

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(3):916-927.

LIU L M,SONG Y S,ZHONG B,et al.Research progress on ecological restoration technology of vegetation concrete[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(3): 916-927.

植被混凝土生态修复技术研究进展

刘黎明^{1,2,3}, 宋岩松^{1,2,3}, 钟斌⁴, 房士栋^{1,2,3}, 许文年^{1,2,3*}, 王一毅^{1,2,3}, 李明薇^{1,2,3}

1.三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 三峡大学

2.防灾减灾湖北省重点实验室, 三峡大学

3.三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心

4.福建永泰闽投抽水蓄能有限公司

摘要 生态护坡能有效减少工程建设所带来的一系列地质环境问题,如水土流失、山体滑坡等,作为常用生态护坡技术之一的植被混凝土生态修复技术经过不断的研究与应用已趋于成熟。阐述了植被混凝土生态修复技术的修复理论依据与技术研发历程;从基材配比、物种选择、施工工艺等方面介绍了植被混凝土生态修复技术的主要内容并阐述了技术优势;概述了植被混凝土生态修复技术的研究体系,从生境基材的物理、化学、微生物特性研究和护坡植物研究4个方面总结了技术的研究进展;最后分析了植被混凝土生态修复技术的待改进之处,并从施工工艺、养护措施和土壤改良等方面对植被混凝土生态修复技术的研究提出了展望。

关键词 植被混凝土;生态修复;物理特性;化学特性;生物特性;护坡植物

中图分类号:X171.4 文章编号:1674-991X(2022)03-0916-12 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210437

Research progress on ecological restoration technology of vegetation concrete

LIU Liming^{1,2,3}, SONG Yansong^{1,2,3}, ZHONG Bin⁴, FANG Shidong^{1,2,3},
XU Wennian^{1,2,3*}, WANG Yiyi^{1,2,3}, LI Mingwei^{1,2,3}

1.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University

2.Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University

3.Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area

4.Fujian Yongtai Mintou Pumped Storage Co., Ltd.

Abstract Ecological slope protection can effectively reduce a series of geological environmental problems caused by engineering construction, such as soil erosion and landslides. The vegetation concrete ecological restoration technology, which is one of the common ecological slope protection technologies in China, has become mature after continuous researches and applications. The theoretical basis of ecological restoration of vegetation concrete technology were discussed, the research and development experience of vegetation concrete technology were expounded. The main contents of vegetation concrete technology was introduced from the aspects of substrate ratio, species selection and construction technology, and the technical advantages were summarized. The research system of vegetation concrete technology was summarized and the research progress of vegetation concrete ecological restoration technologies was reviewed from four aspects of physical, chemical, microbial characteristics of habitat substrate and slope protection plants. The problems for improvement of vegetation concrete ecological restoration technology were analyzed, and the development prospects of vegetation concrete ecological restoration technology were proposed in terms of the construction technology, conservation measures and soil improvement.

Key words vegetation concrete; ecological restoration; physical characteristics; chemical properties; biological characteristics; slope protection plants

收稿日期:2021-08-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504902);国家自然科学基金项目(51979147)

作者简介:刘黎明(1983—),男,工程师,博士,主要研究方向为边坡防护与生态修复,liuliming@ctgu.edu.cn

* 责任作者:许文年(1960—),男,教授,博士,主要研究方向为地质灾害与生态修复研究,xwn@ctgu.edu.cn

近40多年来,中国经济快速发展,大量水利、市政、交通等基础设施兴建,在基础设施建设过程中经常会开挖大量的边坡,这些边坡如果不及时进行治疗,就会引起生态环境破坏,造成水土流失和土壤肥力减退,甚至导致地质灾害频繁发生^[1]。如何对裸露边坡进行生态恢复、有效控制水土流失,成为解决这一难题的关键。对于低缓土石边坡的生态修复治理,由于其修复要求不高,因此一些常用生态修复手段便能解决,如各类喷混技术、铺挂技术和加固填土类技术等^[2]。而对于高陡边坡的生态修复治理,由于大部分高陡边坡为岩质边坡,生境条件恶劣,种子很难附着其上,加之受坡面温差变化、日照、降水等外界因素影响,坡面力学性质不稳定,进行生态修复时较难实现长久的复绿效果^[3],因此高陡岩质边坡的修复治理一度成为边坡生态修复的难题。为实现高陡岩质边坡的生态修复,研究者们从基质改善、防护植被筛选等方面入手,结合工程防护和生态修复理念,经过长期试验与研究,开发了植被混凝土生态修复技术,有效解决了高陡岩质边坡的生态修复问题,并成功在实际修复中应用^[4],实现了在修复受损创面自然生态环境的同时具备显著的浅层防护作用,具有良好的工程、生态和景观效应。笔者详细介绍了植被混凝土生态修复技术的特点、研发历程与技术工艺,并分别从植被混凝土基材物理特性、化学特性、生物特性及植被混凝土护坡植物特性研究进展等方面进行了总结,以期为该技术的进一步推广应用提供参考。

1 植被混凝土生态修复技术特点与工艺

1.1 技术理论依据

植被混凝土生态修复技术是能广泛适用于各类土石边坡、硬化边坡、岩质边坡的生态修复技术,其生境基材是根据修复区域的地质环境、气候条件、土壤理化性质和生物特性等将水泥、土、有机物料、植被混凝土生态改良剂、护坡植绿种子等按特定比例均匀混合,然后通过喷射机喷射至坡面,与水一起形成的一层混合物^[5]。该技术的最大特点是在植生基材中加入了常规硬性材料水泥,因此形象地称此植生基材为植被混凝土。此项技术使喷播基材既有一定强度和抗雨水冲刷能力,达到防护作用,又满足了长期适应植物生长的生态修复要求,适用于45°~85°的各类边坡^[6]。先锋物种的加入能使坡面快速复绿,为本地物种的繁衍生长营造良好的生境条件,最终实现坡面稳定长久的生物群落。

边坡生态修复是在遵循自然规律的前提下,通

过人为作用对遭到破坏的高陡边坡生态系统进行重建或再生而实现其长久复绿效果的过程。植被混凝土生态修复技术的修复理论依据包括限制因子原理(找出生态系统的限制因子)、生态系统的结构理论(设计合理的物种时空搭配)、生态适应性原则(尽量采用本地物种进行生态恢复)、生态位理论(合理安排生态系统中物种及位置)、生物群落演替理论(人工调控生态系统演化方向和速度)、生物多样性原理(生物多样性能保证生态系统恢复后的稳定)^[7-9]等。在进行生态修复时,要先调查恢复区的自然生长条件,找出该系统的关键因子,保证系统合理的生态结构,同时要保证生物的多样性,避免引进生态位相同的物种,在群落演替理论指导下,控制待恢复生态系统的演替过程和发展方向,恢复或重建生态系统的结构和功能,并使系统达到自维持状态。

1.2 技术研发历程

边坡生态修复可定义为“用活的植物与非生命植物材料及土木工程技术相结合,以减轻边坡的不稳定性和侵蚀”^[10]。1633年,日本学者曾利用铺草皮、栽树苗的方式治理荒坡;到了20世纪30年代,这种生物护坡方法被引入欧美国家并推广应用;1953年,美国Finn公司率先开发出草种喷播机,实现了边坡植被恢复与重建的机械化;随后,英国发明了利用乳化沥青作为黏结剂的液压喷播技术,此后边坡生态修复技术飞速发展^[11]。

边坡生态修复技术的大规模应用在日本。1958年,日本京都大学研发了沥青乳剂覆盖膜养生绿化技术并应用于名古屋—神户高速路段路堑边坡,取得了良好的生态修复效果^[12]。1973年日本研发出了能应用于岩石边坡的纤维土绿化方法,成为日后厚层基材技术的雏形^[13]。随着时间的推移,日本不断对喷射技术进行改进与创新,开发出了诸如高次团粒绿化技术^[14]、连续纤维绿化技术^[15]、土壤菌永久绿化法^[16]等,形成了一套成熟的边坡生态修复技术系统,为日本构建稳定边坡生态修复技术体系奠定了良好基础。

我国在边坡生态修复技术方面的研究与应用起步较晚,最初多通过播撒草种、铺草皮等方式用于稳固黄河河岸。1989年,引进喷播机用于华南地区液压喷播试验,这是我国首次利用机械化喷播方式进行坡面植被重建^[17]。1996年,通过客土喷播的方式对高速公路进行边坡生态修复^[18],之后几年,陆续开发出各种土工材料产品,如土工格栅、三维网格、蜂巢格网等,将其与喷播技术相结合并应用于铁路、公路、水利等领域。20世纪90年代末,针对岩质边坡

生态修复开展了广泛的研究与应用,并逐渐形成了多样化体系,如客土喷播技术^[19]、混喷植生技术^[20]、厚层基材喷射护坡技术^[21]、植生基材喷射技术^[22]、植被混凝土生态护坡技术^[23]等。其中,通过技术鉴定并获得国家科学技术进步奖的有厚层基材喷射护坡技术、植生基材喷射技术、植被混凝土生态护坡技术等,应用方面也多以这几项技术为主。

作为高陡条件下的边坡生态修复技术,植被混凝土生态修复技术在我国的研究始于 1997 年,正式应用于 2002 年^[2],总体上该技术的研发经历了绿化—生态防护—可持续发展 3 个主要阶段(图 1):

1)1997—2005 年,技术尚处于护坡绿化层面,此时只能达到坡面抗冲刷和护坡草种能够生长的要求;2)2005—2012 年,将恢复生态学理论引入植被混凝土技术体系,实践了坡面防护与生态修复相结合的理念^[24];3)2012 年之后,重视研究生态基材的肥力可持续性 and 活化作用,开启了生态修复基材可持续的新阶段。经过 20 多年的发展,开展了在不同气候条件下(如高寒地区)的适应性研究,也研发了专用喷射施工设备及新的养护管理系统,植被混凝土生态修复技术在不断的研究与应用中日趋成熟。

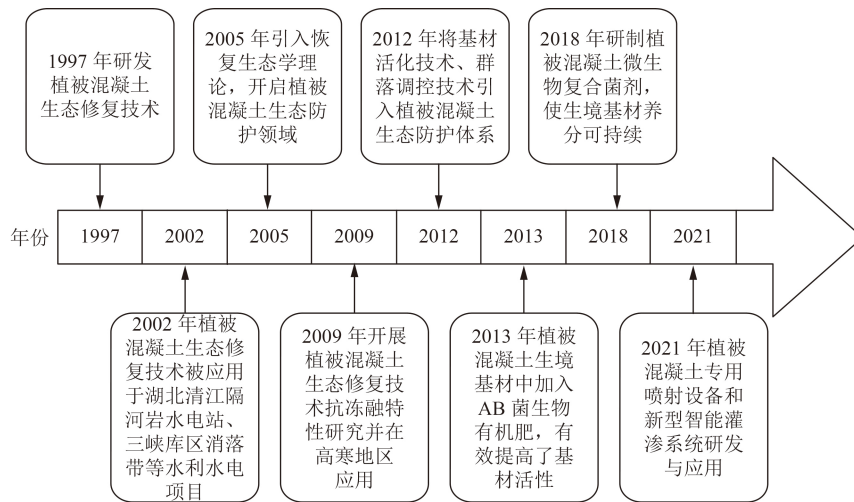


图 1 植被混凝土生态修复技术研发历程

Fig.1 R&D process of ecological restoration technology of vegetation concrete

科研人员在植被混凝土力学特性、化学特性、生物特性等多方面开展研究,依托大量的工程实践对生境基材进行连续多年跟踪监测,使该技术在施工工艺、设备研发、基材改良等方面逐步得到完善。多年研究成果与应用显示,植被混凝土生态修复技术对于高陡岩质边坡的生态修复效果显著,在实现坡面快速复绿的同时,能有效防止对基材的冲刷,使基材长期稳定附着于高陡边坡,有效避免了生态工程重建现象。

1.3 技术工艺

植被混凝土喷射基材中用量最大的是壤土,选择耕作性能与保水、保肥性能良好的土壤能有效改

善植被混凝土基材的质地,一般选择沙壤土作为主要成分。该技术的核心是植被混凝土生态改良剂,其具有改善基材物理化学性质、调节基材生物特性、促进土壤活化、提高种子发芽与成活率、提升土壤团粒结构、调节基材微观结构、固持基材水分养分、提高防冻融效果等功能^[24]。植被混凝土生态改良剂的使用提高了水泥的掺量,从而使基材的强度更高,抗冲刷能力更强,使基材能有效附着在高陡的岩石坡面上。基材配比的最终确定需要经过土壤分析、模拟试验、边坡试验、喷播试验等一系列试验及相应指标的测定环节^[23],植被混凝土基材的典型配比如表 1 所示。基材的喷射土层厚度需要满足适宜

表 1 植被混凝土基材配比^[23]

Table 1 Ingredients ratio of vegetation concrete substrate

基材	用量	作用	条件
壤土	100 ¹⁾	创造植物生长的基本条件	含砂率小于10%且最大粒径小于1.0 cm的壤土
水泥	8~10 ¹⁾	提高基材强度和抗冲刷性能	P.O 32.5普通硅酸盐水泥
生态改良剂	4~5 ¹⁾	改善基材结构与养分转化	能够调节基材理化性质,促进基材活化
有机物料	5~7 ¹⁾	增大土壤空隙,提供养分	一般以酒糟、锯末、稻壳为主
植绿种子/(g/m ²)	30	提供护坡植物	冷季型与暖季型先锋物种混合播种

1)为壤土、水泥、生态改良剂、有机物料的相对质量比,无量纲。

植物生长并保证基材在坡面的稳定性要求, 根据修复边坡的环境状况一般控制在 8~12 cm。

植被混凝土生态修复技术的主要工艺设计如图 2 所示。具体做法是: 对需要进行生态修复的边坡做喷植前的准备工作, 如清坡、布设排水沟和灌溉系统等; 在坡面铺设铁丝网, 并用锚钉和锚杆固定; 将植被混凝土基料拌合后用专用喷射施工设备喷射到坡面, 形成近 8 cm 厚的植被混凝土基层, 随后喷射含植绿种子的面层约 2 cm, 面层中水泥和生态改良剂的用量均减半; 施工完成后覆盖 1 层无纺布保墒, 经过短时间的凝固后基材就有了一定的初始强度, 不惧暴雨的冲刷; 经过一段时间的洒水养护后植被覆盖坡面, 此时揭去无纺布, 植物即可自然生长, 对边坡起到良好的生态修复效果^[6]。植被混凝土生态修复剖面如图 3 所示。

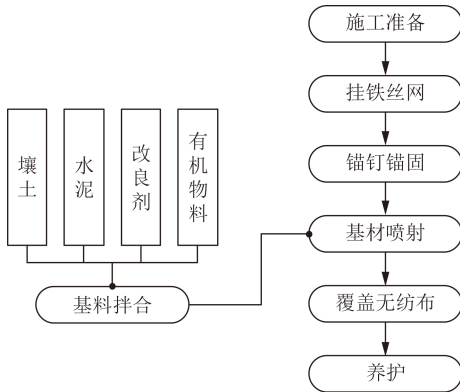


图 2 植被混凝土生态修复工艺流程

Fig.2 Ecological restoration technical process of vegetation concrete

植被混凝土生态修复技术与其他常规喷射类护坡技术^[2]相比, 具有以下优势: 1) 采用水泥作为胶结材料和骨架材料, 可以长效持久地为生境基材和边坡防护提供强度, 有效避免基材的龟裂现象, 抗冲刷能力强; 2) 植被混凝土生态改良剂的使用可有效改

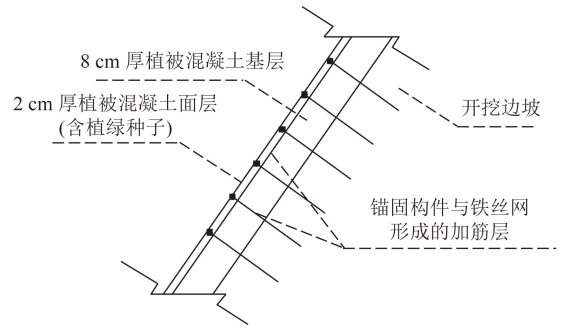


图 3 植被混凝土生态修复的剖面

Fig.3 Ecological restoration technology profile of vegetation concrete

良基材的结构和营养条件, 使基材的 pH 控制在植物适宜生长的范围内, 营造良好的生境条件; 3) 可实现传统硬性加固措施与单纯生态修复措施的有机结合, 实现基材的长期强度大于 4.0 MPa 和植物覆盖率 95% 以上的良好修复效果, 能在确保生态修复效果的同时节约成本, 对各种复杂、有创伤的边坡有效进行生态修复。

2 植被混凝土生态修复技术研究体系及其进展

植被混凝土生态修复技术是集岩石工程力学、生物学、土壤学、肥料学、硅酸盐化学、园艺学和恢复生态学等学科于一体的综合环保技术。自该技术提出以来, 我国有大量学者从植被混凝土生态修复技术的物理性质、化学性质、微生物性质及护坡植物等角度开展了研究, 经过了大量的室内试验与工程验证后取得了一些成果, 形成了较为完善的研究体系(图 4)。

2.1 植被混凝土基材物理特性

植被混凝土作为一种护坡用的生态基材, 需要满足一定的强度和抗侵蚀能力以达到防护的作用,

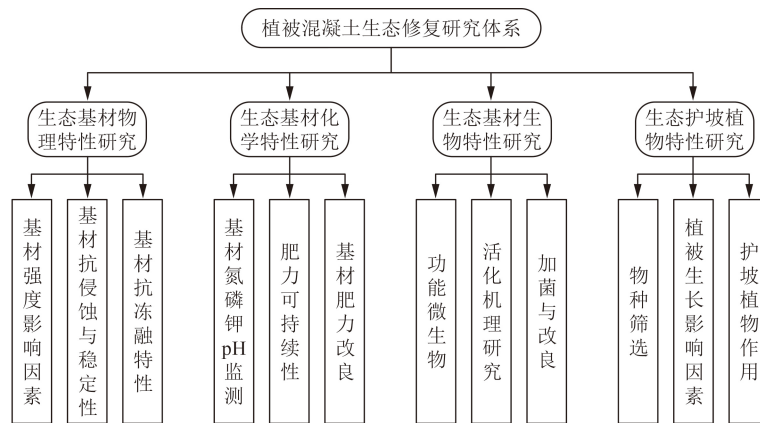


图 4 植被混凝土生态修复技术研究体系

Fig.4 Research system of the ecological restoration technology of vegetation concrete

同时也要满足适应植物生长的要求来达到生态修复的目的,因此基材适中的强度对植被混凝土生态修复的效果尤为重要。此外,植被混凝土中还含有有机物料等成分,因此也有必要开展有机物料对基材强度特性的影响研究。

2.1.1 基材强度影响因素

在护坡植物尚未长成之前,坡面的前期防护作用主要靠护坡基材本身的强度和稳定性来实现,植被混凝土基材的前期强度主要与水泥掺量有关,其次还受有机物料掺量、基材龄期、浸水条件等因素影响^[25]。在一定范围内,基材强度和抗侵蚀性随水泥掺量增加而增大,随有机物料掺量增加而减小,随龄期增加而增大^[26-28]。在中后期,在水的软化作用和水浸条件对植被混凝土中改良剂、有机物料等成分的吸水膨胀作用影响下,基材的强度会有所降低,而水泥的加入能有效改善这一特性,基材受水浸作用的影响会随水泥掺量的增加而降低^[29]。

有机物料作为一种生物基质,其本身具有疏松多孔的特性,可作为土壤团聚体的胶结剂,促进基材形成良好的土壤结构,但有机物料的含量对生态基材的强度有一定影响,因此应兼顾基材稳定性和植物生长需要来确定有机物料的掺量。对稻壳、锯末、玉米酒糟、稻谷酒糟 4 种有机物料对基材强度影响的研究表明:随着有机物料掺入比的增加,基材的孔隙率随之增加,无侧限抗压强度降低,大粒径有机物料需要提前粉碎以防基材抗压强度和弹性模量太小无法保持基材稳定^[30];基材配比中有机物料的掺量为 7%~9% 时,基材的孔隙率和强度控制良好^[31],能满足边坡的生态防护要求。在实际工程中有机物料的掺量还可以视具体边坡情况进行调整,当边坡较缓时,可适当增加有机物料掺量;当边坡质地较好含有的有机质较多时,可适当减少有机物料掺量。

2.1.2 基材抗侵蚀特性与稳定性

良好的抗侵蚀性和坡面稳定性是基材喷播后能否发挥效果的前提。裴得道等^[32]通过自制的消落带涌浪环境模型验证了植被混凝土基材具有良好的抗侵蚀性。Mohammed 等^[33]将植被混凝土技术应用于公路边坡,发现其可起到良好的长期保护作用,能有效降低雨水对路堤边坡的侵蚀。潘波等^[34]通过对植被混凝土基材进行剪切试验表明,合理地掺入纤维能有效提高基材的抗剪能力;丁瑜等^[35]的研究发现,在施工中适当控制坡面粗糙起伏,能使土-岩接触面的抗剪性能提高,从而提高基材的稳定性。张恒等^[36-37]的研究表明,“口坑式”的新型构筑方式能有

效增大各工况下基材破坏位移。随着植被混凝土龄期的增长,植被混凝土基材的力学性质会因植物根系的分蘖与死亡、水分的蒸发与吸收、有机质的进入与分解、各种阴阳离子的电解与结合,以及表层土的冻融等因素发生变化^[38],但此时坡面生态群落已稳定,深入坡体的复杂植物根系能很好地加筋坡面土体,大幅提高基材的强度和稳定性,为坡体向着顶级群落发展提供有利条件。

2.1.3 基材抗冻融特性

植被混凝土生态修复技术多应用于气候温和地区,在该区域冻融作用对生态修复和边坡防护功能影响较小。而西部高寒地区最低温度常在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,生态基材会因室外地表土层含水而产生冻融现象,因此进行生态基材防冻融特性的研究及改良很有必要。通过对基材进行冻融试验发现,植被混凝土基材在冻结初期存在“冻缩”过程,体积会先减小而后逐渐膨胀^[39],同时,基材的抗剪强度也会因为黏聚力的减小而降低^[40]。此外冻融循环还增加了基材养分淋溶流失的风险,降低了基材对速效养分的固持能力^[41]。周明涛^[42]的研究表明,基材土质、含水率与冷端温度对植被混凝土的冻胀特性影响依次降低,其中冷端温度的变化对植被混凝土抗剪强度指标黏聚力及内摩擦角的影响均较大,含水率仅对植被混凝土黏聚力的影响较大,而对其内摩擦角的影响较小,融化温度则对植被混凝土的抗剪强度几乎没有影响。

张琳瑶等^[43]通过往基材中掺入功能菌剂以改良植被混凝土的抗冻融能力,加菌后植被混凝土的肥力、抗冻性相比客土和植被混凝土有一定程度提升,但仍需对现有功能菌剂配方加以改进,以适应高寒地区冻融环境。Liu 等^[44]提出了一种抗冻融作用的混合剂,配比为粉煤灰:硅粉:华山松风干松针:福建曲纤维=12:20:3:5,其掺入有效增强了基材的抗冻融特性,并在实际工程中产生了良好效果,混合剂合理掺量为土壤质量的 7%~9%。此外,往植被混凝土基材中掺加植物纤维也能改善基材抵抗冻融破坏的能力,植物纤维的合理掺量为 0.6%^[45],但该措施对喷播设备有一定要求,需要保证外掺纤维和植被混凝土一起顺利喷射到坡面。

2.2 植被混凝土基材化学特性

生态基材在各种水利、矿山、公路等领域的应用中最大的难题之一是如何解决水分、养分的保持问题。受限于岩质边坡较为恶劣的生境环境,坡面自身涵养水土能力差,无法满足植物生长所需要的长期水分和养分需求,因此生态基材除了要有一定

厚度以满足生态系统往高阶发展外, 还需满足植物生长所需要的有机质、碱解氮、速效钾、速效磷、全磷等营养成分的供给。护坡生态基材的肥力除了与本身成分有关外, 坡面植被群落结构及生态特征、土壤微生物结构、坡面基本情况及降水等引起的淋溶和侵蚀也会影响其肥力水平。

2.2.1 基材肥力特性

对植被混凝土修复边坡中各元素的吸附和解析特征进行分析发现, 植被混凝土的有效氮含量相对较低, 而速效钾、速效磷含量较高^[46], 同时由于植被混凝土的固磷能力较弱^[47], 因此在施工中应适当增大基材中黏粒的质量比, 减小水泥用量或加入缓冲剂以增加磷素的利用率和长久的供磷能力。对基材进行肥力特性研究发现, 经过人工生态修复后的边坡, 数年后土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均高于天然林边坡^[48]; 在基材肥力影响因子中, 无机磷含量最高, 土壤全磷和速效磷含量处于较高水平^[49], 土壤综合肥力表现良好, 这主要是由于基材中配有大量的腐殖质, 如锯末、酒糟、稻壳等, 分解后为植物提供大量的有机质。此外, 修复边坡上的草灌凋落物分解后产生的有机物也可在一定程度上提高土壤肥力^[50], 从而为植物生长提供良好的土壤条件。

2.2.2 基材肥力可持续性

对植被混凝土修复边坡肥力可持续性的研究表明, 修复边坡的综合肥力水平总体上呈现先增长后稳定的发展趋势, 水解有机物含量处于较低水平, 表明生态基材的有机质转化效率不足, 可适当掺入活化酶等微生物改善基材的生化特性^[51]。植被混凝土修复边坡的长期肥力综合等级处于中等偏上水平, 在年循环周期内基材各肥力因子水平都处于逐渐增强的趋势, 总体肥力隔年增加^[52], 为边坡的可持续演进、植物的长期稳定生长提供了良好的营养环境。由于水泥的掺入, 植被混凝土基材的前期 pH 偏碱性或微碱性, 随着植被混凝土生态修复边坡的年限增加, 基材的 pH 会因植物根系分泌物和凋落物的增加而逐渐降低并趋于中性。在修复初期, 基材中有机质含量会明显下降, 这主要与修复初期植物生长对有机质的需要和降水造成的养分淋湿有关; 随着生态系统的演替, 坡面植物的凋落物分解和植物根系的大量生长加快了养分的累积, 基材中有机质含量会显著提高^[53]。

2.2.3 基材肥力改良措施

采用植被混凝土进行生态修复时, 植物物种选择上偏向草本禾本科植物, 该类植物固氮能力较弱,

会增加土壤有效氮元素的流失风险, 使得基材碱解氮含量呈逐年降低的状态^[54], 因此边坡修复后期应适当对基材进行活化处理, 并在修复植物中选择具有固氮能力的豆科植物, 以防止养分的过量流失。杜祥运等^[55]研究了活化菌剂对基材肥力和植物生长的影响, 发现活化菌剂的施用有利于植物的生长和土壤肥效的改善, 基材中活化菌剂的合理施用量为 6%~9%。Gao 等^[56]研究了不同掺量的木材活性炭和矿物活性炭对植被混凝土的改良效应, 结果表明, 活性炭能有效改良基材性能, 并能持续至少 0.5 年, 木材活性炭的影响比矿物活性炭影响更显著, 合理掺量为 1%~2%。

基材含水率影响着植物蒸腾、地表蒸发、地表径流和土壤内水分交换, 在生命活动的前期, 基材中的养分必须溶解于水中才能被植物吸收, 因此, 生态基材对水分的涵养能力是影响生态修复效果的重要因素。植被混凝土生态改良剂具有有效改善基材的水分保持能力和养分转化效率的功效, 向基材中掺入保水剂能有效提高基材的孔隙持水能力, 保水剂的适宜掺量为 0.5%^[57]。许亚坤等^[58]的研究表明, 生物炭处理的植被混凝土的饱和持水量是原植被混凝土的 1.09~1.36 倍, 主要原因是生物炭具有丰富的孔隙结构, 能降低基材的容重并提高总孔隙度和保水能力, 此外生物炭本身作为一种有机物也有一定的持水性能。

2.3 植被混凝土基材生物特性

土壤微生物是土壤中物质转化的动力, 在土壤养分转化循环、系统稳定及土壤可持续性生产中占据主导地位, 是组成生态系统的重要角色, 常被作为评价土壤质量和反映微生物群落状态与功能变化的重要指标, 也是用来评价基材肥力和边坡生态修复效果的重要依据。生态系统中的土壤微生物受多种生态因子综合作用影响, 主要与土壤碳资源、植物生长节律、土壤温度和湿度及季节的变化等因素有关, 此外边坡的生境条件也会通过影响土壤微气候、土壤理化性质、地下碳输入等途径影响土壤微生物的活动。与基材微生物特性有关的参数主要有微生物数量、微生物量碳、微生物量氮、土壤酶活性等, 研究基材微生物特征可较好地反映植物与土壤之间的养分变化情况。

2.3.1 基材微生物特性

通过对比研究植被混凝土修复边坡和天然林的微生物特性发现, 不同坡地的土壤微生物量碳、微生物量氮存在明显的季节变化格局差异, 与空间分布差异不明显, 土壤有机碳含量与微生物量之间有显

著相关性,表明土壤有机碳含量是影响微生物群落的重要指标^[59]。不同植被恢复模式对土壤微生物化学计量特征影响差异显著,且根际土壤的微生物量显著高于非根际土壤,说明植物对微生物的累积有明显的促进作用^[60]。总体上,植被混凝土修复边坡的土壤微生物量含量稍弱于天然林地,反映出植被混凝土修复边坡对土壤全量养分含量的累积作用较好,但由于人工修复边坡植被演替周期较短及基材中含有水泥、有机质等成分而影响了土壤微生物的生长和繁殖,其微生物特性与天然林原始土壤相比还有一定差距^[61]。

植被混凝土基材中水泥的掺入会影响土壤微生物的活性,主要原因是微生物在这种胁迫环境下需要付出额外的能量以维持正常的生命活动^[62],而后期植被的生长可有效改善土壤微生物的活性水平。对不同植被恢复模式下基材的微生物特性进行研究,发现植被的恢复能显著提高土壤微生物量碳、微生物量氮含量,原因是植被能改善基材的腐殖化作用,促进土壤有机质的转化,高有机质含量能为微生物的生长提供充足的碳、氮和能量,从而增加微生物的数量并提高微生物的活性^[63]。不同植被恢复模式对土壤微生物特性的改善效果差异明显:高羊茅生长旺盛,生物量大且根系腐殖质多,对土壤微生物量碳的改善作用明显;紫花苜蓿作为豆科植物,具有固氮作用,对土壤微生物量氮的改善作用明显。因此在群落设计时应考虑物种的多样性和功能性,使微生物群落的食物网复杂化,确保生态系统的稳定。

2.3.2 基材活化机理

土壤酶活性可以反映土壤生物化学过程的强度和方向,是评价植被混凝土微生物特性的重要参数。土壤酶活性指标主要与脲酶、磷酸酶、转化酶等成分的活性有关,脲酶是一种酰胺酶,能促进有机分子中肽键的水解;磷酸酶能促进有机磷化物的水解,其活性高低直接影响土壤有机磷的矿化和生物有效性;转化酶能促进蔗糖分子水解成葡萄糖和果糖。赵娟等^[64]对植被混凝土边坡和天然林地土壤酶活性进行对比研究,发现植被混凝土修复边坡的土壤脲酶活性较高,这是由于植被混凝土中含有大量的有机物料,有机物料的含量与土壤脲酶活性呈显著正相关;此外有机物料的掺入改善了土壤结构,提高了脲酶活性并促进了微生物的代谢作用。牛鹏辉等^[65]的研究表明,植被混凝土修复边坡的磷酸酶活性稍弱于天然林地,主要原因是天然林地土壤 pH 偏酸性,在酸性条件下磷酸酶活性更强;另外,植被混凝土修复边坡的植被覆盖度高、土壤有机质含量丰富,

与之相关的转化酶活性也因此较高。土壤酶活性与基材养分之间有明显的相关性,因此可利用土壤酶活性结合植被的群落结构与特征来测定边坡的恢复程度^[66]。

2.3.3 基材加菌改良措施

生态基材虽然含有大量的有机质和营养物质,但普遍存在速效养分含量低、营养转化效率慢、肥力可持续性不强等现象,无法有效解决基材肥力可持续性问题,通过向植被混凝土基材中施加 AB 菌生物有机肥可显著增加土壤酶活性,改善土壤的生态环境^[67]。这是因为基材中一部分土壤酶来源于微生物,菌肥中含有大量的功能菌,这些功能菌的增加优化了土壤微生物种群结构,使土壤酶活性随之增高;AB 菌生物有机肥还可以改善生态基材的 pH,提高基材肥力,促进土壤功能微生物数量的增加和物种多样性的提高。王立等^[68]的研究表明,向植被混凝土中加入丛枝菌根真菌(AMF)能促进植物的生长,提高植物抗逆性和生理活性;AMF 的添加还能促进植物对弱光的吸收,提高植物的光合同化能力和水分利用效率。添加 AMF 可以在一定程度上解决植被生长易退化和生长状况不良等问题,所有处理中摩西球囊霉处理组在促进植物根系生长、增强植物光合作用效果等方面表现最好,是 AMF 强化的首选菌剂。

2.4 植被混凝土护坡植物特性

边坡修复的主体是植物,大量的工程实践证明,大部分人工修复边坡施工后坡面植被能够在短时间内恢复,起到一定的水土保持效果,但随着时间的推移,植物之间容易出现恶性竞争或外部环境不能满足植物生态习性的要求,导致坡面植被群落逐渐退化,人工恢复的坡地又会退化成裸坡。为了避免此种情况发生,需要在施工前做到利用生态学原理进行合理的坡面植被群落设计,建立草、灌、乔、木结合的多层复杂结构;同时在施工完成后要持续检测坡面恢复情况,及时分析植被群落问题所在并进行针对性的人工调控,使坡面群落正向演替并逐步发展成顶级群落。

2.4.1 植物物种筛选

我国地域辽阔,不同修复地区的地形、气温、降水等条件有很大差别,因此在进行群落设计时,除了要以生态学理论为依据外,还应充分考虑工程区的地理环境、土壤条件、物种特性、后期植被要求等因素^[69]。物种选择好后就需要确定组合方式,物种的组合分为单播和混播,暖季型物种因一致性较差所以普遍选择单播的方式,冷季型物种多采用混播来

形成抗病性强、品质高的草坪。另外不同播种时期对生态工程的修复效果也有一定影响,通常冷季型物种适宜在春季、夏末和初秋进行播种;暖季型物种一般在春末或夏初播种最适宜,冬季由于温度太低而不利于种子发芽。为了预防护坡绿地的病虫害并进一步提升修复质量,可以在物种选择阶段对植物种子进行质量检验、杀菌消毒、催芽等处理^[4]。

2.4.2 植被生长影响因素

水泥的掺入在提高植被混凝土强度和抗冲刷性的同时,也会影响植物的生长,且不同种类植物对水泥的适应性有所差异。许阳^[70]对不同护坡植物的水泥适应性进行研究发现,水泥的掺入对植物种子萌发和幼苗生长有显著的抑制作用,且当水泥掺量高于8%时影响显著增加;随着水泥掺量的增加,植物的光合生理活动逐渐降低,综合考虑边坡防护作用和植物生长条件,最适宜水泥掺量为8%。在所有试验植物物种中,高羊茅对水泥的掺入表现出良好的抗逆性,在施工中应根据边坡具体情况调节水泥掺量并进行相应的物种选择。熊诗源等^[71]的研究表明,水泥的掺入会使基材发生盐碱化,高浓度的盐胁迫对种子的萌发有显著抑制作用,此外高浓度盐造成的渗透胁迫和离子毒害对种子萌发期间培根的生长也有抑制作用,表现为丙二醛(MDA)含量升高,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性升高,说明盐破坏了植物细胞膜结构并降低了细胞内的代谢活动。因此,除了要控制基材水泥掺量以外,可以在种子萌发期内适量增加浇水量,以降低土壤中盐含量。相关研究表明,植被混凝土的植物生长状况会随着坡位及坡向的不同表现出不同的变化趋势,主要表现为下坡位植被生长情况优于上坡位,阴坡生长情况优于阳坡,这与坡体的含水率和pH有直接关系^[72-73]。植物的生长也会受到坡度胁迫的影响,随着坡度的上升,植物的覆盖度和生物量普遍呈下降趋势。不同植被恢复模式对坡度变化的敏感性不同,主要体现在植物的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等方面的差异性^[74]。

2.4.3 植被护坡作用

护坡植被的恢复可有效减少坡面的水土流失,起到稳固坡体、维持生态系统的平衡稳定,并最终达到改善景观和美化环境的目的^[75]。植被的发育能降低土壤的剥离并增强土壤的抗侵蚀能力^[76],从而提高基材的稳定性。植被根系也会在一定范围内增强基材浅层的黏聚力,从而提高根-土复合体的抗剪强度,根系越发达的植物对土壤的充斥能力也越强,根-土复合体的相互作用也越强,但这种提高会随着根

系所占比例的增大和根系对土壤的挤胀作用而逐渐缓和^[77]。Zhao等^[78]的研究表明,植被混凝土的不同植被恢复模式和覆盖度对控制水土流失效果不同,植被组为狗牙根和多花木蓝组合并适当增加植被覆盖度能减少87.88%~99.11%的水土流失量。护坡植被和坡体环境之间的关系是相辅相成的:护坡植被的演替可以改变边坡土壤性质,而土壤性质的改变又可导致植被群落类型的改变^[79]。边坡的环境状况改善会促进群落优势种的拓殖和更替,加快群落演替过程;植被根系对边坡防护的物理作用,死亡根系和凋落物分解的有机质及根际分泌物又能稳定土壤结构,改善土壤质地。

3 展望

植被混凝土生态修复技术是趋于成熟的生态护坡技术,大量的研究与应用证实了该技术具有长期稳定性、抗侵蚀冲刷性、养分固持、肥力可持续性等优点。综合目前的研究和应用情况,植被混凝土生态修复技术的后续研究可从以下几个方面考虑。

(1)施工工艺。目前专用于喷射植被混凝土基料的喷播设备仍处于研发状态,只能用喷播素混凝土的方式喷播植被混凝土,受坡高、坡度等因素的限制,该方式效率较低且有一定危险性。另外基材喷射前水泥与其他基料的混合搅拌减小了水泥颗粒间的连接,降低了原有强度。因此,有必要对施工工艺进行改进。通过研发喷射植被混凝土基材的专用喷播设备提高喷播效率和质量,改良基料的混合方式,使水泥与改良剂均匀混合后再与其他基料混喷,从而使水泥颗粒之间能有效连接,在保证原有强度的同时降低水泥的使用量。而水泥掺量的减少对应对着改良剂的减少,从而达到节约物料、降低成本、提高工效、提升修复效果的目的。

(2)养护措施。由于植被在未形成稳定的生物群落前需要补水,因此苗期养护问题是边坡修复是否成功的重要因素。目前修复边坡养护手段多以喷灌、滴灌等方式为主,由于植被混凝土基材的入渗性较低^[4],因此需要大量补水,补水区域容易形成上部分未完全覆盖而下部分长期浸水等问题。通过改进养护工艺,在基材内部设置沉浸式微渗系统,不仅可以用少量的水达到较好的养护效果,而且还可以使植物根系攀附在其上面,使基材与岩面的贴合更为强力,进而提高基材的强度。另外由于基材内部的保温效果和植物的保护效果,微渗系统还可以轻松解决北方地区由于气温低而带来的养护难问题。

(3)土壤改良。植被混凝土生态修复过程中用

量最大的是壤土,因此土的用量是决定工程造价的主要因素之一。合格的工程用土应是沙粒含量不大于 10% 的壤土,最理想的状况是边坡修整后的土或本地土直接用于修复工程,这会使工程造价大大降低。然而很多工程区由于环境、地理位置、气候条件等的影响土壤达不到施工要求,如南方地区花岗岩边坡风化后的砂粒土、沿海地带的盐碱土等。因此,通过改良手段,增加本地土的适应性很有必要。对于不合格的土可采用研磨过筛、掺入良性土、调节剂改良等手段进行处理,再经过设计方案的调整达到施工要求,从而降低工程造价,提高施工效率。

参考文献

- [1] 颜世敏, 马阔. 土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 江西农业, 2019(6): 67.
- [2] 赵冰琴, 夏振尧, 许文年, 等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. 水利水电技术, 2017, 48(2): 130-137.
ZHAO B Q, XIA Z Y, XU W N, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 130-137.
- [3] 赵金召, 李子红, 席正, 等. 露天高陡岩质边坡生态修复技术的探讨[J]. 绿色科技, 2020(22): 223-225.
ZHAO J Z, LI Y H, XI Z, et al. Discussion on ecological restoration technology of open-pit high and steep rock slope[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(22): 223-225.
- [4] 许文年, 夏振尧, 周明涛. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [5] 许文年, 夏振尧, 周宜红, 等. 植被混凝土力学性能研究方法探讨[J]. 中国水土保持, 2007(4): 30-32.
- [6] 国家能源局. 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范: NB/T 35082—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [7] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 杨京平, 卢剑波. 生态恢复工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [9] 张晓岚, 刘昌明, 赵长森, 等. 改进生态位理论用于水生态安全优先调控[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1103-1109.
ZHANG X L, LIU C M, ZHAO C S, et al. Study on priority regulation for water ecological security based on niche theory[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(10): 1103-1109.
- [10] Ministry of Works and Transport. Use of bio-engineering in the road sector (geo-environmental unit)[M]. Katmandu: Nepal Ministry of Works and Transport, 1999.
- [11] GOODMAN R. Methods of geological engineering in discontinuous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(10): 115.
- [12] GRAY D H, SOTIR R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1395-1409.
- [13] 王亮. 生态边坡客土稳定性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [14] 敖翔宇. CS高次团粒植被恢复技术在丰都县产业大道的应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [15] SHIELDS F D, GRAY D H. Effects of woody vegetation on sandy levee integrity[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1992, 28(5): 917-931.
- [16] SINGH K P, MOHAN D, SINHA S, et al. Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area[J]. Chemosphere, 2004, 55(2): 227-255.
- [17] 尹淑霞, 李宪友, 陈峻崎, 等. 液压喷播植草新技术[J]. 草原与草坪, 2001, 21(4): 48-49.
- [18] 尹剑. 公路边坡生态防护及应用技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [19] 王鹰翔, 张金池, 吴雁雯, 等. 喷播基质中土壤菌施用对紫穗槐幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 902-910.
WANG Y X, ZHANG J C, WU Y W, et al. Effects of soil bacteria inoculation in spray seeding matrix on photosynthesis characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Amorpha fruticose*[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(6): 902-910.
- [20] 周颖, 曹映泓, 廖晓瑾, 等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 353-356.
ZHOU Y, CAO Y H, LIAO X J, et al. Planting on the rocky slope of freeway by spraying combined materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 353-356.
- [21] 张俊云, 李绍才, 周德培. 岩石边坡植被护坡技术(2): 厚层基材的组成及特性[J]. 路基工程, 2000(5): 4-6.
- [22] 王琼, 柯林, 辜再元, 等. PMS技术在高速公路岩石边坡生态防护工程中的应用[J]. 公路, 2009, 54(2): 180-185.
WANG Q, KE L, GU Z Y, et al. Application of PMS technique to rock slope ecological protection engineering in expressway[J]. Highway, 2009, 54(2): 180-185.
- [23] 许文年, 叶建军, 周明涛, 等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 50-52.
XU W N, YE J J, ZHOU M T, et al. Several problems of vegetation technology for protecting slopes using vegetation-growing concrete[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 50-52.
- [24] 许文年, 夏振尧, 戴方喜, 等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持, 2005(4): 31-33.
- [25] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1719-1724.
XIA Z Y, XU W N, WANG L H. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1719-1724.
- [26] 刘黎明. 植被混凝土无侧限抗压强度的室内试验初探[J]. 灾害与防治工程, 2008(1): 30-35.

- [27] 杨奇, 丁瑜, 许文年, 等. 植被混凝土抗雨水冲刷性能试验研究[J]. *中国水土保持*, 2013(1): 54-56.
- [28] YANG Q, XU W N, DING Y, et al. Experimental study of vegetation-growing concrete's resistance to rain erosion[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 193/194: 1449-1453.
- [29] 张博, 许文年, 周正军. 植被混凝土基材崩解特性试验研究[J]. *中国水土保持*, 2012(5): 56-58.
- [30] LIU D X, ZHANG B H, YANG Y S, et al. Effect of organic material type and proportion on the physical and mechanical properties of vegetation-concrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 3608750.
- [31] 刘大翔, 李少丽, 许文年, 等. 植被混凝土有机质类型与配比的合理选取[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(4): 37-40.
LIU D X, LI S L, XU W N, et al. Selection tests for type and ratio of organic matter in vegetation concrete[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(4): 37-40.
- [32] 裴得道, 许文年, 郑江英, 等. 植被混凝土抗侵蚀性能研究[J]. *灾害与防治工程*, 2008(2): 1-4.
- [33] MOHAMMED A, XU W N, XIA Z Y. Ecological and bioengineering studies for stabilizing the wad Medani-sennar roadside slope linking the Gezira and Sennar states[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 7430809.
- [34] 潘波, 丁瑜, 黄晓乐, 等. 纤维加筋植被混凝土干湿循环下抗剪强度研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 63-67.
PAN B, DING Y, HUANG X L, et al. Study on mechanical properties of fiber-reinforced vegetation concrete under dry and wet cycle[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2020, 42(1): 63-67.
- [35] 丁瑜, 杨奇, 夏振尧, 等. 生态护坡基材土-岩接触面原位剪切试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊2): 383-388.
DING Y, YANG Q, XIA Z Y, et al. *In-situ* shear tests on base material soil-rock interface in ecological slope protection system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Suppl 2): 383-388.
- [36] 张恒, 丁瑜, 许文年, 等. 植被混凝土新型生境构筑基材稳定性分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(4): 170-178.
ZHANG H, DING Y, XU W N, et al. Stability analysis on base material for building of new type of vegetation-growing concrete habitat[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(4): 170-178.
- [37] 许文年, 裴得道, 牛海波, 等. 新型生态护坡基材构筑方法: CN101280567A[P]. 2008-10-08.
- [38] 王晓华. 植被混凝土强度的试验研究[J]. *西部探矿工程*, 2015, 27(12): 10-12.
WANG X H. Experimental investigation of strength of vegetation-growing concrete[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2015, 27(12): 10-12.
- [39] 周明涛, 胡欢, 杨平, 等. 冻结温度对植被混凝土生态基材冻胀特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 253-256.
ZHOU M T, HU H, YANG P, et al. Influence of freezing temperature on frost heave characteristics of vegetation growing bases of concrete[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4): 253-256.
- [40] 周明涛, 胡欢. 冻融作用对植被混凝土抗剪强度的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 87-91.
ZHOU M T, HU H. Effect of freeze-thaw action on vegetation-growing concrete shear strength[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(2): 87-91.
- [41] 童标, 刘大翔, 许文年, 等. 冻融循环对植被混凝土养分及其固持能力的影响[J]. *人民长江*, 2018, 49(3): 87-92.
TONG B, LIU D X, XU W N, et al. Effects of freezing and thawing cycles on vegetation concrete nutrients and its retention ability[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 87-92.
- [42] 周明涛. 植被混凝土冻融效应试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [43] 张琳瑶, 刘大翔, 许文年, 等. 冻融循环条件下生境基材中三种功能微生物数量变化规律研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1122-1129.
ZHANG L Y, LIU D X, XU W N, et al. A study on the change of three functional microorganism quantities in habitat substrate under freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1122-1129.
- [44] LIU D X, XU W N, CHENG Z L, et al. Improvement test on frost resistance of vegetation-concrete and engineering application of test fruitage[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(1): 161-170.
- [45] 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 Y Z, CHEN Y, LIU D X, 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.
- [46] 夏栋, 许文年, 赵娟, 等. 植被混凝土护坡基材pH、有机质及其与速效养分的相关性分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 224-227.
XIA D, XU W N, ZHAO J, et al. Analysis of pH, soil organic matter and the correlation to available nutrients in substrate of vegetation-growing concrete gunning[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 224-227.
- [47] 夏振尧, 牛鹏辉, 梁永哲, 等. 边坡生态防护工程生境基材的磷素吸附-解吸特征[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 346-352.
XIA Z Y, NIU P H, LIANG Y Z, et al. Absorption and desorption characteristics of phosphorus in substrates used in slope ecological rehabilitation engineering[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 346-352.
- [48] 吴彬, 刘刚, 肖海, 等. 雅砻江官地水电站生态护坡工程初期土壤肥力状况[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 172-176.
WU B, LIU G, XIAO H, et al. Soil fertility in preliminary stage of ecological slope protection for Guandi Hydropower Station on Yalong River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2): 172-176.
- [49] 吴彬, 夏振尧, 杨悦舒, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤不同形态磷的分布[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(6): 1262-

- 1267.
- WU B, XIA Z Y, YANG Y S, et al. Fractions and distribution of phosphorus at various types of slopes in disturbed area of Xiangjiaba Hydropower Construction[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(6): 1262-1267.
- [50] 周明涛, 许文年, 夏栋. 向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 1031-1037.
- ZHOU M T, XU W N, XIA D. Soil pH value and fertility level at various types of slopes in disturbed area of Xiangjiaba Hydropower Construction[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 1031-1037.
- [51] 丁瑜, 胡文静, 夏振尧, 等. 生态护坡生境基材土壤肥力动态变化研究[J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(2): 31-37.
- DING Y, HU W J, XIA Z Y, et al. Soil fertility dynamics of substrate used for ecological slope protection[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(2): 31-37.
- [52] 许阳, 陈芳清, 金章利, 等. 水电站植被混凝土边坡生态防护工程基材土壤肥力隔年变化分析[J]. *水利水电技术*, 2012, 43(11): 47-50.
- XU Y, CHEN F Q, JIN Z L, et al. Analysis on variation in alternate years of base material soil fertility for vegetation concrete eco-slope protection of hydropower station[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2012, 43(11): 47-50.
- [53] 程虎, 许文年, 向瀚宇, 等. 不同修复年限植被混凝土基材有机碳氧化稳定性特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(2): 232-238.
- CHENG H, XU W N, XIANG H Y, et al. Characteristics of soil oxidizable stable organic carbon in different restoration years for substrate of eco-restoration of vegetation concrete[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(2): 232-238.
- [54] 牛海波, 许文年, 夏振尧, 等. 植被混凝土肥力水平变化研究[J]. *中国水土保持*, 2010(2): 36-39.
- [55] 杜祥运, 刘大翔, 许文年, 等. 活化菌剂施用量对基材肥力及狗牙根生长的影响[J]. *生态科学*, 2016, 35(3): 92-98.
- DU X Y, LIU D X, XU W N, et al. Effects of the application amount activation microbial inocula on fertility of habitat substrate and growth of bermudagrass (*Cynodon dactylon*)[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(3): 92-98.
- [56] GAO J, LIU D, XU Y, et al. Effects of two types of activated carbon on the properties of vegetation concrete and *Cynodon dactylon* growth[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14483.
- [57] 秦健坤, 周明涛, 杨森, 等. 保水剂对植被混凝土生态基材持水特征的影响[J]. *现代农业科技*, 2017(19): 165-167.
- QIN J K, ZHOU M T, YANG S, et al. Effects of super absorbent polymers on retention characteristics of vegetation-growing concrete ecological base material[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(19): 165-167.
- [58] 许亚坤, 张保华, 程虎, 等. 生物炭对植被混凝土饱和持水量的影响[J]. *现代农业科技*, 2018(21): 172-173.
- XU Y K, ZHANG B H, CHENG H, et al. Effect of biochar on saturated moisture of vegetation-concrete[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(21): 172-173.
- [59] 张琳瑶, 杜祥运, 刘大翔, 等. 不同修复模式边坡土壤微生物量季节动态: 以向家坝工程扰动区为例[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(13): 320-324.
- ZHANG L Y, DU X Y, LIU D X, et al. Seasonal dynamics of microbial biomass in slope soil under different restoration patterns: taking Xiangjiaba Dam disturbance area as an example[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(13): 320-324.
- [60] 罗婷, 许文年, 程虎, 等. 向家坝水电站不同修复模式下根际土壤微生物化学计量特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 450-458.
- LUO T, XU W N, CHENG H, et al. Stoichiometric characteristics of rhizosphere soil in different restoration models of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 450-458.
- [61] 姚小月, 许文年, 夏振尧, 等. 向家坝水电站不同修复模式边坡土壤生物量研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(6): 12-15.
- YAO X Y, XU W N, XIA Z Y, et al. Research on soil microbial biomass on slope of Xiangjiaba Hydropower Station under different conservation modes[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(6): 12-15.
- [62] 吴彬, 夏振尧, 赵娟, 等. 植被混凝土基材微生物活性对不同水泥含量的响应[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 6-9.
- WU B, XIA Z Y, ZHAO J, et al. Responses of microbial activities in vegetation-concrete substrate to different cement contents[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 6-9.
- [63] 熊诗源, 许文年, 夏栋, 等. 不同植被恢复模式对植被混凝土基材微生物特征的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 279-284.
- XIONG S Y, XU W N, XIA D, et al. Effects of soil microbial features on vegetation-growing concrete gunning in different vegetative restoration patterns[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(4): 279-284.
- [64] 赵娟, 许文年, 夏栋, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤酶与肥力的相关性研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(26): 16043-16045.
- ZHAO J, XU W N, XIA D, et al. Relationship between soil enzymatic activity and soil fertility of side slopes in Xiangjiaba Hydropower Construction[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(26): 16043-16045.
- [65] 牛鹏辉, 夏振尧, 梁永哲, 等. 向家坝生态恢复边坡土壤有机磷形态和磷酸酶活性研究[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20): 4963-4968.
- NIU P H, XIA Z Y, LIANG Y Z, et al. Study on organic phosphorus forms and phosphatase activity of ecological restoration slope soil in Xiangjiaba area[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(20): 4963-4968.
- [66] ZHAO Z C, XU W N, XIA D. Soil nutrient and soil enzyme activity of the slopes with different ecological protection

- technologies[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 356/357/358/359/360: 2445-2450.
- [67] 夏栋, 夏振尧, 赵自超, 等. AB菌生物有机肥对土壤生物特征和肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(23): 214-219.
XIA D, XIA Z Y, ZHAO Z C, et al. Effects of AB biological-organic fertilizer on soil biological characteristics and fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(23): 214-219.
- [68] 王立, 傅生杰, 马放, 等. 丛枝菌根真菌对植被混凝土植物早熟禾的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(2): 44-48.
WANG L, FU S J, MA F, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on *Poa pratensis* in vegetation-growing concrete[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(2): 44-48.
- [69] 吴少儒, 许文年, 王路根, 等. 喷射护坡绿化技术的物种选择[J]. *中国水土保持*, 2006(6): 41-43.
- [70] 许阳. 五种先锋物种对不同水泥含量的植被混凝土的生态学响应[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012.
- [71] 熊诗源, 许文年, 夏栋. 植被混凝土盐分胁迫对多花木蓝种子萌发的影响[J]. *中国水土保持*, 2010(6): 35-38.
XIONG S Y, XU W N, XIA D. Influence of vegetation concrete salinities stress to seed germination of *Indigofera amblyantha*[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(6): 35-38.
- [72] 潘婵娟, 李鸿铭, 洪焕. 坡度对植被混凝土基材早期蒸散效应的影响[J]. *价值工程*, 2018, 37(5): 90-92.
PAN C J, LI H M, HONG H. Effect of slope on early evapotranspiration of vegetation concrete substrate[J]. *Value Engineering*, 2018, 37(5): 90-92.
- [73] 刘大翔, 许文年, 周明涛, 等. 坡度坡向及年限对黄龙滩电站生态护坡肥力的影响[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 178-182.
LIU D X, XU W N, ZHOU M T, et al. Effects of slope positions and directions and years on fertility of ecological protected-slopes in Huanglongtan Hydropower Station[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 178-182.
- [74] 祝顺波, 许文年, 刘刚, 等. 坡度对紫花苜蓿和狗牙根光合生理特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 218-221.
ZHU S B, XU W N, LIU G, et al. Effect of slope gradient on physiological characteristic of *Medicago sativa* and *Cynodon dactylon*[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(2): 218-221.
- [75] XIA Z Y, XU W N. Ecological characteristics of artificial vegetation communities on excavated slopes at the Xiangjiaba Hydroelectric Power Station[J]. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, 2009, 8(2): 75-81.
- [76] GUO P, XIA Z Y, GAO F, et al. Evaluating the contribution of the physical and biochemical effects of root on detachment for the coarse-textured soil from the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Eurasian Soil Science*, 2020, 53(9): 1260-1269.
- [77] 黄晓乐. 草本植物根系对植被混凝土基材浅层抗剪强度的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.
- [78] ZHAO B Q, ZHANG L, XIA Z Y, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 7043428.
- [79] 夏振尧. 向家坝水电站扰动边坡人工植被群落初期演替过程与稳定性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. ◇