

# 西藏高寒地区不同边坡生态修复类型土壤的肥力变化

朱蒙恩<sup>1</sup>, 沙利云<sup>4</sup>, 周明涛<sup>2</sup>, 尉军耀<sup>3</sup>, 胡旭东<sup>2</sup>, 杜颖<sup>2</sup>

(1.华电西藏能源有限公司 DG 水电分公司, 西藏 山南 856200; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 3.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 4.云南华辰水电工程咨询有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** [目的] 对西藏 DG 水电站 6 种不同边坡生态修复类型土壤的肥力变化进行对比研究, 为西藏水电工程扰动区生态环境的修复提供理论依据和技术支撑。[方法] 采用实地测量和室内试验等方法, 分析不同边坡生态修复类型的肥力变化特征及植被生长情况, 并用相关性分析确定边坡土壤肥力时空变化与植被生长情况之间的相关性, 探讨影响边坡植被生长土壤的肥力主控因素。[结果] 在 6 种边坡生态修复类型土壤中有有机质和氮元素波动变化均较大, 随季节变化呈现先降低后增加再降低的趋势, 而 pH 值、速效磷、速效钾变化相对较小。从不同边坡对比结果来看, 边坡的土壤养分含量从高到低依次均为: 弃土弃渣地 > 土质边坡 > 一般施工场地 > 土石混合边坡 > 岩质边坡 > 施工硬化地表, 不同边坡的植被恢复生长状况方面, 与土壤养分含量呈现相同的排序。各肥力指标中氨氮、硝氮、速效磷与植被生长情况的相关性最高, 其次为速效钾、有机质, 而与 pH 值相关性最低, 说明氨氮、硝氮、速效磷对边坡植被生长效果的影响较大。[结论] 在不同边坡的土壤肥力状况中, 弃土弃渣地表现最佳, 而岩质边坡和施工硬化地表均表现较差, 且土壤肥力中氨氮、硝氮、速效磷含量与植被生长情况紧密相关。

**关键词:** DG 水电站; 边坡生态修复; 肥力变化; 植被生境; 主控因素; 西藏

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)04-0158-08

**中图分类号:** X820.3, TV212

**文献参数:** 朱蒙恩, 沙利云, 周明涛, 等. 西藏高寒地区不同边坡生态修复类型土壤的肥力变化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 158-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.023; Zhu Mengen, Sha Liyun, Zhou Mingtao, et al. Soil fertility changes of various slope ecological restoration types in Tibet alpine region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 158-165.

## Soil Fertility Changes of Various Slope Ecological Restoration Types in Tibet Alpine Region

Zhu Mengen<sup>1</sup>, Sha Liyun<sup>4</sup>, Zhou Mingtao<sup>2</sup>, Wei Junyao<sup>3</sup>, Hu Xudong<sup>2</sup>, Du Ying<sup>2</sup>

(1. DG Hydropower Branch, Huadian Tibetan Energy Co., Ltd., Shannan, Tibet 856200, China;

2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Northwest Engineering Co., Ltd, Xi'an,

Shaanxi 710000, China; 4. Yunnan Huachen Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd, Kunming, Yunnan 650000, China)

**Abstract:** [Objective] A comparative study of the fertility changes in six different slope ecological restoration types was conducted, in order to provide theoretical basis and technical support for the ecological environment restoration in the DG hydropower project disturbed area, Tibet, China. [Methods] Field measurement and laboratory tests were conducted to analyze the fertility change characteristics and vegetation growth status in different types of slope ecological restoration. The spatio-temporal changes of soil fertility and its correlation with vegetation growth were determined by the correlation analysis method, and the main control factors of the fertility in vegetation growth were discussed as well. [Results] The fluctuation of organic matter and nitrogen elements changed greatly in the six types of slope ecological restoration, which decreased first, then increased, and decreased finally with the seasonal change, while the change of pH value, available phosphorus and available potassium were relatively small. From the comparison of different slopes, the soil fertility from high to low showed as: spoil ground > soil slope > general construction site > earth rock mixed slope > rock

收稿日期: 2021-02-27

修回日期: 2021-04-11

资助项目: 中国华电集团公司科研基金项目“高寒高海拔地区水电工程施工干扰植被修复技术与示范”(121JD201800018); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504902-02)

第一作者: 朱蒙恩(1985—), 男(汉族), 河南省孟津县人, 学士, 工程师, 主要从事水电工程生态环境综合治理研究与管理。Email: 63369678@qq.com。

通讯作者: 周明涛(1979—), 男(汉族), 湖北省保康县人, 博士, 教授, 主要从事边坡生态修复技术研究。Email: zmt@ctgu.edu.cn。

slope > construction hardened surface. The vegetation restoration and growth status of different slopes showed the same order as the soil nutrient content. The ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus had the highest correlation with vegetation growth, followed by available potassium and organic matter, while pH value had the lowest correlation, indicating that ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus had the greatest impacts on slope vegetation growth. [Conclusion] Among the fertility conditions of different slopes, the performance of spoil ground is the best, while the restoration of rock slope and construction hardened surface is the poorest, and the contents of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus in fertility are closely related to vegetation growth.

**Keywords:** DG hydropower project; slope ecological restoration; fertility changes; vegetation habitat; controlling factors; Tibet

随着国家西部大开发不断的推进,西藏高寒地区经济水平、基础设施等均在稳步提升。高寒地区主要指高海拔、高纬度地域,是国家近期资源开发、基础设施建设的重点区域<sup>[1]</sup>。资源开发与基础设施建设强烈扰动原有地形地貌与生态系统<sup>[2]</sup>,形成大量次生裸坡<sup>[3]</sup>,危及区域生态景观与社会经济的可持续发展。冬季严寒、土层瘠薄、降水量少、蒸发量大、生物生产量低、植被稀疏、生态脆弱等是高寒地区的显著特点<sup>[4]</sup>。同时,大量山体开挖、填埋等施工措施扰动原有坡体稳定性及生态系统功能,会出现水土保持功能下降、生物多样性降低、原生植被减少等一系列问题<sup>[5]</sup>,故高寒地区施工扰动植被破坏后存在边坡生态修复等难题。因此,适用于该地区可行的生态修复技术,尤其是肥力的可持续性成为研究者关注的重点课题。

边坡生态修复主要定义为用活的植被与工程措施和非生命的植物材料相结合,以降低坡面的不稳定性和侵蚀,人工改善边坡生态系统<sup>[6-7]</sup>。边坡生态修复技术的雏形是日本学者铺草皮、栽树苗治理荒坡的植被护坡方法,经历20世纪初期中欧、美国、英国等在道路建设上的应用和改进,边坡生态修复技术实现了机械化液压喷播方式<sup>[8]</sup>。目前,边坡生态修复技术主要包含喷混(厚层基材喷播技术<sup>[9]</sup>),植被混凝土生态防护技术等<sup>[5]</sup>,加固填土(框格梁回填土护坡技术<sup>[10]</sup>,土工格室生态挡墙技术等<sup>[11]</sup>),槽穴构筑(燕巢法穴植护坡技术<sup>[12]</sup>,板槽法绿化技术等),铺挂(铺草皮绿化技术、植生带生态防护技术等<sup>[13]</sup>)4种类型。上述边坡生态修复技术均可在不同坡面类型、高度、坡度、平整度等适用范围内构建适合生态修复植被生长的生境,为植被提供良好的立地条件,广泛应用于我国南方或半干旱地区<sup>[14-15]</sup>。然而,高寒高海拔地区气候条件恶劣,无论是人工构筑生境或原有植被生境的物理、力学、化学及生物学等性质都受严重影响<sup>[16-18]</sup>,使得边坡生态修复技术较少应用于西藏高寒地区,且鲜有高寒地区不同边坡生态修复类型的对比研究。肥力变化不仅是表征土壤演变的关键因子<sup>[19-20]</sup>,同样能够反映

边坡生态工程的修复效果及植被生长状况<sup>[21-22]</sup>。Rivera等<sup>[21]</sup>研究堤岸边坡生态修复工程表明,土壤肥力、微生物活性及植被覆盖度三项指标能够定量表征植被恢复效果。Li等<sup>[22]</sup>发现不同边坡生态修复类型土壤质量指数的时空分布存在差异显著。因此,本文以西藏DG水电站工程区为例,分别对工程扰动区的土质边坡、岩质边坡、土石混合边坡、弃土弃渣地垫面、一般施工场地、施工硬化地表6种类型边坡采取相应的边坡生态修复措施进行试验。本文采用分布式采样法长期测定各类边坡的土壤肥力变化,统计分析土壤肥力时空变化特征及其与植被生长的相关性,揭示不同边坡生态修复类型是否对土壤养分产生显著性影响,旨在为西藏高寒地区治理水土流失,改善生态环境提供理论依据和技术支撑,服务于西部大开发中的生态文明建设。

## 1 研究区概况

### 1.1 DG水电站工程区

DG水电站位于青藏高原东缘西藏自治区山南市桑日县增期乡境内,是雅鲁藏布江中游河段的第二梯级电站。水电站工程区海拔在3 400~4 000 m,控制流域面积 $1.57 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,沿雅鲁藏布江河段长约49 km,自然落差282 m,河道比降约5.75‰,谷宽40~200 m,谷底高程约3 400 m,两岸顶峰高程达6 000 m以上,为典型的高山深切峡谷地貌。区域气候属高原温带季风半湿润气候区,降雨多集中在每年的6—10月。根据坝址下游加查气象站实测资料统计,多年平均气温、降水量、蒸发量、相对湿度分别为9.2℃,540.5 mm,2 084.1 mm和51%,极端最低气温为-16℃,历年最大冻土深度为19 cm,年无霜期为100~120 d。工程区土壤主要是山地灌丛草原土、风砂土、粗骨土等,其中山地灌丛草原土是工程区耕作土壤的主要类型,多为砂壤和壤土。同时,工程开挖料岩性以黑云母花岗岩闪长岩为主,呈灰白色、中细粒结构,可作为边坡生态修复工程的混凝土骨料料源。



### 1.2 边坡生态修复类型

根据 DG 水电站工程扰动区边坡类型,共选取土质边坡、岩质边坡、土石混合边坡、弃土弃渣地垫面、一般施工场地、施工硬化地表 6 种类型(表 1,图 1)边坡开展边坡生态修复试验示范工程,施工时间集中在 2018 年 7—8 月。土质边坡试验示范区(图 1a)采取机械干喷法施工,修复前已完成了混凝土框格支护施工,其基层喷植(由种植土、粘合剂、有机物料、速效肥、抗冻外掺剂、水均匀混合组成)和面层喷播分别为 8 cm,2 cm;岩质边坡试验示范区(图 1b)采取机械干喷法施工,混播植物物种,其基层喷植(由种植土、水泥、有机物料、混凝土绿化添加剂、抗冻外掺剂、水均匀混合组成)和面层喷播分别为 10 cm,2 cm;土石混合边坡试验示范区(图 1c)采取机械干喷法施工,混

播植物物种,其基层喷植(先回填空隙,再喷植底层,由种植土、水泥、有机物料、混凝土绿化添加剂、抗冻外掺剂、水均匀混合组成)和面层喷播分别为 18 cm,2 cm;弃土弃渣地试验示范区(图 1d)采用基层回填、面层撒播、挖穴移植苗木(灌木、乔木)施工技术,其基层平均回填厚度为 8 cm,面层中添加植物物种,平均厚度为 2 cm;一般施工场地试验示范区(图 1e)采用基层回填、面层撒播、乔木移植修复方式,其基层平均回填厚度 20 cm(由种植土、有机物料、速效肥、抗冻外掺剂均匀混合组成)、面层平均撒播厚度 2 cm;施工硬化地表试验示范区(图 1f)采取机械干喷法施工,其基层平均喷播厚度 13 cm(由种植土、水泥、有机物料、混凝土绿化添加剂、抗冻外掺剂、水均匀混合组成),面层平均喷播厚度 2 cm。

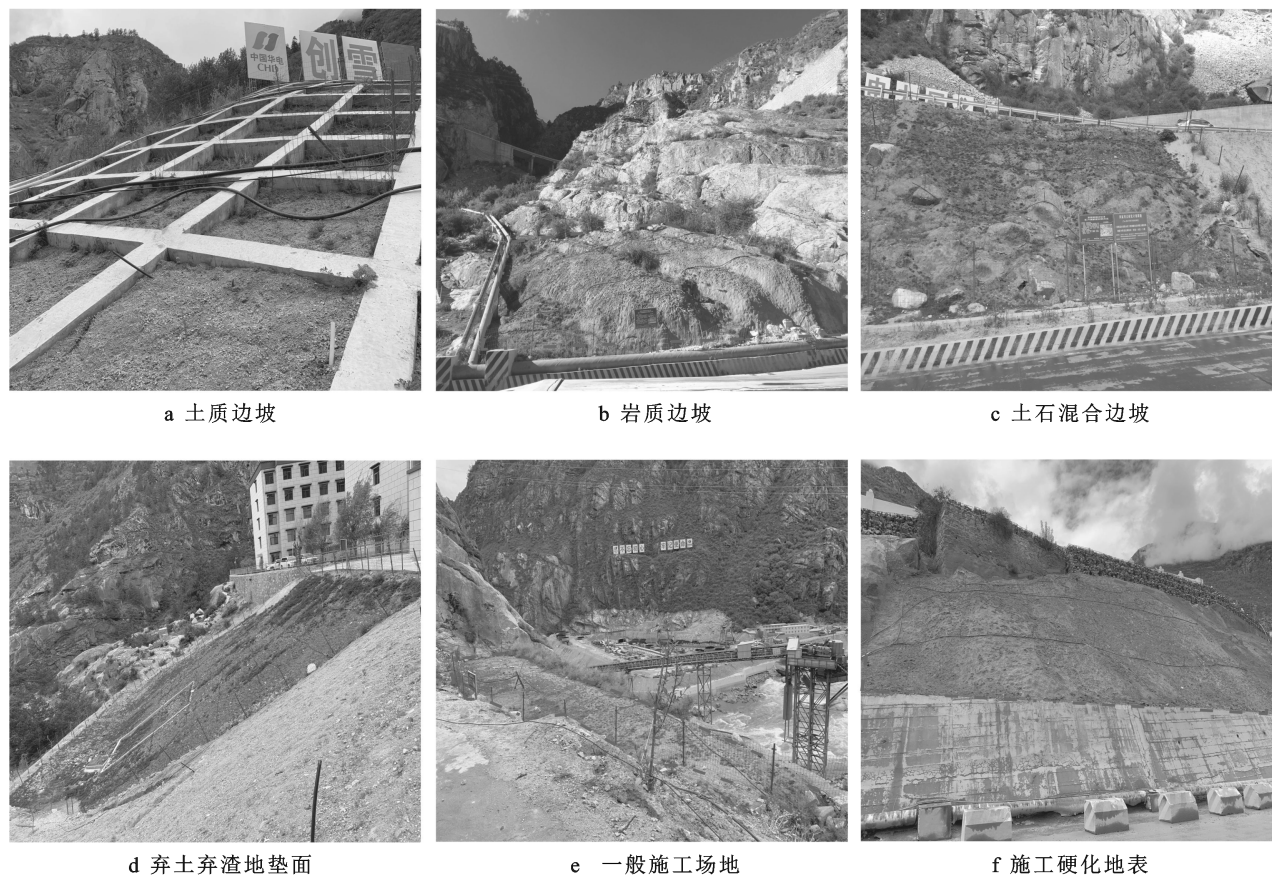


图 1 DG 电站不同类型边坡修复后效果图

表 1 DG 水电站工程区不同边坡主要属性及其修复方法

边坡类型	面积/m <sup>2</sup>	坡向/(°)	坡度/(°)	地表组成	基材类型	喷播方法	基材厚度/cm
土质边坡	400	289	40	细小松散土、沙粒、石块	抗冻型 基材	机械干喷法	8
岩质边坡	400	108	30	赤裸岩石		机械干喷法	10
土石混合边坡	400	126	46	松散土粒、小碎石、大石块		机械干喷法	18
弃土弃渣地垫面	900	263	25	碎石渣、少量土粒		基材回填、面层干喷	8
一般施工场地	500	106	10	混凝土		基材回填、面层干喷	20
施工硬化地表	450	147	35	混凝土		机械干喷法	13

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与监测

在不破坏原有边坡生态修复试验示范区的情况下,各示范区固定选取具有代表性的3个1 m×1 m样方,采取五点取样法在样方中采集5—10 cm表层植被生境土壤,混合均匀后装入样品收集密封袋中,每个样方的样品控制在1 kg左右用于室内植被生境肥力测定试验,结果取三者平均值。首先,将各样品放置于实验室内托盘中自然风干,剔除碎石、草根、落叶等杂物,并用橡胶锤捣碎后过0.25 mm筛;样品前期处理完成后,依据国家现行标准《土工试验方法标准(GBT50123-2019)》<sup>[23]</sup>,用常规方法分析测定样品的pH值、氨氮、硝氮、速效磷、速效钾、有机质。pH值以1:2.5土水比混合成悬液后,采用电测法测定;氨氮和硝氮采用连续流动分析光度法测定;速效磷采用氢氧化钠碱溶—钼蓝比色法;速效钾采用醋酸铵浸提—原子吸收法;有机质采用重铬酸钾外加热法。

自2018年7月底至8月中旬完成DG水电站工程边坡生态植被修复后,每间隔2—3月采集样品和监测一次,至今共计采集样品和监测8次。其中,监测样方与样品采集样方保持一致,每次监测指标包括植物生长状况(植被覆盖率等)、物种情况(乡土物种、物种多样性等)、水土保持效益等。野外测量每个样方的植物枝叶的垂直投影面积与地表总面积,两者之比即为植被覆盖率;乡土物种采用高清相机拍照,通过“形色”软件与网络、图书资料查询辨析,确定其品名;统计分析样方中乡土物种,采用香农—威纳指数(Shannon-Wiener index)<sup>[24]</sup>计算物种多样性指数;水土保持效益通过野外实测地表径流冲沟数据判定。

### 2.2 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2019和Origin 8.0进行数据处理及图表绘制;采用SPSS 16.0统计软件进行方差分析及相关性分析,统计分析土壤肥力时空变化特征及其与植被生长的相关性,判断不同边坡生态修复类型是否对土壤养分产生显著性影响。

香农—威纳指数计算公式为:

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

式中: $H$ 为物种多样性指数; $s$ 为植物的品种数; $P_i$ 为属于种 $i$ 的个体在全部个体中的例, $P_i = N_i/N$ , $N_i$ 为第 $i$ 种个体数, $N$ 为物种个体总数。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同边坡生态修复类型肥力变化特征

土壤肥力是衡量土壤能够提供植物生长所需的

各种养分的能力,其中pH值、氨氮、硝氮、速效磷、速效钾、有机质是土壤肥力的关键指标,对边坡植被修复有重要的影响。通过图2可见,在各类边坡生态修复基材中有机质和氮元素变化较大,而pH值、速效磷、速效钾变化较小。由于水泥的掺入,岩质边坡、施工硬化地表和土石混合边坡在修复初期的pH值较高,随后逐渐降低至与其他边坡生态修复基材的pH值相当;基材受人工配制的控制,各边坡生态修复类型的pH值均控制在植被生长适宜范围内,且波动较小。同时,边坡生态修复初期基材中含有大量植物生长所需养分,氮、磷、钾等元素在施工结束后含量较高,氮、钾呈现先降低后增加再降低随季节变化的趋势,而磷元素则呈现逐渐降低趋势,主要是由于西藏高寒地区水土流失所导致。6种边坡对比来看,土质边坡、弃土弃渣地垫面、一般施工场地和土石混合边坡整体的土壤养分含量均好于岩质边坡和施工硬化地表,主要是此类边坡生态修复类型有大量回填土,为边坡修复基材层提供了持续性的肥力循环,而岩质边坡和施工硬化地表的生态基材是喷播在岩质坡面上,对基材和植被的养分循环不利,导致修复基材的肥力持续性较低。

### 3.2 不同边坡生态修复类型植被恢复状况

在6种不同立地条件的试验示范区中,土质边坡、施工硬化地表、弃土弃渣地垫面、一般施工场地植被覆盖率高(最高分别为78%,71%,99%,99%)、物种丰富(物种多样性最高分别达1.805,1.795,2.205,2.275)、笠年返青早、四季更替自然,由此可见植被修复效果好,且能适应当地生态环境(表2);岩质边坡与土石混合边坡植被覆盖率较低(最高仅为63%和61%)、物种较为丰富(物种多样性最高分别为2.191,1.975),植被修复效果表现的不甚理想(表2)。这与上节中不同边坡的肥力变化情况相一致,由于边坡基材中肥力的变化直接影响着植被的恢复情况,而土质边坡、施工硬化地表、弃土弃渣地垫面、一般施工场地的氮、磷、钾等元素和有机质含量均高于岩质边坡与土石混合边坡,因此其植被修复效果也较佳。随着季节的变化,6种边坡的植被覆盖率和物种多样性均在春夏季节较高,秋冬季节较低,因为无论选配的先锋物种,还是当地的乡土物种,在冬季均会枯黄凋落,部分物种笠年利用宿根发芽返青(图3)。同时,高寒地区昼夜温差大,植被生长环境差,导致在当地生态环境条件下难以实现植被修复的四季常青。此外,由于当地放养的牛羊经常进入试验示范工程区围栏吃草取食(图4),严重危害苗木存活及植被生长,亦是其地区边坡生态较难修复的一个原因。



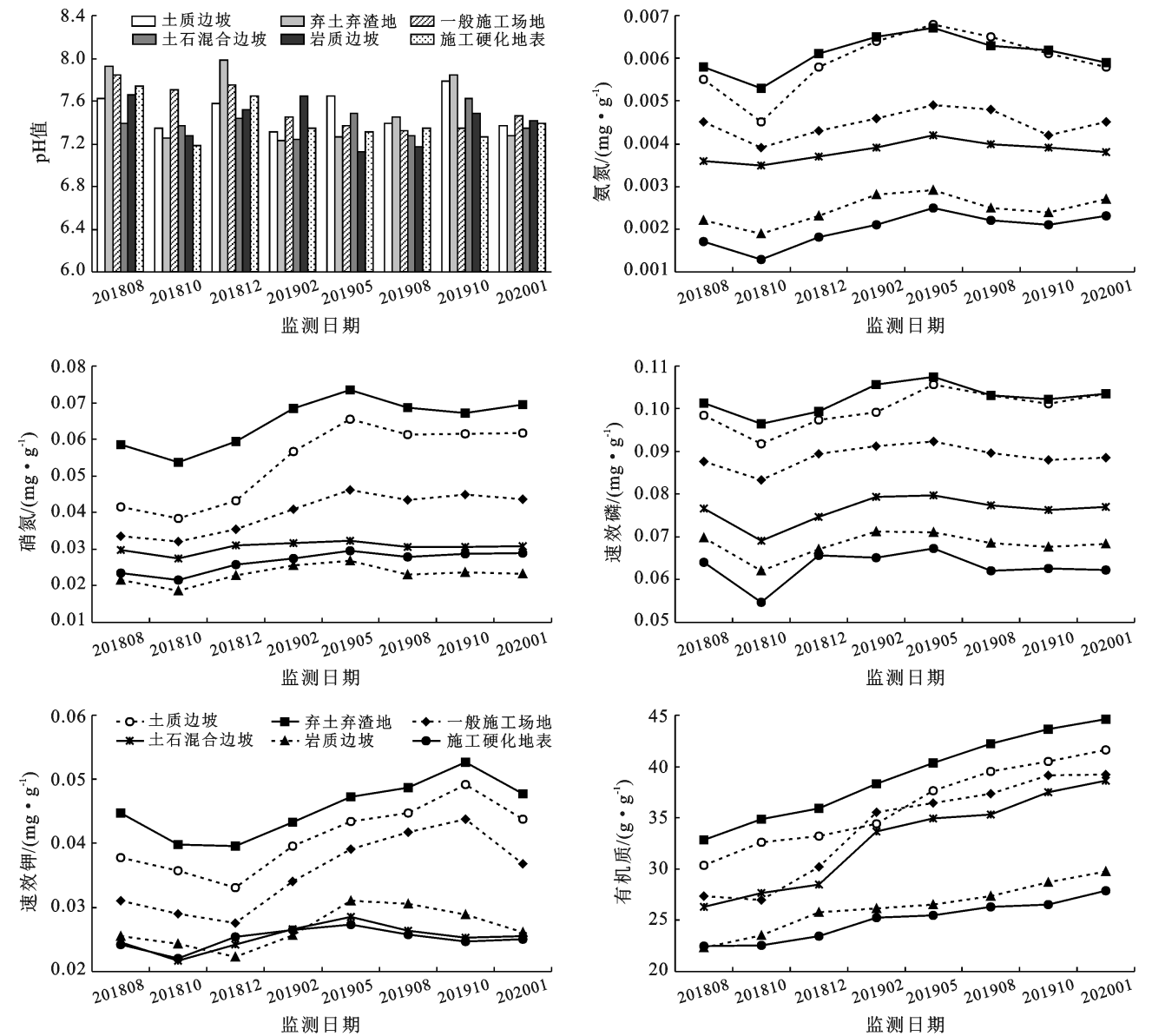


图 2 DG 水电站工程区不同边坡生态修复类型土壤肥力变化

表 2 DG 水电站工程区不同边坡生态修复类型植被恢复状况

监测时间		201808	201810	201812	201902	201905	201908	201910	202001
植被覆盖 率/%	土质边坡	61	52	60	70	78	65	64	67
	岩质边坡	53	48	55	58	63	56	54	57
	土石混合边坡	55	52	56	59	61	59	53	56
	弃土弃渣地垫面	94	90	95	97	99	98	95	97
	一般施工场地	96	90	95	96	98	99	96	97
	施工硬化地表	65	61	64	68	71	68	66	67
物种 多样性	土质边坡	1.755	1.675	1.695	1.765	1.805	1.739	1.728	1.778
	岩质边坡	1.826	1.759	1.929	2.056	2.191	1.897	1.835	1.881
	土石混合边坡	1.956	1.938	1.948	1.973	1.975	1.953	1.957	1.966
	弃土弃渣地垫面	2.113	2.056	2.089	2.183	2.205	2.161	2.137	2.152
	一般施工场地	2.157	2.087	2.115	2.214	2.275	2.204	2.185	2.192
	施工硬化地表	1.757	1.749	1.779	1.786	1.795	1.775	1.765	1.769



返青期(20190803 摄) 凋落期(20191016 摄)

图3 不同季节土质边坡植被恢复对比



岩质边坡 土石混合边坡

图 4 不同边坡围栏被牦牛破坏情况

### 3.3 各类型土壤肥力变化与植被生长的相关性

通过土壤肥力与植被生长指标间的相关分析,确定不同边坡生态修复类型中各肥力与植物生长状况间的相互作用情况,进而判定对不同边坡生态修复类型修复效果影响较大的肥力因子。从表 3 中可以发

现, 氨氮、硝氮、速效磷这 3 个指标与植被覆盖率和物种多样性的相关性比较显著 ( $p < 0.05$ ), 呈明显的正相关, 相关系数均在 0.7 以上。说明氨氮、硝氮、速效磷这 3 个养分指标对植物生长影响较大, 是植物生长的 3 个最重要的指标。

表 3 土壤肥力与植被生长指标的相关分析( $r$ )

边坡类型	指标	pH 值	氨氮	硝氮	速效磷	速效钾	有机质
土质边坡	植被覆盖率	0.184	0.892 <sup>* *</sup>	0.821 <sup>*</sup>	0.863 <sup>* *</sup>	0.501	0.458
	物种多样性	0.107	0.712 <sup>*</sup>	0.714 <sup>*</sup>	0.831 <sup>*</sup>	0.487	0.385
岩质边坡	植被覆盖率	-0.245	0.949 <sup>* *</sup>	0.955 <sup>* *</sup>	0.832 <sup>*</sup>	0.546	0.463
	物种多样性	-0.248	0.840 <sup>* *</sup>	0.895 <sup>* *</sup>	0.725 <sup>*</sup>	0.409	0.206
土石混合边坡	植被覆盖率	-0.366	0.800 <sup>*</sup>	0.801 <sup>*</sup>	0.804 <sup>*</sup>	0.727 <sup>*</sup>	0.332
	物种多样性	-0.068	0.734 <sup>*</sup>	0.822 <sup>*</sup>	0.903 <sup>* *</sup>	0.876 <sup>* *</sup>	0.575
弃土弃渣地垫面	植被覆盖率	-0.385	0.933 <sup>* *</sup>	0.895 <sup>* *</sup>	0.955 <sup>* *</sup>	0.363	0.445
	物种多样性	-0.406	0.882 <sup>* *</sup>	0.952 <sup>* *</sup>	0.991 <sup>* *</sup>	0.574	0.572
一般施工场地	植被覆盖率	-0.608	0.900 <sup>* *</sup>	0.717 <sup>*</sup>	0.938 <sup>* *</sup>	0.486	0.859 <sup>* *</sup>
	物种多样性	-0.752 <sup>*</sup>	0.862 <sup>* *</sup>	0.855 <sup>* *</sup>	0.834 <sup>* *</sup>	0.702	0.565
施工硬化地表	植被覆盖率	-0.100	0.944 <sup>* *</sup>	0.847 <sup>* *</sup>	0.729 <sup>*</sup>	0.922 <sup>* *</sup>	0.634
	物种多样性	-0.015	0.771 <sup>*</sup>	0.720 <sup>*</sup>	0.803 <sup>*</sup>	0.960 <sup>* *</sup>	0.400

注: \* \* 表示  $p < 0.01$  水平上极显著相关; \* 表示  $p < 0.05$  水平上显著相关。



另外,速效钾仅对土石混合边坡和施工硬化地表显著相关( $p < 0.05$ ),不能全面的反映 6 个边坡类型的修复情况。而有机质与植被覆盖率和物种多样性的相关性较低,说明有机质对植物生长的影响并不显著。由于 pH 值变化波动较小且没有明显的规律性,故其与植被覆盖率和物种多样性相关性最低。

## 4 讨论

随着我国美丽西部建设及生态环保要求,边坡生态修复技术在高寒地区的应用不断发展和改善,如在原有边坡生态修复基材的基础上,添加混凝土绿化添加剂或抗冻外掺剂,以达到提高基材强度和抗冻耐久性的目的。因此,在土质边坡、岩质边坡、土石混合边坡、一般施工场地、弃土弃渣地垫面和施工硬化地表试验示范区中,均依据施工场地特征掺入一定比例的混凝土绿化添加剂和抗冻外掺剂。通过不同生态修复类型植被的恢复情况可见,运用合理的基材外掺料(抗冻外掺剂)与修复措施,可在 DG 水电站工程区的土质边坡、弃土弃渣地垫面、一般施工场地营造出四季更替的良好植被修复效果。然而,在当地恶劣的自然环境条件下,植被修复可实现四季更替自然,但难以达到四季常青的效果。由于 DG 水电站工程区施工剥离的砂质土自身级配差、保水保肥能力低、易产生水力侵蚀,岩质边坡与施工硬化地表植被修复后基材肥力整体表现较差,进而导致植被修复效果较差,这表明仍需在岩质边坡与施工硬化地表的土壤基材层的改良作出深入研究。在本文中,添加混凝土绿化添加剂和抗冻外掺剂的抗冻型基材能在高寒地区为植被提供良好的生境,综合边坡修复效果来看,从高到低依次为:弃土弃渣地>土质边坡>一般施工场地>土石混合边坡>岩质边坡>施工硬化地表。

土壤肥力是保障植被长期生长的必要条件,不同边坡生态修复类型对土壤肥力持续性有很大的影响。陈伟等<sup>[20]</sup>研究表明土壤养分间具有明显的相关性,且各养分在不同土地利用类型间均存在较明显的差异。然而,土壤养分在高寒地区表现出上述的特征之外,受高寒地区气候的影响,土壤物理性质的变化、工程的扰动等会造成土壤肥力不断退化<sup>[19]</sup>。通过试验示范区肥力变化分析发现,经过边坡生态修复后基材土壤的肥力均有明显提升,达到了植被生长发育的最低需求。然而,不同边坡生态修复类型间土壤肥力虽然同样表现出明显的差异,但其差别主要体现在总氮和总磷的提升较为明显,而 pH 值、氨氮、硝氮、速效磷、速效钾、有机质的含量均较低,差异并不显著,主要是由于干旱胁迫作用造成边坡修复后的保水性较差,肥

力流失严重。同时,通过对比分析各类型土壤肥力变化与植被生长的相关性后发现,各肥力指标中氨氮、硝氮、速效磷对不同生态修复类型的植被生长发育促进明显,其次为速效钾、有机质,pH 值的相关性最低。因此,在后续的边坡修复中可提高基材土壤中的氨氮、硝氮、速效磷含量以提高边坡生态修复效果。

## 5 结论

由于边坡修复基材层的类型不同,不同边坡生态修复类型下土壤的肥力情况均不相同。从 6 种不同边坡对比可知,土壤养分含量从高到底排序依次为:弃土弃渣地>土质边坡>一般施工场地>土石混合边坡>岩质边坡>施工硬化地表。土壤肥力变化将会影响植被生长情况,在不同边坡的植被恢复效果方面,与土壤肥力呈现相同的排序。土质边坡、施工硬化地表、弃土弃渣地垫面、一般施工场地植被覆盖率和物种多样性均高于岩质边坡与土石混合边坡。从土壤肥力与植被修复情况的相关性来看,氨氮、硝氮、速效磷 3 个养分指标与植物修复情况的相关性较高,是反映和评价植物生长情况的最佳指标;而有机质和 pH 值与植被修复情况的相关性较低,表明不同边坡生态修复类型植被恢复效果主要受土壤肥力中氨氮、硝氮、速效磷的影响。

此外,本文还证明所用的抗冻型基材在西藏高寒地区边坡修复中的应用效果较好,可作为在西藏高寒地区进行边坡修复的一种重要措施。

### [参 考 文 献]

- [1] 黄润秋.论中国西南地区水电开发工程地质问题及其研究对策[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):1-5.
- [2] 曾旭,陈芳清,许文年,等.大型水利水电工程扰动区植被的生态恢复:以向家坝水电工程为例[J].长江流域资源与环境,2009,18(11):1074-1079.
- [3] 梁轶.水电规划陆生生态环境影响评价研究[D].陕西 西安:西北大学,2008.
- [4] 应丰,李健,王静,等.高寒高海拔地区水电站施工扰动区生态修复技术及植物物种选择[J].中国水土保持,2018(1):36-39.
- [5] 许文年,夏振尧,周明涛,等.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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003:44-47.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 吕东旭.土工格室生态挡墙工程性状研究[D].陕西西安:长安大学,2003.
- [12] 闫峰.浅谈蜂巢约束系统护坡在中小河流域治理工程中的运用[J].林业科技情报,2014,46(2):64-65.
- [13] 梁爱学,李统益,王清茹,等.植生带边坡防护技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007(4):163-166.
- [14] Cheng Hu, Xu Wennian, Luo Ting, et al. Microbial functional diversity as affected by different engineered eco-restoration methods at Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020, 146(3): 1-13.
- [15] Luo Aidao, Yan Zongling, Zhai Wenguang. Initial Analysis on the Improvement of Highway Slop Landscape Based on the Ecological Protection [C]//4th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering, 2016.
- [16] 董康,李师翁,康文龙,等.青藏公路沿线土壤微生物数量变化及其影响因素研究[J].冰川冻土,2013,35(2):457-464.
- [17] Sharma Sharma, Szele Zaodia, Schilling Rolf, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006,72(3):2148-2154.
- [18] 张琳瑶,刘大翔,许文年,等.冻融循环条件下生境基材中3种功能微生物数量变化规律研究[J].冰川冻土,2017,39(5):1122-1129.
- [19] 蔡晓布,张永青,邵伟.不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征[J].生态学报,2008,28(3):1034-1044.
- [20] 陈伟,魏虹,李昌晓,等.三峡库区不同土地利用方式土壤肥力变化:以汝溪河流域为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(1):96-100.
- [21] Rivera Desiree, Mejías Violeta, Jáuregui Berta, et al. Spreading topsoil encourages ecological restoration on embankments: Soil fertility, microbial activity and vegetation cover [J]. PLoS One, 2014,9(7): e101413.
- [22] Li Ruirui, Kan Shasha, Zhu Mengke, et al. Effect of different vegetation restoration types on fundamental parameters, structural characteristics and the soil quality index of artificial soil [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184:11-23.
- [23] 水利部水利水电规划设计总院.土工试验方法标准[M].北京:中国计划出版社,2019.
- [24] Spellerberg I F, Fedor P J. A tribute to Claude Shannon (1916—2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon-Wiener’ Index [J]. Global Ecology & Biogeography, 2003,12(3):177-179.

(上接第132页)

#### [参 考 文 献]

- [1] 鄂竞平,刘震,冯仁国,等.中国水土流失防治与生态安全(总卷)[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T20465-2006 水土保持术语[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [3] 中华人民共和国水利部. SL474-2010 河流泥沙公报编制规程[S].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] Booth D B, Leverich G, Downs P W, et al. A method for spatially explicit representation of sub-watershed sediment yield, Southern California, USA [J]. Environmental Management, 2014,53(5):968-984.
- [5] 胡建军,赵力毅,风光成.黄河粗泥沙集中区输沙模数研究[J].人民黄河,2013,35(6):87-89.
- [6] 韦红波,任红玉,杨勤科.中国多年平均输沙模数的研究[J].泥沙研究,2003,28(1):39-44.
- [7] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(2017)[R].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [8] Polyakov V O, Nearing M A, Nichols M H, et al. Long-term runoff and sediment yields from small semi-arid watersheds in Southern Arizona [J]. Water Resources Research, 2010,46(9):204-216.
- [9] Wei Xi, Sauvage S, Ouillon S, et al. A modelling-based assessment of suspended sediment transport related to new damming in the Red River basin from 2000 to 2013 [J]. Catena, 2020,197:104958.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [11] Helsel D R, Hirsch R M. Statistical Methods in Water Resources [M] // Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey. US: Elsevier Sci. Pub. Co., 2002.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T15774-2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [13] 唐克丽,陈永宗,景可,等.黄土高原土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M].北京:中国科学技术出版社,1991.
- [14] 李智广.试论黄河流域水土保持高质量发展目标与途径[J].中国水利,2020(10):7-10.