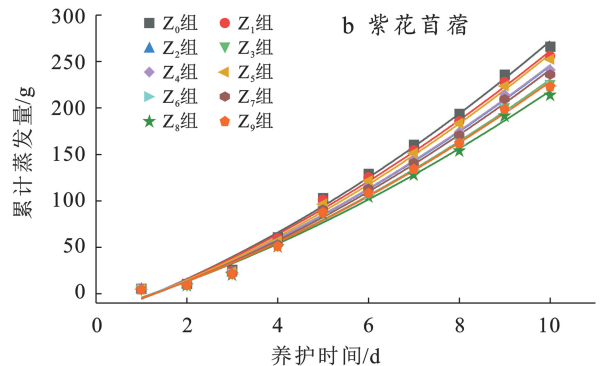
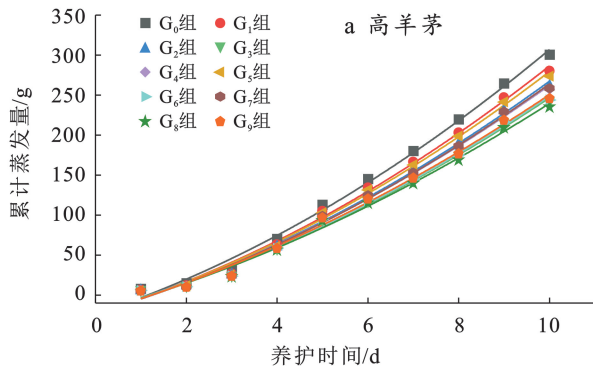


图 8 不同植物试验组的累计蒸发量

Fig.8 Cumulative evaporation of different plant test groups

2.3.3 地上部分生长状态 植被地上部分发育,茎叶间交错覆盖,能够有效降低雨滴对坡面的溅蚀,同时也能通过分散和阻截作用改变径流形态,从而削弱径流对土体的冲刷^[29]。植被地上部分发育情况是其生

长状态的最直观表征。由图 9 中可见,对照组 G_0 中高羊茅的叶片细长,宽度小,局部枯黄,发育不良;基材组中高羊茅叶片宽大,呈现碧绿或翠绿色,生长状态良好,能够实现有效覆盖。

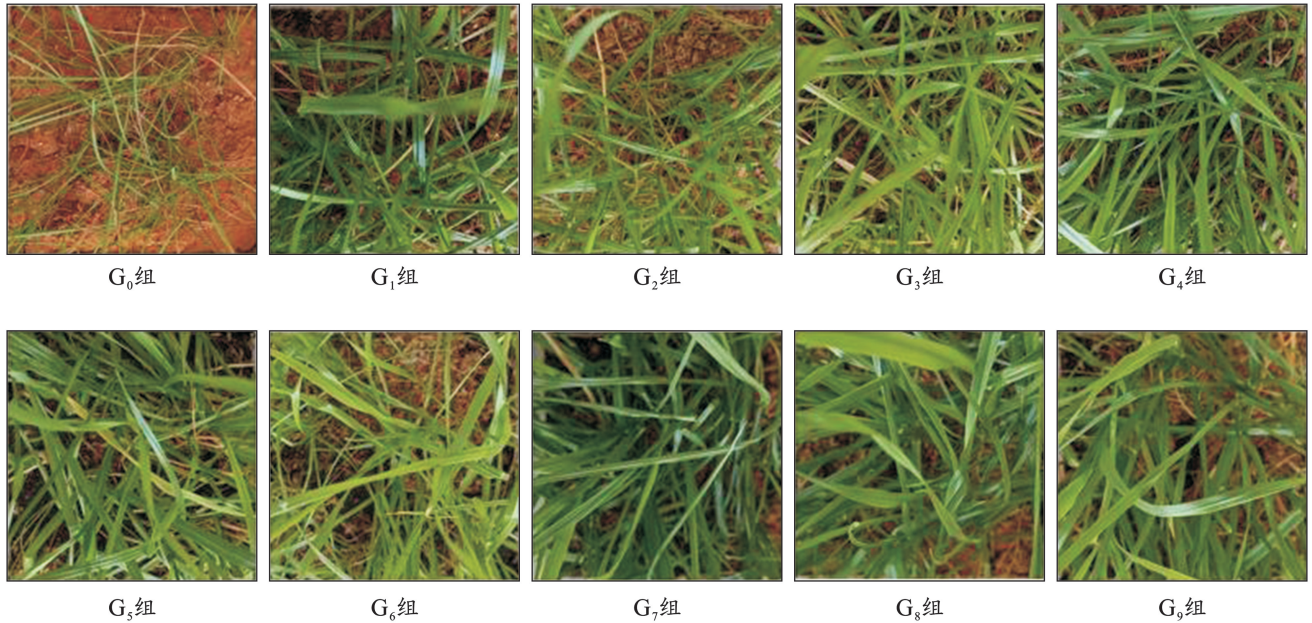


图 9 高羊茅地上部分发育情况

Fig.9 Development of aboveground parts of tall fescue

从图 10 中可以看出,生长期 14 d 内高羊茅高度增长缓慢,增长速率约为 0.32~0.55 cm/d;生长期 14~42 d,高羊茅根系网络基本形成,从基材中汲取了充足的营养和水分快速发育,增长速率为 0.48~1.04 cm/d,较前期增加 50%~89.09%;生长期 42 d 以后,高羊茅已达到一定高度,生长速度减缓,增长速率为 0.13~0.35 cm/d。试验结果表明,高羊茅植株高度增速呈先增加后减缓的趋势,在植物生长周期内,基材组的发育均优于对照组 G_0 ,说明了配比基材对植物生长具有良好的促进作用。

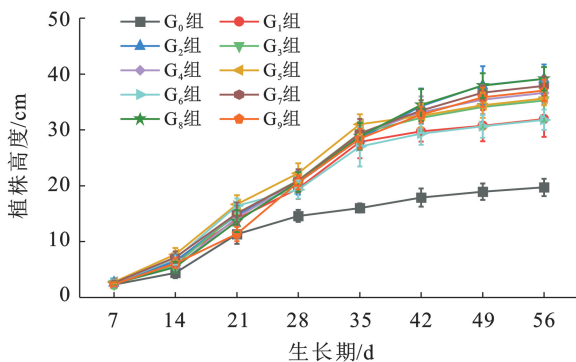


图 10 高羊茅植株高度变化

Fig.10 Plant height change of tall fescue

从图 11 中可见, Z_0 中由于养分缺乏导致植株矮小,生长状态不良; Z_1, Z_4, Z_7 的地上部分发育优于对照组 Z_0 ,但是出现局部枯萎;其余试验组中植物发育良好,叶片宽大,既能有效减少土体水分蒸发,又能保护表层土体免受雨滴直接溅蚀,从而提高坡面抗冲刷能力。

从图 12 中可知,紫花苜蓿在生长期前期植株高度增长均较为缓慢,在生长期 35 d 后,植株的地上高度快速增长。生长期 56 d 时,各组地上高度依次为: $Z_9 > Z_8 > Z_6 > Z_2 > Z_5 > Z_3 > Z_7 > Z_4 > Z_1 > Z_0$ 。其中, Z_9 高度可达到 14.82 cm,较对照组 Z_0 增加 4.27 倍,地上发育情况显著优于对照组。

2.3.4 地下部分生长状态 根系长度和地下生物量是衡量植被护坡能力的重要指标,根系越长,地下生物量越多,则根系的“网兜”效应越强,坡面稳定性越好^[30]。图 13 为生长期 56 d 时植物的根系长度,对照组 G_0 的根系长度仅为 11.67 cm, G_1 — G_9 的根系长度为 20.53~28.33 cm,提升 75.92%~142.76%。表明微生物固化生态基材能够促进高羊茅根系生长、萌蘖,形成较为完整的根系网络,在更短的时间内达到有效加固土体的作用。

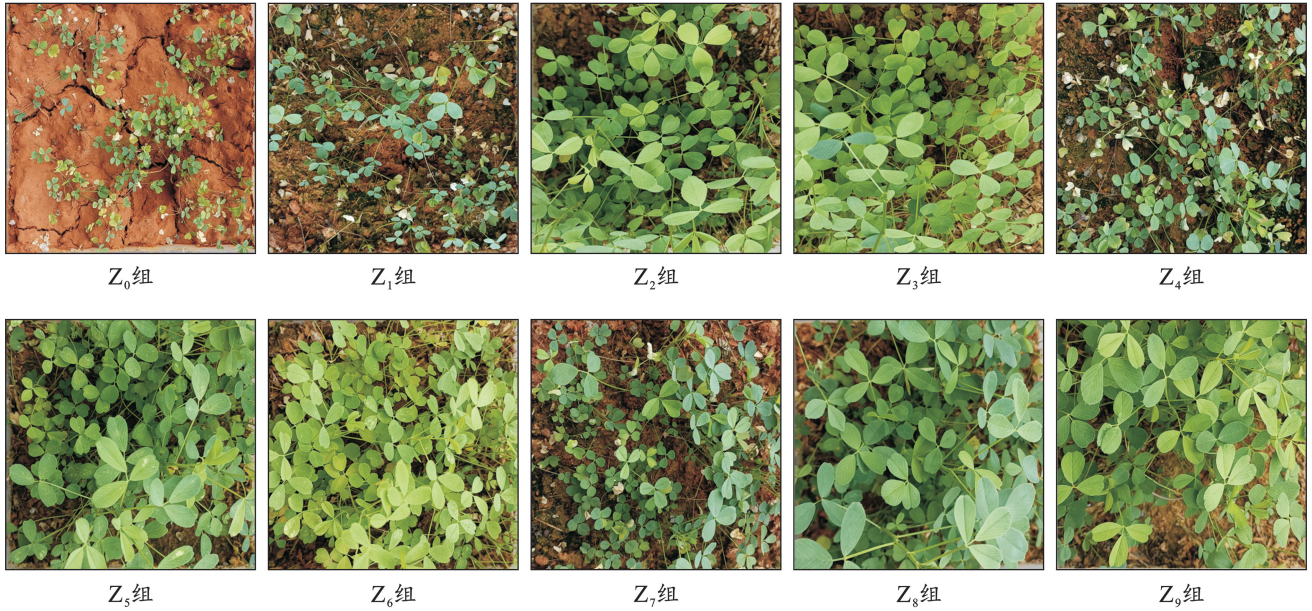


图 11 紫花苜蓿地上部分发育情况

Fig.11 Development of aboveground part of alfalfa

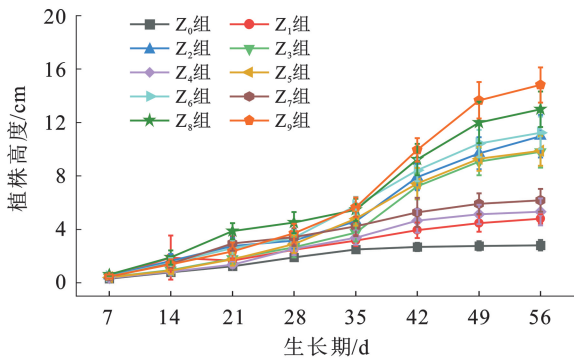


图 12 紫花苜蓿植株高度变化

Fig.12 Plant height change of alfalfa

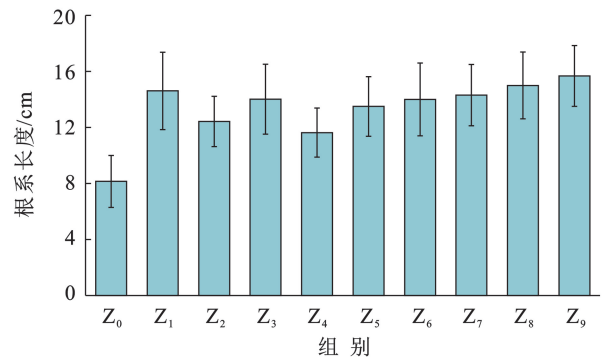


图 14 紫花苜蓿根系长度变化

Fig.14 Root length change of alfalfa

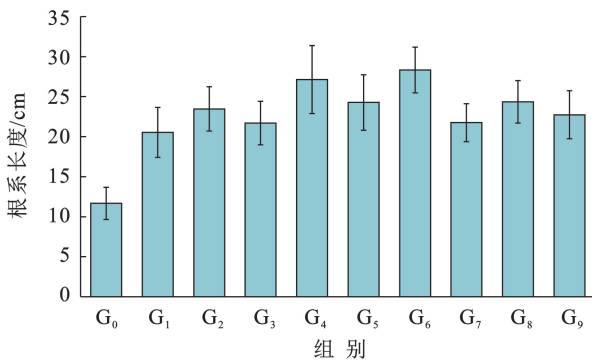


图 13 高羊茅根系长度变化

Fig.13 Root length change of tall fescue

2.3.5 植被覆盖度分析 植被覆盖度是中国植物护坡评价体系中最重要指标,反映了植被的茂密程度和植物进行光合作用面积的大小。由图 15 可见,在生长期 14 d 时,高羊茅各试验组间植株处于生长初期,覆盖度为 14.22%~29.66%。

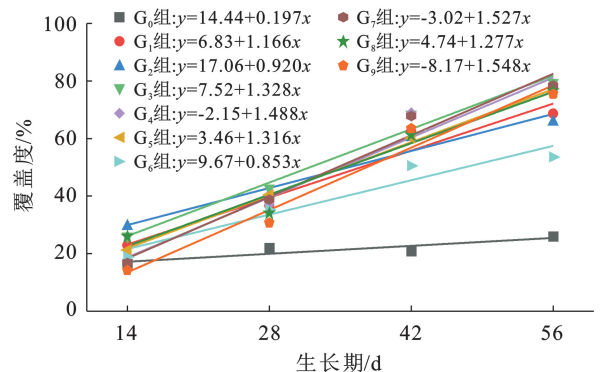


图 15 高羊茅覆盖度变化曲线

Fig.15 Coverage change curve of tall fescue

生长期 56 d 时,紫花苜蓿的地下根系生长状况见图 14。对照组 Z₀ 的根系长度为 8.15 cm,添加基材后的试验组根系长度为 11.63~15.67 cm,提升 42.70%~92.27%,表明配制基材对紫花苜蓿根系的生长、延伸具有正向作用。

G_7-G_9 组由于受到较高浓度胶结液影响,出苗率较低而造成前期植被覆盖度偏低。随着生长时间的增加,基质土和基材中的高羊茅覆盖度产生了明显差别。基质土中养分有限,无法满足高羊茅生长发育的要求,导致对照组 G_0 的覆盖度变化较小;基材的掺入不仅为高羊茅提供了生长所需的养分,还通过保水剂实现有效保水,有助于基材组中高羊茅植株快速生长,叶片宽度增大,覆盖面积持续扩大。生长期 56 d 时, G_0 的覆盖度仅为 26.00%, G_1-G_9 的覆盖度为 53.57%~79.28%,显著优于对照组 G_0 。

紫花苜蓿的植被覆盖度情况见图 16。前期试验组间的覆盖度均处于较低水平,组间差异较小。随着生长期增加,紫花苜蓿根系网发育逐渐完善,可以吸收更多的养分和水分用于自身的生长发育,植株高度和叶片宽度迅速增加。生长期 42 d 时,试验组间已产生较为明显的差距。生长期 56 d 时, Z_8 覆盖度达到 82.25%, Z_2, Z_3, Z_5, Z_6, Z_9 的覆盖度为 70%~80%, Z_7, Z_4 的覆盖度处于 40%~50%之间, Z_1, Z_0 的覆盖度低于 30%。说明紫花苜蓿在基质土中可获取的养分十分有限,难以满足植物正常的生长发育要

求。此外, Z_1, Z_4, Z_7 组的基材配比有待优化。

2.4 综合评价

本研究从基材强度、保水性、生长特性三方面衡量微生物固化生态基材的综合效果,选取了黏聚力、内摩擦角、基材累计蒸发量、出芽时间、出苗率等 8 项指标综合评价基材性能,除基材累计蒸发量和出芽时间外,其他指标均为正向指标,通过熵值法计算得到各指标权重,结果见表 6。

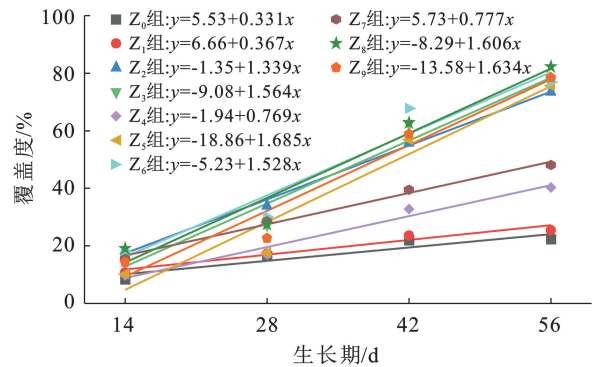


图 16 基材的性能紫花苜蓿覆盖度变化曲线

Fig.16 Coverage change curve of alfalfa

表 6 基材性能评价指标及权重

Table 6 Performance evaluation index and weight of substrates

植物类型	黏聚力	内摩擦角	基材累计蒸发量	出芽时间	出苗率	植株高度	根系长度	覆盖度
高羊茅	12.00%	11.31%	13.25%	9.99%	10.47%	16.29%	18.13%	8.56%
紫花苜蓿	10.89%	10.27%	14.03%	18.22%	9.18%	16.90%	10.35%	10.16%

根据权重计算得各组基材的综合指数,结果见图 17。高羊茅组的基材评分依次为: $G_4 > G_8 > G_6 > G_7 > G_2 > G_3 > G_5 > G_8 > G_1$,表明在 0.2 mol/L 胶结液浓度下,植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 1 : 2 : 0.09 时高羊茅的生长状况最优;紫花苜蓿组中,评分排名依次为: $Z_6 > Z_8 > Z_9 > Z_3 > Z_2 > Z_4 > Z_7 > Z_5 > Z_1$,说明胶结液浓度 0.2 mol/L,植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 3 : 1 : 0.06 的基材配方具有较高的强度,同时又能促进紫花苜蓿的生长。

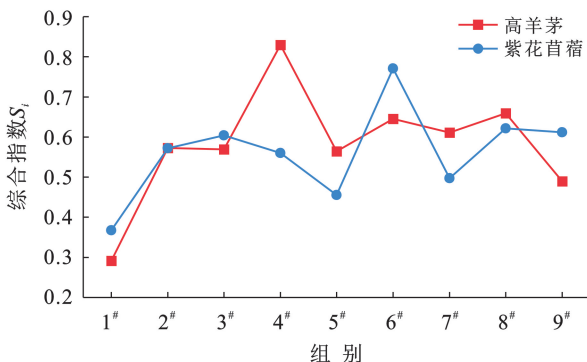


图 17 基材综合评分

Fig.17 Comprehensive score of substrates

3 结论

(1) 微生物固化能够有效增强绿化基材的抗剪强度。随着胶结液浓度的增大,基材的抗剪强度逐渐增大,其中黏聚力提升 179.78%~355.65%,内摩擦角增加 35.69%~58.97%。

(2) 微生物菌液、胶结液、植物纤维、复合微生物肥料、保水剂等原料混合形成的微生物固化生态基材为植被生长发育提供了营养充足,通透性能较优的稳定土壤环境。

(3) 胶结液浓度是影响植物适生性的最重要因素,随着胶结液浓度的升高,出芽时间出现延迟,出苗率明显降低。0.2 mol/L 为最优的胶结液配比浓度,该浓度下植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 1 : 2 : 0.09 时高羊茅的生长状况最优,植物纤维、复合微生物肥料、保水剂质量比为 3 : 1 : 0.06 时紫花苜蓿在绿化基材中表现最好。

参考文献 (References)

[1] 刘文竹,周健,蔡静如,等.华南裸露边坡修复植物生态位

- 研究[J].水土保持通报,2017,37(2):215-221.
- Liu Wenzhu, Zhou Jian, Cai Jingru, et al. A study on niche of plants for damaged slope restoration in Southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(2):215-221.
- [2] 王敏.铁矿场废弃地裸露边坡喷播绿化基质盆栽试验研究[D].山西太原:山西农业大学,2013.
- Wang min. Study on pot experiment of spraying green substrate on exposed slope of iron mine wasteland [D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [3] 晏长根,梁哲瑞,贾卓龙,等.黄土边坡坡面防护技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(4):1-22.
- Yan Changgen, Liang Zherui, Jia Zhuolong, et al. Review on surface protection technologies of loess slope [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023,23(4):1-22.
- [4] 杜技能,王中珏,段继琪,等.生态护坡理论及技术研究现状综述[J].水利与建筑工程学报,2023,21(6):211-220.
- Du Jineng, Wang Zhongjue, Duan Jiqi, et al. Review of the current status of research on ecological slope protection theory and technology [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023,21(6):211-220.
- [5] 刘英,宋子轩,马立杰.公路生态边坡植生技术与抗冲刷效果试验研究[J].公路交通科技,2023,40(增刊2):82-89.
- Liu Ying, Song Zixuan, Ma Lijie. Experimental study on vegetation technology and anti-scour effect on highway ecological slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023,40(Suppl.2):82-89.
- [6] 李少丽,许文年,刘立荣.开挖岩质边坡生态修复研究:以宜昌求索众创中心项目为例[J].水利水电技术,2018,49(4):130-137.
- Li Shaoli, Xu Wennian, Liu Lirong. Study on eco-restoration of excavated-rockslope: A case study of Qiusuo Zhongchuang Center project in Yichang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(4):130-137.
- [7] 孙超,许文年,周明涛,等.防冲刷基材生态护坡技术的研究与应用[J].水利水电技术,2009,40(1):37-40.
- Sun Chao, Xu Wennian, Zhou Mingtao, et al. Application and study on technique of ecological slope-protection with preventing erosion basis material [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009,40(1):37-40.
- [8] 高桂娟,曾小龙.添加剂对高陡岩石边坡人工基质性状的影响[J].草业科学,2009,26(4):154-158.
- Gao Guijuan, Zeng Xiaolong. Effect of water absorbent polymer on properties of soil substrate used on high and steep rocky slope [J]. Pratacultural Science, 2009,26(4):154-158.
- [9] Lou Guochong, Zhong Qinghui, Xie Jianguo. Nanometer montmorillonite modified fly ash ecological slope protection material and its preparation and application [J]. Journal of Chemistry, 2020,2020:6953594.
- [10] 刘冠宏,张森,郭小平,等.绿化废弃物堆肥配制喷播基质的试验研究[J].环境科学与技术,2018,41(5):61-66.
- Liu Guanhong, Zhang Sen, Guo Xiaoping, et al. Experimental study on preparing spray seeding matrix with greening waste compost [J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(5):61-66.
- [11] 田祥磊.喷播木纤维基质材料配方试验研究[D].北京:北京林业大学,2021.
- Tian Xianglei. Experimental study on formula of spraying wood fiber matrix material [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [12] 宋泽卓,刘瑾,梅红,等.黄原胶-黏土复合基材岩坡生态修复试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(5):1978-1989.
- Song Zezhuo, Liu Jin, Mei Hong, et al. Experimental study on ecological restoration of rock slope with Xanthan gum-clayey soil composite substrate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023,54(5):1978-1989.
- [13] 王双娇,李志清,田怡帆,等.微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J].工程地质学报,2024,32(1):236-264.
- Wang Shuangjiao, Li Zhiqing, Tian Yifan, et al. The past, present and future of technology in microbial geotechnical engineering [J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(1):236-264.
- [14] 段金贵.黄土边坡微生物矿化加固及植被恢复技术试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
- Duan Jingui. Experimental study on microbial mineralization reinforcement and vegetation restoration technology of loess slope [D]. Yangling, Shanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] 陈焱,王重卿,江世雄,等.微生物矿化对塔基弃土的固结作用及抗降雨侵蚀效果[J].科学技术与工程,2023,23(34):14713-14720.
- Chen Yao, Wang Chongqing, Jiang Shixiong, et al. Idation effect and anti-rainfall erosion of microbially induced carbonate precipitation on abandoned soil of transmission tower [J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(34):14713-14720.
- [16] 李中义,邵光辉,马志刚.微生物固化粉土坡面的植物适生性研究[J].林业工程学报,2020,5(2):158-163.
- Li Zhongyi, Shao Guanghui, Ma Zhigang. Plant adaptability of silty soil slope protected by microbial solidification [J]. Journal of Forestry Engineering, 2020,5(2):158-163.

- [17] 喻永祥,郝社锋,蒋波,等.基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):174-181.
Yu Yongxiang, Hao Shefeng, Jiang Bo, et al. An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021,48(2):174-181.
- [18] 许飞,尹晓晴,包含,等.干旱半干旱区岩质边坡生态基材防护特性与优化配比[J].科学技术与工程,2024,24(5):2158-2167.
Xu Fei, Yin Xiaoqing, Bao Han, et al. Protection characteristics and optimal proportion of ecological base material for rock slope in arid and semi-arid region [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2158-2167.
- [19] 夏振尧,董欣慧,胡欢,等.微生物诱导碳酸钙沉积固化三峡库区黏性紫色土试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(5):91-100.
Xia Zhenyao, Dong Xinhui, Hu Huan, et al. Performance of microbial induced carbonate precipitation (MICP) for reinforcing cohesive purple soil in the Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024,46(5):91-100.
- [20] 喻成成,卢正,姚海林,等.微生物诱导碳酸钙沉淀改性膨胀土试验研究[J].岩土力学,2022,43(S1):157-163.
Yu Chengcheng, Lu Zheng, Yao Hailin, et al. Experimental study of modifying expansive soils using microbial induced calcite precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(S1):157-163.
- [21] 梁永哲,陈毅,刘大翔,等.外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2016,36(2):136-139.
Liang Yongzhe, Chen Yi, Liu Daxiang, et al. Effect of additive plant fiber on shearing strength of vegetation-compatible concrete under freezing-thawing cycles [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(2):136-139.
- [22] 王德银,唐朝生,李建,等.纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J].岩土工程学报,2013,35(10):1933-1940.
Wang Deyin, Tang Chaosheng, Li Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(10):1933-1940.
- [23] 徐盼盼,张奇莹,钱会,等.基于 SEM 多级化孔隙特征研究:以重塑黄土为例[J].工程地质学报,2023,31(6):1799-1810.
Xu Panpan, Zhang Qiying, Qian Hui, et al. Sem-based multi-level pore characteristics: A case study of remolded loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(6):1799-1810.
- [24] Li Ping, Vanapalli S, Li Tonglu. Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016,8(2):256-274.
- [25] 赵志杰,李驰,高瑜,等.MICP 技术与超旱生植物联合治理流沙试验研究[J].人民黄河,2022,44(8):119-122.
Zhao Zhijie, Li Chi, Gao Yu, et al. Experimental study on the treatment of mobile dunes by MICP technology combined with super xerophytes [J]. Yellow River, 2022,44(8):119-122.
- [26] 孔剑捷,陈萍,黄顺心,等.微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2019,44(5):688-696.
Kong Jianjie, Chen Ping, Huang Shunxin, et al. Experimental investigation on solidifying the desert aeolian sand undercombined action of MICP and vegetation [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2019,44(5):688-696.
- [27] 单立山,李毅,石万里,等.土壤水分胁迫对红砂幼苗生长和渗透调节物质的影响[J].水土保持通报,2015,35(6):106-109.
Shan Lishan, Li Yi, Shi Wanli, et al. Effects of dehydration stress on growth of reaumuria soongorica seedlings and regulation of osmotic substances [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(6):106-109.
- [28] 颜路明,郭祥泉.盐碱胁迫对香樟幼苗离子吸收与分配的影响[J].土壤,2015,47(6):1176-1180.
Yan Luming, Guo Xiangquan. Effects of saline-alkali stress on ion absorption and distribution of camphor seedling [J]. Soils, 2015,47(6):1176-1180.
- [29] 牟信刚.护坡绿化基质筛选及其理化性质研究[D].山东泰安:山东农业大学,2008.
Mu Xingang, Research on selection of substrates for slope protection and revegetation and its physiochemical properties [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2008.
- [30] 黄钢,郑明新,王庆,等.鄂州航空港通渠河岸植物根系加固土体的机理[J].水土保持通报,2021,41(1):15-21.
Huang Gang, Zheng Mingxin, Wang Qing, et al. Mechanism of soil reinforcement by vegetation roots in canal of Ezhou Airport [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):15-21.