# 湿喷植被混凝土生态护坡技术在水渠边坡工程中的应用

叶建军[1], 陈阳阳[1], 黄 涛[2]

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 武汉康习环保科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘 要**: [目的] 验证湿喷植被混凝土生态护坡技术的先进性与实用性,为工程边坡生态防护提供参考。[方法] 将湿喷植被混凝土生态护坡技术应用于湖北省鄂州市花马湖水系连通渠护坡工程,现场观测了护坡和水土保持效果、植物盖度、植株密度、植物平均高度以及物种多样性指标。[结果] 湿喷植被混凝土生态护坡技术能促使边坡稳定。所用基材能较好地附着于坡面,未出现冲沟和滑塌,水土保持较好,成功解决了基材可喷射性和坡面附着性之间的根本矛盾;1 个月后坡面整体植被覆盖率达到 90%以上;缓坡区的 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数与陡坡区均较为接近,但与自然边坡存在差异;湿喷综合成本比干喷节约 5%~15%。[结论] 湿喷植被混凝土生态护坡技术作为干喷植被混凝土生态护坡技术的升级版,具备显著的先进性,能用于工程边坡的生态防护。

**关键词**: 湿喷; 植被混凝土; 岩石边坡; 生态护坡; 施工工艺

**文献标识码**: B **文章编号**: 1000-288X(2020)03-0228-07 **中图分类号**: S157.9

**文献参数**: 叶建军, 陈阳阳, 黄涛. 湿喷植被混凝土生态护坡技术在水渠边坡工程中的应用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 228-234. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200623.001; Ye Jianjun, Chen Yangyang, Huang Tao. Application of ecological slope protection technology of wet-spraying vegetation-compatible concrete in channel slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 228-234.

# Application of Ecological Slope Protection Technology of Wet-Spraying Vegetation-Compatible Concrete in Channel Slope

Ye Jianjun[1], Chen Yangyang[1], Huang Tao[2]

(1. *School of Civil Engineering and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei* 430068, *China*; 2. *Wuhan Kangxi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei* 430000, *China*)

**Abstract**: [Objective] The advancement and practicality of wet-spraying vegetation-compatible concrete (VCC) were studied to provide a reference for ecological protection of engineering slopes. [Methods] The application of the new technology in the slope protection of a channel connected to Huama Lake in Ezhou City, Hubei Province, was presented. The effects of slope protection and soil and water conservation were observed. Furthermore, the plant coverage, plant density, average plant height, and species diversity index were tested on site. [Results] The technology could keep the slopes remained stable. The VCC substrate could adhere well to the slope surface, without forming gullies and slumps, with good soil and water conservation. The fundamental contradiction between the spraying of the VCC substrate and its adhesion to the slope surface was successfully solved. One month after the construction, the overall vegetation coverage of the slope reached more than 90%. The Shannon-Wiener diversity index, the Pielou evenness index, and the Simpson dominance index of the vegetation in the gentle-slope area were similar to those in the steep-slope area, but there were differences from the natural slope. The overall cost of the new technology (wet-spraying version) was 5%~15% lower than that of the old one (dry-spraying version). [Conclusion] As an upgraded version of dry-spraying VCC, this new technology shows significant advancements and can be used for ecological protection of engineering slopes.

**收稿日期**: 2019-10-31 **修回日期**: 2020-03-31

**资助项目**: 国家重点研发计划项目"西南水电高坝大库梯级开发的生态保护与修复技术"(2016YFC0502208); 中铁十六局横向科研项目(4201/00324)

**第一作者**: 叶建军(1974—),男(汉族),湖北省英山县人,博士,教授,主要从事生态护坡、屋顶绿化及绿色拆除爆破研究。Email: 715470323@qq.com。

**Keywords**: wet spraying; vegetation-compatible concrete; rock slope; ecological slope protection; construction technique

大规模工程建设形成的工程边坡,带来了生态环境破坏和地质灾害隐患。对边坡进行防护的同时修复坡面生态系统,近年来成为工程界努力追求的目标。这催生了一个新的领域——生态护坡。在过去的 30 a 多时间里,伴随大规模基础建设,国内工程技术人员在借鉴国外先进经验的基础上,开发出了种类繁多的生态护坡新技术,如客土喷播技术、厚层基材喷播技术、植被混凝土生态护坡技术(初称植被混凝土护坡绿化技术)、防冲刷基材生态护坡技术、液压喷播护坡技术、框格梁填土护坡技术、喷混植生护坡技术、植生带生态防护技术、三维植被网护坡技术、土工格室生态护坡技术等[1]。其中,2000 年前后三峡大学许文年等[2]、王铁桥等[3]发明的植被混凝土(vegetation-compatible concrete,VCC)生态护坡技术是其中杰出代表。该技术是将水泥、壤土、有机质、植物种子、肥料及植被混凝土添加剂按配比混合得到植被混凝土基材(简称基材),再利用喷射机喷射到需要生态防护的边坡(一般要先在坡面施工锚杆和挂网)上,最后洒水养护。该技术自问世以来一直采用干喷工艺(使用干式喷锚机),已大规模应用在各类生态护坡工程中[4]。通过大量工程实践,发现该技术(干喷工艺)具有施工机械设备易获得(可利用现有干式喷锚设备,不必专门开发机械设备)、基材喷层护坡性能和抗冲刷性能良好的优点;但也存在基材板结、pH 值较高、部分植物发芽率低的缺点。另外,干喷工艺固有的缺点—效率低、粉尘污染大、喷枪手劳动强度大和安全风险高也无法避免。虽然过去的 10 a 多期间陆续开发了一系列专利技术(如改进型植被混凝土绿化添加剂制备方法[5],一种植被混凝土改良型微生物菌剂及其制备方法[6]等),克服了原有技术的部分缺点(如基材板结和发芽率低),但干喷工艺固有的缺点一直存在。

为了克服植被混凝土生态护坡技术干喷工艺存在的问题,扩大该技术的应用范围,我们通过借鉴湿式客土喷播工艺[7],改进植被混凝土基材配方和开发新型添加剂等技术途径,开发了湿喷植被混凝土生态护坡技术[8]。本文介绍了该发明的主要技术特征和首次在水渠边坡治理工程中的应用情况,以期验证其先进性和实用性,为工程边坡生态防护提供参考。

# 1　材料与方法

## 1.1　湿喷植被混凝土生态护坡技术

湿喷植被混凝土生态护坡技术在原有植被混凝土基材配方、植被混凝土添加剂、喷射机械等方面进行了改进,湿喷植被混凝土的配方见表 1,该技术相对于原有技术的主要区别见表 2。

**表 1　新拌湿喷植被混凝土配方**

| 材 料 | 基层用量 | 面层用量 | 作 用 | 说 明 |
|---|---|---|---|---|
| 壤 土 | 0.2～0.6 $m^3$ | 0.2～0.6 $m^3$ | 为植物生长提供基本条件 | 选用表土,取土深度≤3 cm,去除≥0.75 cm 砂砾 |
| 水 泥 | 20～50 kg | 0～30 kg | 增强湿喷基材的强度和抗冲刷性能 | 选用普通硅酸盐水泥,水泥熟料碱含量≤ 0.6% |
| 湿喷植被混凝土添加剂 | 15～40 kg | 0～25 kg | 改善基材的施工性能,调节基材 pH 值、土壤结构和养分供给 | 专利产品 |
| 有机质 | 0.1～0.15 $m^3$ | 0.1～0.2 $m^3$ | 改善基材结构,增加养分和喷层整体性 | 选用碎麦草、碎稻草、稻壳、酒糟或者锯末等材料 |
| 长效肥 | 0.4～0.8 kg | 0.4～1.2 kg | 改善湿喷基材后期营养状况 | 一般使用长效缓释复合肥 |
| 普通复合肥 | 0.3～0.7 kg | 0.5～0.8 kg | 保证湿喷基材前期养分供给 | 一般使用速效肥料 |
| 土壤粘合剂 | 0.1～0.3 kg | 0.2～0.3 kg | 降低湿喷基材的流动性和提高附着性 | 一般选用水溶性粘合剂 |
| 植物种子 | 0 g | 100～200 g | 提供先锋物种 | 灌木与草本种子分别占 60%,40%(质量比) |
| 水 | 适 量 | 适 量 | 拌合基材,使其具备可施工性能 | 同时满足基材的喷射距离和附着坡面要求下确定用量 |

表 1 给出的湿喷植被混凝土配方选用材料常见,多数材料是当地材料,能够有效控制建设成本。配方中用量最大的是壤土,在使用前需要了解壤土的类型及其他性质(含水量、pH 值、养分含量),以便优化配方设计。湿喷植被混凝土添加剂为研发的新型专利产品[9],经过多道工序加工制备而成,能显著改善植被混凝土基材的施工性能、土壤结构及 pH 值等性能。该湿喷基材配合锚杆、铁丝网或钢筋网等坡面防护体系,共同为边坡创造稳定的生态系统提供基本物质基础。

**表 2 植被混凝土干喷工艺与湿喷工艺对比**

| 项 目 | 干喷工艺 | 湿喷工艺 |
|---|---|---|
| 主要流程 | 基材拌合料搅拌均匀后,用压风通过管道输送到喷嘴处与水接触后喷射到边坡上 | 基材拌合料加水搅拌均匀后,经泵送将混合料输送到喷嘴处,直接喷射到坡面或在喷嘴处接入压风喷射到边坡 |
| 喷射分层 | 分面层和基层两层喷射 | 多次分层喷射,每次分层厚度 1～2 cm |
| 基材配方 | 壤土、水泥、有机质、肥料、种子、绿化添加剂 | 壤土、水泥、湿喷植被混凝土添加剂、有机质、长效肥、普通复合肥、土壤黏合剂、种子 |
| 添加剂 | 主要由多种矿粉、保水剂、硫磺粉、引气剂和硫磺细菌组成,调节基材 pH 值,活化基材 | 主要由多种菌种、石膏粉、矿粉组成,改善基材施工性能和营养状况和 pH 等 |
| 施工效率 | 效率较低,≤200 $m^2$/d | 效率高,≥500 $m^2$/d |
| 安全风险 | 喷枪手需在陡坡上手持喷头施工,危险性较大 | 湿喷机上有供操作人员工作的平台,远离边坡,危险性很小 |
| 劳动强度 | 上料和喷射作业劳动强度大 | 无劳动强度大的操作 |
| 操作环境 | 粉尘污染大 | 无粉尘污染 |
| 设备成本 | 需要配合空压机联合使用,使用进口设备时成本较高 | 设备成本与干喷工艺使用的设备相比略低 |
| 主流设备 | PZ-5 干式喷射机,动力泵为转子式 | HKP-125 湿式喷播机,动力泵为离心泵 |

注:施工效率数据来源于 PZ-5 干式喷射机与 HKP-125 湿式喷播机;干喷工艺中的绿化添加剂配方引用专利"改进型植被混凝土绿化添加剂制备方法"[5]。

通过上表两种施工工艺对比表明,在基材配方上,湿喷植被混凝土配方在原有干喷植被混凝土配方的基础上,使用长效肥替代部分普通复合肥改善湿喷基材后期的营养状况;加入草纤维及土壤黏合剂提高了基材整体性与附着性;以湿喷植被混凝土添加剂替代以往的绿化添加剂不仅能有效改善基材的 pH 值和养分供给,还能显著提高新喷基材的早期黏聚性,防止基材脱落,提高植物抗旱能力,加速边坡植被恢复进程并建立稳定坡面生态系统。

相对于干喷工艺中喷枪手需要用安全装置站在陡坡上手持喷头喷射植被混凝土基材,湿喷工艺中的湿喷机械上有专供操作人员工作的平台,湿喷的泥浆状基材可以喷射数 10 m 远,操作人员不必上到坡面,因而湿喷操作更加轻便和安全,几乎没有喷射灰尘。湿喷机械设备已实现国产化,成本比干喷低 10%～15%;湿喷每天喷射量≥500 $m^2$/d,施工效率是干喷的 2.5 倍以上,节约人工费 5%～10%,综合经济成本可节约 5%～15%。这表明,对于路上边坡(或施工平台以上的边坡),湿喷工艺占有明显的优势。

在湿喷基材喷射施工中,存在一对根本的矛盾需要解决,即:为保证基材喷射不堵管和喷射距离远,需要基材黏度小、流动性大;而为了使基材在坡面附着,需要新喷基材的黏度大和流动性低。这对矛盾必须妥善解决,才能让湿喷植被混凝土技术有广泛的应用(特别是可用于陡坡)。本发明通过以下措施解决:在湿喷基材中使用吸水型土壤黏合剂,这种有机土壤黏合剂连同无机胶凝材料——水泥、石膏(主要是水化作用时产生的阳离子)共同作用,使分散在水中的黏土颗粒发生絮凝,在保证基材拌合物的有合适流动性的前提下,显著提高了新喷基材的附着性;在基材中加入了短植物纤维,能显著提高新拌基材的整体性;在湿喷植被混凝土添加剂中加入适量石膏,利用石膏本身的快速凝结与硬化、铝酸三钙、硅酸三钙的快速水化生成的凝胶以及石膏与硅酸三钙、铝酸三钙反应生成钙矾石,迅速降低新喷基材的流动性;伴随着水泥中硅酸钙的继续水化反应和游离水分的蒸发,进一步提高新喷基材的黏聚性和抗侵蚀性。采用多次分层施工工艺,减少每次喷射厚度,使新喷基材能黏结在硬化后的喷层上,且新喷基材中水分能被旧喷层吸收一部分,降低新喷层的流动性。这些措施联合作用解决了湿喷工艺的流动性与黏聚性之间的根本矛盾。后期的工程应用也验证了这个观点。

### 1.2 新技术在花马湖水渠边坡工程的首次应用

1.2.1 工程概况 花马湖水系连通渠连接花马湖上湖、中湖,位于鄂州市沙窝乡新湾村。渠道总长度 1 004.2 m,宽度 40 m,渠底至坡顶截水沟高度在 5～67 m 之间,边坡坡度在 35°～80°之间。该连通渠左岸有施工料场,右岸毗邻当地池塘,上游与下游各有施工便道穿行,上游设置有闸口,下游设有涵管,防汛排涝。根据甲方要求,边坡覆绿植物以草灌为主,草本、灌木、花卉相结合,施工完成后 3 个月内覆绿率达到 90%。该工程的典型断面见图 1。

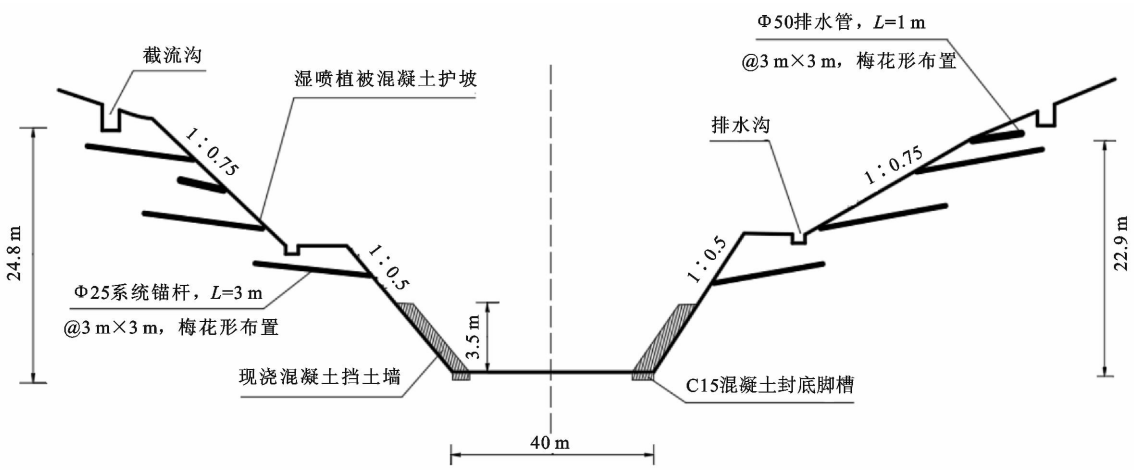



**图 1　花马湖水渠边坡绿化工程 YJ0+250 桩号断面图**

1.2.2　自然地理概况

(1) 气候条件。该区域位于亚热带季风性湿润气候区,属鄂东南和鄂南的沿江平原气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨,梅雨期较短。年均气温 16.8 ℃,年均降水量 1 282.8 mm,年均无霜期 266 d,常年主导风向为东南季风。

(2) 水文地质条件。本水渠设计蓄水位深度为 3.5 m,在每年 6—10 月汛期来临时蓄水排洪;地形主要以东西走向的低山丘陵为主,境内主要有白雉山、峰尖子山和早山;地貌较为单一,以丘陵地貌为主,遍布有较多的稻田、棉花地以及少数的沟渠、池塘,表层均为耕植土与腐植土;坡面岩石以含泥质长石石英砂岩层、风化灰岩、含泥质粉砂土岩层为主,岩层破碎、风化严重,局部存在倒坡现象。

(3) 植被状况。该区域土壤肥沃、气候适宜,草本、灌木、乔木、花卉类植物众多,整体植被覆盖率高达 90%,对花马湖流域典型植被进行调查,主要有以下植被类型:①乔木。有刺槐、杨、柳、马尾松、桑、马尾松、香樟、构树、臭椿、广玉兰、油茶、山鸡椒、冬青、楠木、苦楝、白玉兰、枇杷、合欢、栾树、柿、泡桐树、侧柏、水杉、榆树、槭树等;②灌木。有牡荆、连翘、蔷薇、紫荆、火棘、胡枝子、杜鹃、盐肤木、多花木兰、小叶女贞、黄杨、枸骨、黑莓、乌药、木槿、紫丁香、夹竹桃、无花果、柠条、紫穗槐等;③草本。有马唐、狗尾草、牛筋草、青蒿、茵蒿、白茅、芭茅、竹、黄背草、马鞭草、夏枯草、益香草、阴行草、车前草、水菖蒲、芒草、香附子、鬼针草、芍药、野菊花、鸡冠花、紫罗兰等。

1.2.3　主要设计技术参数

(1) 生态护坡设计。连通渠边坡原设计采用喷 C20 混凝土护坡方式,后来考虑到生态环境保护及工程景观效果,决定渠底至 3.5 m 高程采用现浇混凝土挡土墙,3.5 m 以上(包括一级、二级平台)采用湿喷植被混凝土生态护坡。边坡设置坡顶截水沟及坡面排水沟,其内截面尺寸均为 60 cm×60 cm;在坡面打锚杆(包括长锚杆和短锚杆)挂铁丝网或钢筋网(钢筋网只在局部坡面使用,直径为 Φ6.5 mm 光圆钢筋,间隔 500 mm×500 mm),实现对边坡的防护;喷射植被混凝土基材喷层厚度 10～12 cm。

(2) 机械设备选择。施工现场选用的机械设备有:JS1000 强制式搅拌机,ZL930 型农用装载机,50 型震动筛土机,HKP-125 型湿式喷播机。它们搭配合理,施工效率高、用工较少,能够满足正常施工需求,节约施工成本。

(3) 基材配比。根据施工创面的特点和坡面立地条件,确定湿喷植被混凝土基材由壤土、水泥、湿喷植被混凝土添加剂、有机质、长效肥、普通复合肥、土壤粘合剂组成,包括基层和面层,基材配比为:基层(壤土 0.5～0.6 $m^3/m^3$,水泥 30～40 $kg/m^3$,湿喷植被混凝土添加剂 30～40 $kg/m^3$,有机质 0.12～0.15 $m^3/m^3$,长效肥 0.6～0.8 $kg/m^3$,复合肥 0.5～0.7 $kg/m^3$,土壤黏合剂 0.1～0.2 $kg/m^3$),面层(壤土 0.5～0.6 $m^3/m^3$,水泥 20～25 $kg/m^3$,湿喷植被混凝土添加剂 20～25 $kg/m^3$,有机质 0.1～0.12 $m^3/m^3$,长效肥 0.9～1.0 $kg/m^3$,复合肥 0.6～0.8 $kg/m^3$,土壤黏合剂 0.2～0.3 $kg/m^3$,植物种子 150～200 $g/m^3$)。

其中,有机质中草纤维的体积占 40%～50%,腐烂的稻壳或酒糟的体积占 50%～60%;草纤维采用长度为 20～80 mm 的碎稻草或碎麦草。土壤黏合剂选用聚丙烯酰胺,兼作保水剂。长效肥采用长效复合肥,其中氮磷钾含量分别占 37.5%,50%,12.5%;普通复合肥中氮磷钾含量分别占 50%,25%,25%。

(4) 植物选择与配比。依据恢复生态学的理论总结出的裸露的岩石边坡的生态修复规律[10-11],在进行植物配置时应遵循不同生态位的植物相搭配的原则,即深根和浅根植物相结合,草本和木本植物均兼顾,先锋和建群植物都使用。

根据上述植物配置原则及边坡植被对耐旱、耐寒、耐贫瘠要求,结合考虑市场供应,确定了使用植物种类为:多花木兰(*Indigofera amblyantha*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、白三叶(*Trifolium repens*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、早熟禾(*Poa pratensis*)、野花组合(俏江南)。植物种子在春夏秋冬季节对暖季型草种与冷季型草种用量进行了相应调整(必须指出的是,冬季和深秋施工时植物发芽率低,应尽量减少或避免),具体配比见表 3。

**表 3 植物种子配比** g/m²

| 季节 | 草本 | | | | | | | 灌木 | | | 乔木 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 早熟禾 | 狗牙根 | 高羊茅 | 黑麦草 | 白三叶 | 百日菊 | 紫花苜蓿 | 多花木兰 | 紫穗槐 | 盐肤木 | 刺槐 |
| 春季 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 6 | 6 | 3 | 2 |
| 夏季 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 1 |
| 秋季 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| 冬季 | 0 | 1 | 4 | 4 | 4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 |

(5) 湿喷植被混凝土生态护坡技术施工工艺。本项目的施工分两个阶段,第一阶段为施工长锚杆(局部钢筋网)护坡。待注浆完工后,开始第二阶段施工——湿喷植被混凝土施工。施工长锚杆护坡为成熟工艺,本文不详述。

湿喷植被混凝土生态护坡技术施工工艺流程:清理坡面→截排水施工和锚杆挂网施工→喷射植被混凝土→养护管理→竣工验收。由于清理坡面、截排水施工、锚杆挂网、养护管理、竣工验收等环节与以往干喷植被混凝土施工工艺并无显著差异,此处不再详细论述;仅在配置植被混凝土基材时与干喷工艺存在差别,具体为:①湿喷植被混凝土配制。按照给定的基材配比,将种植土先过网筛去除大于 0.75 cm 的砂砾,再将筛出的细土置入强制式搅拌机,加水拌合成泥浆,通过铁皮制作的溜槽流入客土喷播机料斗,然后加入水泥、有机质(草纤维、稻壳、酒糟)、长效肥、普通复合肥,充分拌合 2～3 min 使其均匀;最后将湿喷植被混凝土添加剂、土壤粘合剂、植物种子一起倒入料斗中搅拌,完成植被混凝土的配制。搅拌完成后的待喷时间不应超过 10 min。②喷射植被混凝土。植被混凝土喷层包括基层和面层,多次分层喷射,基层喷射 3～5 次,面层(含植物种子)喷射 1～2 次。使用容量为 7.2 m³ 的 HKP-125 客土喷播机喷射基材。喷射时间控制在 15 min 以内。

### 1.3 现场试验观测与指标计算

2019 年 3 月施工后持续观测护坡、水土保持和植物生长情况,期间的天气状况见图 2。

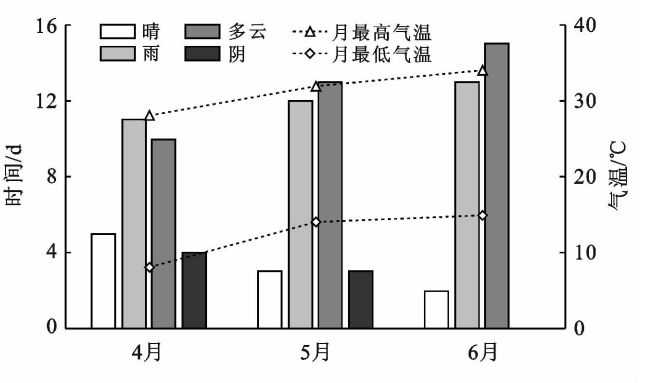



**图 2 施工期间天气状况**

湿喷基材喷射 3 个月后(即 2019 年 6 月)采用样方调研法[12],在人工边坡上选取两个典型坡面(陡坡和缓坡,大于 60°为陡坡,小于 40°为缓坡),在上、中、下坡面等不同坡位分别设置以个 1 m×1 m 的样地,每个样地竖向间距至少为 3 m,共选取 6 个样地,同时按照相同的方法在自然边坡选取样地。再统计人工边坡和自然边坡的植物类型、种类、数量,记录每个样方中植物的平均高度(选取测量 20 个样本取平均值)、植株密度(1 m² 内植物的数量)、植物盖度(使用手机拍照,利用 Photoshop 软件处理,植被覆盖度像素与整张照片像素的比值就是植被的盖度)等指标的具体情况。根据现场试验采集结果,依据计算公式计算相关指标[13-17],并利用 Excel 制作表格。

(1) Shannon-Wiener 多样性指数。是反映物种多样性的重要指标,其指数越大,说明物种数目越多,不确定性也越大,公式如下:

$$H=-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i \quad (1)$$

(2) Pielou 均匀度指数。反映样地中所有物种的分布状况,与丰富度有关,其指数越大,表明物种分布越均匀,公式如下:

$$J=\frac{-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i}{\ln S} \quad (2)$$

(3) Simpson 优势度指数。是对物种集中性的反映,其指数大,表明物种集中性高,公式如下:

$$D=1-\sum_{i=1}^{s}(P_i)^2 \quad (3)$$

式中:$i=1,2,3\cdots,s$ 为物种序号;$S$ 为群落内物种总数;$P_i$ 为第 $i$ 个物种的重要值比值。

## 2　结果与分析

### 2.1　护坡与水土保持效果分析

2.1.1　*护坡效果*　边坡在长锚杆(局部钢筋网)和植被混凝土喷层的防护下,未发生深层滑坡;坡顶未出现新的裂纹或既有裂纹扩展现象;长锚杆未出现折断和脱落;铁丝网没有破裂和下滑;湿喷基材能够稳固地附着于坡面,在雨天边坡坡面未发生浅层滑坡;坡脚设置刚性挡土墙(钢筋混凝土挡土墙),应力分布均匀,没有出现明显结构变形,保证了坡脚稳定;总体上,护坡效果显著,没有出现工程地质灾害现象。

2.1.2　*水土保持效果*　在施工后的 3 个月里,喷层先后经历过 4 次暴雨考验(最大一次降雨量大于 100 mm),经历几场暴雨后基材能够覆盖绝大多数坡面和铁丝网,仅在局部陡坡(如倒坡、坡面渗水处)处出现了喷层流淌和剥落,不能覆盖镀锌铁丝网的问题(后期通过引离坡面水流和补喷的方式加以补救)。坡顶截水沟拦截了山体汇聚的雨水,避免了坡面直接受水流侵蚀;从基材新喷到植物发芽期间,遭遇大暴雨时,坡面出现过轻微面蚀和细沟侵蚀(平均厚度约 1～2 mm)。但随着植物的快速生长,植物的茎叶越来越茂盛,坡面植被覆盖逐渐增强,雨水侵蚀逐步减弱;同时随着植物根系也对基材的加筋作用的增强,进一步增强了基材的抗侵蚀性。2 个月后坡面水土保持效果很好,大暴雨时,坡面径流保持清澈。

### 2.2　植被恢复效果与分析

2.2.1　*植被覆盖效果*　喷射施工 1 个星期后,缓坡区(小于 40°)高羊茅最先发芽,接着狗牙根、百日菊、紫花苜蓿、紫穗槐相继发芽。陡坡区(大于 60°)前期植物发芽率普遍较低,植物长势也低于缓坡区,但 1 个月后植被也能基本覆盖坡面,整体覆盖率达到 90%以上。整体的工程景观绿化效果较为美观,能与周围的自然景观融合在一起,达到了预期的植被恢复效果,见图 3。



**图 3　护坡植被恢复后状况**

2.2.2　*物种恢复效果*　在植物生长的过程中,发生了由基材壤土中携带草种或原地宿根或附近草种被风吹入坡面等本地植物入侵。主要入侵物种为稗草、狗尾草、藜、草木犀、凤仙花、商陆、竹、地肤、马唐、牛筋草、飞蓬、苎麻、黑麦草。这些本地物种虽一定程度上抢占了生存空间、土壤养分及水分,但也提高了坡面物种丰富度及物种多样性,避免坡面人工植物出现退化,利于早日建立稳定的适合当地气候的生态系统。根据以上试验观测数据与计算得到如表 4 结果。

**表 4　花马湖水渠边坡植被观测指标**

| 边坡类型 | 植物各项生长指标 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 植被盖度/% | 植物平均高度/cm | 植株密度(株/m²) | Shannon-Wiener 多样性指数 | Pielou 均匀度指数 | Simpson 优势度指数 |
| 缓坡区 | 95 | 9.4 | 35 | 0.604 1 | 0.337 2 | 0.972 0 |
| 陡坡区 | 90 | 7.2 | 28 | 0.596 2 | 0.332 7 | 0.977 3 |
| 自然边坡 | 97 | 11.9 | 43 | 0.577 1 | 0.218 7 | 0.887 1 |

从表 4 可知,施工 3 个月后,缓坡区的植被盖度、植物平均生长高度、植株密度明显高于陡坡区,植物中后期长势也更好;在 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数上缓坡区与

陡坡区接近，与自然边坡存在明显差异，说明边坡人工生态恢复难以在短时期内达到与自然边坡相同的状态。主要原因在于该边坡物种种类与数目和自然边坡存在差别，并且部分外来物种跟本地乡土植物相比适应性较差。可以预计，随着时间的推移，本地物种更多地侵入边坡，边坡生态系统的物种和结构将越来越接近当地生态系统。

## 3 结 论

（1）喷植被混凝土生态护坡技术作为干喷植被混凝土生态护坡技术的升级版，通过在配方、施工机械和施工工艺等多个方面的创新，解决了拌合基材可喷射性和新喷基材的坡面附着性的矛盾；具有施工工艺简单、施工效率高、粉尘污染小、安全性更高、造价更低的优点；其适用性和先进性经受了实际工程应用检验，可推广应用。

（2）花马湖水渠边坡采用湿喷植被混凝土生态护坡技术实现了边坡的防护和生态修复目标：边坡稳定；喷射施工 1 个月后植被基本覆盖坡面，整体植被覆盖率达到 90％以上，形成的工程覆绿景观与自然景观协调一致。施工 3 个月后入侵的乡土植物提高了坡面物种丰富度及物种多样性。

（3）在湿喷植被混凝土施工过程中，我们也遇到了以下突发情况和技术问题：有水施工，前期施工采用车辆运输客土喷播机，中后期水渠开始蓄水，车辆无法通行转而改用船舶施工。限于篇幅，用船施工的工艺将在随后的论文中进行详细介绍。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 方星. 矿山生态修复理论与实践[M]. 北京：地质出版社，2019.

[2] 许文年，王铁桥，叶建军. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术，2002(07)：35-36.

[3] 王铁桥，许文年，叶建军，等. 挖方岩石边坡绿化技术与方法探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版)，2003(02)：101-104.

[4] 张家明，陈积普，杨继清，等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J]. 水土保持学报，2019，33(5)：1-7.

[5] 韦书勇. 改进型植被混凝土绿化添加剂制备方法：CN102491836B[P]. 2012-06-13.

[6] 许文年，薛海龙，夏栋，等. 一种植被混凝土改良型微生物菌剂及其制备方法：CN106590672A[P]. 2017-04-26.

[7] 李虎. 曼大公路仙米自然保护区标段取土场边坡生态修复措施[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：109-113.

[8] 叶建军，陈阳阳. 湿喷植被混凝土生态护坡技术：CN110521503A[P]. 2019-12-03.

[9] 叶建军. 湿喷植被混凝土添加剂：CN110451837A[P]. 2019-11-15.

[10] 朱兆华，官昭瑛，徐国钢，等. 假俭草作为先锋植物在道路边坡生态修复上的应用[J]. 西北林学院学报，2017，32(5)：263-268.

[11] 朱兆华，赖涛，陈晓蓉，等. 受损边坡生态修复工艺选择、目标群落设计与效果评价[J]. 西北林学院学报，2017，32(3)：78-83.

[12] 朱晓勇，胡海波，鲁小珍，等. 太湖西区公路两侧植物物种多样性的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2006，30(3)：85-88.

[13] 王太平，杨晓明. 高速公路边坡植物群落物种多样性[J]. 西北林学院学报，2012，27(2)：230-234.

[14] 张艳，赵廷宁，杨建英，等. 高速公路不同边坡类型对植被恢复的影响[J]. 中国水土保持科学，2013，11(4)：80-85.

[15] 宋凤鸣，刘建华，钱瑭璜，等. 8 种乡土植物在边坡植被恢复工程中的应用[J]. 中国水土保持科学，2016，14(4)：134-141.

[16] 李晶，高照良，张小娟，等. 宝牛高速公路路域植被恢复效果调查分析[J]. 水土保持研究，2012，19(6)：100-104.

[17] 孙华方，李希来，金立群，等. 黄河源区人工草地植被群落和土壤养分变化[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：25-30.