

不同生态修复措施对藏东南工程边坡植被重建作用

蒋云清^{1,2}, 王国严^{1,2}, 黄梦月^{1,2}, 张鸿南^{1,2},
彭培好^{1,2}, 裴向军³, 李景吉³, 唐晓鹿³, 印大秋⁴, 王世军⁴

(1.成都理工大学 生态与景观研究所 四川 成都 610059;

2.成都理工大学 旅游与城乡规划学院 四川 成都 610059; 3.成都理工大学

生态环境学院 四川 成都 610059; 4.华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司 西藏 拉萨 850000)

摘要: [目的] 青藏高原是我国生物多样性保护的重点地区,工程扰动区的生态恢复研究对该地区生态系统保护具有重要意义,但相关研究资料较少。[方法] 以藏东南新修派墨公路为研究对象,基于沿线边坡生态恢复植物群落调查,分析群落盖度、物种多样性指数(Shannon-Wiener 指数、Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数)、群落加权性状值(比叶面积、叶干物质含量、叶氮含量、叶磷含量)与环境变量(海拔、修复措施)的关系,探究当前恢复重建植物群落对环境变量及工程措施的响应。[结果] ①海拔显著影响 Margalef 丰富度指数、叶干物质含量($p < 0.05$); ②高强度的措施显著提高群落盖度、比叶面积、叶氮含量($p < 0.05$),但对叶磷含量有显著负向作用($p < 0.05$); ③人为高度干预的 SJP 技术能够显著增加高海拔植物的叶干物质含量,对群落修复效果总体较好。[结论] 海拔和修复措施是派墨公路沿线边坡植物群落恢复的主要影响因素,研究结果强调了随着海拔升高,植被自然恢复难度增大,应加强人为修复措施强度,避免引起高寒地区生态退化。

关键词: 生态修复; 植被重建; 海拔; 物种多样性; 群落加权性状

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0187-08

中图分类号: Q948.1

文献参数: 蒋云清, 王国严, 黄梦月, 等. 不同生态修复措施对藏东南工程边坡植被重建作用[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 187-194. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230524.001; Jiang Yunqing, Wang Guoyan, Huang Mengyue, et al. Effect of different ecological restoration measures on reconstruction of slope vegetation in Southeastern Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 187-194.

Effect of Different Ecological Restoration Measures on Reconstruction of Slope Vegetation in Southeastern Tibet

Jiang Yunqing^{1,2}, Wang Guoyan^{1,2}, Huang Mengyue^{1,2}, Zhang Hongnan^{1,2},

Peng Peihao^{1,2}, Pei Xiangjun³, Li Jingji³, Tang Xiaolu³, Yin Daqiu⁴, Wang Shijun⁴

(1. Institute of Ecological Resources and Landscape, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Tourism and Urban-Rural Planning College, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Huaneng Tibet Yarlung Zangbo River Hydropower Development Investment Co., Ltd., Lhasa, Tibet 850000, China)

Abstract: [Objective] The influence of environmental factors on the plant community of a slope during the process of ecological restoration objective of this study was evaluated in order to provide a reference for the ecological restoration of disturbed areas in southeastern Tibet. [Methods] We studied an area of the newly constructed PAIMO Highway in southeastern Tibet. We determined the relationships between community cover, species diversity indexes (Shannon-Wiener index, Simpson diversity index, Margalef richness index, Pielou evenness index), community weighted trait values (specific leaf area, leaf dry matter content, leaf nitrogen content, and leaf phosphorus content), and environmental variables (elevation, restoration measures)

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2023-01-06

资助项目: 国家重大工程建设技术服务项目“雅江中游电站受损创面生态修复技术体系研究与应用项目”(JC2020/D02); 国家重大工程服务项目“YX 截弯引水发电工程区生态地质环境评价与生态修复技术研究”; 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0301); 国家自然科学基金地区项目(31860123, 31560153); 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司项目(JC2022/D01)

第一作者: 蒋云清(1996—), 女(汉族), 山东省泰安市人, 硕士研究生, 研究方向为生态修复学和植物地理学研究; Email: jyqing163@163.com.

通信作者: 王国严(1983—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事群落生态学和功能生态学研究。Email: wangguoyan@yeah.net.

based on an investigation of the plant community of an ecological restoration area along a slope. [Results] ① Elevation significantly influenced the Margalef richness index and leaf dry matter content ($p < 0.05$); ② High-intensity measures significantly increased community cover, specific leaf area, and leaf nitrogen content ($p < 0.05$), but significantly decreased leaf phosphorus content ($p < 0.05$); ③ the SJP technique with high human intervention could significantly increase the leaf dry matter content of high-elevation plants and showed an overall greater efficacy. [Conclusion] The difficulty associated with natural vegetation restoration increases as elevation increases, and artificial restoration measures need to be intensified to prevent ecological degradation in alpine regions.

Keywords: ecological restoration; revegetation; elevation; species diversity; community weighted traits

工程建设开挖出的大量边坡常常对周围生态环境造成直接破坏,若长期缺乏植被覆盖,裸露、陡峭的边坡容易受到降雨和地表径流的直接侵蚀,从而改变地形地貌,扰乱土壤结构,甚至影响局部气候^[1]。植被重建是边坡生态系统恢复中的重要步骤,恢复良好的边坡植被能够提高边坡稳定性,降低水土流失风险,恢复边坡土壤结构和肥力,能够促进边坡群落的自然演替^[2]。植物群落特征作为植被重建过程中的重要表征,能够衡量边坡生态功能恢复的质量与群落演替进程。

植物物种多样性、群落盖度、功能性状等是描述植物群落特征的主要指标,能够反映植物群落生态功能对环境的适应。植物物种多样性是植物群落在组成结构功能和动态等方面体现出的差异,常与养分存储、物质循环、能量流动和生态系统的稳定等有着紧密关系,同时也是群落内物种分布数量和均匀程度的测度指标^[3]。物种多样性可定量表征生物群落和生态系统的结构特征,多年来一直是生态学研究的热点^[4]。植被盖度及其变化不仅是区域生态系统环境变化的重要指标,而且与水文、生态、全球变化等都密切相关^[5]。植物功能性状是植物在长期的进化和选择过程中与环境相适应的结果,在一定程度上反映了植物应对生态环境变化的适应策略。功能性状可以直接反映生态系统过程,基于性状的方法能够评估群落集合和生态系统功能之间的关系,而功能性状的群落加权平均性状值(CWM)与生态过程的相关性最强,是了解和评估生态修复效果的重要方法。如今,功能性状被越来越多地用于预测生物多样性对多个生态系统过程和生态功能的影响,人工修复措施对生态系统功能与服务的恢复效果也可以通过直接测量相关功能性状来评估。例如,与光捕获能力及光合作用有关的比叶面积、叶氮含量等叶性状可反映植物重建过程中对光资源的利用情况;叶磷是植物叶片的重要元素之一,可反映植物的耐寒性与抗寒性。将物种多样性、功能性状作为不同环境条件下植物群落生态恢复的功能性指标,有助于对当前群落恢复状况进行

有效评价,从而指导下一步生态恢复工作。

青藏高原是中国生物多样性保护的重点地区,近年来水利水电工程的建立给生态环境带来威胁,工程扰动区的生态恢复对该地区生态系统保护具有重要意义,但相关研究资料较少。在不同海拔跨度上,针对区域尺度生态恢复的研究大多围绕河流生态系统、工程区边坡的植物选择配置及土壤养分变化等内容展开^[6,7],而少有涉及工程扰动区的植物群落与生态系统功能关系。

基于以上背景,本文以雅下重大水电工程区的派墨公路为研究对象,调查工程扰动区边坡群落恢复情况,以物种多样性、群落功能性状为群落特征指标,评价生态恢复过程中环境因素对边坡植物群落的影响。提出以下科学假设:①海拔是诸多环境因子中影响群落特征的主要因素;②修复措施能够影响工程扰动区边坡植物物种多样性及叶性状,从而影响生态功能和群落特征的恢复效果,促进群落重建及恢复。通过分析物种多样性、叶性状与环境变量的关系,阐明植物群落与环境的相互作用,以期为藏东南工程扰动区生态恢复研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样地概况

派墨公路位于西藏自治区林芝市境内,于2021年5月全线贯通,随后完成了边坡生态恢复工作。该公路地处西藏最温暖湿润的地区,具有热带和亚热带气候特征,年平均气温 $16\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量约为 $2\ 202\text{ mm}$ 。研究区取自派镇至老虎嘴隧道段沿线边坡($94^{\circ}53'30''\text{—}95^{\circ}9'14''\text{E}$, $29^{\circ}21'7''\text{—}29^{\circ}30'19''\text{N}$),其海拔梯度较大,为 $1\ 700\sim 3\ 600\text{ m}$,自低海拔向高海拔发育有山地黄棕壤、山地棕壤及山地漂灰土,植被类型分布有亚热带山地常绿阔叶林、针阔叶混交林、亚高山针叶林带^[8]。研究区内主要植物种类有白车轴草(*Trifolium repens*)、早熟禾(*Poa annua*)、莎草(*Cyperus esculentus*)、美花山蚂蝗(*Sunhangia calliantha*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、天蓝苜蓿

(*Medicago lupulina*)等。以派墨公路沿线边坡植物群落为研究对象,分别调查记录在自然恢复、普通措施修复及 SJP 系列边坡植被修复技术^[9][专利:CN201 610 334 309.3](以下简称“SJP 技术”)下植物群落恢复情况,并采集相应叶性状。其中,普通措施恢复主要包括 TBS 厚层基材喷播、增加挡土翼、锚挂金属网 3 种修复方法,SJP 技术主要包括坡面修整、固化剂配置、加固土配置、加固土摊铺、加固土养护几个重要步骤,同时改善土壤养分配置。

1.2 样本采集

在研究区派墨公路沿线选择了 5 个典型修复边坡作为样地,根据边坡面积大小在每个样地内随机设置 3~4 个样点,在每个样点内设置 1 m×1 m 草本样方 3~8 个,每两个样方间隔 3~5 m。考虑到边坡坡度较陡,即介于 65°~90°,故将所有样方设置在坡中部或下部,以便于调查进行。共调查 75 个草本样方,包含自然恢复样方 14 个,普通修复措施样方 27 个,SJP 技术修复样方 34 个,同时记录样方内所有植物的种名、盖度、株丛数。

在 5 个样地内,每种植物选择 8~10 株标准样株,选取完全舒展、健康成熟的叶片 20 片进行采集。将采集后的叶片用被蒸馏水浸湿的滤纸包裹,装入自封袋并编号。使用叶面积扫描仪(万深植物图像分析仪)获取叶面积;用吸水纸吸干叶表面多余的水分,并用 0.000 1 g 的电子天平(上海力辰电子分析天平 FA224 C)测量其叶片鲜重。之后将叶片放于 105 °C 干燥箱杀青 30 min 后 70 °C 干燥至质量恒定,用电子天平称取叶干质量。经研磨过筛后,使用凯氏定氮仪凯氏定氮法测得叶片氮含量;使用紫外分光光度计钼锑抗比色法测得叶片磷含量。比叶面积(SLA)用叶面积与其干质量之比进行计算,单位 cm²/kg;叶干物质含量(LDM)用叶干质量与叶片鲜重之比进行计算,单位 g/kg。

1.3 群落学指标

本研究选取 4 种常见物种多样性指数,即 Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(J_e)、Margalef 丰富度指数(R),以及群落加权性状值(CWM)进行计算,用于表征物种多样性及功能多样性。计算公式如下:

(1) Shannon-Wiener 指数(H'):

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

(2) Simpson 多样性指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

(3) Pielou 均匀度指数(J_e):

$$J_e = H' / \ln S \quad (3)$$

(4) Margalef 丰富度指数(R):

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

(5) 群落加权性状值(CWM):

$$CWM = \sum_{i=0}^S P_i \times T_i \quad (5)$$

式中: i 为样方中第 i 个物种; S 为样方物种总数; P_i 为 i 物种的相对多度; N 为全部种的个体数总数; T_i 为物种在每个样方中的个体性状值。

1.4 环境数据

利用坡向转换指数(TRASP)将 0°~360°的方位角转换为 0~1 区间,该指数越大表示越向阳,反之越背阴。其中 1 代表南偏西 30°,0 代表北偏东 30°。计算公式如下:

$$TRASP = \frac{1 - \cos[\pi(A - 30)/180]}{2} \quad (6)$$

式中: A 代表坡向。

根据样地经纬度信息,通过 Worldclim 网站(<https://www.worldclim.org/>)获取近 30 年的历史气候数据(包括年均温、年降水量),并通过 ArcGIS 将气象数据匹配至各个样地。

1.5 数据分析

本研究首先对海拔、坡度、坡向、年均温、年降水量、措施进行标准化(平均值为 0,标准差为 1),以消除各个变量间量纲差异的影响。其次,为避免各变量之间的共线性对结果的影响,对海拔、坡度、坡向、年均温、年降水量、措施进行主成分分析,并通过主成分回归得到主成分预测值。将主成分预测值作为自变量分别与群落盖度、物种多样性指数(Shannon-Wiener 指数、Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数)、群落加权性状值(比叶面积、叶干物质含量、叶氮含量、叶磷含量)进行多元线性回归模型拟合,对不服从正态分布的因变量进行 log 对数转换。利用单因素方差分析(ANOVA)和多重比较方法(LSD)研究不同恢复方式对群落加权性状及物种多样性的影响。

所有分析均在 R 4.2.0 中进行,其中,主成分分析用 psych 包进行分析,作图用 ggplot2 包和 sjPlot 包进行绘制。

2 结果与分析

2.1 影响群落特征的主要环境因素

本研究对 6 个环境变量进行了 PCA 分析,根据 Cattell 碎石检验的结果,确定保留前两个主成分,其方差累计贡献率达 83%,在一定程度上基本可反映

研究区环境变量的综合信息。由主成分分析图(图1)可以得出,海拔与气候变量(年均温、年降水量)对第一主成分贡献最大,其中,海拔与第一主成分呈负相关,气候变量与第一主成分呈正相关;措施对第二主成分贡献最大。考虑到气候会随海拔发生变化,此处选择海拔作为第一主成分,同时将措施作为第二主成分进行后续模型拟合。

2.2 群落盖度、物种多样性指数与环境变量的关系

线性模型结果显示,海拔对 Margalef 丰富度指数有显著负向影响($p < 0.05$),措施对群落盖度有显著正向影响($p < 0.01$)。而海拔、措施以及二者交互作用对 Shannon-Wiener 指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数均没有显著影响($p > 0.05$,图2)。

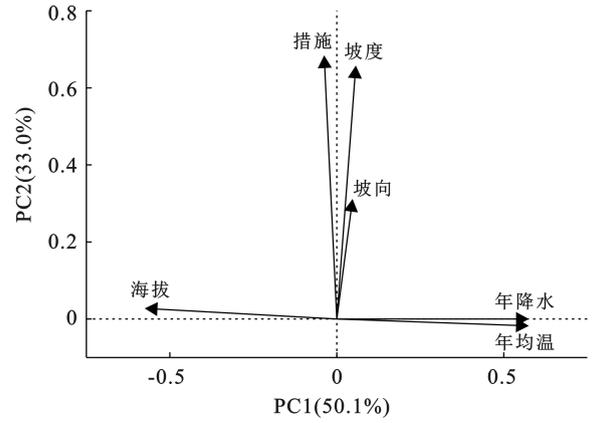


图1 影响群落特征的主要环境因子主成分分析图
Fig.1 Principal component analysis of the main environmental factors affecting community characteristics

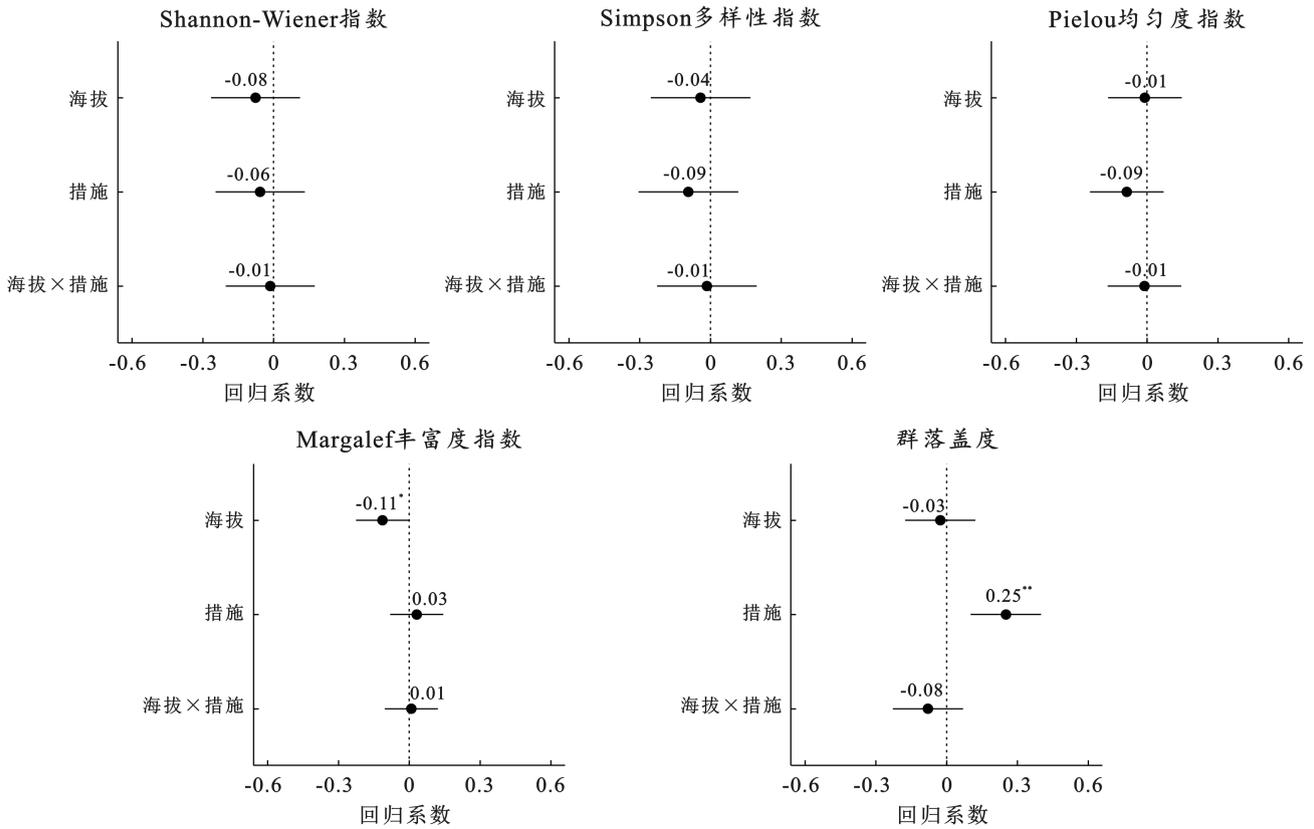


图2 群落盖度、物种多样性指数对环境变量的响应

Fig.2 Responses of community coverage and species diversity index to environmental variables

2.3 群落加权性状与环境变量的关系

群落加权性状与环境变量的模型拟合结果见图3。海拔只对叶干物质含量有显著影响,表现为正效应($p < 0.05$),与比叶面积、叶磷含量、叶氮含量均无显著关系。

不同措施对比叶面积、叶氮含量有显著正向影响($p < 0.05$),对叶磷含量有显著负向影响($p < 0.05$)。海拔与措施的交互作用对叶干物质含量有显著正向影响($p < 0.05$)。

2.4 不同修复措施对群落盖度、群落加权性状的影响

修复措施对群落盖度、比叶面积、叶氮含量及叶磷含量有显著影响(图2,图3)。根据LSD检验结果,不同恢复方式的效果存在差异(图4)。SJP技术对群落盖度、比叶面积、叶氮含量的影响最大。3种恢复方式对群落盖度的恢复效果大小排序为:SJP>NRE>OME,对比叶面积的恢复效果大小排序为:SJP>NRE>OME。两种人工修复方式对叶氮含量的影响均大于自然恢复,而对叶磷含量的影响均小于自然恢复。

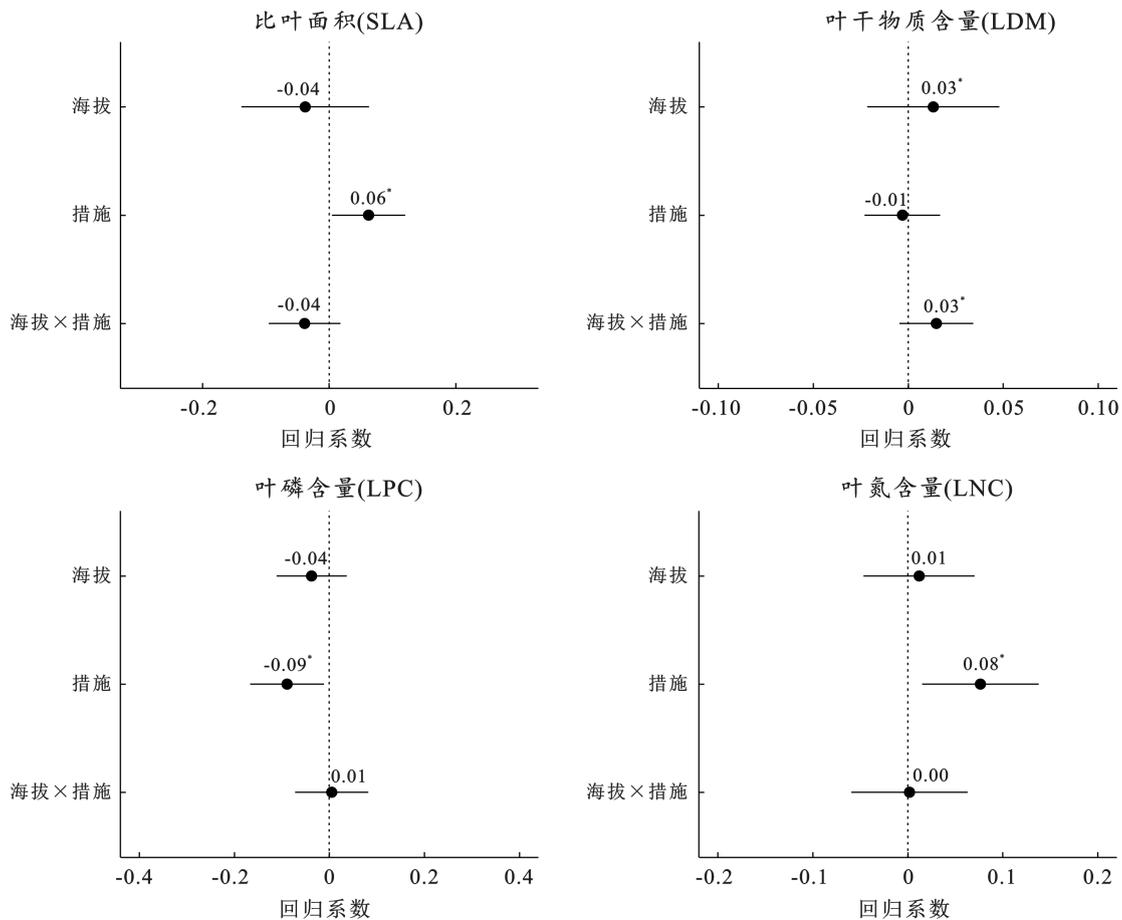
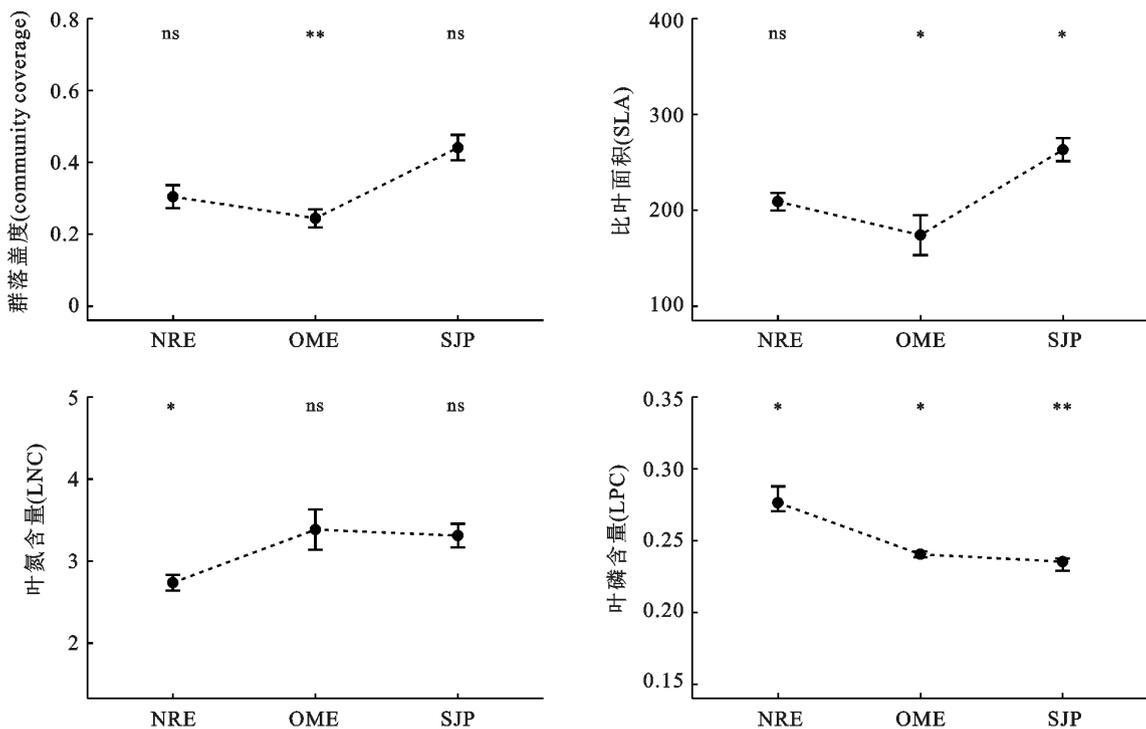


图 3 群落加权性状对环境变量的响应

Fig.3 Responses of community weighted traits to environmental variables



注: NRE 表示自然恢复, OME 表示普通措施, SJP 表示 SJP 技术。下同。

图 4 不同修复措施对群落盖度、群落加权性状的影响差异

Fig.4 Differences in the effects of different restoration measures on community coverage and community weighted traits

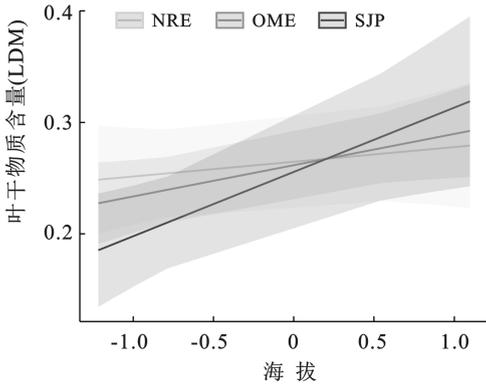


图 5 海拔与措施交互作用对叶干物质含量的影响

Fig.5 Effects of the interaction of altitude and measure on leaf dry matter content

3 种恢复方式在不同海拔梯度上对叶干物质含量的影响存在差异(图 5)。直线斜率越大表明该措施下群落的叶干物质含量受海拔影响越大。低海拔处自然恢复的效果优于人工修复,高海拔处则相反,恢复效果为: SJP>OME>NRE。

3 讨论

3.1 植物群落对海拔的适应

海拔和坡度、坡向作为最重要的地理变量,共同影响土壤温度和土壤水分的变化,从而影响植物的分布。本研究中,由主成分分析结果可知(图 1),研究区内海拔的影响大于坡度、坡向。海拔梯度被认为是影响物种多样性空间分布格局及其潜在机制的一个关键性的因子,它通过影响太阳辐射、温度、水分和土壤等资源的分配进而影响生态系统,导致植物群落空间分布格局的不同^[10]。本研究中,海拔对物种多样性指数的影响均为负向(图 2),其中对 Margalef 丰富度指数的影响最显著($p < 0.05$),当海拔升高,温度、水分等因子随之发生了变化,耐寒物种也会相应减少,进而导致物种多样性减少。然而,生态恢复的难度也将随着海拔升高而增加,物种多样性对措施的负响应会削弱措施对群落盖度的修复效果,高寒地区也将加重环境过滤,使一些低海拔物种很难在高海拔地区生存。因此,在高海拔地区进行生态恢复时对所选物种的生活型应当有更高要求,从而增加物种在该地区的定植成功率,提高物种多样性。另一方面,叶干物质含量可以很好的指示植物对养分元素的保存能力,并且与养分吸收策略有关^[11]。张增可等^[12]的研究结果表明,随着海拔的上升植物倾向于增加叶干物质含量,将更多的资源投入到防御组织,采取保守资源策略,从而抵御冲蚀引起的养分流失,这与本文的研究结果相符(图 3),高海拔地区的较低温度也有助

于植物进行养分积累^[13],从而更好适应高寒环境。

3.2 植物群落对修复措施响应

植物能够产生某些生态适应特征而与环境保持协调关系,这种对环境的适应性保证了其自身的生存与发展。叶性状作为植物与环境之间的必要桥梁,可以直接反映植物适应环境变化的生存策略^[14]。

本研究的结果表明,修复措施能够通过调整植物对资源的利用策略从而对群落特征及群落加权性状产生显著影响($p < 0.05$,图 2,图 3),具体表现为群落盖度增加、群落比叶面积增大、叶氮含量提高以及叶磷含量的减少。措施对群落盖度的促进作用表明当前研究区生态恢复取得了初步成效,研究区群落生境质量得到提高。通常情况下,在资源有限的生境中,生长缓慢的物种比叶面积比较低,而高比叶面积的植物常常分布在土壤营养资源丰富的地方^[15],这也说明研究区内的生态恢复有效促进了土壤营养的聚集。叶氮含量与叶磷含量作为描述群落水平上的植被结构功能及养分限制的重要指标^[16],与光合速率、植物养分存储相关,二者的变化能够反映植物群落对资源利用的能力、生长发育及生理机制的调节^[17]。措施帮助植物提高叶氮含量促进其对环境的适应,叶氮含量的提高也可使植物减少低温带来的负面影响、提高水分利用率,保证其自身生物化学效应的正常进行,这在高海拔处尤为明显^[18]。然而,与对叶氮含量的作用相反,措施对叶磷含量的影响是显著负向的。当土壤中的含水量增加时,叶磷含量将随之降低^[19],这体现了植物在生态恢复过程中对环境的适应策略。此外,由于植物叶片中的氮、磷含量极易受环境条件的影响^[20],且其主要由植物根系从土壤中吸收获得^[19],叶氮、叶磷含量因此也可反映土壤中氮磷养分情况。在本研究的结果中,修复措施对叶氮、叶磷含量表现出相反的作用效果,这可能是受到土壤中氮、磷养分配置不均的影响。叶磷含量对植物新陈代谢有着重要意义,它的提高能够增强植物的抗旱能力和抗寒性^[19]。因此,措施中对土壤养分的配置有待改进,如何同时提高叶片氮、磷含量仍需进一步研究。

3.3 不同环境条件下修复措施对植物群落的影响

当土壤水分和有机质状况较差时,植物的生长就会受到限制,自然恢复和人工修复措施下土壤水分和养分的差异是导致群落功能性状和多样性特征不同的主要因素^[21]。虽然两种措施均对土壤进行了加固,利于植物扎根生长,但恢复效果却存在差异(图 4),这表明单纯加固土壤的修复方式并不能有效促进群落恢复。由图 4 可知,SJP 技术下的群落盖度、群落加权性状值更高,表明 SJP 技术能够提供比自然恢

复和普通措施下更适宜的植物生长条件。SJP技术既加固了土壤,也保证了群落有充足的营养资源,对土壤进行了改良,使土壤团聚体增加,提高了土壤孔隙率,解除了土壤养分缺乏的限制,植物由养分竞争变为光竞争^[22],其比叶面积增加,进而群落盖度增大(图2),使植物群落得到更好的恢复。

有学者指出,短期内以人工措施为主的植被恢复优于原地的自然植被恢复^[23]。然而,仅仅改善土壤成分在短期内虽能提高土壤质量,但对群落盖度、物种丰富度的提高可能没有太大影响^[24],这可能与恢复方式的类型等有关,因而群落的恢复效果不明显。随着生态恢复的进行,土壤有机质将不断积累,土壤养分呈增多趋势,土壤理化性质逐渐得到改善,并促进群落结构的调整^[25]。因此,群落不同功能的恢复需要不同的时间跨度,生态恢复时需要明确考虑在给定的时间框架内应该或可以实现哪些生态功能^[26]。

在不同的海拔梯度上,自然恢复、普通措施修复及SJP技术修复这3种恢复方式对群落的影响表现出差异。由图5可知,海拔较高的地区更需要进行人工修复,海拔越高,修复技术强度也宜越大。低海拔地区采取自然恢复比人工修复更有助于植物养分的积累,但自然恢复在不同海拔梯度下的效果基本不变。与普通措施相比,SJP技术作为人为高度干预的一种方式,生态恢复效果更好,这与吴舒尧等^[27]的研究结果一致。然而,也有研究表明,资源丰富的群落已被发现有更多的非本地种,且容易被侵略性植物入侵,从而阻止了本地群落的恢复^[28]。但本地种群落一旦建立,就可以通过占据资源来减少入侵,快速建立本地种群落,提高其物种丰富度及盖度,是限制外来种入侵资源丰富的恢复群落的重要一步^[29]。因此,在生态恢复初期应当控制群落的土壤资源量,适当提高土壤养分,同时尽量选择本地种进行播种或栽种。由于受制于样本量大小的影响,本研究并未分析植物群落对坡度、坡向等因子的适应。坡度、坡向作为重要的环境因子,对生态恢复中植物群落的影响有待进一步研究。

4 结论

(1) 藏东南工程边坡植物群落特征受海拔影响较为显著。其中,叶干物质含量随海拔显著增加,但Margalef丰富度指数随海拔有减小趋势;

(2) 修复措施能够有效增大群落盖度,促进比叶面积、叶氮含量的提高,表明当前修复措施起到了初步效果。但修复措施对叶磷含量有一定负向作用,因此,如何同时提高叶片氮、磷含量仍需进一步研究;

(3) 本研究的结果表明,海拔较高的地区更需要进行人工修复,并且随着海拔梯度增加,修复技术强度应当加大,以保证更好的生态修复效果;

(4) 自然恢复、普通修复措施、SJP技术对群落的影响表现出明显差异。其中,SJP技术作为人为高度干预的恢复方式能够通过显著影响群落盖度、比叶面积、叶干物质含量、叶氮含量及叶磷含量,有效促进植物适应高寒环境、优化生态服务功能,因此恢复效果最好。

本研究表明植被重建过程中可通过群落特征及功能性状进行恢复效果的评估,高海拔地区是生态修复的重点、难点地区,随着海拔升高,应加强人为修复措施强度,避免引起高寒地区生态退化,研究结果为藏东南水电工程扰动区边坡植被恢复提供参考。

致谢:项目野外考察中得到了西藏农牧学院罗建老师在植物分类方面的帮助和支持,在此表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 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]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(11): 2820-2832.
- [2] 刘鑫,包维楷,胡斌,等.高寒山区道路边坡植被恢复物种选择及适宜性评估[J].*应用与环境生物学报*, 2016, 22(6):1015-1022.
- [3] 田起隆,张晓萍,王妙倩,等.植被演替下植物组成多样性和群落稳定性与土壤团聚体的关系[J].*中国环境科学*, 2022, 42(12):5885-5895.
- [4] 王太平,杨晓明.高速公路边坡植物群落物种多样性[J].*西北林学院学报*, 2012, 27(2):230-234.
- [5] 余娇娥,司宏敏,吴雪涛,等.海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征[J].*生态环境学报*, 2018, 27(11):2017-2022.
- [6] Tonolla D, Bruder A, Schweizer S. Evaluation of mitigation measures to reduce hydropeaking impacts on river ecosystems—a case study from the Swiss Alps [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574:594-604.
- [7] 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.
- [8] 孙航,周浙昆.雅鲁藏布江大峡谷弯河谷地区种子植物:[拉汉对照][M].云南昆明:云南科技出版社,2002:5,7.
- [9] 裴向军,张晓超,杨晴雯.一种土质边坡护坡方法:CN105862889A[P].2018-06-19.
- [10] 刘秉儒.生物多样性的海拔分布格局研究及进展[J].*生态环境学报*, 2021, 30(2):438-444.
- [11] Kergunteuil A, Descombes P, Glauser G, et al. Plant physical and chemical defence variation along elevation

- gradients: A functional trait-based approach [J]. *Oecologia*, 2018, 187(2): 561-571.
- [12] 张增可, 吴雅华, 王齐, 等. 环境因子对海岛植物茎、叶功能性状的影响[J]. *广西植物*, 2020, 40(3): 433-442.
- [13] Zhang Jun, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties along an elevation gradient in the Karst region of southwest China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 320: 107572.
- [14] Huang Rong, Tian Qing, Zhang Yue, et al. Response of leaf functional traits of landscape plants to urban green space environment in Lanzhou, China [J]. *Forests*, 2022, 13(5): 682.
- [15] 刘旻霞, 马建祖. 阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 102-106.
- [16] 钟悦鸣, 王文娟, 王健铭, 等. 极端干旱区绿洲植物叶功能性状及其对土壤水盐因子的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(10): 20-29.
- [17] 何雅琴, 史晓洁, 陈国杰, 等. 滨柃叶功能性状对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2418-2429.
- [18] 王常顺, 汪诗平. 植物叶片性状对气候变化的响应研究进展[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 206-216.
- [19] 马剑英, 陈发虎, 夏敦胜, 等. 荒漠植物红砂(*Reaumuria soongorica*)叶片元素和水分含量与土壤因子的关系[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 983-992.
- [20] 张凯, 侯继华, 何念鹏. 油松叶功能性状分布特征及其控制因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 736-749.
- [21] Dang Han, Li Jiahao, Xu Jinshi, et al. Differences in soil water and nutrients under catchment afforestation and natural restoration shape herbaceous communities on the Chinese Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 505: 119925.
- [22] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [23] Wang Anning, Huang Qiuxian, Xu Xuehua, et al. Influence of vegetation restoration on matrix structure and erosion resistance of iron tailings sites in eastern Hebei, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(3): 969-980.
- [24] Rothman S E, Cole C A, Bruns M A, et al. The influence of soil amendments on a native wildflower seed mix in surface mine restoration [J]. *Restoration Ecology*, 2021, 29(7): e13440.
- [25] 宋百敏, 刘建, 张玉虎, 等. 废弃采石场自然恢复过程中土壤和植被特征[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2022, 57(1): 8-19.
- [26] Engst K, Baasch A, Erfmeier A, et al. Functional community ecology meets restoration ecology: Assessing the restoration success of alluvial floodplain meadows with functional traits [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 751-764.
- [27] 吴舒尧, 黄姣, 李双成. 不同生态恢复方式下生态系统服务与生物多样性恢复效果的整合分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(20): 6986-6999.
- [28] Williams E W, Barak R S, Kramer M, et al. In tall-grass prairie restorations, relatedness influences neighborhood-scale plant invasion while resource availability influences site-scale invasion [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2018, 33: 37-48.
- [29] Iannone B V, Galatowitsch S M, Rosen C J. Evaluation of resource-limiting strategies intended to prevent *Phalaris arundinacea* (reed canarygrass) invasions in restored sedge meadows [J]. *Écoscience*, 2008, 15(4): 508-518.