

不同草种配置下植生混凝土边坡的抗冲刷与蓄水性能研究

曹璨然¹, 厉建升¹, 刘彬², 邓俊双³, 林超^{1,*}, 孙加平^{2,4}, 尹壮飞⁵, 刘圣杰⁴, 谢甲闰³

1. 宜春学院, 江西 宜春, 336000
2. 中铁十六局集团第五工程有限公司, 河北 唐山, 064000
3. 江西交通工程集团有限公司, 江西 南昌, 330038
4. 河海大学, 江苏 南京, 210024
5. 青岛理工大学, 山东 青岛, 266520

摘要: 为提升多雨地区植生混凝土边坡的生态防护效果, 系统研究了不同草种配置下的植物生长适应性、坡面抗冲刷性能及蓄水能力。选用狗牙根、黑麦草、高羊茅、四季青四种草本植物, 设置无植被、单播、混播三种配置方式, 基于自制模拟降雨装置, 测试了坡度(30°、45°)和降雨强度(34 mm/h、144 mm/h)下的坡面径流率与侵蚀率, 并评价了植生混凝土的蓄水能力。结果表明: (1) 四种植物生长速度排序为: 黑麦草>狗牙根>四季青>高羊茅, 35 d 平均高度分别为 16.2cm、14.1cm、12.5cm、10.7cm; “黑麦草+狗牙根”混播方案根系互锁效果最优。(2) 坡面径流率随坡度增大而减小, 随降雨强度增大而增大; 混播植物可使径流率较无植被组降低 45%~52%。(3) 坡面侵蚀率与坡度、降雨强度正相关, 混播植物组侵蚀率仅为无植被组的 8%~12%。(4) 植生混凝土留存水比例高达 71.6%, 可有效缓冲降雨对原边坡的冲击。构建的径流率-侵蚀率双指标评价体系及推荐的混播方案, 可为多雨地区植生混凝土护坡设计提供量化依据。

关键词: 植生混凝土; 草种配置; 抗冲刷性能; 径流率; 侵蚀率; 蓄水能力

Study on Scour Resistance and Water Retention Capacity of Planting Concrete Slope Under Different Grass Species Configurations

Cao Canran¹, Li Jiansheng^{1,2}, Liu Bin³, Deng Junshuang⁴, Lin Chao^{1,*}, Sun Jiaping¹, Yin Zhuangfei⁵, Liu Shengjie⁴, Xie Jiarun³

1. Yichun University, Jiangxi Yichun, China
2. China Railway Sixteenth Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Hebei Tangshan, China
3. Jiangxi Traffic Engineering Group Co., Ltd., Jiangxi Nanchang, China
4. Hohai University, Jiangsu Nanjing, China
5. Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao, China

Abstract: To improve the ecological protection performance of planting concrete slopes in rainy regions, this study systematically investigated plant growth adaptability, slope scour resistance, and water retention capacity under different grass species configurations. Four herbaceous species—*Cynodon dactylon*, *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea*, and *Poa pratensis*—were selected. Three vegetation configurations were established: no vegetation, single-species seeding, and mixed seeding. Using a self-developed rainfall simulator, the slope runoff rate and erosion rate were measured under different slope gradients (30° and 45°) and rainfall intensities (34 mm/h and 144 mm/h). Additionally, the water retention capacity of the

planting concrete was evaluated. The results showed that: (1) The growth rate sequence of the four species was: *Lolium perenne* > *Cynodon dactylon* > *Poa pratensis* > *Festuca arundinacea*, with average heights at 35 days reaching 16.2 cm, 14.1 cm, 12.5 cm, and 10.7 cm, respectively. The mixed seeding of *Lolium perenne* and *Cynodon dactylon* exhibited the best root interlocking effect. (2) The slope runoff rate decreased with increasing slope gradient but increased with increasing rainfall intensity. Mixed seeding reduced the runoff rate by 45%–52% compared to the unvegetated group. (3) The slope erosion rate was positively correlated with both slope gradient and rainfall intensity, and the erosion rate of the mixed-seeding group was only 8%–12% of that of the unvegetated group. (4) The planting concrete achieved a high water retention ratio of 71.6%, effectively buffering the impact of rainfall on the original slope. The proposed dual-indicator evaluation system (runoff rate and erosion rate) together with the recommended mixed-seeding strategy provides a quantitative basis for the design of planting concrete slopes in rainy regions.

Keywords: Planting concrete; Grass species configuration; Scour resistance; Runoff rate; Erosion rate; Water retention capacity

随着生态文明建设的推进,公路边坡防护已从单一的工程耐久性要求转向工程安全与生态修复协同发展。植生混凝土(Planting Concrete)作为一种新型生态护坡材料,通过大孔隙混凝土基体为植物根系提供生长空间,同时利用植被的地上部分削减降雨动能、地下部分加筋固土,实现边坡长效稳定^[1-3]。然而,在多雨地区(如江西、湖南、福建等),植生混凝土面临两大技术瓶颈:一是水泥基体高碱性环境对植物萌发和生长的抑制;二是植物未成坪前的裸露期易受强降雨冲刷,导致基质流失、种子移位,最终生态效果不达标^[4-5]。

目前,国内外学者在植生混凝土配合比设计、力学性能及降碱措施方面取得了丰富成果^[6-7],但在植物材料选择与坡面抗冲刷性能的定量评价方面仍存在不足。具体表现为:①草种筛选多凭经验,缺乏对不同草种生长速度、根系发育及混播协同效应的系统比较;②抗冲刷评价指标单一(多采用总侵蚀量),未建立能够反映动态过程的径流率与侵蚀率双指标体系;③植生混凝土内部孔隙的蓄水能力及其对原坡面保护作用的研究鲜见报道^[8-9]。

为此,本文依托江西省沪昆高速改扩建工程试验段,以植生混凝土生态护坡为对象,重点开展以下研究:(1)比较狗牙根、黑麦草、高羊茅、四季青四种草本植物的生长高度与根系特征,提出推荐混播方案;(2)构建基于自制模拟降雨装置的坡面径流率与侵蚀率双指标评价体系,定量分析坡度、降雨强度及植被覆盖方式对坡面抗冲刷性能的影响;(3)验证植生混凝土的蓄水能力,揭示其对原边坡的保护机制。研究成果可为多雨地区植生混凝土护坡的植物配置与抗冲刷设计提供科学依据和技术支撑。

1 实验方案

1.1 植生混凝土基体制备

基体材料属性为水泥:P·II42.5R 硅酸盐水泥,密度 3030 kg/m³,比表面积 330 m²/kg。粗骨料:13.2~16 mm 石灰岩碎石,表观密度 2695.52 kg/m³,压碎指标 10.9%。配合比:水灰比 0.28,设计孔隙率 0.24,骨料用量 1352 kg/m³,水泥用量 313 kg/m³,用水量 88 kg/m³。

制备工艺:采用“裹浆法”+静压插捣成型。先将全部骨料加入搅拌机,加入 50% 拌合水搅拌 30 s 润湿,再加入剩余 50% 水和水泥搅拌 180 s。成型时采用 150 mm×150 mm×150 mm 模具,分层三次填筑,每层插捣 15 次,施加 0.1 MPa 静压,24 h 后脱模,标准养护 28 d。实测抗压强度 6.2 MPa,实测孔隙率 24.5%,透水系数 10.2 mm/s。

1.2 营养基质配制与灌注

采用双层基质系统(表1)。第一层为孔隙填充基质,扩展度控制在 210 mm (185~230 mm 最

佳)，采用低压灌浆法注入混凝土内部，灌注过程中轻敲模具辅助填充。第二层为表面覆层基质，扩展度 100 mm，刮涂厚度 50~80 mm，草种混入第二层基质中。基质原材料：本地红土（江西）、泥炭土、SAP 吸水树脂、复合肥（N-P-K 15-15-15）、固土剂（磷酸二氢铝）。

表 1 植生混凝土营养基质配比
Table 1 Nutrient matrix ratio of planting concrete

分层	材料组成	用量比例	具体用量
第一层（灌注层）	泥炭土	68%	7.1 kg/m ³
	本地红土	30%	57 kg/m ³
	保水剂（SAP）	0.5%	0.5 kg/m ³
	复合肥	1.5%	5 kg/m ³
第二层（覆层）	本地红土	93%	10.2 kg/m ²
	保水剂	1.5%	0.15 kg/m ²
	复合肥	1.5%	0.15 kg/m ²
	固土剂	4%	0.4 kg/m ²

1.3 草种选择与配置方案

选取四种常用护坡草本植物：狗牙根（*Cynodon dactylon*）、黑麦草（*Lolium perenne*）、高羊茅（*Festuca arundinacea*）、四季青（*Poa pratensis*）。设置四种植被配置方式：

CK：无植被（仅基质）

A1：单播黑麦草

A2：单播狗牙根

A3：混播黑麦草 + 狗牙根（质量比 1:1）

播种量均为 20 g/m²，草种与第二层基质搅拌均匀后刮涂。

1.4 模拟降雨试验装置与方法

试验装置：本试验采用自制模拟降雨系统，装置的主要技术参数见表 2。该装置可调节坡面角度（0~55°），通过流量计精确控制降雨强度，坡面径流由底部收集槽汇集。

表 2 模拟降雨装置主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of simulated rainfall device

部件名称	规格 / 参数	备注
主体框架	方钢结构，尺寸 55 cm × 25 cm × 60 cm	可调坡度 0~55°
喷淋系统	10 个可调喷头，间距 10~12 cm	矩形布置，保证降雨均匀
流量计	8 mm 插管微小流量计，量程 0.2~10 L/min	实时监测并控制出水量

部件名称	规格 / 参数	备注
喷头类型	12 转三通 8 mm 快插铜喷头	可调节出水量
坡面角度调节	手动调节, 最大坡度 55°	本试验取 30°和 45°
径流收集装置	不锈钢收集槽, 位于坡面底部	收集泥水混合物
降雨强度设定	34 mm/h (江西平均暴雨强度)、144 mm/h (极端暴雨强度)	通过流量计和喷头标定

试验设计采用坡度: 30°和 45°, 降雨强度为 34 mm/h (江西地区平均暴雨强度)、144 mm/h (极端暴雨强度), 植被配置: CK、A1、A2、A3, 每组试验重复 3 次, 取平均值。具体试验步骤: 将养护 35 d 的植生混凝土试件置于坡面上, 调节坡度, 开启喷淋系统。34 mm/h 组每 10 min 收集一次径流与泥沙, 144 mm/h 组每 5 min 收集一次, 总降雨时间 60 min。收集的泥水混合物静置 12 h, 倒出上清液, 底部泥沙在 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 称量。

评价指标为径流率 $R=Q/t$ (L/min), 其中 Q 为径流量 (L), t 为时间 (min)。侵蚀率 $E=M/t$ (g/min), 其中 M 为泥沙沉积量 (g), t 为时间 (min)

1.5 蓄水能力试验

采用 30cm×15cm×10cm 植生混凝土试件 (底部钻透水小孔), 下方放置收集盘。向试件表面缓慢注入 500mL 水, 记录下渗水量随时间变化, 计算留存水比例=(注入水量-下渗水量)/注入水量×100%。

1.6 植物生长评价

播种后每 7d 测量一次植物高度, 每种植物选取试件中最长、最短及中等高度三株, 取平均值。35d 后敲碎试件, 观察根系在混凝土孔隙内的分布情况并拍照记录。

2 实验结果

2.1 草种生长适应性

2.1.1 生长高度变化

四种植物 35d 内生长高度变化如图 1 所示。黑麦草生长速度最快, 35d 时达 16.2cm; 狗牙根次之 (14.1cm); 四季青前期 (21d 内) 生长较快, 后期趋缓, 最终 12.5cm; 高羊茅最慢 (10.7cm)。所有草种在 0~21d 为快速生长期, 28d 后生长速度显著减缓。生长速度序列为: 黑麦草>狗牙根>四季青>高羊茅。

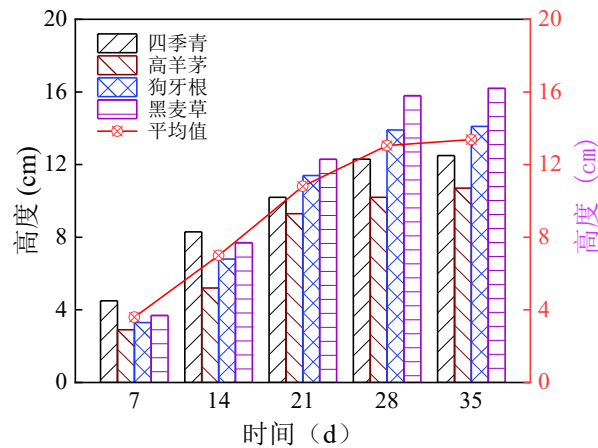


图1 四种植物在植生混凝土中的生长高度变化

Fig. 1 The growth height changes of four plants in vegetation concrete

2.1.2 根系发育特征

35d 后破型观察 (图 2), 黑麦草根系为浅而密的须根系, 在混凝土表层 5~8cm 孔隙内密集分布; 狗牙根为匍匐茎+深根系, 可穿透 10cm 以上孔隙, 两者在混播条件下形成空间互补的“浅-深”双结构根系网络。四季青和高羊茅根系相对稀疏。混播试件中可观察到大量白色新根 (根系活力强), 表明植生混凝土内部环境经降碱处理后适宜根系生长。



图2 不同草种配置下植生混凝土内部根系发育情况

Fig. 2 The internal root development of planting concrete under different grass species configuration.

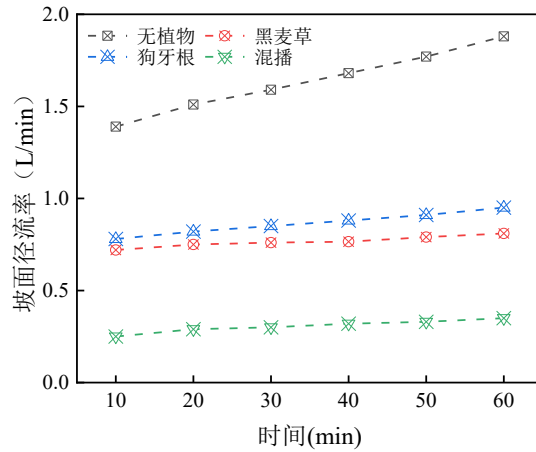
2.2 坡面径流率特性

2.2.1 坡度与降雨强度的影响

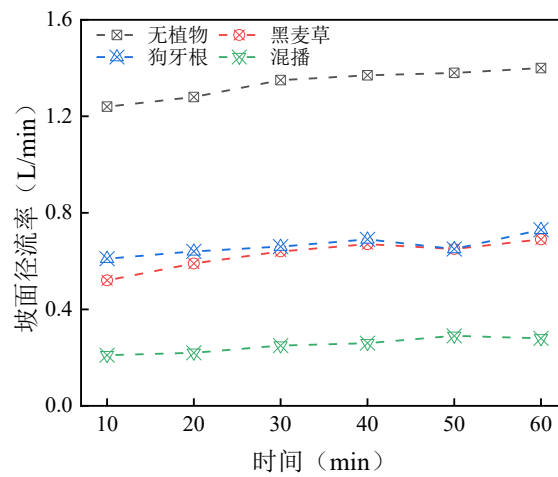
在同一植被配置下 (图 3), 坡度从 30°增至 45°时, 径流率减小 0.2~0.6L/min。分析认为: 坡度增大导致坡面有效受雨投影面积减小, 虽然重力分量增大, 但受雨量减少占主导。当降雨强度从 34mm/h 增至 144mm/h 时, 径流率显著增大 1.1~1.5L/min, 表明降雨强度是径流率的主控因素。

2.2.2 植被配置的影响

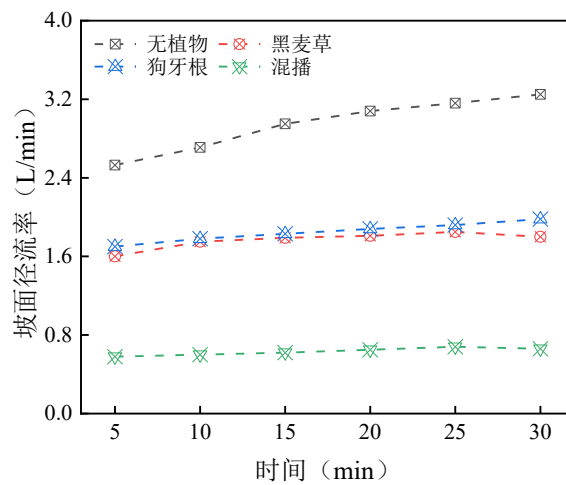
以 30°、144mm/h 条件为例（图 3c），无植被组（CK）径流率达 4.2L/min，单播黑麦草组为 3.0L/min，单播狗牙根组为 3.1L/min，混播组（A3）仅 2.2L/min，较 CK 降低 47.6%。混播植物的叶片截留和茎秆阻力增加了坡面糙度，同时根系对基质的锚固作用减少了表层滑移，从而显著降低径流率。不同植被配置的径流率排序为：CK>单播黑麦草~单播狗牙根>混播。



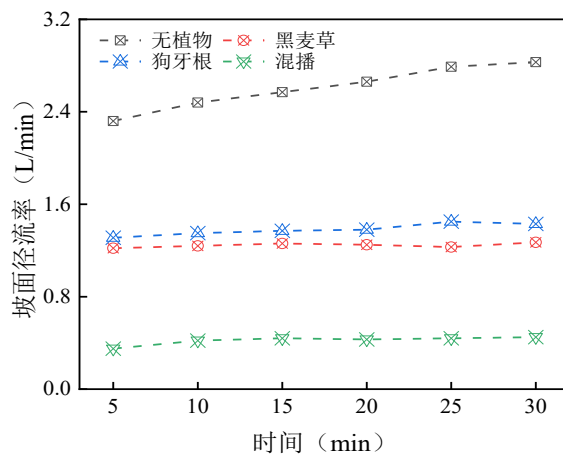
(a) 30°,34mm/h 坡面径流率



(b) 45°,34mm/h 坡面径流率



(c) 30°,144mm/h 坡面径流率



(d) 45°, 144mm/h 坡面径流率

图3 坡度、降雨强度和植被配置对坡面径流率的影响

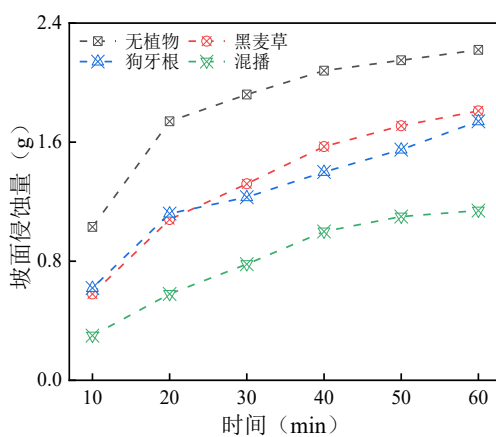
Fig. 3 Effects of slope, rainfall intensity and vegetation configuration on slope runoff rate.

2.3 坡面侵蚀特性

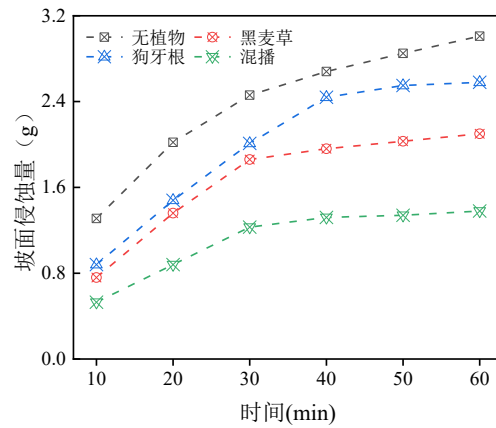
坡面侵蚀量随时间呈“快速上升—缓慢增加—趋于稳定”三阶段特征（图4）。侵蚀率在初期（0~10min）最高，随后逐渐下降。以45°、144mm/h条件为例（图4d）：

对于CK组，其累积侵蚀量17.3g，侵蚀率峰值1.25g/min；单播黑麦草侵蚀量6.1g，侵蚀率0.20g/min；单播狗牙根侵蚀量6.5g，侵蚀率0.22g/min；混播组侵蚀量仅1.1g，侵蚀率0.037g/min。

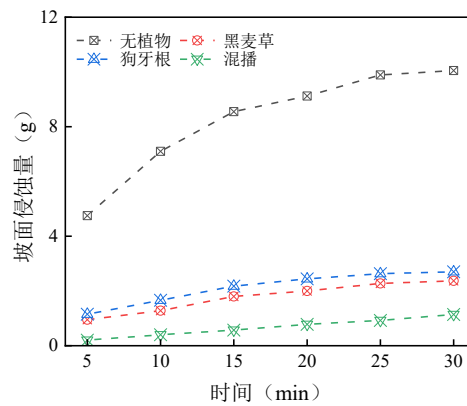
混播组侵蚀率仅为CK组的3.0%，抗冲刷效果极为显著。分析原因：混播植物在混凝土孔隙内形成“浅根+深根”互锁结构，对表层基质产生整体锚固；同时，密集的叶片冠层有效削减了雨滴动能，使坡面抗侵蚀能力大幅提升。



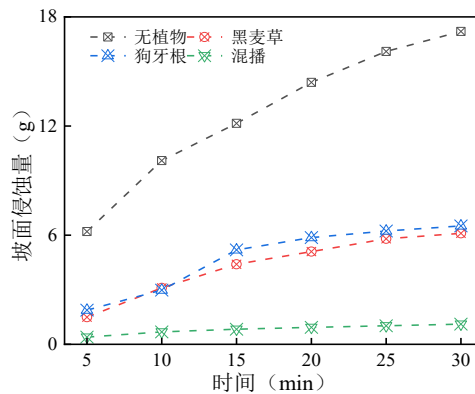
(a) 30°, 34mm/h 坡面侵蚀量



(b) 45°, 34mm/h 坡面侵蚀量



(c) 30°, 144mm/h 坡面侵蚀量



(d) 45°, 144mm/h 坡面侵蚀量

图 4 坡度、降雨强度和植被配置对坡面侵蚀特性的影响

Fig. 4 Effects of slope, rainfall intensity and vegetation configuration on slope erosion characteristics.

2.4 植生混凝土蓄水能力

蓄水能力试验结果如图 5 所示。注入 500mL 水后，留存水比例随时间逐渐降低，8min 后趋于稳定，最终留存水比例高达 71.6%。这一高蓄水能力归因于植生混凝土的大连通孔隙结构（实测孔隙率 24.5%）。其工程意义在于：（1）蓄存的雨水可在干旱期为植物提供水分缓冲，减少养护频率；（2）对原边坡而言，植生混凝土起到了“截留-缓释”作用，显著削减了进入坡体的瞬时水流量，降低了滑坡风险。

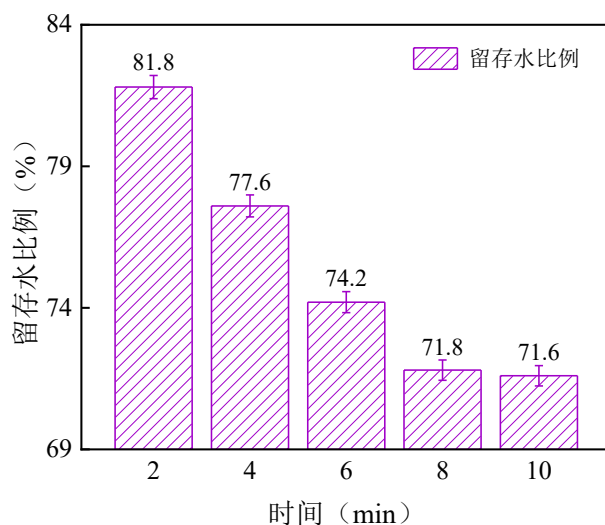


图5 植生混凝土蓄水能力

Fig. 5 Water storage capacity of vegetation concrete

3 机理分析

3.1 混播植物的协同抗冲刷机理

本研究发现，“黑麦草+狗牙根”混播的抗冲刷效果远优于单播，其协同机理可从三个层面解释，首先是根系空间互补：黑麦草为须根系（主要分布在0~8cm表层），狗牙根为匍匐茎+垂直根（可达10cm以上），两者在混凝土孔隙中形成“浅层加筋-深层锚固”的复合结构，显著提高了基质整体性。地表覆盖叠加指两种植物叶片形态不同（黑麦草宽叶、狗牙根细叶），混播后冠层密度和层间结构更复杂，对雨滴的拦截和动能耗散效率更高。地表糙度增加，混播后坡面微观起伏增大，径流阻力增大，流速降低，从而减少径流对表层的剪切力。

这一机理为多雨地区植生混凝土的植物选型提供了明确指导：应选择根系形态互补的草种进行混播，而非单一草种。

3.2 径流率-侵蚀率双指标评价体系的意義

以往研究多采用“总侵蚀量”或“侵蚀深度”作为抗冲刷评价指标，但难以反映冲刷过程的动态变化。本文首次构建了基于连续采样的径流率与侵蚀率双指标动态评价体系。径流率反映坡面雨水流动的速率和动能，侵蚀率直接表征土壤颗粒被剥离和搬运的强度。两者结合可以更全面地揭示抗冲刷性能的演变规律（如初期高侵蚀率、后期趋于稳定），并为数值模拟提供输入参数。

3.3 蓄水能力对边坡稳定性的贡献

植生混凝土71.6%的留存水比例是一个重要发现。与普通透水混凝土（留存水比例一般低于30%）相比，植生混凝土因配有保水剂和细粒基质，蓄水能力显著提升。这一性能使植生混凝土不仅是“透水”材料，更是“蓄水-缓释”材料。在原边坡保护方面，它可以削减降雨洪峰流量，延长水分入渗时间，特别适用于土质边坡和风化岩质边坡。建议在设计时考虑利用植生混凝土的蓄水能力部分替代传统截水沟和盲沟，以降低工程造价。

3.4 工程应用建议

基于本研究，提出以下工程应用建议：

草种配置推荐黑麦草+狗牙根混播，质量比1:1，播种密度25~30g/m²。基质工艺采用第一层基质扩展度控制在200~220mm，确保孔隙填充率≥85%；第二层覆层厚度≥50mm，为根系提供足够锚固深度。养护要求播种后前14d每日细雾喷洒2次，保持基质湿润；植被成坪后可减少至每3~5d一次。

蓄水利用在坡顶设置简易蓄水槽,将植生混凝土的蓄排水与坡面截水系统联动,可进一步降低径流峰值。

3.5 研究局限与展望

本研究降雨强度仅设置两个水平,未涵盖持续中雨(如10~20mm/h)场景;植物观测周期为35d,未考察多年生长后的根系老化与抗冲刷性能衰减规律。后续研究可开展长期野外定位观测,建立“降雨-径流-侵蚀-植物生长”耦合模型。此外,蓄水能力与植物耗水之间的水量平衡关系也值得深入探索。

4 结论

(1)系统评价了狗牙根、黑麦草、高羊茅、四季青四种草本植物在植生混凝土中的生长适应性,生长速度序列为:黑麦草(16.2cm/35d)>狗牙根(14.1cm/35d)>四季青(12.5cm/35d)>高羊茅(10.7cm/35d)。“黑麦草+狗牙根”混播方案的根系互锁效果最优,推荐用于多雨地区。

(2)首次构建了基于自制模拟降雨装置的坡面径流率与侵蚀率双指标评价体系。定量揭示:坡度越大(30°→45°),径流率减小0.2~0.6L/min,但侵蚀率增加;降雨强度越大(34→144mm/h),径流率增加1.1~1.5L/min,侵蚀率显著上升;混播植物可使径流率降低47.6%,侵蚀率降至无植被组的3%~12%。

(3)验证了植生混凝土的高效蓄水能力,留存水比例高达71.6%。该性能可为植物提供干旱早期水分缓冲,并通过在原边坡的“截留-缓释”作用降低滑坡风险。

(4)推荐多雨地区植生混凝土护坡采用“黑麦草+狗牙根(1:1)混播+双层基质灌注(覆层≥50mm)”的技术方案,该方案在保证边坡力学稳定的同时,可显著提升抗冲刷性能和生态效益。

参考文献

- [1] 许文年,王铁桥,叶建军. 工程边坡绿化技术初探 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2001, (06): 512-513+542.
- [2] 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 (S2): 82-89.
- [3] 乔建刚,董进国,李明浩,等. 生态混凝土植生与抗冲刷性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (03): 917-924.
- [4] 王家庆,吴健生,黄凯健,等. Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45 (4): 29-40.
- [5] 李波,浦嘉诚,康爱红,等. 现浇绿化混凝土植生冲刷试验研究 [J]. 混凝土, 2023, (10): 195-200.
- [6] Zheng C, Zhang Z, Huang Z, et al. Review of Porous Vegetation Eco-concrete (PVEC) Technology: From Engineering Requirements to Material Design [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 111442.
- [7] 谭思琪,焦楚杰. 基于正交试验法的植生混凝土强度与碱性研究 [J]. 混凝土, 2020, (10): 146-150.
- [8] 张济宁. 河道护坡中植生混凝土作用机理研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50 (10): 28-30.
- [9] 孙合龙,吴锋,王喆. 绿色建筑——植生混凝土 [J]. 湖北农机化, 2020, (07): 75.
- [10] 董玉文,陈磊,易霖,袁玉龙,杨刚. 根系生长对再生植生混凝土关键性能的影响[J]. 人民长江, 2026, 1-9.
- [11] 沈春颖,唐亮,王铭明,王先伟. 再生骨料植生型混凝土物理力学性能及植生特性[J]. 建筑材料学报, 2026, 29(05): 556-562.
- [12] 陈京京,王敏,袁绍春,柳培兵,刘杰,吕波. 植生混凝土护坡对雨水径流污染物的净化效果[J]. 环境工程, 2026, 1-12.
- [13] 汪丽娟,乔宏霞,苏睿. 植生混凝土配合比优化设计及性能研究[J]. 混凝土, 2026, (04): 106-111.
- [14] 万娟,许欣,肖衡林,吕锋,欧阳帆. 主动多孔护岸混凝土的植生及抗冲刷性能实验结果及新认知[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(05): 2138-2146.

- [15] 石豪, 曾志雄, 董志浩, 吴帆, 王涛, 刘珂孜, 刘云峰, 廖徐冉, 唐朝生. 西南山区泥石流防护工程结构与植生环境破坏机制浅析[J]. 地球科学, 2025, 1-17.
- [16] 沈春颖, 唐亮, 王铭明, 王先伟. 不同粒径再生骨料植生型混凝土物理力学及植生特性研究[J]. 建筑材料学报, 2026, 1-12.

基金项目: 江西省自然科学基金面上项目(20232BAB204074)。

第1作者简介: 曹粲然(2005-), 女, 宜春学院在读, 研究方向: 边坡支护。E-mail: 919251079@qq.com。

***通讯作者简介:** 林超(1987-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 隧道工程。 E-mail: 190125@jxycu.edu.cn。