

土工合成材料植被生长基质高陡硬地边坡生态修复可行性研究

杨庚鑫¹ 朱忠平¹ 刘钊¹ 张旭¹ 廖嘉俊^{2*}

(1. 国能大渡河流域水电开发有限公司枕沙水电建设管理分公司 四川乐山 614700 2. 深圳大学 土木与交通工程学院 广东深圳 518060)

摘要: 基础设施的兴建产生了大量的高陡岩石、混凝土(硬地)边坡, 此类边坡表面缺乏合适的基质, 难以维持植被的生长。由此, 本文通过实验验证了一种以土工合成材料替代土壤的高陡硬地边坡生态修复方法(GVS)。为评估该方法在高陡硬地边坡生态修复的可行性, 并为后续GVS高陡硬地边坡生态修复研究提供数据支撑。对种植于土工合成材料植被生长基质的植被进行65天的连续监测, 以植被的茎叶长度作为植被健康状况的指标, 对在不同实验条件下的植被生长情况进行分析。结果表明: 1. GVS具有高陡硬地边坡生态修复的可行性。2. 适宜的灌溉量和可降解覆盖层可为植被创造充分湿润和避免阳光暴晒的环境, 促进植被的萌芽和生长。3. 提出GVS生态修复机理, 改变传统修复技术依赖土壤的情况。研究结果可为高陡硬地边坡生态修复提供新的生态修复方法, 也为后续GVS高陡硬地边坡生态修复研究提供数据支撑。

关键词: 边坡生态修复; 土工合成材料; 植被生长; 植被复合基质

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A

基础设施的兴建往往破坏原有的地形地貌和原始植被, 被移除的表土和产生的混凝土或岩石表面无法维持植物生长, 造成土地荒漠化和水土流失等问题, 并且会导致生物多样性降低, 加剧生态系统的退化^[1], 对区域生态系统造成难以自我修复的破坏, 对可持续发展造成极其不利的影响^[2]。为保护与修复生态系统, 加大生态修复力度, 进一步遏制生态系统的退化, 2020年中国颁布了《国家重要生态系统保护与修复重大工程总体规划(2021-2035年)》将生态修复提升到国家重大任务的高度, 生态修复已经成为国家可持续发展的关键^[3]。

植被作为生态系统的重要组成部分, 以植被为主体进行高陡硬地边坡的生态修复, 对区域生态系统、可持续发展和工程安全具有重大意义^[4]。然而此类边坡性质坚硬、持水性差和表层附着条件差, 且几乎没有适合植被生长的基质, 难以满足植被生长的需求。现有的生态修复技术可以对高陡硬地边坡起到一定的修复效果, 但这些技术都有难以解决的问题。其中客土喷播技术的基材稳定性较差, 肥力易流失, 难以满足植被长久的生长需求^[5]。植生袋稳定性不好, 在雨水冲刷下, 植生袋自重增大, 易产生滑移, 造成整体失稳, 须采用锚杆、挂网等加固措施^[6]。而植被混凝土技术, 水泥与基料的混合搅拌不仅减小了水泥颗粒间的连接, 降低了原有强度, 还使生长基质偏碱性, 对基材微生物活性和植被生长有不利影响^[7]。当前生态修复领域, 现有的生态护坡技术多以土壤或改性土壤作为植物生长基质, 对于高陡硬地边坡表面展现出较为有限的应用范围及较低的适应性。这一局限性主要源于现有技术对土壤或经改良土壤基质的高度依赖, 易产生基质和营养流失、结构失稳等问题。考虑到硬质边坡环境特别是混凝土和岩石表面缺乏支持植物生长所必需的土壤条件, 传统的生态修复策略面临显著挑战, 难以达成生态系统的有效恢复。因此, 本研究提出土工合成材料植被生长基质(Geosynthetic Vegetation Substrate, 简称GVS)的构想。适用于高陡硬地边坡, 且能取代传统土壤作为植物生长基质的生态修复方法, 不仅有助于解决传统土壤作为植物生长基质在这类边坡修复中的应用难题, 更填补了现有技术在高陡硬地边坡生态修复方面的些许空白, 对生态修复和可持续发展建设具有重大意义。

1 材料与方法

1.1 土工合成材料植被生长复合基质

理想的植被基质应满足以下几个核心条件: 1. 基质应保证水分的自由渗透能力及水分保持能力, 确保水源能够持续供给植物所需; 2. 基质的pH值应处于适宜植物生长的范围内, 以促

进养分的有效吸收; 3. 适当的孔隙度为根部提供氧气交换空间, 以维持植物根系的正常生长。

GVS以土工布作为基层, 可降解纤维作为覆盖层, 植物种子通过附着剂固定于二者之间, 最后通过线缝技术将夹有植物种子的土工布底层与可降解纤维覆盖层缝合组成的整体结构, 如图1所示。

GVS的灌溉利用土工布基层的导水特性, 通过在较高端滴灌为植物萌芽及生长提供水分。植被根系能够自然地在水源生长, 穿透或在土工布内部发育, 有效地将植被固定在GVS上。在植物的生长过程中, 根系不断地从基质中吸收水分, 然后将水分输送到整个植物中, 最终通过叶片上的气孔蒸腾。该过程主要由根系与基质间的吸力差驱动的, 大多数植物根系可以从水势在-30kPa到-100kPa之间的基质中吸收水分^[8]。在GVS上, 当植被根系吸力大于复合生长基质的基质吸力, 植被时即可从其中汲取水分。土工布的基质吸力与土壤相似, 可以表示为含水量的函数^[9], 因此可以通过调节灌溉频率和控制土工布的干湿循环来控制GVS的基质吸力, 进而使GVS能够持续向植被供水, 如图2所示。

GVS具备较好的透水能力, 同时可以通过灌溉频率调节基质吸力(持水性能), 保证持续为植被供水; 此外, GVS基层所采用的土工合成材料以PET为原材料, 具备良好的化学稳定性和酸碱稳定性, 能够长时间支持植被的生长; 同时, GVS具备足够的孔隙率和透气性, 允许植被根系发展和呼吸。综上, GVS可以作为植被生长基质以维持植被的萌芽和生长。因此GVS有望在工程高陡边坡上培育植被, 实现生态修复效果。本文通过一系列室外植被种植实验探索了GVS的可行性, 以及植被朝向、灌溉量和可降解覆盖层对植被生长的影响。

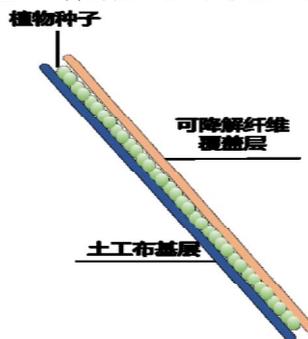


图1 GVS结构示意图

Fig 1 GVS structure diagram

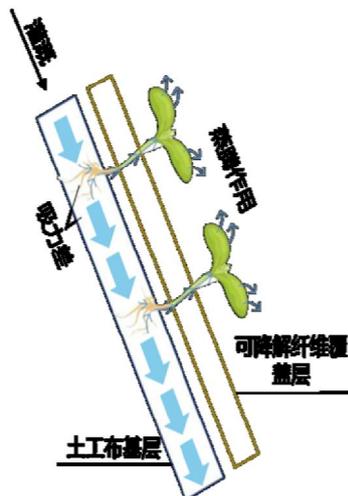


图2 GVS的植物吸水原理图
Fig 2 Plant water absorption by GVS

1.2 实验设计

复合基质植被生长实验开展于深圳大学汇星楼停车场入口处 (22° 32'07.8"N 113° 56'10.1"E)。实验地区属于亚热带季风气候, 全年高温多雨, 全年平均气温为 22℃, 同时受季风影响, 全年降雨集中在 4-9 月, 平均降雨量 1944mm。本研究设置 6 个尺寸为 0.5m × 1m 的实验样品和 2 个 1m × 2m 的实验样品, 为模拟高陡边坡的坡面材料和角度, 上述样品被放置于坡度为 75° 的钢板或亚克力板上, 由定时滴灌系统从样品上沿进行灌溉, 灌溉频率分别为每 3 小时灌溉 3 分钟。钢板底部安置集水槽, 多余水分被回收并再利用, 如图 4 所示。所有复合基质所采用的有纺土工布层由珠海 xx 公司定制, 克重为 730g/m², 抗拉强度为 300 kN/m。小尺寸实验植被选取台湾草与大叶油草混合(种子质量比为 1:1), 大尺寸实验植被选取大叶油草。可降解覆盖层分别为黄麻网和黄麻网结合椰棕丝, 其中黄麻网克重为 300 g/m², 孔径为 0.5mm × 0.5mm, 由可降解植物纤维黄麻编织而成, 椰棕丝为椰子外壳提取的丝状物质。

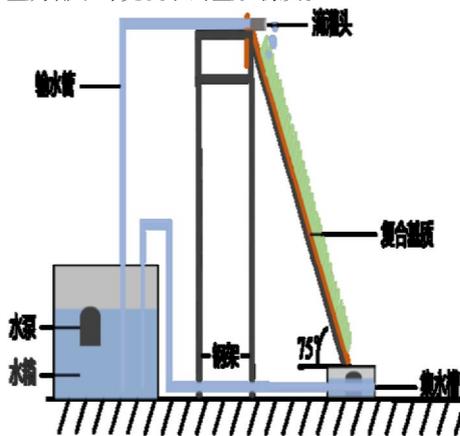


图3 实验设备示意图
Fig 3 Schematic diagram of experimental equipment

1.3 实验数据采集方法

本研究主要目标为验证复合植被生长基质在高陡硬地边坡上的可行性, 并探索灌溉量, 可降解覆盖层, 以及朝向对植被生长的影响。其中可行性验证以植被萌芽及生长为主要因素, 通过照片记录及视觉观察得出结果。而灌溉量、可降解覆盖层、朝向对植被生长的影响, 以植被茎叶长度为参数进行比较。

每五天进行一次植被照片记录及视觉观察, 观察并拍照记录各阶段植被生长情况。同时进行植被茎叶长度的记录, 复合基质上随机选取 10 株植物进行茎叶长度的测量, 后取茎叶长度

的平均值, 代表样品植被的生长情况。实验条件见表 1。表 1 实验样本配置

Table 1 Configuration of experimental samples

样本 ¹	朝向	覆盖层			日灌溉量 L/m ²	面积 m ²
		表层	中层	底层		
A1	西	黄麻网			10.80	0.5
A2	西	黄麻网			7.20	0.5
A3	西	黄麻网			3.60	0.5
A4	西	黄麻网	椰棕丝	黄麻网	10.80	0.5
A5	西	黄麻网	椰棕丝	黄麻网	7.20	0.5
A6	西	黄麻网	椰棕丝	黄麻网	3.60	0.5
B1	东	黄麻网	/	椰棕丝	2.25	2.0
B2	东	黄麻网			2.25	2.0
B3	西	黄麻网	/	椰棕丝	2.25	2.0
B4	西	黄麻网			2.25	2.0

¹: 编号 A 为小尺寸实验样品, 编号 B 为大尺寸实验样品

2 结果与讨论

2.1 GVS在高陡硬地边坡上的可行性

为验证复合植被生长基质在高陡硬地边坡上的可行性, 进行小尺寸及大尺寸植被生长实验, 每隔 5 天进行照片记录、视觉观察和植被茎叶长度记录。各组实验都进行了照片记录和植被茎叶长度记录, 但由于实验样品数量较多, 小尺寸实验中, A1 的植被生长情况最差, A6 的植被生长情况最优, 因此选取 A1、A6、B1、B2、B3 和 B4 组 65 天的植被生长情况照片进行可行性分析。

通过观察植被外观特征, 对其整体及局部细节的全面审视, 以评估植被存活和生长状况。通过对植被的连续监测, 可以视觉观察到根根首先伸出种皮, 形成初生根, 并迅速向下生长, 种子胚芽伸出种皮, 形成茎和叶的原始体, 证明复合植被生长基质的种子大部分都顺利萌芽生长, 进入幼苗形成阶段。而后根系和茎叶进一步发育生长, 叶片逐渐展开并增大面积, 茎干则逐渐加粗并伸长以支撑叶片和后续的生长。后续植被进入生长旺盛阶段, 植物的茎干显著伸长并加粗, 产生更多的分枝, 长出新的更大更绿的叶片。此时植被呈现出鲜亮的绿色, 具有自然的光泽, 整体富有生机, 小部分出现枯黄、灰暗或异常的颜色(如白斑、黑斑等)。叶片形状、大小和排列方式符合大叶油草(叶鞘松弛, 基部者互相跨复, 压扁, 呈脊, 边缘质较薄, 近鞘口处常疏生毛)和台湾草(叶鞘无毛, 紧密裹茎; 叶舌膜质, 长约 0.3 毫米, 顶端碎裂为纤毛状, 鞘口具丝状长毛)的正常特征, 且叶片质地具有一定的厚度和韧性, 小部分出现干瘪、易碎的情况。因此通过 65 天的连续观测, 在 75° 陡坡度情况下, 各实验样品植被在复合基质上顺利萌芽生长, 并且大面积覆绿, 验证了复合植被生长基质在高陡硬地边坡上的可行性。

2.2 灌溉量对植被生长情况的影响

A 区域为 75° 小尺寸植被实验, 草种均为台湾草和大叶油草, 放置于 75° 的钢板上。如图 5 所示, 其中 A1 和 A4 为灌溉水量 10.8L/m² 实验样本, A2 和 A5 为灌溉水量 7.2L/m² 的实验样本, A3 和 A6 为灌溉水量 3.6L/m² 的实验样本。

如图 4 所示, 25 天的茎叶长度曲线没有明显的下降趋势, 说明灌溉水量对萌芽幼苗阶段的植被生长几乎没有影响。而 45 天和 65 天的植被茎叶长度曲线有显著的下陷趋势, 各组植被茎叶长度由于灌溉量的影响, 出现显著差别, 体现为植被茎叶长度 3.6L/day > 7.2L/day > 10.8L/day。同时, 灌溉量对植被生长速率有一定的影响, 如图 5 所示, 随着灌溉量的增加, 植被生长速率降低, 体现为植被生长速率 3.6L/day > 7.2L/day > 10.8L/day。说明

适宜的灌溉能更好的促进植被的生长，而过量的灌溉会使复合基质长期处于湿润状态，导致植被根部长期接触湿润的基质，抑制植物根系的呼吸，造成植物根系受损，从而降低植物对水分和养分的吸收能力，影响植物正常生长和发育。

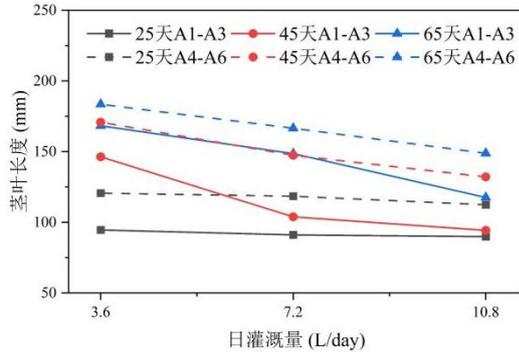


图4 不同灌溉量植被茎叶长度图

Fig 4Stem and leaf length map of vegetation with different irrigation rates

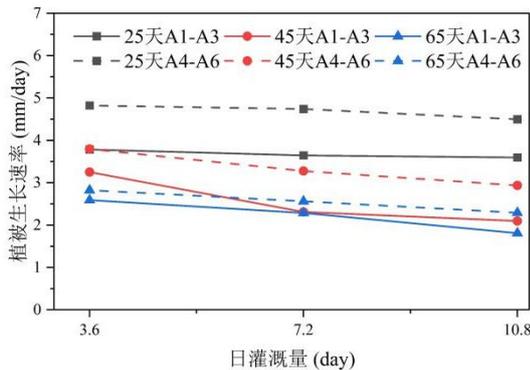


图5 不同灌溉量植被生长速率图

Fig 5Growth rates map of vegetation with different irrigation rates

2.3 可降解覆盖层对植被生长情况的影响

如图5所示 A1、A2、A3均为以黄麻网为覆盖层的样本，A4、A5、A6以黄麻网+椰棕丝+黄麻网为覆盖层的样本。B区域为75°大尺寸植被实验，植物品种均为大叶油草，放置于75°的亚克力板上，如图6所示 B1、B3覆盖层为椰棕丝+黄麻网，B2、B4覆盖层为黄麻网。

如图6和图7所示，在0-20天内，在灌溉量相同的条件下，虚线代表的以黄麻网+椰棕丝+黄麻网为覆盖层的植被茎叶长度和生长速率显著大于实线代表的黄麻网为覆盖层的植被茎叶长度和生长速率，说明充分湿润的GVS覆盖层及避免紫外线暴晒的阴凉环境可以使植物的更好的萌芽及生长。在20-65天内，以黄麻网为覆盖层的样品中，A3植被茎叶长度显著优于A2和A1，A2和A1植被茎叶长度差距较小，而以黄麻网+椰棕丝+黄麻网覆盖层的各组植被差异较为明显，其中A6优于A5，A5优于A4。同时，黄麻网为覆盖层的植被生长速率各组差异较小，以黄麻网+椰棕丝+黄麻网为覆盖层的植被生长速率差异明显。可能是可降解覆盖层为植被提供阴凉的生长环境，使基质的水分蒸发和植被的蒸腾作用受阻，导致更多的水分滞留在基质中，从而使植被根系处于过湿的环境中，阻碍植物根部的呼吸，抑制植被的生长，因此拥有可降解覆盖层的植被生长情况差异更为明显。拥有覆盖层的植被生长情况明显优于无覆盖层的植被，说明可降解覆盖层能促进植被的生长，灌溉量越大的样品，覆盖层对植被的生长影响越大。

如图8和图9所示，在0-20天内，B1与B2，B3与B4植被茎叶长度曲线有重合部分，拥有覆盖层的B1和B3植被生

长情况并不明显优于无覆盖层的B2和B4植被生长情况。而生长速率曲线也没有明显的差异，可见此时覆盖层对大尺寸陡坡度植被生长影响较小，但在20-65天内，B1和B3的植被茎叶长度逐渐大于B2和B4的植被茎叶长度。B1和B3的生长速率也逐渐大于B2和B4组的生长速率，说明可降解覆盖层可以为植被提供一个适宜生长的环境，从而对植被生长有显著影响，与小尺寸陡坡度植被生长实验结论一致。

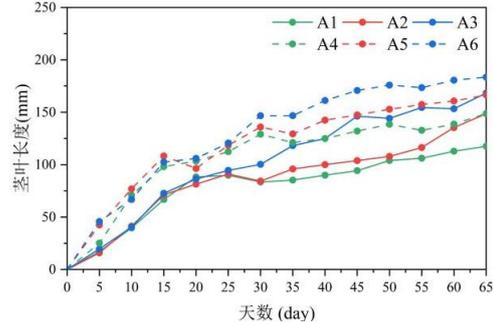


图6 小尺寸植被茎叶长度图

Fig 6Stem and leaf length maps of vegetation with different covers at small sizes

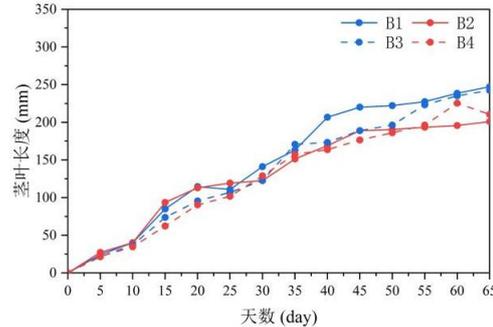


图7 大尺寸植被茎叶长度图

Fig 7Stem length map of large-size vegetation with different orientations

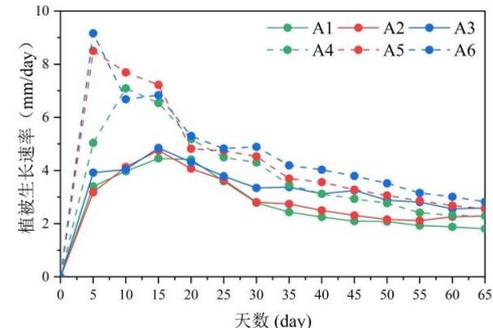


图8 小尺寸植被生长速率图

Fig 8Growth rates map of small-size vegetation

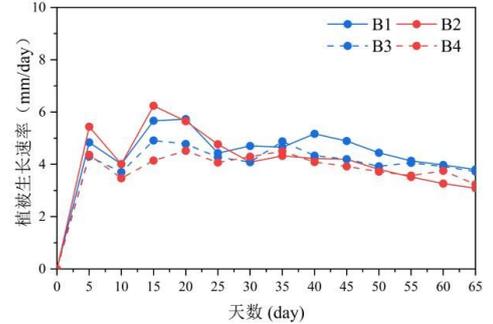


图9 大尺寸植被生长速率图

Fig 9Growth rates map of large-size vegetation

3 GVS 独特生态修复机理与应用挑战

3.1 GVS独特生态修复机理

与传统修复技术依赖土壤不同, GVS 技术通过土工布和可降解纤维的综合结构, 不需要依赖天然土壤, 即可在硬质边坡(如岩石、混凝土)上实现生态修复。如图 10 所示, GVS 生态修复技术以土工布作为基层, 可降解纤维作为覆盖层, 植物种子通过附着剂固定于二者之间。其中土工布具备良好的抗拉强度与化学稳定性, 这种材料可以在极端环境下保持较长的使用寿命, 同时长期保持其物理和化学性能。可降解覆盖层为种子提供了充足的湿润环境, 基质优良的导水性和持水性, 为植被提供持续的水源供应, 基质适当的孔隙度, 为植被根系提供充足的生长空间和氧气交换。由可降解覆盖层为植被种子提供充分湿润和避免阳光直射的阴凉环境, 使种子顺利萌芽生长, 形成初生根, 并迅速向下生长, 进入幼苗形成阶段。而后植被根系能够自然地在水源生长, 穿透或在土工布内部发育, 进一步增加了植被在高陡硬地边坡上的稳定性, 减少了土壤侵蚀风险。植被根系持续不断的从基质吸收水分, 使茎叶进一步发育生长, 叶片逐渐展开并增大面积, 进入生长旺盛阶段。期间, 植被通过光合作用吸收二氧化碳, 释放氧气, 有效缓解温室气体积累的环境压力, 通过蒸腾作用, 释放水蒸气, 有效降低局部温度。

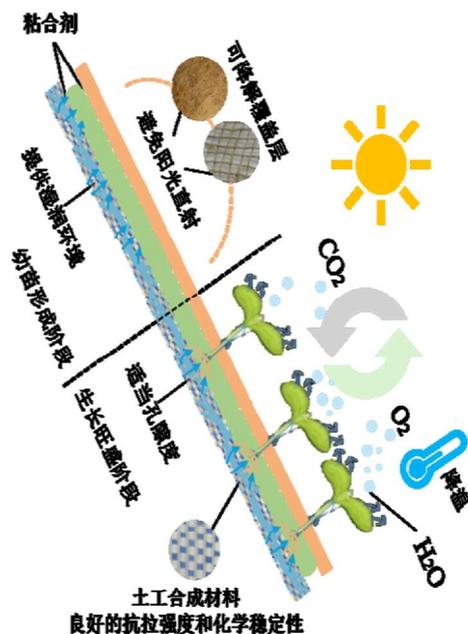


图 10GVS 生态修复机理图

Fig 10GVS ecological restoration mechanism diagram

4 结论

本研究提出一种用于高陡硬地边坡生态修复的土工合成材料植被生长基质。为评估该材料在高陡硬地边坡生态修复的可行性, 并为后续 GVS 高陡硬地边坡生态修复研究提供数据支撑, 对种植于土工合成材料植被生长基质的植被进行 65 天的连续监测, 对在不同实验条件下的植被生长情况进行分析, 结果表明:

1. 该材料在高陡硬地边坡的生态修复是可行的。在高陡的斜坡上, 无论是小尺寸陡坡度植被生长实验, 还是大尺寸陡坡度植被生长实验, 种植于 GVS 的植被大多都完整经历萌芽幼苗期, 顺利进入生长旺盛期, 植被生长形成稳定的根系和成熟的

茎叶, 达到较好的绿化效果。

2. 适宜的灌溉量和可降解覆盖层可为植被创造充分湿润和避免阳光暴晒的环境, 促进植被的萌芽和生长。

3. 提出 GVS 生态修复机理, 改变传统修复技术依赖土壤的情况。

参考文献:

- [1]Shen Y, Li Q, Pei X, et al. Ecological restoration of engineering slopes in China—A review[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5354.
- [2]张国,郑春燕,李钰飞,等.喀斯特地区石漠化生态修复对土壤生物多样性的影响[J].生态学报,2023,43(01):432-440.
ZHANG Guo,ZHENG Chunyan,LI Yufei,et al. Impact of ecological restoration of desertification in karst areas on soil biodiversity[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(01):432-440. (in Chinese)
- [3]Yu K, Duan C, Chen B, et al. Ecological restoration effectiveness assessment based on social media analytics: A case study of Yongding River, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448: 141604.
- [4]Xu Y, Guo L, Mao H H. Automatically identifying the vegetation destruction and restoration of various open-pit mines utilizing remotely sensed images: Auto-VDR[J].Journal of cleaner production, 2023, 414(Aug.15):137490.1-137490.13.
- [5]汪益敏,陶玥琛,程致远,等.高速公路路暂边坡客土喷播的长期防护效果[J].生态环境学报,2021,30(08):1724-1731.DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.08.019.
WANG Yimin,TAO Yuechen,CHENG Zhiyuan,et al. Long-term protection effect of guest soil spraying on highway graben slopes[J].Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(08): 1724-1731.DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.08.019.(in Chinese)
- [6]刘昆珏,刘问,刘明西,等.路边坡黄麻植生袋的性能测试与稳定性分析[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(06):67-73.DOI:10.16843/j.sswc.2022.06.009.
LIU Kunjue,LIU Man,LIU Mingxi,et al. Performance test and stability analysis of jute planting bag on roadbed slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(06):67-73.DOI:10.16843/j.sswc.2022.06.009. (in Chinese)
- [7]刘黎明,宋岩松,钟斌等.植被混凝土生态修复技术研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(03):916-927.
LIU Liming,SONG Yansong,ZHONG Bin et al. Research progress of ecological restoration technology of vegetated concrete[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(03):916-927. (in Chinese)
- [8]Taylor S A, Ashcroft G L. Physical edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils[M]. 1972.
- [9]Lin C, Zhang X, Han J. Comprehensive material characterizations of pavement structure installed with wicking fabrics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(2): 04018372.
杨庚鑫(1986—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向从事水电工程技术及管理工作,单位:国能大渡河流域水电开发有限公司沙湾水电建设管理分公司。
课题名称:沙坪一级水电站基于复合基质的生态边坡修复,编号:892-02688