

中国岩质边坡植被护坡技术研究进展

张家明¹, 陈积普¹, 杨继清², 何玉琼³, 田林¹

(1.昆明理工大学建筑工程学院,昆明 650500; 2.云南农业大学建筑工程学院,昆明 650100; 3.昆明理工大学交通工程学院,昆明 650500)

摘要: 高速公路建设等活动产生了大量的裸露岩质边坡。随着环保观念的逐渐普及和增强,人们对生态环境保护的要求越来越高,岩质边坡植被护坡技术已成为了工程建设技术的一个重要组成部分,并已取得了很多研究成果。首先分析了岩质边坡植被恢复的特点,然后从植被护坡技术应用、植物的选择和配置、生态基材的配比和特性、植被护坡机制和植被恢复效果评价 5 个方面对中国岩质边坡植被护坡技术的研究进行总结和概述,在此基础上,从特殊生境条件下的高陡岩质边坡植被护坡技术研发、岩质坡面—基材—根系的相互作用机理及整体力学稳定性、植被恢复效果评价长效机制和基于气候、地理环境等因子的岩质边坡植被护坡技术标准的编制 4 个方面,提出了该领域有待深入研究的问题及未来的发展趋势。

关键词: 岩质边坡; 植被恢复; 护坡技术; 研究进展

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.001

Advances in Biological Protection of Rock Slopes in China

ZHANG Jiaming¹, CHENG Jipu¹, YANG Jiqing², HE Yuqiong³, TIAN Lin¹

(1.Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2.College of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650100;

3.Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: The construction of infrastructures such as highways always results in many exposed rock slopes. With the increasing awareness of human environmental protection, the higher requirement for environmental protection is being proposed. Therefore, as an important component of engineering construction technology, the biological protection of rock slope has obtained many achievements. Firstly, the features of vegetation restoration in rock slopes were analyzed. Secondly, the paper reviewed the application of biological protection technology in rock slopes, surface vegetation rational selection and design, the compound ratio of ecological base materials and their properties, the mechanism of vegetation restoration and its effect evaluation in China. Although much has been achieved, there are still many problems need to be deeply and systematically explored. The future studies may focus on the research and exploitation of biological protection in high-steep rock slope in special habitats, the interaction mechanism of rock slope-ecological base material-plant root system and its overall mechanical stability, constructing a long-term mechanism for the assessment and evaluation of the vegetation restoration and the establishment of technical specification for biological protection of rock slopes based on climate, geographical conditions.

Keywords: rock slope; vegetation restoration; biological protection; research progress

近 30 年来,我国经济快速发展,科技水平持续提高,综合国力不断提升,各种工程建设活动迅猛发展,例如高速公路和铁路工程、港口工程、能源开发利用工程和矿产资源开采工程等。这些工程建设活动必然形成

了很多裸露的岩质边坡,既破坏了植被和土壤,损毁生态景观,又容易造成水土流失,诱发崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害^[1]。随着人类环保意识的不断增强,人们对环境质量的要求越来越高,工程建设与环境保护

收稿日期:2019-04-03

资助项目:国家自然科学基金项目(41807258);云南省应用基础研究计划项目(2014FD007);云南省人才培养项目(KKSY201406009);云南省教育厅科学研究基金项目(2018JS024)

第一作者:张家明(1984—),男,博士,讲师,主要从事强降雨条件下植被斜坡稳定性研究。E-mail:zjm_engeo@163.com

的矛盾日益突出,传统的岩质边坡工程护坡技术(如水泥抹面、捶面、喷混凝土以及浆砌片石护坡等)绿化效果和生态环境效益较差^[2],已不能满足环境保护的要求。因此,岩质边坡植被护坡技术应时而生,并已成为工程建设技术的一个重要组成部分。

植被护坡也称为生态护坡,也有边坡植被恢复、植物固坡、坡面生态工程、坡面植被恢复等说法,是指“单独用活的植物,或者植物与土木工程材料、非生命植物材料相结合,达到涵水固土,减轻坡面不稳定性 and 侵蚀的目的,在坡面形成与周边环境相协调的生态系统”^[3],是集合岩土力学、恢复生态学、植物学、土壤学、水土保持学等多学科的复合型工程技术^[4]。日、美、澳、英等发达国家的岩石边坡植被护坡技术非常成熟,已建立了完备的技术理论体系^[5]。我国在该领域的研究比上述国家开展得相对较晚,但凭借近年来快速发展的工程建设活动和对生态环境保护的严格要求,我国的岩质边坡植被恢复技术研究也取得了重要进展。例如,李绍才等^[6]从岩石边坡的生态特点、护坡工程原理、护坡技术(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)及其不足、今后的发展方向 4 个方面分析了中国岩石边坡植被护坡技术的发展现状。胡双双等^[7]从技术原理、生态护坡理论、施工方法和草种配比方面综述了生态基材喷射护坡技术在我国高速公路路堑岩质边坡植被恢复工程中的应用。夏冬等^[5]介绍了植被混凝土防护技术、客土喷播技术、三维植被网喷播技术和厚层基材喷播技术的国内外研究现状,并提炼了岩质边坡生态重建技术的发展方向。

为进一步开展相关研究提供基础和参考,本文首先探讨了岩石边坡植被恢复的特点,然后从植被护坡技术应用、植物的选择和配置、基材的配比和特性、护坡机制和植被恢复效果评价 5 个方面综述了我国岩质边坡植被恢复技术研究现状,分析了既有研究存在的不足,并讨论了未来研究方向。

1 岩石边坡植被恢复特点

与土质边坡相比,岩石边坡植被恢复表现出的特点为:

(1)首先需要在坡面上建造一定厚度的人工土壤层或生态基材层。土壤是植物生存的物质和能量源泉,影响着植被恢复和生态环境建设^[8]。而裸露的岩质边坡创伤面没有土壤覆盖,水热容量小,营养元素很难形成和富集,生态因子急剧变化,这些特征都不利于植物定居^[6]。因此,岩质边坡生态恢复首先应在坡面营造一定厚度的土壤层或生态基材层,而且土壤

层要满足一定的物理、化学和力学性能要求^[3]。

(2)植被恢复难度大,尤其是高大的灌木、乔木。岩质边坡多呈高陡形态,含水性和持水性较差,硬度高,根系难以扎入岩体内,主要是侧向生长。此外,土壤条件较差,具有极强的不稳定性,立地条件较差,生态系统恢复难度大,尤其是高大的灌木、乔木。

(3)护坡机制、护坡技术和施工工艺复杂。岩质边坡植被护坡机制研究涉及到“植被根系—土壤层—岩体(面)”的相互作用。兰虎林等^[9]曾报道,岩质边坡具有较强的异质性,有很多不利于植被恢复的环境条件,需要综合考虑边坡的地理位置、走向、坡高、坡度、岩体结构的形态和质量、坡面的结构、平整度和风化程度,选择合理的植被护坡技术^[5,9-11]。为了实现植被持续健康生长,必须将人工土壤层固定在岩面上,增大了施工难度。

(4)养护管理困难、费用高。岩质边坡含水性和持水性差,而且人工土壤层的厚度不可能太厚,自我供给的水分和养分条件难以持续有效,需要靠外部不断补充,所以养护管理困难,费用高。

2 岩质边坡植被护坡技术研究概述

2.1 植被护坡技术应用研究

目前,中国岩质边坡植被护坡技术主要有液压喷播技术、客土喷播技术、喷混植生技术、植被混凝土护坡技术和厚层基材喷射护坡技术。

液压喷播技术,也称为水力喷播或泥浆喷播技术,是一种将植物种子经过催芽处理后,配以一定比例的纤维、保水剂、黏合剂、复合肥料和土壤改良剂等,通过搅拌,利用机械加压作用将浆体混合物喷播到坡面的绿化方法。例如,陈雪^[12]介绍了液压喷播技术在贵州石阡县大顶山风电场某泥岩边坡植被恢复工程中的应用,达到了绿化美化环境的目的。

客土喷播技术是将客土、植物种子、缓效性肥料、纤维、黏合剂等按一定比例均匀混合,再利用空气压缩机将混合物喷射到坡面形成一层复合客土层(3~5 cm),实现护坡和恢复植被的一种生态防护技术^[13-14]。据报道,客土喷播技术已用于甘肃宝天高速公路红砂岩边坡^[15]和京沪高速公路济南—莱芜段部分路堑石质边坡^[13]的植被恢复工程。齐藤诚等^[14]综合利用保育块技术与客土喷播技术,在内蒙古赤峰—通辽高速公路某岩质边坡进行了植被恢复试验。黄灏峰等^[4]介绍了该技术在京承高速公路岩质边坡的应用。

喷混植生技术是使用喷混机械将土壤、普通硅酸盐水泥、植物种子、肥料、有机质、保水剂等混合加水后喷射到坡面上,形成约 10 cm 厚度的多孔稳定结构

层,种子可以在空隙中生根、发芽、生长,又具有较强的抗雨水冲刷能力^[16-17]。例如,章梦涛等^[16]从种植基质材料、植物种子的选择及配比和施工方法3个方面介绍了该技术在华南地区岩质边坡植被恢复工程中的应用。赵春权^[17]以阿荣旗—博克图高速公路岩质边坡为例,从原理和施工工艺方面介绍了喷混植生技术,取得了良好的绿化和防护效果。

植被混凝土护坡技术是由液压喷播技术演化而来的,植被混凝土是典型的人工复合生态基材,其固体部分由植生土、水泥、腐殖质和植被混凝土绿化添加剂混合而成^[18]。张振东等^[19]研发的断级配全填式植被混凝土护坡技术在抗雨水冲刷能力和植被恢复效果方面具有显著的优越性。

厚层基材喷射护坡技术,简称TBS(thick-layer base material spraying)技术,是运用喷播系统将混有植物种子、防侵蚀材料等的基质材料喷附在坡面上,形成一层既适宜植物生长又稳定的基材层,该技术主要由锚杆、网及基材混合物组成。所谓厚层是指喷附在坡面上基材的厚度,是相对于前述几种技术的基材厚度而言的。该技术的喷射材料以有机质为主,物料喷射时不掺入水分,因此也属于干法喷播^[20]。例如,孟强等^[21]以北京—承德3期高速公路边坡工程为依托,介绍了该技术在半干旱地区的应用,并针对基材层出现的开裂、滑落等不良现象提出了改进建议。李义强等^[20]介绍了这种技术的施工工艺。张霄等^[22]将该技术成功用于大兴安岭地区阿荣旗—博克图段高速公路岩质边坡的植被恢复。

2.2 植物的选择和配置

不同植物的基因特征不同,对环境条件的适应性也就不同。因此,科学研究及合理论证植物选择和配置模式是成功恢复岩质边坡生态系统,确保植物群落长期有效的关键^[9]。张俊云等^[23]从植物的气候区划分、播种量和混播3个方面讨论了厚层基材喷射护坡的植物选型设计,认为一般应选4~8种适宜植物按混播原则进行混播设计;植物选择必须考虑种间的生态生物型的搭配是否合理。乔领新等^[24]认为,灌草模式比草豆模式更适用于京—承高速公路边坡植被恢复。李勇等^[25]筛选出适宜川西高原高海拔地区的本地草种,然后进行不同草种组合培植模式试验,从覆盖度、高度、生物量和土壤侵蚀度4个方面选出最优组合。陈振峰等^[26]通过种植试验,从植物的株数、高度和覆盖度来确定岩石边坡植被恢复适宜采用的苗木,筛选合理的栽植密度及植被配置方案。李天斌等^[3]认为,对于陡峭岩质边坡宜先构建草本或草灌

植物群落,最后提出了适宜川西高寒区的“草灌花”配套模式。陶岩等^[1]认为,吉林东部高速公路岩质边坡植被护坡工程的植物选择应以本土物种为主,并适当配置外来物种,最终建立草灌乔植物群落;优选初期生长速率快、耐荫和耐旱的本地物种。

2.3 生态基材的配比和特性

基材混合物的配比和特性研究是前文所述护坡技术的核心内容。基质材料是由土壤、植物种子、有机质、肥料、酸碱调节剂、保水剂、纤维、黏结剂等按一定比例配制出的一种适宜植物生长的人工土壤。表1列举了5种技术的10种基质材料的配比方案,不同研究者采用的材料不同,配比不同。例如,徐华等^[27]以植壤土、腐殖土、秸秆纤维、聚丙烯酰胺(JBA)、羧甲基纤维素钠(YQS)和粉煤灰肥料(CXL)为组分,配制出了适宜川西高寒高海拔地区岩质边坡植被恢复的JYC生态基质材料。马朋坤等^[28]和王建胜等^[29]进行了天然条件下的盆栽试验和无侧限抗压强度试验,以基材理化、力学性质和植物生长状况为评价指标,优化了以铁尾矿为基础材料,秸秆纤维、425#水泥、蘑菇肥、保水剂、糠醛渣、有机肥为配比材料的植被混凝土基材配比方案。刘大翔等^[30]以植被混凝土的孔隙率和无侧限抗压强度为评价指标,通过试验研究了基材的有机质类型(稻壳、锯末、玉米酒糟、稻谷酒糟)和含量的合理取值,结果表明宜选择小粒径粉末状有机质,合理配比范围为7%~9%(以干土质量为计算基数)。

基材是植被恢复的物质基础,必须满足相应的物理、化学和力学特性要求:要具有合理的物理结构、水分条件和保水性能;要具备充分的养分条件,满足环保要求;要保证自身的稳定,与根系、金属网、锚杆、岩面构成一个整体,具备抗雨水侵蚀能力,而且要求以上性能具有长期有效性。

张俊云等^[31]开展了厚层基材喷射护坡的天然降雨冲刷试验,并测定了基材的物理(容重、自然含水量、饱和含水量、空隙率、稳定渗透系数)和化学(有效氮、有效磷、有效钾、pH、阳离子代换量)指标,评价了基材的植被护坡适宜性,认为这种基材适用于国内连续干旱不超过50天、年降水量超过600mm的非高寒区,并用自由收缩率、水平收缩率、自由恢复度和水平恢复度4个指标评价了有机质含量对基材收缩恢复性质的影响。李绍才等^[32]采用室内人工降雨模拟试验、直剪试验、收缩性分析试验等,分析了秸秆纤维对基材抗剪强度、收缩性、抗侵蚀的影响,聚丙烯酰胺对基材抗侵蚀、孔隙度的影响及其时间效应,高吸水

树脂对基材水分特性、水分蒸发、反复吸水特性、植被生长的影响。李天斌等^[33]进行室内试验,分析了基材组分(JBA、YQS、CXL 肥料和水的用量)对植被发芽率、植被株高、基材抗剪强度、团粒度和含水量的影响,评价基材的养分、肥效、稳定性、团粒化度和抗旱性,并对现场护坡基材的基本物性指标(容重、含水量、土粒比重、空隙度)和养分含量(酸碱度、全氮、有效磷、有效钾、有机质和碳氮比)进行了 3 年监测。秦健坤等^[33]试验研究了保水剂的粒径和掺入量对植被混凝土生态基材的土水特征曲线及其参数,主要水分常数的影响。张俊云等^[34]基于室外草坪草的培育试验、直剪试验和无侧限抗压强度试验结果,分析了草坪草根扎入种植基深度、草坪草覆盖度、基材抗剪强度和无侧限抗压强度与水泥含量、稻草含量的关系。张季如等^[2]利用扫描电镜和能谱技术剖析了 ZZLS

基材的植生功能和强度机制,并采用无侧限抗压强度试验分析了龄期 and 水泥掺量对基材的应力—应变关系、单轴抗压强度、变形模量的影响。周中等^[35]研究了基材组分(水泥、土壤、腐殖质和水)对基材无侧限抗压强度的影响。针对植被混凝土生态基材,采用混凝土冻融试验机,周明涛等^[36]研究了冻结温度对基材冻结历时、冻胀率、温度场和水分迁移的影响,分析了冻结温度、含水率、植生土类型和融化温度对基材冻胀率、融沉系数的影响。梁永哲等^[37]的室内试验表明,与干土质量相比,当黄麻纤维、棕纤维的含量分别为 0.9%,0.6%时,可明显提高植被混凝土抵抗冻融破坏的功效。夏振尧等^[38]开展了 2 天龄期植被混凝土基材单轴抗压强度的影响因素(水泥及有机质含量,水灰比)研究,结果表明,前述 3 个因素对基材初期强度的影响依次减小。

表 1 不同护坡技术 10 种基质材料的配比

护坡技术	土壤	有机质	黏结剂	肥料	保水剂	其他	来源
液压喷播技术			1.25 kg/m ³	复合肥 15 kg/m ³	1.25 kg/m ³	纤维 27.5 kg/m ³	[12]
客土喷播技术	田园土 0.7~0.8 m ³ /m ³	腐殖土 0.1~0.2 m ³ /m ³		农家肥 0.1 m ³ /m ³ , 复合肥 10 g/m ²		土壤熟化剂 5 g/m ²	[15]
	当地土壤 60 kg/m ²	泥炭土 12 kg/m ²	聚乙烯类 0.008 kg/m ²	复合肥 0.03~0.04 kg/m ²	聚丙烯类 10~15 kg/m ²	草纤维 2 kg/m ²	[7]
喷混植生技术	砂土、砂壤土或黄土 50 L/m ² ,园土或肥土 50 L/m ²	蘑菇肥 20 L,糠壳 3 L,锯木屑 3 L/m ²	普通硅酸盐水泥 5~8 kg/m ²	长效氮肥 0.05 kg/m ²	0.006 kg/m ²	pH 缓冲剂(碱性中和因子)适量	[16]
	80%~90%(质量百分比。下同。)	酒糟、稻壳、锯木(体积比)10%~20%	425 [#] 普通硅酸盐水泥 5%~12%	复合肥 0.6%~1.0%	吸水树脂 0.08%~0.10%	绿化添加剂(专利产品)2%~5%	[7]
植被混凝土护坡技术	植生土 100%(以干土质量为计算基数。下同。)	锯末 8%	32.5R 普通硅酸盐水泥 10%			绿化添加剂 5%	[18]
	铁尾矿 100%(以铁尾矿质量为计算基数。下同。)	山大沃丰生物有机肥 2%	425 [#] 水泥 6%	蘑菇肥 6%	0.15%	秸秆纤维 2%,糠醛渣 3%	[27]
厚层基材喷射护坡技术	耕层土壤 5%(质量百分比。下同。)	绿化基材(主要成分为草炭等有机质)95%	适量添加	缓释肥、高效化肥,适量添加	适量添加	其他添加剂,适量添加	[21]
	40%(体积百分比。下同。)		绿化基材(另含消毒剂、酸碱调节剂、团粒剂等)20%				草纤维 40% [7]
	植壤土 5 kg/m ² ,	腐殖土 5 kg/m ²	羧甲基纤维素钠 30 g/m ²	粉煤灰肥料 150 g/m ²	聚丙烯酰胺 40 g/m ²		[28]

2.4 植被护坡机制

李绍才等^[39]的室内试验已经证实随基质—根系复合体含根量的增加、含水量的减小,复合体抗剪、抗拉强度、复合体与岩体间的抗剪强度随之增大。舒安平^[40]考虑了根系的摩擦和抗剪作用,建立了岩质

边坡客土稳定系数计算模型,并用现场直剪试验结果进行了检验,认为客土稳定系数取决于无根土抗剪强度、客土的容重和厚度、根系抗剪强度。李绍才等^[6]从植被的力学效应(根系的锚固和加筋作用)和水文效应(截留降雨、减弱溅蚀效应、缓解土粒侵蚀、降低

坡体孔隙水压力)方面分析了生态护坡原理。周正军等^[41]定性讨论了施工期间和植被成型后植被混凝土护坡基材在岩质坡面上的力学稳定性(基材层稳定、基材与挂网的接触稳定和基材层与坡面接触稳定)。

2.5 植被恢复效果评价

护坡工程植被恢复效果评价是对边坡土壤性质和植被状况进行监测,然后评估土壤质量和植物生长情况。植被恢复效果评价方法有2种:一是对某护坡工程进行长时间监测和评估;二是对某区域不同恢复年限的护坡工程进行监测和评估。采用第1种方法,李天斌等^[3]在国道317线鹧鸪山隧道西引道边坡进行了3年多的生态基材护坡现场试验,通过测试JYC基材的物理性质和养分含量来评估恢复效果。陶岩等^[1]对吉林省江延高速公路某边坡的土壤养分(pH、有机质、全氮、全磷、全钾)、植物的种类、高度、密度、覆盖度、成活率、基径、冠幅、根系长度和形态进行了1.5年的监测。历经7个月左右的监测,赵毓璋^[15]从植被发芽率、出苗率、生长量及总盖度方面评价了甘肃宝天高速公路红砂岩边坡的植被护坡效果。齐藤诚等^[14]对内蒙古赤峰—通辽高速公路某岩质边坡的植被盖度、物种数量、木本植株高度、地径、成活率和根系发育形态历时1年监测。以贵阳环城高速公路岩石边坡为例,王良平等^[42]对植物种类、出苗数量、高度、地径、覆盖度进行了1年监测并评估植被恢复效果。李义强等^[20]对京承高速公路岩质边坡的植被覆盖度、乔灌木株数进行了2年监测。高小虎等^[43]长期(14年)监测了灌木的株数、株高、胸径、冠幅、枝下高、盖度和草本植物的苗数、最大苗高、最大胸径、最大冠幅、盖度,构建一种群落稳定性指数计算模型,用于评估植被恢复效果。

运用第2种方法,潘树林等^[44]以深圳盐田港高速公路10年植被恢复年限的边坡为研究对象,分析了土壤理化性质(含水量、有机质、全氮、速效氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、脲酶、蔗糖酶)和植物多样性。李林霞等^[45]以舟山海岛矿区不同植被恢复年限(1~6年)的岩质边坡为例,采用除趋势对应分析和线性回归分析法研究了植物群落演替中物种多样性的变化规律。邹蜜等^[46]采用广义线性混合模型分析了舟山市岩质边坡植被恢复过程中坡位、坡向、恢复年限、坡度、海拔、土壤厚度与植物物种多样性指数(Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数、物种丰富度)的关系。张霄等^[22]从物种的组成、高度、盖度、频度,土壤全氮、有机质、缓效钾、速效钾、速效磷和群落多样性方面评价

了大兴安岭地区阿荣旗—博克图段高速公路岩质边坡的植被恢复效果。

3 研究现状

虽然我国开展岩质边坡植被护坡技术研究比欧美等发达国家稍晚,但近10年来已经取得了重要进展,这些进展是不均衡的,相关方面有待进一步深入和扩展。

(1)适宜特殊生境的岩质边坡植被护坡技术有待系统研究。

基材研究和植物选择是岩质边坡植被护坡技术研发的关键内容,二者紧密联系。综合植被护坡技术应用、植物选择和生态基材研发的研究进展来看,我国岩质边坡植被护坡技术已取得很多成果,但不同地区的岩石边坡植被护坡工程仍面临着诸多困难和挑战^[22],尤其是针对适宜特殊生态环境区域的岩质边坡植被护坡技术的研究深度和广度均有待提高,例如,荒漠、高海拔高寒地区。特殊生境对生态基材和植物选择有特殊要求,诸多极端条件对植被恢复的协同耦合作用机制是极其复杂的,已成为生态基材护坡技术急需攻克的技术难题。我国地域辽阔,地形地貌、地质条件和气候条件复杂多变,特殊生境区域工程建设活动形成的众多裸露岩质边坡急需生态修复。因此,开展适宜特殊生境的岩质边坡植被护坡技术研究有重要的科学意义和工程实践意义。

(2)岩质边坡植被护坡机制有待深入研究。

岩质边坡植被护坡机制研究涉及植被根系—基材—岩面之间的相互作用。一项技术的应用和推广必须要有完备的科学理论体系作为基础。但截止目前,我国岩质边坡植被护坡机理研究仍处在定性研究和经验总结阶段^[6]。此外,仅认识到植被根系护坡的正效应,而对其不利影响没有充分研究,对护坡机制的研究不全面。因此,岩质坡面—基材—根系统一体的相互作用机理及整体力学稳定性仍然需要深入研究^[5],查明相关问题对坡体支护体系研究具有重要指导意义,对技术的应用和推广具有重要的理论意义。

(3)护坡工程植被恢复效果评价长效机制不健全。

目前,边坡植被恢复更多地追求快速绿化、全面覆盖的效果,而不重视植被生长的可持续性,在一定程度上是由于缺乏植被恢复效果评价长效机制所致。因此,护坡植被“一年绿,两年黄,三年枯,四年死”的现象普遍存在。此外,绝大多数的植被恢复效果评价都是针对恢复初期,缺乏对植物后期生长的长期监控,这不仅是引发后期植被退化的一个原因,而且也

在一定程度上制约着我国护坡技术的发展。开展科学的植被恢复效果评价长效机制研究不仅是植被恢复的重要组成部分,而且植被恢复的长期监测数据对护坡技术的发展、改进和升级有重要的反馈、指导意义。

4 未来需要深入研究的方向

(1)特殊生境条件下的高陡岩质边坡植被护坡技术研发。

特殊生境条件下,基材组分的理化特性和配比优化研究;基材的物理、化学、力学特性和植物生长适宜性的协同耦合调控研究;基材的稳定性和耐久性研究;冻融循环或干湿交替作用下基材微结构(如裂缝)研究和调控机制。

合理的植物配置是群落向正演替方向发展的前提条件之一^[45],植物选择和配置是护坡技术研发的关键内容之一。因此,应开展特殊区域的植物种类组成和群落结构调查,适生植物品种的评价筛选及草、灌、乔木之间的相互关系研究,植被生态的演替规律和长期稳定性研究,坡面植被建植调控技术手段研究。

(2)岩质坡面—基材—根系的相互作用机理及整体力学稳定性。

继续深入研究根系护坡的正效应,同时注重植被根系对基材稳定性的不利影响研究,与植被根系有关的大孔隙结构,如根—土间面、腐烂根系通道和土壤动物洞穴^[47],不仅降低基材的力学性能,而且在强降雨过程中产生优先流,加快降雨入渗,强化基材—坡面界面处的地下径流,降低基材—根系复合体在坡面上的稳定性;此外,还会引起营养物质优先渗漏,造成基材养分严重不足;植被根系与岩体(面)的黏结力是有限的,应注重基材—岩面之间的黏结技术研发;研究岩体(面)特性对基材—根系复合体稳定性的影响^[5];对坡面—基材—根系的整体力学稳定性进行精细数值模拟研究。

(3)护坡工程植被恢复效果评价长效机制。

植被恢复与重建总是朝着物种多样性的方向构建,因此,可采用物种多样性评价群落演替进程,该指标能反映群落组成和结构的变化^[22]。植被恢复效果评价研究首先应建立健全评价指标体系,研究科学合理的植被恢复评价方法,然后开展恢复后的植被群落研究,包括植被群落的抗蚀性、稳定性、多样性和演替规律等,最后研究植物演替过程中,植物群落多样性与生态基材特性之间的关系。制定科学合理的植被恢复监测长效机制。

(4)基于气候、地理环境等因子的岩质边坡植被

护坡技术标准的编制。

经过近 10 年的研究,我国已经发布了一些相应的技术标准,如《混凝土基体植绿护坡技术标准》^[48]。植被护坡方法的抉择应主要考虑当地的气候条件、地理环境、生态环境和地质环境等,其次考虑护坡技术特点。而我国目前的植被护坡技术标准主要是基于技术特点而制定的,没有阐述这些技术在气候条件、地理环境和生态环境方面的适宜性,工程师们难以选择合理的植被护坡方法。因此,基于气候、地理环境等因子而编制的岩质边坡植被护坡技术标准更有工程指导意义,如适宜干热河谷地区、荒漠地区和高海拔高寒地区的标准等。

参考文献:

- [1] 陶岩,韩继国,殷秀琴,等.吉林省东部高速公路岩质边坡植被恢复效果研究[C]//中国水土保持学会.工程绿化理论与技术进展:全国工程绿化技术交流研讨会论文集.北京:中国水土保持学会,2008:212-221.
- [2] 张季如,朱瑞赓,夏银飞,等.ZZLS 绿色生态护坡材料的强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1533-1537.
- [3] 李天斌,徐华,周雄华,等.高寒高海拔地区岩质陡边坡 JYC 生态基材护坡技术[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2332-2339.
- [4] 黄灏峰,王礼旺,南海龙,等.多阶梯边坡植被恢复技术在公路建设中的应用[J].中国水土保持科学,2013,11(4):60-62.
- [5] 夏冬,李富平,袁雪涛,等.露天矿岩质边坡生态重建技术研究现状及发展趋势[J].金属矿山,2018(1):1-10.
- [6] 李绍才,孙海龙.中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J].资源科学,2004,26(增刊 1):61-66.
- [7] 胡双双,陈静曦,周爱芳.浅析我国高速公路路堑岩质边坡生态基材喷射护坡技术[J].交通科技,2006(3):73-75.
- [8] 郭爽,牛小云,吴桐,等.不同植被恢复类型对高速公路边坡土壤质量的影响[J].土壤通报,2018,49(1):84-92.
- [9] 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,2011,48(3):713-719.
- [10] 王英宇,宋桂龙,韩烈保,等.高速公路不同结构岩石边坡生态防护对策与植被恢复技术选择[J].中国水土保持,2012(10):29-32.
- [11] 顾卫,邵琪,戴泉玉,等.基于坡面植被恢复的岩质边坡分类及生境再造技术研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(5):745-758.
- [12] 陈雪.液压喷播植草技术在高海拔风电场水土保持植被恢复中的应用[J].黑龙江水利科技,2017,45(6):144-146.
- [13] 舒安平,成瑶,李芮,等.高速公路石质边坡不同受光面土壤与植被恢复的差异性[J].公路交通科技,2010,27

- (6):143-147.
- [14] 齐藤诚,邵琪,顾卫,等.半干旱地区公路岩质边坡植被恢复技术工程试验:以内蒙古赤峰—通辽高速公路为例[J].公路交通科技,2010,27(12):145-151.
- [15] 赵毓璋.宝天高速公路红砂岩边坡生态植被恢复技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2009,5(11):204-207.
- [16] 章梦涛,付奇峰,吴长文.岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J].水土保持研究,2000,7(3):65-66,75.
- [17] 赵春权.喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护中的应用[J].北方交通,2013(1):27-29.
- [18] 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.
- [19] 张振东,罗斌,张兰军,等.岩质边坡断级配植被混凝土护坡技术[J].公路交通技术,2008(3):127-130.
- [20] 李义强,王英宇,宋桂龙,等.厚层基材喷播技术在北方半干旱区岩石边坡植被恢复中的应用:以京承高速公路(3期)植被恢复工程为例[J].草原与草坪,2012,32(3):58-64.
- [21] 孟强,闫亚丽,戴泉玉,等.厚层基质喷附技术在半干旱地区高速公路边坡植被恢复中的应用及建议[C]//中国水土保持学会.全国公路生态绿化理论与技术研讨会论文集.北京:中国水土保持学会,2009:177-182.
- [22] 张霄,张红玉,陆兆华,等.高寒地区路堑边坡植被恢复效果[J].生态学报,2017,37(5):1450-1457.
- [23] 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.
- [24] 乔领新,宋桂龙,韩烈保,等.高速公路岩质边坡植被恢复初期不同植物配置模式的比较研究[C]//中国水土保持学会.全国公路生态绿化理论与技术研讨会论文集.北京:中国水土保持学会,2009:207-211.
- [25] 李勇,干友民,李平,等.川西高原公路边坡植被恢复中不同草种组合筛选试验研究[J].草业与畜牧,2015(6):31-39.
- [26] 陈振峰,程文,陈增香,等.矿山岩石边坡植被恢复中植物配置的研究[J].环保科技,2015,21(3):15-20.
- [27] 徐华,李天斌,周雄华,等.高寒地区 JYC 生态基材护坡现场试验及测试研究[J].岩土工程学报,2009,31(5):799-804.
- [28] 马朋坤,李富平,韩新开,等.以铁尾矿为基础材料的植被混凝土基质研究[J].环境科学与技术,2015,38(11):110-114,129.
- [29] 王建胜,李富平,韩新开,等.尾矿植被混凝土无侧限抗压强度正交试验[J].河北联合大学学报,2015,37(3):33-38.
- [30] 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):37-40,54.
- [31] 张俊云,周德培.厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7):1203-1208.
- [32] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):257-267.
- [33] 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):165-167,174.
- [34] 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.
- [35] 周中,巢万里,刘宝琛,等.岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J].中南大学学报,2005,36(6):1112-1116.
- [36] 周明涛,杨平,胡欢,等.植被混凝土生态基材冻融效应试验研究[J].水土保持研究,2013,20(2):282-287.
- [37] 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):136-139,145.
- [38] 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.
- [39] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等.坡面岩体—基质—根系互作的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2074-2081.
- [40] 舒安平,高小虎,舒晓锐.岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性分析[J].水土保持通报,2017,37(4):184-188.
- [41] 周正军,许文年,刘大翔,等.岩质边坡植被混凝土护坡基材力学稳定性探讨[J].三峡大学学报,2010,32(3):57-60.
- [42] 王良平,祝小科,张晓龙.贵阳市环城高速公路南环线岩石边坡植被恢复效果分析[J].贵州林业科技,2011,39(4):33-42.
- [43] 高小虎,苏德荣,舒晓锐,等.高速公路风化岩石路堑边坡植被恢复的群落稳定性研究[J].公路交通科技,2018,35(2):129-136.
- [44] 潘树林,辜彬,李家祥.岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性[J].生态学报,2012,32(20):6404-6411.
- [45] 李林霞,王瑞君,辜彬,等.海岛矿区岩质边坡植物群落演替中物种多样性的变化[J].生态学杂志,2014,33(7):1741-1747.
- [46] 邹蜜,罗庆华,辜彬,等.生境因子对岩质边坡生态恢复过程中植被多样性的影响[J].生态学杂志,2013,32(1):7-14.
- [47] 张家明,徐则民,裴银鸽.植被发育斜坡非饱和带大孔隙[J].山地学报,2012,30(4):439-449.
- [48] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ/T 412—2017 混凝土基体植绿护坡技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018:1-40.