

生态护坡理论及技术研究现状综述

杜技能¹, 王中珏¹, 段继琪², 王忠良², 段青松¹

(1. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 为了更好地保护生态环境以及为未来研究提供研究基础及方向, 通过查阅收集文献资料, 分析和阐述了生态护坡技术国内外研究现状、生态护坡技术的理论和影响因素, 将工程扰动区常用边坡生态修复技术分为喷播类、组合结构类、刻槽钻孔类、生态挡墙类四类, 并对四类生态护坡关键技术的发展现状、特点和适用范围进行了重点综述与分析。并从以下四方面提出展望, 即从特殊环境下生境基材配置研发及植物合理选择、优化边坡支护工艺、完善生态护坡方面的技术规范和理论建设、建立科学的施工养护管理体系和有效的护坡工程评价机制提出展望。该研究为生态护坡理论及技术研究提供了理论基础和实施方向。

关键词: 生态护坡技术; 喷播; 组合结构; 刻槽钻孔; 生态挡墙

中图分类号: S157; U471

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)06-0211-110

Review of the Current Status of Research on Ecological Slope Protection Theory and Technology

DU Jineng¹, WANG Zhongjue¹, DUAN Jiqi², WANG Zhongliang², DUAN Qingsong¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China;

2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: In order to better protect the ecological environment and provide research basis and direction for future research, through methods such as literature review and data collection, this study briefly describes the current research status of ecological slope protection technologies, the theory and influencing factors of ecological slope protection technology, divides the commonly used slope ecological restoration technology in engineering disturbed areas into four categories, namely spray seeding, combined structure, engraved groove drilling and ecological retaining wall. This work focuses on the current status of the development of the key technologies of the four types of ecological slopes, their characteristics and scope of application to synthesize the development of the four types of key ecological slope protection technologies. It also focuses on the development status, characteristics and scope of application of the four types of key ecological slope protection technologies, and proposes the outlooks from the aspects of research and development of habitat substrate configuration and reasonable selection of plants under special environment, optimization of slope support process, improvement of technical specifications and theoretical construction of ecological slope protection, and establishment of a scientific construction and maintenance management system and an effective evaluation mechanism of the slope protection project.

Keywords: ecological slope protection technology; spray seeding; combined structure; engraved groove drilling; ecological retaining wall

改革开放四十年来,我国水利、市政、公路、铁路等基础设施建设飞速发展,在促进区域发展和交通

便利方面取得了显著的成果。在工程建设过程中,挖掘边坡是很常见的,如果不及时治理,将会带来水

土流失、生物多样性缺失等生态问题,甚至会引发崩塌、泥石流和滑坡等地质灾害,严重破坏了当地环境,影响区域经济可持续发展。为解决上述问题,传统方法采用浆砌片石、浆砌片石(混凝土)骨架、混凝土预制框格及喷射混凝土等工程防护技术,这些技术不仅造价高、劳动强度大、受水流影响容易产生冲沟局部溜坍等病害^[1],而且生态恢复缓慢。因此利用植物进行边坡防护技术应时而生,已成为工程建设技术的重要组成部分^[2]。边坡生态防护叫植被护坡,也叫生物防护、植物固坡、边坡生态工程等,生态护坡一般定义为:利用活植株,与土木、非活植料结合或单独使用,以减少坡面的不稳定和冲刷^[3]。边坡生态防护技术主要包括土木工程学、工程力学、农学、林学、生态学等学科。近年来,随着水土保持工程学、恢复生态学等学科的发展,人们对边坡治理的认识不断提高^[4]。大量研究结果表明,植物的存在对于防治边坡水土流失、浅层滑坡、降低边坡土体开裂程度、提高坡面稳定性具有重要作用,植物护坡的理论研究和应用受到众多学者的重视^[5-9]。目前,在全球气候变暖的背景下,研究生态护坡理论及技术,不仅对保护“绿水青山”具有重要意义,而且对促进国民经济可持续发展、提升生态服务功能意义重大^[10-11]。为了更好地阐述相关研究成果并为未来的研究提供基础和方向,通过文献资料查阅和资料收集等方法,系统梳理生态护坡理论及技术研究现状,并结合实际提出相应的建议,为生态护坡工程理论研究和实践提供参考。

1 生态护坡技术国内外发展现状

1.1 国外发展现状

国外生态护坡技术大规模的运用主要集中在日本、中欧、北美等发达国家^[5,12-18]。上世纪 30 年代德国、奥地利等中欧国家开始引入生态护坡技术,自此该技术开始迅速发展并影响着全球的研究和运用;北美最早于 1926 年引入生态护坡技术并成功应用于道路建筑有关活动的坡面治理;1965 年美国便制定了关于高速公路绿化技术标准;在 20 世纪 40 年代末,该方法在英国开始盛行,用于陆地景观的稳定、堤岸和交通线路边坡的防护治理;直到 1994 年首次以植物护坡为主题的学术会议在牛津大学举行,标志着利用植物进行护坡开始受到学术界的关注。日本由于特殊的国情和地理环境,他们对于水土保持和绿化十分重视,在大规模基础设施建设的同时,就开始对工程扰动中遭破坏的植被和边坡进

行治理和绿化,其绿化的工艺、技术、设备具有国际先进水平,形成了一套成熟的边坡生态防护技术系统。

1.2 国内发展现状

我国生态护坡技术应用较早,但系统研究相对欧美国家较晚。1989 年广东省水利水电科学研究所引进第一台喷播机进行液压喷播试验取得了成功,揭开了我国边坡建植机械化的序幕;1993 年我国引进了土工材料植草护坡技术;1997 年云南昆曲高速公路的建设中引进了瑞士喷播技术来进行路堑边坡绿化,在坚硬贫瘠的坡面上建立了有效的植被保护系统^[14,19-20]。二十世纪以来,中国的护坡技术飞速发展,一些学者开始对岩质边坡的防护进行研究,如张俊云等^[3,21-22]、李绍才等^[23]总结了岩石边坡的生态特点和护坡工程原理,并介绍了框架内植草护坡、植被型生态混凝土技术、厚层基材喷射护坡技术等,还建立了岩石边坡生态护坡效果评价指标体系,为岩石边坡生态护坡的发展打下了基础。经过四十多年的发展,形成了以下四类代表性关键技术^[24]:以植被混凝土生态护坡技术^[25]和厚层基材喷射护坡技术^[26]为代表的喷播类,以框架梁^[27-28]和土工格室^[29]填土为代表的组合结构类,以钻孔、开槽构筑植生基材^[30]的刻槽钻孔类,以生态袋^[31]和格宾石笼挡墙^[32]为代表的生态挡墙类。这四类生态护坡技术不仅能够长期稳定工程建设中产生的土石边坡、岩质边坡、圯工材料边坡,还具有较好的生态恢复作用。

2 生态护坡理论与影响因素

2.1 生态护坡理论

边坡生态防护主要是指在裸露的坡面上重建植被的行为,以达到绿化边坡、稳定坡面、保持水土的目的。而根系是植物重要的器官,具有稳定植株、吸收土壤中水分、合成运输养分等重要功能,通过根系与土体的紧密接触,可以明显提高边坡土体的抗剪强度,从而增大边坡的稳定性。目前植物根系对土体的加固作用主要有加筋和锚固两大理论,即植物的水平浅根可视为带预应力的三维加筋材料对坡面起到了稳固的作用,垂直生长的深根和预应力锚索或锚杆一样,稳定坡体^[15,33-36]。植物根系在生长的过程中会形成复杂的根系网络,并与周围的土体粘结、吸附、咬合形成根-土复合体,在对土体加载的过程中,土体中的剪切力会转变为根系的拉应力,从而增强土体的抗剪强度^[37]。

植物护坡另一个重要的机理就是植物的水文效应。降雨时植物的根系会吸收土体中的孔隙水,降低土壤中的孔隙水压力,增大基质吸力,提高浅层边坡稳定性^[37];植物叶片能拦截降雨并吸收一部分雨水,抑制地表径流,减少对坡面的冲刷、侵蚀^[38-39]。吴俊杰等^[40]对非饱和土体研究指出基质吸力对边坡的稳定性有重要影响,边坡滑坡主要是因为基质吸力消失。王轩等^[41]通过试验对比裸坡和香根草植物边坡的土-水特征曲线指出,植物根系能有效提高土壤进气值,增大土体基质吸力,提高抗剪强度。

2.2 生态护坡影响因素

影响植物固坡稳定的因素有很多,其中最重要的因素为植物根系的分布形态和降雨强度。

根土加筋复合体强度受植物根系的分布形态影响,当植物的根系数量增多以及与土接触的面积增大时,相应的固土能力也会增强^[42-43]。孔纲强等^[44]通过透明土试验技术观测了植物根系生长过程中的分布形态,指出根系分布形态对含根复合土体抗剪强度影响显著,增强效果由大到小为混合、相交、倾斜、水平、竖直。肖宏彬等^[45]发现,贫瘠土壤中香根草根系的数量和横截面积沿深度呈递减趋势,根径和长度对抗拉强度影响明显。杨文辉等^[46]利用数值模拟研究发现配合土工格栅的深浅根混种法能有效提高边坡稳定性,且宜采取坡下密坡上疏方式种植。刘宇飞等^[47]和段青松等^[48]研究了草本植物根土复合体无侧限抗压强度增量与根系分布特征关系,同时对混播草本植物根系对土体抗剪强度的影响进行研究,发现混播根系土体的固土能力高于单播。曾红艳等^[49]对不同倾角下的根-土复合体开展大型直剪试验,指出根系倾角若增加,则根系断裂时产生的拉伸变形量增加,根-土复合体抗剪强度相应提高。

根系的吸水及蒸腾作用将会增大边坡土体内的基质吸力,提高坡土强度,但根系在坡土内生长过程中会形成大孔隙,降雨时产生优势流,在一定程度上削弱了根系固土效果^[50]。嵇晓雷等^[51]对植物根系固土边坡进行数值模拟计算,发现随着降雨强度增大,植物根系对边坡表层土体位移的控制效果将会减弱,边坡稳定性也随之降低。植物根系对土壤渗透性具有显著影响^[52],廖田婷等^[53]对比了 tap、plate 和 heart 3 种根型在降雨条件下对坡体内水分运移影响和浅层固土效果,发现植被根系能够很好地有效阻挡坡面水分渗透。大量研究表明:雨水不

仅对边坡有明显的冲刷作用,还影响着土体中的含水率,如果降雨强度大、持续时间长对坡面的侵蚀程度也会加强,植物根系不断被掏刷直至出现表面裸露或全部裸露的形态,导致不同土层间根系分布存在差异,进而影响根系对土体的加固效果^[54-60]。

3 关键技术发展现状

我国目前的生态护坡技术主要有喷播、组合结构、刻槽钻孔和生态挡墙四类关键技术^[24]。

3.1 喷播生态护坡技术

喷播类生态护坡技术是最为常见的防护措施,它是将植物种子、保水材料、黏结材料、疏松多孔材料、pH 调节剂、客土、肥料等混合起来,利用喷播机等机械喷射到坡面上,形成有利于植物生长的土壤基层,实现植被的快速恢复和稳固边坡的目的^[61-62]。该类护坡技术一般适用于裂隙发育的岩石坡面、坡度较陡、砂地、贫瘠地、盐碱地等植物生长困难的地域,结合挂网、格构梁等施工工艺,具有施工简单高效、安全美观、防护性能好、生态恢复效益高等优点,在铁路、公路、水利工程、矿山等边坡生态修复中得到广泛应用^[63-65]。常见的喷播类生态护坡技术主要有液压喷播技术、客土喷播技术、厚层基材喷播技术、植被混凝土技术、高次团粒喷播技术、三维植被网喷播技术、CF 网喷播技术等^[66-71]。其中,由张俊云等^[72]开发的厚层基材喷播技术和许文年、叶建军等^[73-74]开发研究的植被混凝土技术是目前喷播类护坡技术的主要代表。

喷播生态护坡技术的核心是植生基材的配比。基材是植物赖以生存的物质基础,研究材料配比时必须兼顾稳定性和满足植物生长的需要^[75]。国内学者从基材的配比、强度、稳定性、物理化学性质等内容进行了大量研究,如杨钊等^[76]通过实验探明水泥掺量为 8% 时,掺入 0.5% CMC (羧甲基纤维素钠)、1.0% 麦秸秆纤维,可使改性植被混凝土基材的力学性能与黑麦草的生长性能达到最佳;张富有等^[77]得出采用泥炭、水泥、土壤改良剂、pH 值调节剂等配制基质的最优配合比;刘大翔等^[78]通过实验得出了生物炭能够增加植被混凝土的孔隙率和渗透系数,调节植被混凝土的 pH 值,能促进植物根系生长。罗东城等^[79]研究得出水泥含量大于 5% 基质土壤对黑麦草根系的生长胁迫影响较大;杨卫军等^[80]研究了水泥掺量对磷石膏 (PGFH) 植生材料理化性质的影响,指出 PGFH 植生材料强度和抵抗雨水冲刷能力随水泥掺量增加而增大,水泥掺量为

4%~6% 时收缩率较合适;潘波等^[81]通过不固结不排水三轴试验得到纤维能够增大基材黏聚力而对内摩擦角无影响,并且棕纤维加筋效果优于玄武岩纤维;李双洋等^[82]研究发现在植被混凝土中掺入 0.3% 的椰纤维和 2% 的粉煤灰植物生长最好,植被混凝土的抗剪强度最高。

植物根系和微生物是互相影响的,根系通过分泌物调控群落结构以及多样性,而微生物能够调节土壤特性向有利于植物生长的方向进行,对提升植物抗逆性有着重要作用^[83-84],因此微生物改良基质成为现在的研究热点。Xia Lu 等^[85]采用 Biolog-Eco 方法对植被混凝土中 3 种优势草种的根际和非根际土进行了研究,得出植被改变了植被混凝土基质的微生物群落结构和功能多样性,提高了植物的整体代谢活性。王丽等^[86]指出土壤菌能够改善基质的团粒构造,增加基质肥力和改善水分循环,大大增加后期喷播植物的覆盖率和出苗率,植物根系也因此变得发达。杜祥运等^[87]发现植被混凝土中活化菌剂施用量为 6%~9% 时,基材肥力和植物生长状况较好。Shu 等^[58]以苔藓球菌(GM)、根内球菌(GI)和两种丛枝菌根(AMF)的混合物(MI)为外源接种剂,通过试验得出 GM、MI 接种的最大菌根感染率是在水泥含量为 5%~8%,GI 接种的最大真菌感染率是水泥含量为 5%~10%。Shu Qian 等^[88]通过试验探究得出 AMF 可以显著提高植物细胞间 CO_2 浓度进而增强植物光合作用^[89]。吕宋等^[68]利用芽孢杆菌作为生物活化剂用于纤维结构团粒喷播技术的基质配比中,在京雄城际铁路固安站路堤边坡生态防护中取得了很好的生态防护效果。Xiong Danwei 等^[90]指出植被混凝土的抗侵蚀性和抗剪强度随着时间的推移而增加,并在植物生长的后期达到最大值。

3.2 组合结构生态护坡技术

组合结构生态护坡技术主要以框架梁填土护坡技术和土工格室填土护坡技术为主,是典型的工程防护措施与生态防护措施相结合生态护坡技术。框架梁填土护坡技术主要是指在坡面上先浇筑(或预制装配)混凝土框架梁或利用圬工材料砌筑类似窗口结构的框架防止浅层土体滑移的加固措施,并在格子或骨架内填土建植、堆放生态袋、生态砖、铺设草皮或植被毯,以达到涵养水土防止雨水冲刷,待植物生长后达到坡面绿化的技术;土工格室是属于土工合成的特殊材料,展开后的格室内可以填埋种植土,并撒播草籽、种植灌木,在原始坡面无法恢复植

被的情况下可以获得理想的绿化效果。

在一些地质较差的高边坡防护中,通常会采用锚杆+框格梁、框格梁+预应力锚索 2 种形式^[91]。该形式具有刚度大、边坡稳定性好、适用范围宽等优点,但长期稳定性较差,施工工艺繁琐,与坡面接触的地方受雨水长期掏刷,梁悬空后容易断裂^[92]。国内研究人员对其施工工艺和结构设计进行了优化,例如杨阳等^[93]在安徽岳武高速公路边坡工程中,利用植被毯代替植生袋后结合框格梁的防护效果和水土保持效果更优,能够有效提高坡面表层抗剪强度,显著改善土壤理化性质并促进植物生长。尹萍等^[27]针对高寒地区的岩石和岩土混合边坡提出以植生混凝土与塑石、坡面挂网喷土为辅内嵌式隐形锚杆框格生态防护新工艺,获得了较好效果。毛正君等^[94]针对黄土高原的矿区提出了 PVC 板材格构锚杆梁植被种植保障技术,改善了传统施工工艺,提高了边坡的稳定性。郝廷伟等^[95]针对矿山排土场坡面防护提出了一种质量轻、密度小、具有良好的抗压、耐弯及弹性性能优良的新型柔性轻型格构梁,能够大幅提升边坡浅层土体的稳定性。在结构设计方面,侯俊伟^[96]基于文克尔地基理论提出了岩质边坡预应力锚杆框格梁内力简化计算方法,优化了梁的截面和配筋。张太玥等^[97]利用双参数弹性地基模型推导出有限长梁受集中力的内力解答,辅以 ABAQUS 有限元软件模拟验证了理论解答的正确性,证明双参数地基模型比 Winkler 地基模型精确性高,可利用该方法优化锚杆格构梁设计。李楠等^[98]也采用 ABAQUS 有限元软件建立了压力型锚杆联合格构梁支护的锚固滑坡模型,分析了锚固滑坡的加速度响应规律、地震动参数对加速度响应的影响以及压力型锚杆的受力特征,研究结果对于压力型锚杆支护滑坡的抗震设计具有一定的指导意义。

对土工格室边坡生态防护技术的研究热点主要集中于技术防护机理、设计计算方法简化、新材料研制以及施工工艺的优化。王广月等^[99]利用 ABAQUS 有限元软件建立边坡-土工格室-铆钉之间相互作用的三维有限元模型,对不同加固条件下边坡的安全系数以及降雨入渗条件下孔压、饱和度等参数在土体内的分布规律进行了模拟,揭示了土工格室生态防护边坡的稳定机制。鲁志方等^[100]指出土工格室能够将坡面表层土分隔成若干独立的小单元,在夯实功的作用下松散土体被挤入格室方格内,格室侧壁对土体产生一个环向包裹作用力,能够

减小、隔断、限制膨胀土裂隙,从而对膨胀土边坡起到稳固作用。王成元等^[101]介绍了一种由聚酯/聚酰胺纳米纤维分散于乙烯基质内形成的高分子纳米复合合金 PCA,做成长条形片材,经超声波焊接展开后成蜂窝状立体网格的蜂巢格室。张冰冰等^[102]采用双轴拉伸试验研究了聚丙烯高强土工格室拉伸性能,并指出土工格室的抗拉承载力的影响程度为格室高度>格室焊距>加载速度。蒋建良等^[103]提出由生态混凝土、土工格室、铁丝网和锚杆共同组成的新型生态混凝土托举结构系统,使基材得到有效固定,同时也为植物营造了良好的生长环境。

3.3 刻槽钻孔类生态护坡技术

刻槽钻孔类生态护坡技术是在边坡上钻孔、开槽或者安装植生槽等装置,利用槽、孔构筑适宜植物生长的生境基材,并为植物生长提供必要的养分,能有效防止在后期植物群落演替时水土流失。该类护坡技术在植物生长基材的配置方面有着很高的要求,如果配置不当,基材后期容易板结,不利于植物的生长。在植物配置方面,乔灌草藤结合的多元植物模式是该类技术的首选,这种模式下能保证植物长青^[104]。常见的断面形式主要有 V 型、口型和 L 型。

目前刻槽钻孔类护坡技术与其他防护技术相结合以及槽、孔内基质配比是国内学术界的研究热点。在河道边坡治理中,袁以美等^[105]提出在混凝土挡墙临水侧墙面上设置数排生态槽,并设置自动浇灌系统使植物健康生长。张恒等^[106]提出了一种新型生境构筑法口型坑,能在一定程度上增加基材稳定性,并且口型坑内植物根系固土的效果会随口型坑尺寸增加而增大。李锐等^[107]以污泥为主要原料,氧化钙和氯化镁作为微生物灭活剂和胶凝剂,混合草种制成“植入泥浆”注入坡面以下,开发了一种植入型生态护坡配方。苏奇童等^[108]则是采用台阶植被再生结合“崖壁打孔+3D 打印土”植被再生对裸岩边坡进行绿化,此方法使植被得到了较好的恢复。刘娜等^[109]通过试验研究发现,当种植孔底部填充 20 cm 砂砾卵石+基质土时,植被生长良好,生态恢复效果最佳。

3.4 生态挡墙护坡技术

生态挡墙护坡技术主要以生态袋挡墙和格宾石笼挡墙两种为主。生态袋挡墙护坡技术也称植生袋护坡技术,该技术主要是在土工袋中填入营养土,再加入植物种子,沿着坡体堆砌,每个袋子之间采用特殊的结构联结,在坡体形成具有一定强度的软体结

构,待土工袋中的植物发芽生长以后实现边坡绿化和防护。该技术常用于坡度不超过 63°的岩石风化及破碎程度不高的边坡或者河岸边坡的防护,既能够满足生态袋法的覆绿效果,又能够满足施工时的稳定性^[110]。李凯等^[111]研究对比了永定河流域北京段 9 种不同生态护岸形式,以减流减沙效果和减缓无机物含量为评价指标,得到效果最好的护坡结构是生态袋,其次是石笼,土工格栅网效果最差。包赛很那等^[112]则是在充分灌水和高氮条件下,得到了有利于植物生长的最佳水肥组合,为后续生态挡墙护坡技术提供了参考。

在稳定性方面,植物根系和雨水入渗均能产生显著影响,周云艳等^[113]通过室内模型试验指出在生态袋加筋挡土墙中根系加筋能增强生态袋挡墙的整体刚度,使承载力提高、稳定性增加,并且增强作用随根系长度增加而增加。蒋希雁等^[114]通过三轴试验研究了含水率对生态袋加筋土的力学特性和邓肯-张模型参数影响,并获取了初始切线模量随含水率变化的经验公式。蒋希雁等^[115]又通过实验模拟特大暴雨条件下不同坡比的生态袋防护降雨入渗,分析不同条件的强降雨作用下生态袋护坡的入渗规律,为强降雨地区的边坡防护设计提供参考。

格宾石笼是由耐腐蚀、强度大、延展性强的低碳钢丝包覆聚氯乙烯(PVC)采用机械绞合制成,填充具有抗风化、耐腐蚀的坚硬块石,并在石料之间填土,并设置反滤层,为植物生长提供必要的生长条件^[116-117]。格宾石笼充分发挥了材料的优势,拥有良好的柔韧性、整体性、透水性、耐久性以及协调变形能力。目前该技术常用于路堤挡墙和河岸护坡当中,很多学者在新型结构设计和覆土功能等方面进行了探索。杨果林等^[117]将煤矸石作为格宾箱填料,对加筋挡墙墙后土体水平土压力、挡墙内部土体水平变形和垂直土压力以及筋材应变分布进行了系统的研究,建议施工过程中进行挡墙台前回填处理以限制墙体侧移和鼓肚现象。李慈航等^[118]研发了格宾-桩板墙组合结构用于拦挡泥石流,通过对被拦物源的级配组成的模拟分析后发现格宾-桩板墙拦阻结构的拦阻效果明显。杨凡等^[119]针对强降雨条件下植被土颗粒的流失问题,对格宾网箱填充物进行反滤层的优化设计,利用自行设置的装置进行了实验探究,指出反滤层层数设置为两层,上下层厚度均为 100 mm 且上层碎石粒径小于 20 mm、下层碎石粒径为 20 mm~100 mm 时,反滤层的防冲刷效果最佳。

4 坡面生态修复技术的特点

我国生态护坡技术经过三十多年的研究与实践,已从初期对发达国家防护技术的模仿转向适合我国地理环境实质性改良及研发,各类技术虽蓬勃发展,相关基础理论研究也取得了重要突破,但真正形成系统化的技术并不多。四类坡面生态修复技术各有特点,适用范围也各不相同。

4.1 喷播生态护坡技术

喷播类技术机械化程度高、施工作业面广、施工工期短,适用于不同坡度、不同质地的边坡,是目前国内应用最广泛的边坡绿化技术。对于生态修复效果显著的高陡岩质边坡,在实现坡面快速复绿的同时,还能有效防止基材冲刷,使基材长期稳定地附着在高陡边坡上,对高陡边坡的绿化效果十分显著,能有效避免生态工程重建现象。该类技术的核心是基质土壤的重建,但是施工后期的管理难、基材肥力下降、保水性较差、植物存活困难、强降雨基材冲刷严重,容易出现坍塌等问题亟待解决。

4.2 组合结构生态护坡技术

框架梁生态护坡技术多用于防护现场施工高差大、施工区域周边环境复杂、边坡防护要求整体结构稳定性强的边坡,广泛应用于公路、铁路路基边坡。而土工格室生态护坡技术具有较高的整体性和柔韧性,能极大地缓解水流流速,避免坡面径流的形成,弥补了框架梁易松动、塌陷、架空等缺陷,具有较强实用性。

4.3 刻槽钻孔生态护坡技术

刻槽钻孔类技术一般是通过配置高低乔灌木、爬藤植物等在穴坑内重建生态系统,主要用于改善生态修复工程中乔灌木存活率较低的现象,比较适合裸露岩质山体的生态恢复,但在坡面施工时对坡面稳定性有一定影响。

4.4 生态挡墙护坡技术

生态挡墙类护坡技术施工简单、造价低廉,一般较适用于坡度较缓、岩质柔软、风化程度较高的岩质边坡以及河流护岸等。应结合工程特点、地质环境特点和技术要求等因素综合考虑,因地制宜灵活应用。然而,随着生态袋的大量使用,袋体破损、填充物渗漏、整体或局部坍塌、难以构筑或生长不良等问题也越来越多地暴露出来。

5 结论与展望

针对各类坡面生态修复技术存在的问题,在后

续的研究中应从以下四个方面进行深入的研究:

(1) 特殊环境下的生境基材配置的研发以及植物合理的选择京举行。我国地域辽阔,极端气候环境分布广泛,这些环境对基材的要求较高,应开展特殊区域环境下植物生长的生境基材配置研究,调和基材物理性质、化学性质、力学性能耦合作用下与植生性能矛盾关系,为在极端环境下更好地开展边坡修复工作提供理论依据;对适宜乔灌木生长的基材进行深入研究,使坡面植物品种丰富,得以构建完整的植物群落;在植物的合理配置上,应充分考虑时效性,开展在特殊环境下的植物种类组成和群落结构,综合选择具有抗逆性、繁殖能力强的多种科类植物进行种植。

(2) 建立科学的施工养护管理体系和边坡防护工程的有效评价机制。如何科学合理地应用和创建适合防护区域的管理体系和有效评价机制是应用好技术的前提。边坡生态防护工程易出现土壤肥力下降、植被重建后缺水的现象,是一项长期、复杂的工程,施工单位大水大肥等粗放的水肥管理模式不仅使资源浪费,而且利用效率低下,所以后期的养护管理至关重要。对不同生长时期的植物进行水肥条件的精准控制,提高植物对营养物质和水的利用率,对水肥一体化高效节水灌溉技术应用需重点研究;对灌溉装置进行深入研究,针对传统灌溉方式进行优化设计,对一些难以渗透水分的基材进行处理;建立起科学有效的养护管理规范,制定不同的养护标准,节约费用。我国现行的评价体系主要由五个方面组成,即保护性能、土壤条件、植被条件、景观效果和综合效益,缺乏对工程长期效应评价标准。长期效应评价体系应以植物恢复多样性为主导,研究建立和完善多学科交叉、信息化、数字化融合的长期效应评价体系,补齐建设后效果评价短板,为生态护坡工程的长期稳定和后期养护管理提供参考依据。

(3) 优化边坡支护工艺。在西南地区,工程建设会遇到如高强度断裂带,也会经常遇到对区域内原始植被生态系统、动植物生存栖息地破坏严重的山体滑坡、泥石流等地质灾害^[120]。对边坡支护结构的不合理设计和简单复绿,所导致的结果是水土流失严重、生态效果不佳。护坡的最终效果应该是稳定性和生态恢复效果都达到要求,单纯的植物保护可能在保护初期无法达到要求,而且护坡容易出现溜坡现象。因此,应深入研究工程防护与植被保护的结合,因地制宜设置合理的结构形式,建立稳固的植被-工程防护体系,使生态护坡工程发挥最大

效益,从而减少对传统工程材料的使用,围绕可持续发展、追求安全经济、节约资源,加大对新材料、新工艺的研究力度。

(4) 完善生态护坡方面的技术规范和理论研究。尽管我国已出台了相关生态护坡技术规范,仅是某一地区的技术标准,在已完成的项目建设中,大多只能以施工经验为基础进行参考。因此,建立于热河谷地区、旱寒地区、水库消落带地区等不同气候、环境、地域的生态护坡技术标准,在工程上更具指导意义。

参考文献:

- [1] 杨晓华,王文生. 土工格室生态护坡在黄土地区公路边坡防护中的应用[J]. 公路,2004,49(8):179-182.
- [2] 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.
- [3] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报,2000,40(4):36-38.
- [4] 叶建军,许文年,鄢朝勇,等. 边坡生物治理回顾与展望[J]. 水土保持研究,2005,12(1):173-177.
- [5] Wang Yanghang, Liu Xiaoxia. Plant slope protection in highway engineering[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018,170(5):052038.
- [6] 张劲捷,杨文琦,周成,等. 植被联合植筋带护坡水力特性模型试验[J]. 水利水运工程学报,2021(3):136-143.
- [7] 唐瑞泽,汤骅,宗全利,等. 植被根系对于旱内陆河流岸坡冲刷过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报,2023,37(2):27-36.
- [8] 徐中华,斜逢光,陈锦剑,等. 活树桩固坡对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学,2004(S2):275-279.
- [9] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等. 西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J]. 农业工程学报,2021,37(2):142-151.
- [10] Qin T, He S, Liu S, et al. Optimal allocation of slope ecological restoration for the climate change mitigation and natural function improvement[J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:837311.
- [11] Shen Y, Li Q, Pei X, et al. Ecological restoration of engineering slopes in China: A review[J]. Sustainability, 2023,15(6):5354.
- [12] 周跃, Watts D. 坡面生态工程及其发展现状[J]. 生态学杂志,1999,18(5):68-73,79.
- [13] 周跃, Watts D. 欧美坡面生态工程原理及应用的发展现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):80-86.
- [14] 段晓明. 植被护坡研究与应用现状[J]. 中国农学通报,2007,23(3):474-477.
- [15] 张俊云,李绍才,周德培. 岩石边坡植被护坡技术(1)——植被护坡简介[J]. 路基工程,2000(5):1-4.
- [16] 王文生,杨晓华,谢永利. 公路边坡植物的护坡机理[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26-30.
- [17] 芦建国,于冬梅. 高速公路边坡生态防护研究综述[J]. 中外公路,2008,28(5):29-32.
- [18] 杜娟. 客土喷播施工法在日本的应用与发展[J]. 公路,2000,45(7):72-73.
- [19] 陈济丁. 昆曲高速公路绿化实践和思考[J]. 云南交通科技,1998(2):23-25.
- [20] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2010.
- [21] 张俊云,周德培,李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1400-1403.
- [22] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):239-242.
- [23] 龙凤,李绍才,孙海龙,等. 岩石边坡生态护坡效果评价指标体系及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3095-3101.
- [24] 杨雨荷,廖克武,麻坚,等. 中国30年边坡绿化技术专利发展[J]. 生态学杂志,2023,42(8):1993-2002.
- [25] 三峡大学. 一种提高植被混凝土中高羊茅净光合速率的方法;CN202110277393.0[P]. 2021-07-09.
- [26] 铁汉山艺环境建设有限公司. 一种厚层基材喷播植草护坡结构;CN201921070946.X[P]. 2020-06-30.
- [27] 尹萍,贾富贵,蒲广宁. 高寒高海拔地区岩石及岩土混合边坡生态防护新技术研究[J]. 公路,2019,64(8):32-38.
- [28] 中国水利水电第十一工程局有限公司. 一种高海拔地区边坡水土保持方法;CN202010439290.5[P]. 2020-09-08.
- [29] 张振武. 一种土工格室;CN201510599429.1[P]. 2015-11-18.
- [30] 叶建军. 育苗营养钵用于喷射生态护坡的结构及方法;CN201910611180.X[P]. 2019-10-08.
- [31] 罗金. 一种生态袋;CN201810924341.6[P]. 2018-12-11.
- [32] 苏州大学. 一种基于河岸格宾网挡墙的植物生态系统;CN201420227921.7[P]. 2014-12-03.
- [33] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系固土的理论基础[J]. 水土保持通报,2008,28(6):180-186.
- [34] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control[M]. John Wiley & Sons, 1996.

- [35] 杨维西,赵廷宁,李生智,等. 人工刺槐林和油松林的根系固土作用初探[J]. 水土保持学报,1988,2(4):38-44.
- [36] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍. 林木根系固土机理数值分析[J]. 北京林业大学学报,2006,28(S2):80-84.
- [37] 周云艳,陈建平,王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报,2012,21(6):1171-1177.
- [38] 邓友生,梅靖宇,王 欢,等. 铁路边坡生态防护应用研究[J]. 建筑技术,2017,48(9):996-998.
- [39] 付江涛,李光莹,虎啸天,等. 植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报,2014,22(6):1135-1146.
- [40] 吴俊杰,王成华,李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学,2004,25(5):732-736,744.
- [41] 王 轩,李珍玉,肖宏彬,等. 基于土-水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究[J]. 水土保持学报,2021,35(5):57-62,71.
- [42] 夏振尧,周正军,黄晓乐,等. 植被护坡根系浅层固土与分形特征关系初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3641-3647.
- [43] 许英姿,朱乔生,黄 效. 基于熵值法的南宁市膨胀土护坡植被根系特征指标评价[J]. 水土保持通报,2022,42(2):189-194.
- [44] 孔纲强,文 磊,刘汉龙,等. 植物根系分布形态及含根复合土强度特性试验[J]. 岩土力学,2019,40(10):3717-3723.
- [45] 肖宏彬,赵 亮,李珍玉,等. 香根草根系的分布形态及抗拉强度试验研究[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(3):6-10.
- [46] 杨文辉,章定文,闫 茜,等. 深浅根混种法加固边坡稳定性的数值分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(1):161-168.
- [47] 刘宇飞,赵燚柯,杨苑君,等. 2 种草本植物混播根系对土体抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):81-88.
- [48] 段青松,赵燚柯,杨 松,等. 不同草本植物根系提高无侧限受压土体的抗剪强度[J]. 土壤学报,2019,56(3):650-660.
- [49] 曾红艳,吴美苏,周 成,等. 根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):151-156.
- [50] 王一冰,杨文琦,周 成,等. 植筋带联合植物护坡的水力特性数值分析[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):238-243.
- [51] 嵇晓雷,杨 平. 不同根系布置模式对降雨条件下边坡稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(7):86-89,97.
- [52] 刘定辉,李 勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- [53] 廖田婷,蒋关鲁,张崇磊,等. 考虑水文效应的不同植被根系护坡效果数值分析[J]. 长江科学院院报,2022,39(9):102-108,117.
- [54] 李桂芳,王坚桦,谢福倩,等. 降雨与作物种植方式对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文),2022,20(1):65-73.
- [55] Xiao Yang, Ma Guoliang, Wu Huanran, et al. Closure to " Rainfall-Induced Erosion of Biocemented Graded Slopes" [J]. International Journal of Geomechanics, 2021,22(1):07023004.
- [56] 石建周,刘贤德,田 青,等. 六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应[J]. 干旱区研究,2023,40(4):594-604.
- [57] 杨秀超,方 乾,尹晓爱,等. 模拟降雨条件下林木裸露根系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(4):7-12.
- [58] 嵇晓雷,杨 平. 不同根系布置模式对降雨条件下边坡稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(7):86-89,97.
- [59] 刘长娥,邹国燕,周 胜,等. 江苏太湖地区草坪根系形态对初期降雨径流的影响[J]. 上海农业学报,2017,33(5):41-47.
- [60] 郭旭曼,王佳敏,杜浩瀚,等. 桢楠幼苗通过改变生物量分配及根系分布适应喀斯特岩溶裂隙生境及降雨时间格局[J]. 生态学报,2023,43(1):379-387.
- [61] 谭映瑜. 喷播草种护坡绿化技术[J]. 路基工程,2004(5):45-47.
- [62] 高德彬,陈增建,倪万魁,等. 厚层基材喷播植草黄土路堑高边坡防护技术研究[J]. 工程勘察,2008(5):1-4.
- [63] 吕大伟,杨永红. 客土喷播技术在山区高速公路边坡防护绿化中的应用[J]. 公路交通技术,2006,22(3):141-145.
- [64] 申 剑,周明涛,田德智,等. 我国喷混植生护坡绿化技术浅析[J]. 人民长江,2020,51(3):61-64,80.
- [65] 冀陆奇. 喷混植生护坡技术在花桥水利工程中的应用[J]. 人民黄河,2020,42(S2):102-104.
- [66] 赵百磊. 山区高速公路路堑边坡生态防护质量控制与效果评价方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [67] 兰虎林,尹金珠,彭国涛,等. 岩质边坡植被恢复研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2011,48(3):713-719.
- [68] 吕 宋,魏少伟,姚建平,等. 不同坡率下纤维结构团粒喷播技术的适用性研究与应用[J]. 铁道建筑,

- 2021,61(2):79-82,94.
- [69] 刘本同,钱 华,何志华,等.我国岩石边坡植被修复技术现状和展望[J].浙江林业科技,2004(3):48-55.
- [70] 王忠伟,黄景春,宁立波,等.灰岩边坡挂网喷播技术适宜坡度条件研究[J].环境科学与技术,2018,41(1):156-162.
- [71] 申 剑,周明涛,田德智,等.我国喷混植生护坡绿化技术浅析[J].人民长江,2020,51(3):61-64,80.
- [72] 张俊云,周德培.厚层基材喷射植被护坡植物选型设计研究[J].水土保持学报,2002,16(4):163-165.
- [73] 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(中英文),2004,33(10):50-52.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 杨 钊,王晓梅,周云艳.改性植被混凝土基材力学与植生试验研究[J].安全与环境工程,2022,29(1):225-233.
- [77] 张富有,辛永新,洪 杰,等.高山峡谷地区高速公路边坡生态防护基质配比优化研究[J].公路,2021,66(8):333-337.
- [78] 刘大翔,高 贤,许亚坤,等.施加生物炭对植被混凝土理化性质及狗牙根生物量的影响[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(1):1-14.
- [79] 罗东城,张立成,胡德勇,等.不同水泥含量的基质土壤对黑麦草根系生长胁迫的影响[J].河南农业大学学报,2021,55(4):661-665,688.
- [80] 杨卫军,杨成军,潘 玲,等.水泥改性磷石膏基植生材料的研究[J].非金属矿,2020,43(4):20-23.
- [81] 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.
- [82] 李双洋,陈芳清,熊丹伟.外掺料对植被混凝土高羊茅根系生长及抗剪强度的作用[J].环境工程技术学报,2023,13(3):1242-1248.
- [83] 连文慧,董 雷,李文均.土壤环境下的根际微生物和植物互作关系研究进展[J].微生物学杂志,2021,41(4):74-83.
- [84] 丁 娜,林 华,张学洪,等.植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J].土壤通报,2022,53(5):1212-1219.
- [85] Xia Lu, Zhao Binqing, Luo Ting, et al. Microbial functional diversity in rhizosphere and non-rhizosphere soil of different dominant species in a vegetation concrete slope [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2022,36(1):379-388.
- [86] 王 丽,张金池,梦 莉,等.土壤菌对植被生长及喷播基质物理结构的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):144-147,152.
- [87] 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.
- [88] Shu Qian, Xia Dong, Ma Yueyang, et al. Response of physiological characteristics of ecological restoration plants to substrate cement content under exogenous arbuscular mycorrhizal fungal inoculation[J]. Frontiers in Plant Science, 2022,13:1028553.
- [89] Yan Yujie, Zhao Bingqin, Xu Wennian, et al. The future prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in slope ecological restoration[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020,32(9):2031-2040.
- [90] Xiong Danwei, Chen Fangqing, Lv Kun, et al. The performance and temporal dynamics of vegetation concretes comprising three herbaceous species in soil stabilization and slope protection[J]. Ecological Engineering, 2023, 188:106873.
- [91] 肖 策,褚丝绪,徐国良,等.框格梁施工技术在高边坡防护工程中的应用[J].施工技术,2013,42(S1):85-87.
- [92] 栗海军,刘 泽.公路边坡生态防护方法及其常见病害分析[J].工程技术研究,2020,51(5):67-68.
- [93] 杨 阳,杨建英,赵 平,等.两种框格梁生态护坡技术及其应用效果——以安徽岳武高速公路为例[J].中国水土保持科学,2015,13(5):118-124.
- [94] 毛正君,王双明,安 宁.黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究——PVC板材格构锚杆梁植被种植保障技术[J].煤炭科学技术,2020,48(4):120-128.
- [95] 郝廷伟,李 驰,高 瑜,等.轻型格构边坡防护数值应力及稳定性分析[J].水利水电技术(中英文),2023,54(6):176-188.
- [96] 侯俊伟,吴曙光.预应力锚杆框格梁加固岩质边坡计算方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(5):74-79.
- [97] 张太玥,梅 岭.锚杆格构梁节点荷载分配研究与优化设计[J].水利水电技术(中英文),2016,47(1):36-40.
- [98] 李 楠,汪班桥,门玉明,等.压力型锚杆支护滑坡的地震动响应特性研究[J].地质力学学报,2018,24(4):490-497.
- [99] 王广月,王 云.土工格室生态边坡稳定性数值模拟分析[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(5):924-933.

- [100] 鲁志方,杨晓华,晏长根.土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J].公路,2016,61(4):23-28.
- [101] 王成元,肖彩玲,李朝晖.蜂巢格室坡面绿化在城市水土保持中的应用[J].水土保持应用技术,2022(5):42-44.
- [102] 张冰冰,刘杰,阿肯江·托呼提,等.基于响应面法的聚丙烯高强土工格室拉伸性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1348-1360.
- [103] 蒋建良,王华俊,卿翠贵,等.采用土工格室的公路岩质陡坡绿化研究[J].公路,2019,64(4):305-308.
- [104] 陈晓蓉,朱兆华,徐国钢,等.高陡采石场边坡生态修复工程设计初探及效果观测[J].环境保护与循环经济,2019,39(3):42-48.
- [105] 袁以美,叶合欣,罗日洪.植绿生态挡墙及自动浇灌系统研究[J].中国农村水利水电,2020(4):177-180,185.
- [106] 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(中英文),2018,49(4):170-178.
- [107] 李锐,黄永刚,胡筱敏.一种植入型生态护坡的制备工艺及施工方法[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1201-1204.
- [108] 苏奇童,田翊,李中召,等.南太行地区裸岩边坡植被再生技术研究与应用[J].环境生态学,2023,5(7):101-106.
- [109] 刘娜,任国俊,王磊.兴隆山矿山岩质边坡生态修复技术研究[J].金属矿山,2022(10):218-225.
- [110] 李华翔,宁立波,杜博涛,等.岩质边坡生态袋覆绿技术适用条件研究[J].环境科学与技术,2017,40(4):13-18.
- [111] 李凯,程金花,祁生林.永定河流域(北京段)不同生态护岸形式坡面侵蚀及面源污染特征[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(1):74-83.
- [112] 包赛很那,苗彦军,郭云霄,等.西藏林芝地区高等级公路生态袋边坡修复技术应用研究[J].中国水土保持科学,2019,17(3):140-147.
- [113] 周云艳,钱同辉,宋鑫,等.植物根系长度对生态袋加筋土挡墙稳定性的影响[J].农业工程学报,2020,36(13):102-108.
- [114] 蒋希雁,许梦然,陈宇宏.基于三轴试验生态袋加筋土邓肯-张模型参数研究[J].中国农村水利水电,2022(10):219-227.
- [115] 蒋希雁,陈宇宏,许梦然,等.强降雨作用下生态袋护坡入渗规律模型试验研究[J].中国农村水利水电,2022(7):1-9.
- [116] 唐福尧,姚爱军,杨帆,等.岩质高切坡生态再造格宾支护结构大型现场试验研究[C]//贵州省岩石力学与工程学会,中国建筑学会工程勘察分会,中国水利学会勘测专业委员会,中国岩石力学与工程学会滑坡与工程边坡分会,北京华森启达企业管理咨询有限公司.第十二届全国边坡工程技术大会论文集,2020:360-367.
- [117] 杨果林,张梓振,杜勇立,等.煤矸石组合式加筋挡土墙现场试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1382-1390.
- [118] 李慈航,吴红刚,陈小云.格宾-桩板墙泥石流组合拦阻结构模型试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):71-76.
- [119] 杨凡,张志红,吴长路,等.格宾网箱覆绿功能反滤层优化设计研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):235-239.
- [120] 戴德江,黄骤屹,徐仁华,等.西南高速公路岩质边坡生态防护安全性及耐久性正效应分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(10):153-157.

(上接第 210 页)

- [26] 李中杰.不同灌溉技术和灌水量的陕北山地苹果节水增产提质效应研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [27] 孙浩,黄修桥,韩启彪,等.下衬阻水板宽度对地下滴灌土壤水分运移的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(2):64-71.
- [28] 何振嘉.涌泉根灌单点源入渗湿润体特性研究[J].灌溉排水学报,2018,37(S1):34-37.
- [29] 费良军,曹俊,聂卫波.涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J].排灌机械工程学报,2011,29(3):260-265.
- [30] 郑健,胡笑涛,蔡焕杰,等.局部控制地下浸润灌溉土壤入渗特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(3):227-232.
- [31] 杨喜莲,刘扬.肥液浓度对涌泉根灌条件下湿润体的影响[J].甘肃水利水电技术,2018,54(6):19-24.
- [32] 李耀刚.涌泉根灌土壤水分运动特性试验及模拟研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [33] 刘显,费良军.灌水器流量对涌泉根灌土壤水氮运移的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(10):903-911.
- [34] 马娟娟,孙西欢,李占斌.入渗水头对土壤入渗参数的影响[J].灌溉排水学报,2004,23(5):53-55.