

# 西藏 DG 水电站工区边坡植被修复 效果及生态因子分析

申剑<sup>1,3</sup>, 李明明<sup>2</sup>, 周明涛<sup>2</sup>, 王辰元<sup>4</sup>, 程威<sup>2</sup>

[1.华电西藏能源有限公司 大古水电分公司, 西藏 山南 856200; 2.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;  
3.华电西藏能源有限公司, 西藏 拉萨 850000; 4.三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002]

**摘要:** [目的] 探究西藏 DG 水电站工区内边坡植被修复效果及主导生态因子, 为提高工区植被修复成功率, 治理水土流失, 改善生态环境等提供理论依据和技术支撑。[方法] 以工区内 5 种不同类型边坡(渣土堆积体、土质、土石混合、岩质、混凝土)为研究对象, 选取土壤相对湿度、气温、坡度、坡向为生态因子, 通过实地监测和取样分析, 采用熵权法计算植被特征(物种多样性、物种丰富度、植被盖度)和土壤肥力(有机质、速效磷、速效氮、速效钾)权重分值, 再由综合评价法计算综合得分, 并结合极差分析甄选主导生态因子。[结果] 西藏 DG 水电站工区内渣土堆积体边坡、土质边坡植被修复综合得分最高, 均为 10.000 0, 现场植被修复效果最好, 而混凝土边坡植被修复综合得分仅为 5.369 0, 现场植被修复效果较差; 边坡类型不同, 各生态因子对其植被修复影响的强弱不同, 即土石混合边坡表现为: 土壤相对湿度 > 坡度 > 气温 > 坡向, 岩质边坡表现为: 土壤相对湿度 > 气温 > 坡度 > 坡向, 而土质边坡、混凝土边坡、渣土堆积体边坡均表现为: 土壤相对湿度 > 坡向 > 坡度 > 气温, 但主导生态因子却均为土壤相对湿度。[结论] 影响西藏 DG 水电站工区内边坡植被修复主导生态因子为土壤相对湿度。不同类型边坡植被修复最优生态因子组合存在较大差异, 其中土石混合边坡、岩质边坡、土质边坡、混凝土边坡和渣土堆积体边坡相对湿度和坡度均相同, 差异主要体现在坡向和温度两方面。

**关键词:** DG 水电站; 边坡植被修复; 生态因子; 熵权法; 西藏自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0031-13

中图分类号: X826, Q142

**文献参数:** 申剑, 李明明, 周明涛, 等. 西藏 DG 水电站工区边坡植被修复效果及生态因子分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 31-43. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.005; Shen Jian, Li Mingming, Zhou Mingtao, et al. Impacts of slope type and ecological factors on vegetation restoration at DG hydropower station in Xizang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 31-43.

## Impacts of Slope Type and Ecological Factors on Vegetation Restoration at DG Hydropower Station in Xizang Autonomous Region

Shen Jian<sup>1,3</sup>, Li Mingming<sup>2</sup>, Zhou Mingtao<sup>2</sup>, Wang Chenyuan<sup>4</sup>, Cheng Wei<sup>2</sup>

[1. DG Hydropower Branch, Huadian Tibetan Energy Co., Ltd., Shannan, Xizang 856200, China;

2. College of Civil Engineering & Architecture China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

3. Huadian Tibetan Energy Co., Ltd., Lhasa, Xizang 850000, China; 4. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China]

**Abstract:** [Objective] The slope vegetation restoration effect and dominant ecological factors in the working area of DG hydropower station in Xizang Autonomous Region were studied in order to provide a theoretical basis and technical support to increase the success rate of vegetation restoration, control soil erosion, and

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2022-12-23

资助项目: 中国华电集团公司科研项目“高寒高海拔地区水电工程施工干扰植被修复技术研究与示范”(12IJD201800018); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504902-02)

第一作者: 申剑(1973—), 男(汉族), 贵州省毕节市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水电工程生态环境综合治理研究与管理。Email: 912534747@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。

improve the ecological environment in the work area. [Methods] Five different types of slope (slag accumulation, soil, soil/rock mixed, rock, and concrete) were taken as the research objects, and the relative soil water content, air temperature, slope and slope aspect were selected as ecological factors. After in-situ monitoring, sampling and analyzing the entropy-weight method was used to calculate the weight scores of vegetation characteristics (species diversity, species richness, and vegetation coverage) and soil fertility (organic matter, available phosphorus, available nitrogen, and available potassium). Then the comprehensive-evaluation method was used to calculate the comprehensive score that was then combined with the range analysis to select the most dominant ecological factor. [Results] The highest comprehensive score of vegetation restoration (10.000 0) was obtained for the slag accumulation slope and the soil slope, and the effect of vegetation restoration was the best for these two slopes. The comprehensive score of vegetation restoration for the concrete slope was only 5.369 0, and the effect of vegetation restoration was poor. Different types of slope had different effects on vegetation restoration because of different ecological factors. The impact of ecological factors followed the order of relative soil water content > slope > air temperature > slope aspect for the soil/rock mixed slope; relative soil water content > air temperature > slope > slope aspect for the rock slope; relative soil water content > slope aspect > slope > air temperature for the soil slope, concrete slope, and slag accumulation slope. Hence, relative soil water content was the most dominant ecological factor for all slopes. [Conclusion] The main ecological factor affecting slope vegetation restoration in the working area of DG hydropower station in Xizang Autonomous Region is soil relative humidity. There are great differences in the combination of optimal ecological factors for vegetation restoration in different types of slopes, among which the relative soil water content and slope of soil-rock mixed slope, rock slope, soil slope, concrete slope and residue accumulation body slope are the same, and the differences are mainly reflected in slope aspect and air temperature.

**Keywords: DG hydropower project; slope vegetation restoration; ecological factor; entropy weight method; Xizang Autonomous Region**

西藏自治区地处西南高海拔,高纬度地域,水资源丰富。在党中央努力实现碳中和的号召下,作为当前国家资源开发的重点区域,该区依靠自身先天的地理优势,水电工程建设得到大力发展<sup>[1-3]</sup>。随着工程建设的不断推进,原有地形地貌受到强烈扰动而产生众多赤裸边坡,造成植被毁损,水土流失等严重的生态环境问题。西藏地区自然条件恶劣,土质贫瘠,降雨少,蒸发强,日温差大,受损植被修复的难度较高<sup>[4]</sup>。因此,研究植被修复主导生态因子,将有助于提高植被修复成功率。影响边坡植被修复的因子众多。如气候、地形地貌、土壤肥力等。Zhu Ming 等<sup>[5]</sup>,Che Cuiwei 等<sup>[6]</sup>对半干旱地区人工林植被生长的研究表明气候变化是影响半干旱地区地表植被覆盖的主要因素。于昊辰等<sup>[7]</sup>利用多元回归模型和残差分析对新疆矿区生态系统研究的结果表明气候变化是矿区生态修复的主导影响因子。毛芮等<sup>[8]</sup>研究了高寒草原区缓坡、斜坡、陡坡、急坡的土壤性状和群落特征对植被修复的影响,结果表明坡度越陡,植物所能获取的土壤养分越少,植被情况越差。张家喜等<sup>[9]</sup>对四川省二郎山不同坡度植被修复的研究表明

35°~40°坡面修复效果明显高于 40°~45°坡面。同时,坡向对植被修复也有重要影响,Pan Jian 等<sup>[10]</sup>运用方差分析法发现植被覆盖度和土壤含水量在半阴坡呈先下降后上升趋势,在半阳坡呈先上升后下降趋势。陆雅佩等<sup>[11]</sup>对伏牛山自然陡坡不同坡向(阳坡、阴坡)植被修复的研究表明草本植物物种多样性在阳坡呈 U 形变化,丰富度指数在阴坡先下降后升高。此外,土壤亦是植物生长的重要因素。张展等<sup>[12]</sup>通过对黄延边坡土壤理化性质和植物群落组成研究,提出土壤肥力和植被修复是相辅相成的。Rivera 等<sup>[13]</sup>研究了堤岸边坡生态修复工程,揭示土壤肥力、微生物活性及植被覆盖度三项指标是影响植被修复的关键因子。针对水电站扰动区边坡,选用合适的修复方法尤为重要,严雨洁等<sup>[14-15]</sup>在向家坝水电站研究表明采用植被混凝土基材喷播技术(CBS)能促进植物生长并改善受干扰地区边坡的土壤养分含量。朱蒙恩等<sup>[16]</sup>通过对雅鲁藏布江水电站的研究证明了 CBS 技术在边坡修复中具有良好的效果。

本文以 DG 水电站工区 5 种不同类型边坡为研究对象,选取土壤相对湿度( $R_{sm}$ )、气温( $T$ )、坡度

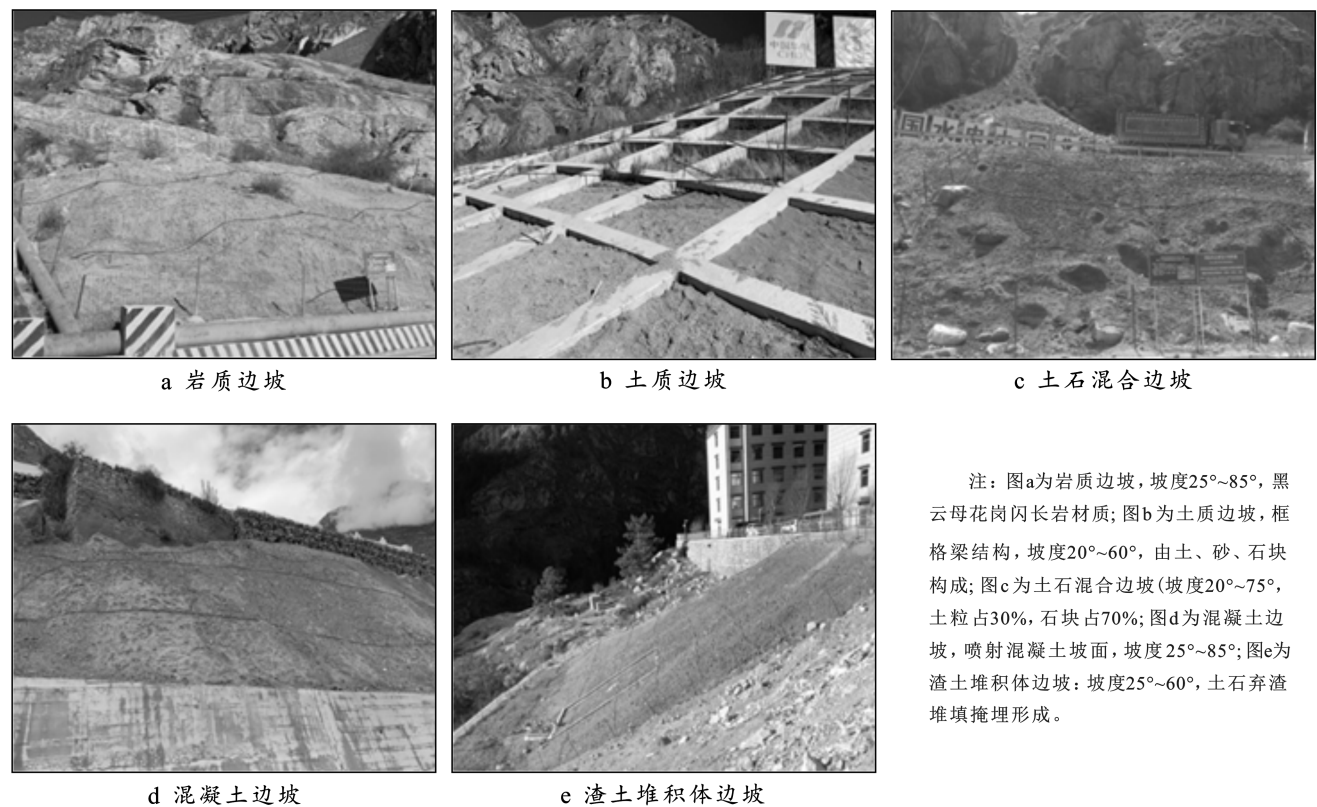
( $P$ )、坡向( $S$ )为生态因子,通过实地监测和取样分析,探究不同生态因子之间的关系以及对边坡土壤肥力和植被特征的影响,以期为提高西藏 DG 水电站植被修复成功率,治理水土流失,改善生态环境等提供理论依据和技术支撑。

## 1 研究区概况

西藏 DG 水电站是雅鲁藏布江中游的二等大(2)型水电站,坐落于区内山南市桑日县境内,工区高程 3 370~3 400 m,高原温带或寒温带气候,年均气温

8.15 °C,极端最高气温 26.61 °C,最低气温 -15.53 °C;年均降雨量 546.86 mm,雨季集中于 7—11 月,占全年降雨量的 70%以上;年均蒸发量 2 084.1 mm。

本文根据地表出露物质,选取 DG 水电站工区内 5 种不同类型边坡如图 1 所示。各边坡植被修复在 2018 年 7 月底开始,当年 8 月中旬施工完成。选用三峡大学植被混凝土生态护坡技术(CBS),采用干喷法喷植。基层、面层喷播厚度分别为 8 cm 和 2 cm。其中,喷植植物包括紫花苜蓿、早熟禾、披碱草、老芒麦、紫羊茅、波斯菊、黑麦草。



注:图a为岩质边坡,坡度25°~85°,黑云母花岗岩闪长岩材质;图b为土质边坡,框格梁结构,坡度20°~60°,由土、砂、石块构成;图c为土石混合边坡(坡度20°~75°,土粒占30%,石块占70%);图d为混凝土边坡,喷射混凝土坡面,坡度25°~85°;图e为渣土堆积体边坡:坡度25°~60°,土石弃渣堆填埋形成。

图1 DG水电站5种不同类型边坡

Fig.1 Five different slope types at DG hydropower station

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计及样品采集

在工区内 5 种不同类型边坡中采用全站仪和罗盘仪分别选取 3 处不同坡度( $P_1: P < 30^\circ; P_2: 30^\circ \leq P < 50^\circ; P_3: P \geq 50^\circ$ )和不同坡向( $S_1$  为阴坡,  $S_2$  为半阴坡,  $S_3$  为阳坡)的试验样地,再结合土壤相对湿度、气温等条件,2020—2022 年每月 5, 15, 25 日采集样品和监测数据,每次在固定的 3 个 1 m × 1 m 样方中依次取样,共取样 3 组,取 3 者平均值当天分析。同时采用 4 因素 3 水平无重复试验,具体设计详见表 1。由于 5 种边坡共需 45 组试验边坡编号,由于设计

的因素和水平均一致,故此只列举其中一种边坡试验方案叙述。土壤相对湿度条件依据农业干旱标准(GB/T32136-2015)(土壤相对湿度指数  $R_{sm}$ :土壤含水量占田间持水量的比值) $R_{sm} \geq 55\%$  为无旱,  $45\% \leq R_{sm} < 55\%$  为轻旱,  $35\% \leq R_{sm} < 45\%$  为中旱,  $25\% \leq R_{sm} < 35\%$  为重旱,  $R_{sm} < 25\%$  为特旱,根据现场监测和人为控制选取( $R_{sm1}$  表示无旱,  $R_{sm2}$  表示轻旱,  $R_{sm3}$  表示中旱)3 个等级。气温条件依据气温评价等级(GB/T35562-2017)和工区气温情况,选取( $T_1: 12^\circ\text{C} \leq T \leq 27.9^\circ\text{C}$ ,  $T_2: -4.9^\circ\text{C} \leq T \leq 11.9^\circ\text{C}$ ,  $T_3: -19.9^\circ\text{C} \leq T \leq -5^\circ\text{C}$ )3 个等级。(注:土壤相对湿度和气温这两个变量是在样地选择之后根据监测现场

实际情况进行的分组划分)。监测和样品采集样方保持一致,在选取的 3 个具有代表性的 1 m×1 m 样方中,测量样方内植被盖度、物种多样性、物种丰富度等。其中,植被盖度采用目测法,物种丰富度、物种多样性分别由 Margalef 丰富度指数和 Simpson 多样性指数计算。同时在选定的 3 个样方中,对 0—10 cm 表层土取样,带回实验室后自然风干,剔除枯枝落叶,用橡皮锤捣碎过筛后,测定速效钾、速效氮、有机质、速效磷。速效钾和速效氮采用荷兰 Skalar 自动化学分析仪测定,有机质采用重铬酸钾外加热法,速效磷采用氢氧化钠浸提—钼锑抗比色法。

表 1 边坡试验方案  
Table 1 Slope test scheme

试验边坡 编号	因素水平			
	土壤相对湿度	气温	坡度	坡向
1#	$R_{sm1}$	$T_1$	$P_1$	$S_1$
2#	$R_{sm1}$	$T_2$	$P_2$	$S_2$
3#	$R_{sm1}$	$T_3$	$P_3$	$S_3$
4#	$R_{sm2}$	$T_1$	$P_2$	$S_3$
5#	$R_{sm2}$	$T_2$	$P_3$	$S_1$
6#	$R_{sm2}$	$T_3$	$P_1$	$S_2$
7#	$R_{sm3}$	$T_1$	$P_3$	$S_2$
8#	$R_{sm3}$	$T_2$	$P_1$	$S_3$
9#	$R_{sm3}$	$T_3$	$P_2$	$S_1$

## 2.2 熵权法模型

熵权法是利用各个指标中熵值携带的信息进行权重计算<sup>[17]</sup>,一般来说熵值是不确定的一种度量,某个指标的信息熵越小,指标变异程度越大,权重越大,反之,指标的信息熵越大,指标变异程度越小,权重越小。计算步骤为:

(1) 对各个指标的数据进行无量纲化处理。假设有  $n$  个指标  $X_1, X_2 \cdots X_n$ , 其中  $X_i = \{x_1, x_2 \cdots x_n\}$ 。假设对各个指标数据化后的值为  $Y_1, Y_2 \cdots Y_n$ , 则有:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} + 0.0001 \quad (1)$$

(2) 计算各目标信息熵:

$$Z_j = -\ln n^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

$i=1, 2 \cdots n; j=1, 2 \cdots n$

其中,  $p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}$ , 若  $p_{ij} = 0$ ,

$$\text{则定义 } \lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0 \quad (3)$$

(3) 通过信息熵计算各指标权重:

$$D_j = 1 - Z_j \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{D_j}{M - \sum Z_j}, \quad j=1, 2 \cdots n \quad (5)$$

式中:  $\omega_j$  为权重;  $D_j$  为信息效应值;  $Z_j$  为信息熵值;  $M$  为指标个数。

所测数据先经 Excel 2018 整理后,再采用 Origin 2018 处理和分析,运用 SPSS 23.0 软件中熵权法和综合评价法确定综合得分,再结合极差分析甄选出主导生态因子。

## 3 结果与分析

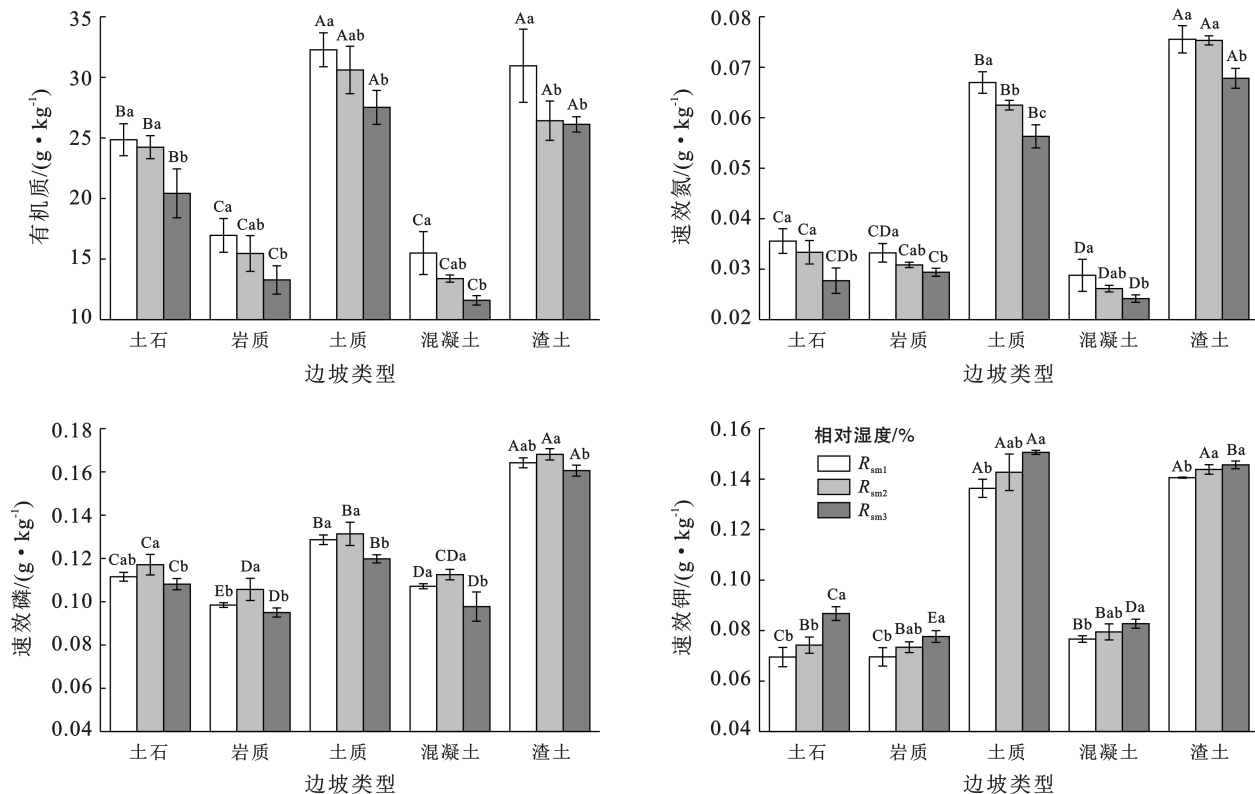
### 3.1 边坡土壤肥力

3.1.1 土壤相对湿度对边坡土壤肥力的影响 土壤肥力是土壤为植物生长供给养分的能力。根据土壤养分分级标准,有机质、速效氮、速效钾、速效磷是土壤肥力的重要指标<sup>[18]</sup>,可在某种程度上反映边坡植被修复效果。为了研究土壤相对湿度对边坡土壤肥力的影响,以边坡类型为横坐标,有机质、速效氮、速效钾、速效磷分别为纵坐标,绘制不同土壤相对湿度条件下 5 种不同类型边坡土壤肥力变化图(如图 2 所示),并进行方差分析(表 2)。由图 2 和表 2 可知,5 种不同类型边坡速效磷含量随  $R_{sm}$  的降低均呈现出先升高后降低的趋势,原因是土壤速效磷主要以磷酸根的形式存在,一般含量较低。有研究发现土壤从湿润转变为干旱的过程中,土壤团聚体破裂,释放出溶解性较低的有效态磷,微生物受干湿交替的影响,活性增加,释放磷酸酶促进有机态磷转化为可溶性无机磷导致速效磷含量增加<sup>[19]</sup>。但由于本试验中土壤为过筛土,团聚体粒径较小,受扰动释放的有效态磷含量较低,导致其被微生物利用并分解为速效磷的数量有限,因此土壤速效磷含量随  $R_{sm}$  的降低呈现先升高后降低的趋势。而有机质和速效氮则随着  $R_{sm}$  的降低呈现降低的趋势。原因是有机质含量主要来源于土体中微生物及其分泌物和植物残体,随着  $R_{sm}$  的减少土壤含水量降低,生物量减少,微生物分解动植物残体缓慢,易引起土壤有机质含量降低。速效氮含量随着有机质含量变化而变化<sup>[20]</sup>。同时,土壤速效钾主要以钾离子的形式存在,钾的阳离子在土中交换能力比较弱,随着  $R_{sm}$  的降低,降低了速效钾从土壤胶体上的解离过程,从而导致速效钾含量随  $R_{sm}$  的降低呈增加趋势<sup>[21]</sup>。

3.1.2 气温对边坡土壤肥力的影响 5 种不同类型边坡在不同气温条件下土壤肥力变化及方法分析如图 3,表 3 所示。有机质含量随温度降低呈现出先升

高再降低的趋势,原因是温度过高时有机质分解加快,而随着温度降低土壤微生物活性降低,有机质累

积增加,但温度过低容易造成土壤微生物死亡,从而导致有机质含量下降。



注:不同大写字母表示同一土壤相对湿度不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一边坡类型不同土壤相对湿度显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 2 土壤相对湿度对边坡土壤肥力影响

Fig.2 Effect of soil relative humidity on soil fertility of slope

表 2 同一土壤相对湿度不同边坡类型土壤肥力方差分析

Table 2 Variance analysis of soil fertility in same soil relative humidity and different slope types

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性	
有机质	组间	718.272	4	179.568	50.169	0.000
	组内	35.793	10	3.579		
	总计	754.065	14			
速效氮	组间	0.006	4	0.001	222.454	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.006	14			
速效磷	组间	0.008	4	0.002	600.332	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.008	14			
速效钾	组间	0.016	4	0.004	469.626	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.016	14			

注:由于试验数据较多,此处只列举土石边坡一组进行展示。下同。

速效氮含量跟随有机质变化,呈现随温度降低先升高再降低的趋势。速效磷、速效钾含量随温度降低均呈现出降低趋势,原因是速效磷含量与微生物活性

关系密切,随着温度的降低,微生物活性降低容易造成速效磷含量下降。同时速效钾含量在温度降低时,土壤供钾能力下降,缓冲性能上升,导致速效钾含量随温度降低呈现下降趋势。

表 3 同一温度不同坡度类型土壤肥力方差分析

Table 3 Variance analysis of soil fertility in different slope types at the same temperature

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性	
有机质	组间	347.416	4	86.854	15.244	0.000
	组内	56.977	10	5.698		
	总计	404.393	14			
速效氮	组间	0.004	4	0.001	255.579	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.004	14			
速效磷	组间	0.007	4	0.002	230.734	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.007	14			
速效钾	组间	0.017	4	0.004	218.603	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.017	14			

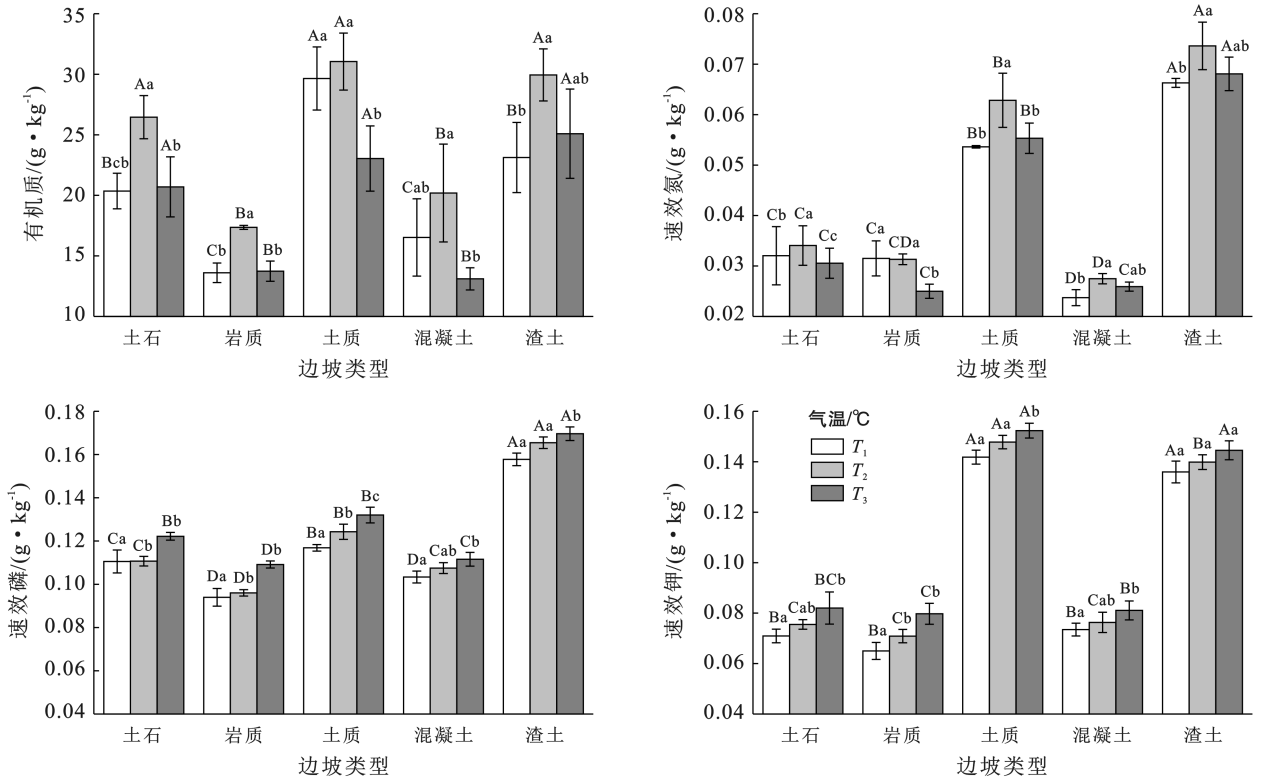
3.1.3 坡度对边坡土壤肥力的影响 为了研究坡度对边坡土壤肥力的影响,分别绘制了 5 种不同类型边坡不同坡度与有机质、速效磷、速效氮、速效钾含量之间的柱状图并进行方差分析(如图 4,表 4 所示)。

由图 4 可知,速效磷含量随坡度增加呈现先升高后降低的趋势,而有机质、速效钾、速效氮含量则随坡度增加均呈现降低趋势,原因是受土壤侵蚀和径流的影响,坡度越陡泥沙流失量越多,有机质、速效钾、速效氮、速效磷含量等土壤养分流失越严重。但由于土壤对磷元素有较强的吸附作用,在  $<30^\circ$  坡面受雨水浸提作用,土壤表层磷被溶解,迁移到径流中,而  $\geq 50^\circ$  坡面因为坡面较陡,径流速度快,径流冲刷作用强,加速了表层土壤磷元素溶解,从而导致速效磷在  $<30^\circ$  坡面和  $\geq 50^\circ$  坡面时比  $30^\circ \sim 50^\circ$  坡面含量低,呈现随坡度增加先升高后降低的趋势<sup>[22-24]</sup>。

表 4 同一坡度不同坡度类型土壤肥力方差分析

Table 4 Variance analysis of soil fertility at same slope and different slope types

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性	
有机质	组间	849.309	4	212.327	487.629	0.000
	组内	4.354	10	0.435		
	总计	853.663	14			
速效氮	组间	0.005	4	0.001	89.676	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.005	14			
速效磷	组间	0.008	4	0.002	241.028	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.008	14			
速效钾	组间	0.015	4	0.004	147.635	0.000
	组内	0.000	10	0.000		
	总计	0.016	14			



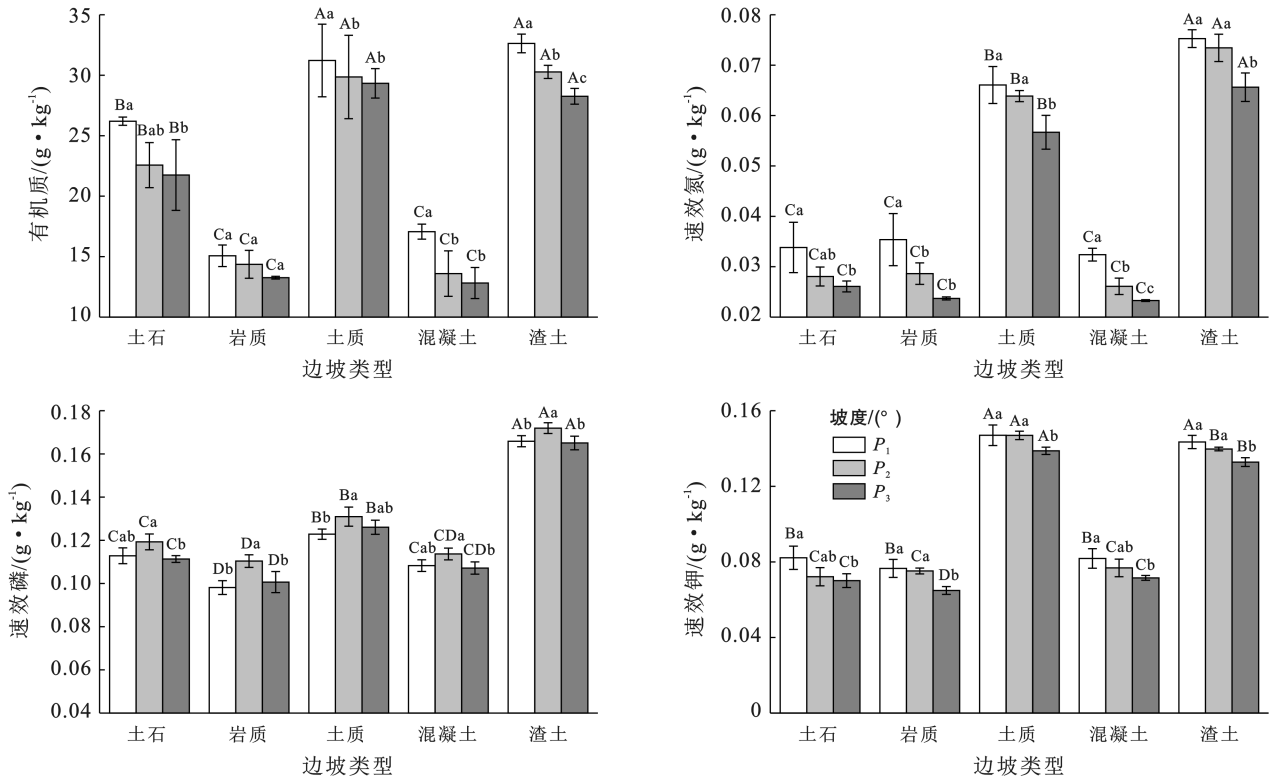
注:不同大写字母表示同一气温不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一边坡类型不同气温显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 3 气温对边坡土壤肥力的影响

Fig.3 Impact of air temperature on soil fertility of slope

3.1.4 坡向对边坡土壤肥力的影响 图 5 及表 5 表示不同坡向对边坡土壤肥力的影响分析情况。由图 5 可知,速效磷、速效钾含量随坡向变化呈现出阳坡大于半阴坡、阴坡,有机质、速效氮含量则呈现出阴坡、半阴坡大于阳坡趋势,原因是受太阳辐射的影响阴

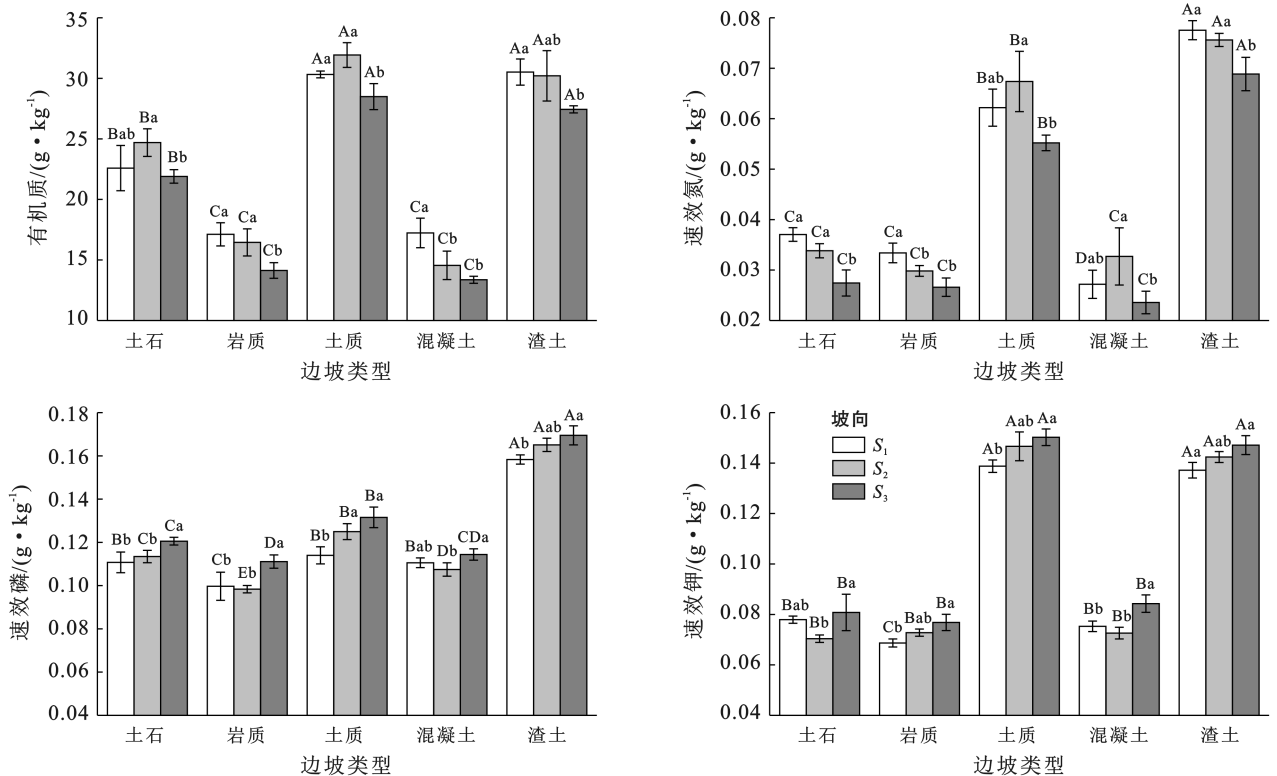
坡、半阴坡与阳坡相比普遍土壤温度低,蒸发量少,有机质分解缓慢,积累较多。故有机质含量在阴坡和半阴坡普遍较高,而速效氮随有机质变化而变化<sup>[25]</sup>。同时由于阳坡温度较高,土壤供钾能力提升、土壤微生物活性增加,导致速效磷、速效钾含量在阳坡普遍较高。



注:不同大写字母表示同一坡度不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一边坡类型不同坡度显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 4 坡度对边坡土壤肥力的影响

Fig.4 Impact of slope on soil fertility



注:不同大写字母表示同一坡向不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一边坡类型不同坡向显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 5 坡向对边坡土壤肥力的影响

Fig.5 Effect of slope aspect on soil fertility

表 5 同一坡向不同边坡类型土壤肥力方差分析

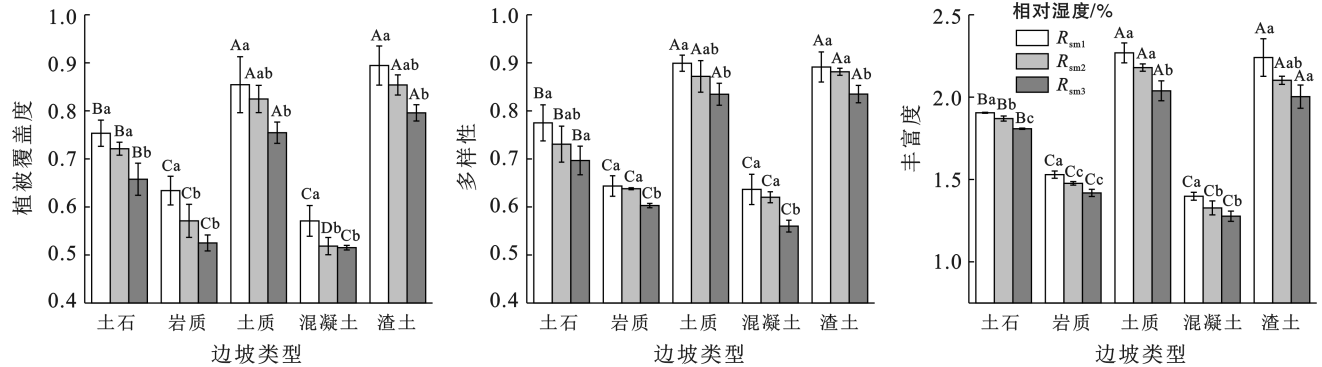
Table 5 Variance analysis of soil fertility of different slope types in same slope aspect

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性
有机质					
组间	529.814	4	132.453	92.649	0.000
组内	14.296	10	1.430		
总计	544.110	14			
速效氮					
组间	0.006	4	0.001	225.730	0.000
组内	0.000	10	0.000		
总计	0.006	14			
速效磷					
组间	0.006	4	0.002	86.352	0.000
组内	0.000	10	0.000		
总计	0.006	14			
速效钾					
组间	0.015	4	0.004	755.460	0.000
组内	0.000	10	0.000		
总计	0.015	14			

## 3.2 植被生长特征

## 3.2.1 土壤相对湿度对边坡植被生长特征的影响

植被覆盖度通常是植被在地面的垂直投影面积占该研究区总面积的百分比;物种多样性是一定区域内全部物种及其类群状况;物种丰富度是一定区域内群落物种数目的多少,这 3 种指标在一定程度上是表征植被修复的重要参数<sup>[26]</sup>。为了研究土壤相对湿度对边坡植被生长特征的影响,分别绘制 5 种不同类型边坡不同土壤相对湿度条件下植被覆盖度、物种多样性和物种丰富度之间的柱状图(如图 6 所示),并进行方差分析(表 6)。由图 6 可知,5 种不同类型边坡植被覆盖度、多样性指数和物种丰富度随  $R_{sm}$  降低均呈降低趋势。原因一方面是土壤含水量增加对植物生长有促进作用,另一方面则是有机质等养分含量多有利于植被吸收利用,对植物生长有利。但随着  $R_{sm}$  的减少土壤含水量降低,有机质含量不断减少,植被覆盖度、多样性指数和物种丰富度均呈降低趋势。



注:不同大写字母表示同一土壤相对湿度不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一边坡类型不同土壤相对湿度显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 6 土壤相对湿度对边坡植被生长特征的影响

Fig.6 Effect of soil relative humidity on slope vegetation characteristics

表 6 同一土壤相对湿度不同边坡类型植被生长特征方差分析

Table 6 Variance analysis of vegetation growth characteristics in different slope types of same soil relative humidity

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性
植被覆盖度					
组间	0.231	4	0.058	37.403	0.000
组内	0.015	10	0.002		
总计	0.246	14			
物种多样性					
组间	0.196	4	0.049	59.288	0.000
组内	0.008	10	0.001		
总计	0.207	14			
物种丰富度					
组间	1.907	4	0.477	134.561	0.000
组内	0.035	10	0.004		
总计	1.943	14			

3.2.2 气温对边坡植被生长特征的影响 由图 7,表 7 可知,5 种不同类型边坡植被覆盖度、物种多样性和物种丰富度随温度的不断降低整体呈现下降的趋势。

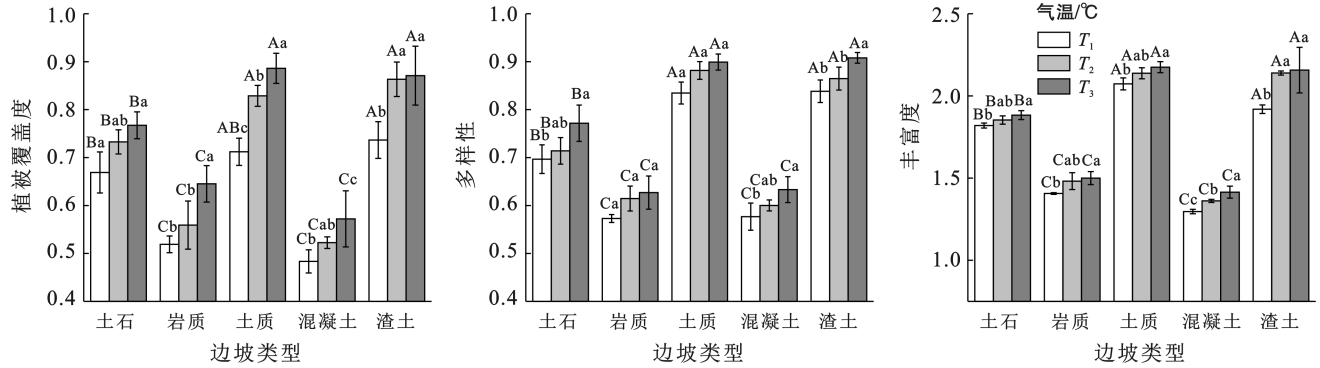
原因是随着温度的降低,植物光合作用减弱,水分和营养物质运转速度降低,脱落酸含量增多,植物处于“饥饿”状态,生长缓慢。

表 7 同一气温不同边坡类型植被生长特征方差分析

Table 7 Variance analysis of vegetation growth characteristics in different slope types at same temperature

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性
植被覆盖度					
组间	0.228	4	0.057	27.397	0.000
组内	0.021	10	0.002		
总计	0.249	14			
物种多样性					
组间	0.225	4	0.056	74.627	0.000
组内	0.008	10	0.001		
总计	0.232	14			
物种丰富度					
组间	1.531	4	0.383	79.730	0.000
组内	0.048	10	0.005		
总计	1.579	14			





注: 不同大写字母表示同一气温不同边坡类型显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一边坡类型不同气温显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

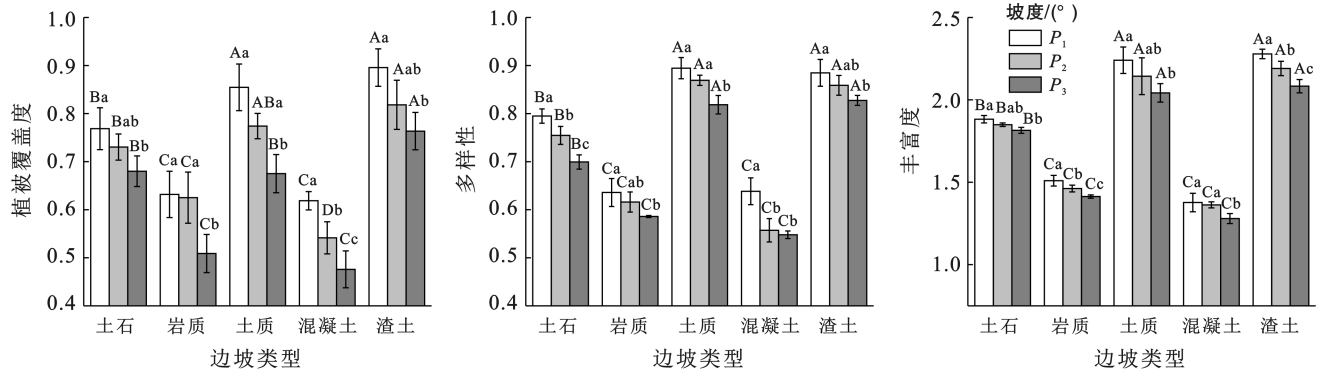
图 7 气温对边坡植被生长特征的影响

Fig.7 Impact of temperature on slope vegetation characteristics

3.2.3 坡度对边坡植被生长特征的影响 为了研究坡度对植物生长特征的影响, 分别绘制了 5 种不同类型边坡不同坡度条件下植被盖度、物种多样性和物种丰富度之间的柱状图(如图 8 所示), 并进行了方差分析(表 8)。

由图 8 可知, 5 种不同类型边坡植被覆盖度、物

种多样性和物种丰富度随坡度增加整体呈现下降趋势。原因是受地表侵蚀和水土流失影响, 陡坡的养分含量逐渐向低坡度迁徙, 低坡度土壤肥力更好, 有利于种子萌发。同时坡度越大, 种子迁入、附着、遗留越困难, 生境资源越匮乏, 潜藏物种越稀缺, 植物群落结构越简单<sup>[27]</sup>。



注: 不同大写字母表示同一坡度不同边坡类型显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一坡度类型不同边坡显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

图 8 坡度对边坡植被生长特征的影响

Fig.8 Impact of slope on slope vegetation characteristics

表 8 同一坡度不同边坡类型植被生长特征方差分析  
Table 8 Variance analysis of vegetation growth characteristics of same slope and different slope types

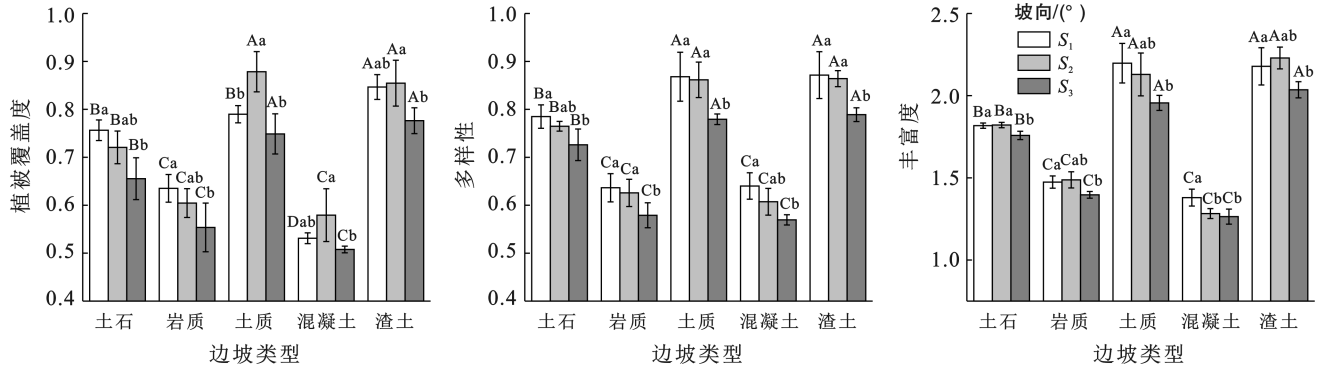
项目	平方和	自由度	均方	F	显著性	
植被覆盖度	组间	0.191	4	0.048	28.206	0.000
	组内	0.017	10	0.002		
	总计	0.208	14			
物种多样性	组间	0.194	4	0.048	77.906	0.000
	组内	0.006	10	0.001		
	总计	0.200	14			
物种丰富度	组间	2.030	4	0.507	211.234	0.000
	组内	0.024	10	0.002		
	总计	2.054	14			

3.2.4 坡向对边坡植被生长特征的影响 由图 9, 表 9 可知, 5 种不同类型边坡植被盖度、物种多样性和物

种丰富度随着坡向变化均呈现出阴坡、半阴坡大于阳坡趋势, 原因是阳坡光照时间长, 温度高, 土壤含水量和有机质含量低, 恶劣的环境使得阳坡植物资源竞争较弱, 生态系统趋于稳定, 物种种类明显较少, 而阴坡和半阴坡土壤温度低, 含水量大且土壤养分含量丰富, 植物面临着更强的资源竞争, 导致植物群落复杂, 物种种类多<sup>[28]</sup>。

### 3.3 主导生态因子甄选

3.3.1 熵权法权重计算 分别选取不同类型边坡的有机质、速效磷、速效氮、速效钾、植被覆盖度、物种多样性和物种丰富度指标, 利用熵权法计算各指标权重分值, 最后按综合评价法计算综合得分<sup>[29-30]</sup> (满分 10.000 0, 超过者按算 10.000 0 取值), 各指标分值及综合得分详见表 10。



注:不同大写字母表示同一坡向不同边坡类型显著性差异( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示同一边坡类型不同坡向显著性差异( $p < 0.05$ )。

图 9 坡向对边坡植被生长特征的影响

Fig. 9 Impact of slope aspect on slope vegetation characteristics

表 9 同一坡向不同边坡类型植被生长特征方差分析

Table 9 Variance analysis of vegetation growth characteristics of different slope types in same slope aspect

项目	平方和	自由度	均方	F	显著性	
植被覆盖度	组间	0.194	4	0.049	100.508	0.000
	组内	0.005	10	0.000		
	总计	0.199	14			
物种多样性	组间	0.163	4	0.041	28.230	0.000
	组内	0.014	10	0.001		
	总计	0.177	14			
物种丰富度	组间	1.751	4	0.438	69.214	0.000
	组内	0.063	10	0.006		
	总计	1.815	14			

由表 10 可知,5 种不同类型边坡中,植被修复效果最好的为渣土堆积体边坡 1<sup>#</sup> 和土质边坡 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 和 6<sup>#</sup>, 综合得分最高均为 10.000 0, 其次为土石混合边坡 1<sup>#</sup>, 综合得分为 8.071 6, 岩质边坡混凝土边坡植被修复效果较差, 综合得分最高的编号均为 1<sup>#</sup>, 分别为 5.645 9, 5.369 0。主要是由于土质边坡、渣土堆积体边坡和土石混合边坡在喷播生境基材时地表出露物质回填土较多, 生境基材与回填土联系比较紧密, 利于肥力循环和植物成长, 而岩质边坡和混凝土边坡地表出露物质为岩石和混凝土, 生境基材容易脱落, 对肥力循环不利, 导致植物生长缓慢。这与 Hu Xudong 等<sup>[31]</sup> 研究结果基本一致, 而与乔欧盟等<sup>[32]</sup> 研究矿区不同类型边坡结果有一定出入, 分析认为该研究区土壤类型为淡褐土, 而本文研究区土壤类型是砂土, 土壤质地差异导致的结果不同。

3.3.2 极差分析 根据边坡植被修复效果综合得分, 对 5 种不同类型边坡进行极差分析, 结果详见表 11。从表 11 可以看出, 各生态因子对土石混合边坡影响的强弱顺序为: 土壤相对湿度 > 坡度 > 气温 > 坡向, 岩质边坡为: 土壤相对湿度 > 气温 > 坡度 > 坡向, 土

质边坡、混凝土边坡和渣土堆积体边坡均为: 土壤相对湿度 > 坡向 > 坡度 > 气温。由此可知, 在土壤相对湿度、气温、坡度和坡向 4 个生态因子中, 对西藏 DG 水电站工区边坡植被修复影响最大的生态因子为土壤相对湿度。主要原因在于, 西藏地区干旱半干旱气候显著, 土壤肥力和植被生长特征在干旱环境中受土壤相对湿度因素影响明显。这与 Wu Wenjuan 等<sup>[33]</sup> 研究结果基本一致, 与尹金珠等<sup>[34]</sup> 研究采石场岩质边坡植被修复主导生态因子有一定出入, 分析认为一方面西藏高寒地区与内地相比, 光照时间长、气候差异大, 造成生态因子结果不同; 另一方面采石场边坡中重金属含量比较高, 容易对土壤理化性质造成一定影响, 从而导致植被修复因子存在差异, 同时采石场边坡地表出露物质仅为岩石基质, 土壤蓄水能力差, 而本研究涵盖 5 种不同类型地表出露物质的边坡, 研究条件更全面, 研究结果更可靠。

极差分析结果显示, 土石混合边坡中土壤相对湿度因素  $k_1 = 7.770 7$  最大(相比较 7.770 7, 7.578 0, 6.388 8), 气温因素  $k_2 = 7.439 1$  最大, 坡度因素  $k_1 = 7.670 6$  最大, 坡向因素  $k_2 = 7.408 8$  最大, 故土石混合边坡植被修复最好的因子组合为  $R_{sm1}, T_2, P_1, S_2$ ; 岩质边坡中土壤相对湿度因素  $k_1 = 5.304 0$  最大, 气温因素  $k_2 = 5.116 0$  最大, 坡度因素  $k_1 = 4.922 9$  最大, 坡向因素  $k_1 = 4.937 9$  最大, 故岩质边坡植被修复最好的因子组合为  $R_{sm1}, T_2, P_1, S_1$ ; 土质边坡中土壤相对湿度因素  $k_1 = 9.869 2$  最大, 气温因素  $k_1 = 9.553 3$  最大, 坡度因素  $k_1 = 9.565 2$  最大, 坡向因素  $k_2 = 9.663 1$  最大, 故土质边坡植被修复最好的因子组合为  $R_{sm1}, T_1, P_1, S_2$ ; 混凝土边坡中土壤相对湿度因素  $k_1 = 4.847 2$  最大, 气温因素  $k_1 = 4.334 9$  最大, 坡度因素  $k_1 = 4.400 8$  最大, 坡向因素  $k_1 = 4.452 7$  最大; 渣土堆积体边坡中土壤相对湿度因素  $k_1 = 9.544 2$  最大,

气温因素  $k_1=9.389 1$  最大,坡度因素  $k_1=9.442 5$  最大,坡向因素  $k_1=9.464 1$  最大,故混凝土边坡和渣土堆积体边坡植被修复最好的因子组合均为  $R_{sm1}, T_1, P_1, S_1$ 。

表 10 工区 5 种不同类型边坡植被修复综合得分

Table 10 Comprehensive score of vegetation restoration for 5 different types of slopes

项目	边坡编号	单项分值							综合得分
		多样性	丰富度	覆盖度	有机质	速效磷	速效氮	速效钾	
土石混合边坡	1#	0.067 6	0.141 4	0.081 6	9.386 0	0.008 8	0.005 4	0.008 6	8.071 6
	2#	0.064 5	0.141 0	0.079 0	9.231 7	0.008 1	0.005 2	0.008 5	7.938 9
	3#	0.062 7	0.137 4	0.075 9	8.489 9	0.007 7	0.005 3	0.008 1	7.301 7
	4#	0.061 4	0.139 8	0.076 9	8.682 4	0.007 7	0.005 8	0.006 9	7.467 1
	5#	0.059 1	0.136 0	0.074 1	8.549 2	0.008 2	0.005 4	0.007 3	7.352 4
	6#	0.060 3	0.136 1	0.075 4	9.203 8	0.007 1	0.005 5	0.007 5	7.914 4
	7#	0.055 5	0.133 7	0.071 8	7.408 9	0.007 0	0.005 3	0.006 5	6.373 2
	8#	0.057 4	0.135 8	0.073 8	8.168 9	0.005 8	0.005 2	0.007 2	7.025 8
	9#	0.055 3	0.134 0	0.073 3	6.703 1	0.006 3	0.005 0	0.006 6	5.767 4
岩质边坡	1#	0.055 5	0.114 5	0.069 3	6.563 3	0.008 1	0.004 7	0.007 8	5.645 9
	2#	0.053 3	0.114 1	0.066 5	6.337 4	0.007 4	0.004 6	0.007 3	5.451 8
	3#	0.053 2	0.110 7	0.063 1	5.595 0	0.007 4	0.004 7	0.007 5	4.814 2
	4#	0.050 0	0.110 0	0.062 9	5.284 0	0.007 0	0.005 3	0.007 3	4.547 1
	5#	0.053 0	0.108 5	0.063 3	6.241 7	0.007 2	0.005 1	0.007 2	5.369 1
	6#	0.050 3	0.109 8	0.060 3	5.341 0	0.007 0	0.004 8	0.006 9	4.595 9
	7#	0.048 6	0.106 8	0.059 8	4.811 3	0.006 6	0.004 6	0.007 2	4.141 0
	8#	0.049 0	0.103 8	0.058 2	5.261 3	0.006 9	0.004 5	0.006 7	4.527 0
	9#	0.050 6	0.106 9	0.056 2	4.412 7	0.006 7	0.004 4	0.006 5	3.798 8
土质边坡	1#	0.076 2	0.172 9	0.094 5	12.165 8	0.015 9	0.006 2	0.014 7	10.000 0
	2#	0.075 2	0.167 4	0.091 0	11.865 7	0.015 2	0.006 1	0.014 7	10.000 0
	3#	0.073 2	0.161 0	0.082 6	11.173 6	0.015 0	0.006 0	0.014 5	9.607 7
	4#	0.073 4	0.161 9	0.088 9	11.246 6	0.014 6	0.006 5	0.014 6	9.670 6
	5#	0.072 9	0.159 7	0.086 8	10.365 8	0.015 1	0.006 3	0.013 3	8.914 3
	6#	0.072 6	0.162 9	0.083 1	11.775 6	0.014 3	0.006 0	0.013 7	10.000 0
	7#	0.066 7	0.146 6	0.084 2	10.454 4	0.012 4	0.006 1	0.013 6	8.989 2
	8#	0.069 7	0.155 6	0.084 3	10.111 5	0.013 0	0.005 8	0.014 2	8.695 5
	9#	0.067 8	0.150 9	0.083 9	9.453 6	0.013 4	0.005 6	0.012 9	8.130 4
混凝土边坡	1#	0.055 1	0.105 2	0.062 8	6.241 7	0.007 4	0.005 2	0.008 2	5.369 0
	2#	0.050 3	0.103 9	0.060 3	5.703 8	0.006 4	0.005 1	0.008 1	4.906 9
	3#	0.047 8	0.096 5	0.056 1	4.957 8	0.006 0	0.005 1	0.007 9	4.265 8
	4#	0.050 6	0.101 9	0.056 3	4.747 8	0.005 8	0.005 3	0.007 9	4.086 1
	5#	0.050 7	0.097 0	0.053 7	4.903 3	0.006 0	0.005 3	0.007 9	4.219 1
	6#	0.050 5	0.096 1	0.052 7	4.956 3	0.006 1	0.005 3	0.007 4	4.264 5
	7#	0.045 9	0.092 5	0.054 2	4.124 1	0.005 4	0.005 0	0.007 5	3.549 8
	8#	0.046 4	0.097 3	0.054 2	4.146 0	0.005 5	0.005 0	0.007 3	3.568 9
	9#	0.045 8	0.097 1	0.053 3	4.380 2	0.005 7	0.004 9	0.007 6	3.769 9
渣土堆积体边坡	1#	0.076 1	0.171 2	0.097 3	12.144 4	0.017 7	0.007 9	0.014 3	10.000 0
	2#	0.072 8	0.170 8	0.094 5	11.593 7	0.017 6	0.007 8	0.014 1	9.989 0
	3#	0.072 0	0.156 4	0.088 9	10.028 2	0.016 6	0.007 8	0.014 1	8.643 8
	4#	0.074 6	0.157 6	0.091 5	10.945 1	0.017 4	0.008 1	0.014 2	9.431 8
	5#	0.073 6	0.156 0	0.087 1	11.022 4	0.017 4	0.008 0	0.013 9	9.497 5
	6#	0.073 6	0.154 0	0.089 2	11.220 9	0.017 0	0.008 0	0.013 8	9.667 9
	7#	0.067 9	0.151 0	0.084 4	10.137 0	0.015 1	0.007 7	0.013 6	8.735 4
	8#	0.069 8	0.152 0	0.084 1	10.048 0	0.015 7	0.007 8	0.013 7	8.659 7
	9#	0.068 1	0.142 5	0.081 2	9.758 6	0.016 0	0.007 6	0.013 7	8.409 9

表 11 工区 5 种不同类型边坡极差结果与分析

Table 11 Analysis of range results of 5 different types of slopes

项目	边坡编号	因素水平			
		土壤相对湿度	气温	坡度	坡向
边坡类型	1 <sup>#</sup>	$R_{sm1}$	$T_1$	$P_1$	$S_1$
	2 <sup>#</sup>	$R_{sm1}$	$T_2$	$P_2$	$S_2$
	3 <sup>#</sup>	$R_{sm1}$	$T_3$	$P_3$	$S_3$
	4 <sup>#</sup>	$R_{sm2}$	$T_1$	$P_2$	$S_3$
	5 <sup>#</sup>	$R_{sm2}$	$T_2$	$P_3$	$S_1$
	6 <sup>#</sup>	$R_{sm2}$	$T_3$	$P_1$	$S_2$
	7 <sup>#</sup>	$R_{sm3}$	$T_1$	$P_3$	$S_2$
	8 <sup>#</sup>	$R_{sm3}$	$T_2$	$P_1$	$S_3$
	9 <sup>#</sup>	$R_{sm3}$	$T_3$	$P_2$	$S_1$
土石混合边坡	$k_1$	7.770 7	7.304 0	7.670 6	7.063 8
	$k_2$	7.578 0	7.439 1	7.057 8	7.408 8
	$k_3$	6.388 8	6.994 5	7.009 1	7.264 9
	R	1.381 9	0.444 5	0.661 5	0.345 0
岩质边坡	$k_1$	5.304 0	4.778 0	4.922 9	4.937 9
	$k_2$	4.837 4	5.116 0	4.599 2	4.729 6
	$k_3$	4.155 6	4.403 0	4.774 8	4.629 4
	R	1.148 4	0.713 0	0.323 7	0.308 5
土质边坡	$k_1$	9.869 2	9.553 3	9.565 2	9.014 9
	$k_2$	9.528 3	9.203 3	9.267 0	9.663 1
	$k_3$	8.605 0	9.246 0	9.170 4	9.324 6
	R	1.264 2	0.350 0	0.394 8	0.648 1
混凝土边坡	$k_1$	4.847 2	4.334 9	4.400 8	4.452 7
	$k_2$	4.189 9	4.231 7	4.254 3	4.240 4
	$k_3$	3.629 6	4.100 1	4.011 6	3.973 6
	R	1.217 7	0.234 9	0.389 2	0.479 1
渣土堆积体边坡	$k_1$	9.544 2	9.389 1	9.442 5	9.302 5
	$k_2$	9.532 4	9.382 1	9.276 9	9.464 1
	$k_3$	8.601 7	8.907 2	8.958 9	8.911 7
	R	0.942 6	0.481 9	0.483 6	0.552 4

注:① $k_i=1/3$ ,为各边坡植被修复效果综合得分在*i*水平所对应的指标和;② $R=\max(k_1,k_2,\dots,k_i)-\min(k_1,k_2,\dots,k_i)$ , $i=1,2,3$ 。

## 4 结论

(1) 利用熵权法算出综合得分,结果显示植被修复效果最好的是渣土堆积体边坡和土质边坡,最高得分均为 10.000 0,其次为土石混合边坡和岩质边坡,最高得分分别为 8.071 6 和 5.645 9,混凝土边坡最高得分 5.369 0 植被修复效果较差。

(2) 在土壤相对湿度、气温、坡度和坡向生态因子中,根据极差大小可以看出,土石混合边坡:土壤相对湿度>坡度>气温>坡向,岩质边坡:土壤相对湿度>气温>坡度>坡向,土质边坡、混凝土边坡、渣土堆积体边坡均为:土壤相对湿度>坡向>坡度>气温。由此可知影响西藏 DG 水电站工区内边坡植被修复主导生态因子为土壤相对湿度。

(3) 由极差分析结果得到土石混合边坡植被修复最优因子组合为  $R_{sm1}, T_2, P_1, S_2$ ;岩质边坡植被修复最优因子组合  $R_{sm1}, T_2, P_1, S_1$ ;土质边坡植被修复最优因子组合为  $R_{sm1}, T_1, P_1, S_2$ ;混凝土边坡和渣土堆积体边坡植被修复效果最优因子组合均为  $R_{sm1}, T_1, P_1, S_1$ 。

本研究基于熵权法,对 DG 水电站 5 种不同类型边坡植被修复主导生态因子做了全面的评价和分析,为后续边坡修复提供了思路。虽然通过极差分析得到土壤相对湿度对西藏高寒地区植被修复影响最大,但由于本文仅考虑了非生物因子,植物根系与地下微生物之间的关系,以及人为原因对植被修复的影响,还需进一步探索,以完善高寒地区植被修复主导生态因子研究。

## 【参考文献】

- [1] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等.高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J].水利学报,2021,52(12):1404-1417.
- [2] 李朝霞,吕琳莉,李萍,等.西藏水电开发对河流生态环境影响评价[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):200-204.
- [3] 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(1):1-5.
- [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] Zhu Ming, Zhang Jingjing, Zhu Lianqi. Article title variations in growing season NDVI and its sensitivity to climate change responses to green development in mountainous areas [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021,9:678450.
- [6] Che Cunwei, Xiao Shengchun, Ding Aijun, et al. Growth response of plantations *Hippophae rhamnoides* Linn. on different slope aspects and natural *Caragana opulens* Kom. to climate and implications for plantations management [J]. Ecological Indicators, 2022,138:108833.
- [7] 于昊辰,陈浮,尹登玉,等.采矿与气候变化对戈壁矿区土地生态系统的影响:以准东煤炭基地为例[J].煤炭学报,2021,46(8):2650-2663.
- [8] 毛芮,郭碧花,刘金平,等.寒区公路不同坡度护坡土壤性状和群落特征及功能群差异[J].草地学报,2022,30(6):1550-1557.
- [9] 张家喜,詹天宇,杨兴,等.坡度与坡位对工程创面土壤养分状况的影响研究[J].土壤通报,2020,51(1):58-62.
- [10] Pan Jian, Bai Zhongke, Cao Yingui, et al. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump [J]. Environ-

- mental Science and Pollution Research, 2017, 24(30): 23953-23965.
- [11] 陆雅佩, 罗久富, 王丽娜, 等. 海拔与坡向对伏牛山自然陡坡土壤种子库的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 74-84.
- [12] 张展, 高照良, 宋晓强, 等. 黄延高速公路边坡植被与土壤特性调查研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 191-195.
- [13] Rivera D, Mejias V, Jáuregui B, et al. Spreading topsoil encourages ecological restoration on embankments: Soil fertility, microbial activity and vegetation cover [J]. PLoS One, 2014, 9(7): e101413.
- [14] 严雨洁, 夏露, 赵冰琴, 等. 向家坝工程扰动区不同修复类型边坡土壤养分及土壤酶活性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2005-2015.
- [15] 王辰元, 周明涛, 胡旭东, 等. 蒸散视角下护坡植被滴灌技术评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 85-92.
- [16] 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.
- [17] 章穗, 张梅, 迟国泰, 等. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
- [18] Li R, Kan S, Zhu M, 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.
- [19] 张泽洲, 王冬梅, 李梦寻. 干湿交替程度对土壤速效养分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 265-270.
- [20] 段玉婷, 王志泰, 徐小明, 等. 石质边坡植被建植后土壤养分与植物群落特征动态研究[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 10-18.
- [21] 全思懋, 管晓进, 王绪奎, 等. 江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J]. 土壤, 2019, 51(2): 257-262.
- [22] 雷斯越, 赵文慧, 杨亚辉, 等. 不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 86-91, 105.
- [23] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [24] 平李娜, 王辉, 沈紫燕. 坡度对黏性红壤土坡面溶质迁移特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 47-50, 58.
- [25] 高郟, 李江荣, 卢杰, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1331-1341.
- [26] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 190-196.
- [27] 陈乐乐, 施建军, 王彦龙, 等. 高寒地区不同退化程度草地群落结构特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 210-213.
- [28] 税伟, 冯洁, 李慧, 等. 喀斯特退化天坑不同坡向植物群落系统发育与功能性状结构[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8050-8060.
- [29] 何肖肖, 王娇娇, 孙鲁龙, 等. 基于 AHP-EWM 评价陕西渭北地区无袋栽培苹果果实品质[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 70-78, 87.
- [30] 陈品章, 杨海浪, 胡波, 等. 基于植被恢复的水泥改性膨胀土换填土复合改良试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 112-118.
- [31] Hu Xudong, Gao Jiazhen, Zhou mingtao, et al. Evaluating the success of engineering disturbed slope eco-restoration in the alpine region, Southeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. 山地科学学报(英文版), 2021, 18(11): 2820-2832.
- [32] 乔欧盟, 陈璋. 矿区不同类型生态护坡工程植物多样性对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 742-748.
- [33] Wu Wenjuan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. Driving mechanisms of climate-plant-soil patterns on the structure and function of different grasslands along environmental gradients in Tibetan and Inner Mongolian Plateaus in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339: 130696.
- [34] 尹金珠, 朱凯华, 史翔宇, 等. 庆丰采石场岩质边坡植被恢复状况和土壤特性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 144-149, 155.

(上接第 16 页)

- [21] Fan Ying, Miguez M G, Jobbag Y, et al., et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America., 2017, 114(40): 10572-10577.
- [22] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-27.
- [23] Zhou Shuang, Lin Junjie, Wang Peng, et al. Resistant soil organic carbon is more vulnerable to priming by root exudate fractions than relatively active soil organic carbon [J]. Plant and Soil, 2022: 1-12.
- [24] Wang Hao, Zhang Guanghui, Li Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2018, 325: 18-27.