

文章编号: 1006-4362(2023)02-0114-07

# 气温急变带工程创面植生层土壤及微生物群落特征研究

吕晶阳<sup>1</sup>, 沈逸凡<sup>1</sup>, 肖维阳<sup>2</sup>, 魏人杰<sup>1</sup>, 罗正宇<sup>1</sup>, 周立宏<sup>1</sup>, 李琪<sup>1</sup>, 裴向军<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059; 2. 阿坝藏族羌族自治州九寨沟风景名胜区管理局, 九寨沟 623420)

**摘要:** 青藏高原地处高寒缺氧的环境条件下, 对人类扰动及气候变化非常敏感。人类活动如公路修建形成众多工程创面, 对高原生态环境影响较大。创面生态修复的开展促进高原生态的恢复, 但关于环境因子对生态修复过程中土壤及生物恢复的影响尚未探明。本研究选取青藏高原派墨公路中不同海拔的工程创面重构植生层, 探究海拔变化下植生层土壤养分、酶活性及微生物群落的特征。研究结果表明: 随着海拔变化, 土壤氮磷养分含量总体随海拔升高先增加后减小, 其中海拔 3 100 m 左右的修复样地土壤养分整体优于其他海拔, 其速效磷含量最高, 同时全氮、氨态氮和全磷含量较高。此外, 随着海拔的升高, 土壤酸性蛋白酶和淀粉酶含量整体上略有升高的趋势。海拔变化对土壤酸性磷酸酶、纤维素酶、葡萄糖苷酶活性没有显著影响。海拔变化显著改变了土壤养分及土壤微生物的相对丰度 ( $P < 0.05$ ), 其中变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 为优势种群, 分别占土壤群落的 35.81%~53.82%, 8.49%~40.74%, 5.98%~24.61%, 3.17%~8.70%。微生物  $\alpha$  和  $\beta$  多样性结果表明海拔显著影响土壤细菌群落多样性, 不同海拔下的微生物群落组成在门水平上物种差异与标志物种不同。以上研究结果揭示了海拔梯度下创面生态修复重构土壤及微生物变化规律, 对生态修复效果的科学评价具有重要意义。

**关键词:** 海拔; 土壤酶活性; 土壤养分; 土壤微生物; 群落结构

中图分类号: X171.4 文献标识码: A

## CHANGES OF SOIL PROPERTIES AND MICROBIAL COMMUNITY CHARACTERISTICS IN THE PLANT-GROWTH MATRIX OF THE RESTORED ENGINEERING SLOPES UNDER DIFFERENT ELEVATIONS

LU Jing-yang<sup>1</sup>, SHEN Yi-fan<sup>1</sup>, XIAO Eei-yang<sup>2</sup>, WEI Ren-jie<sup>1</sup>,LUO Zheng-yu<sup>1</sup>, ZHOU Li-hong<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, PEI Xiang-jun<sup>1</sup>

(1. College of Ecological and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Jiuzhaigou Valley Scenic and Historic Interest Area Scenic Area Administration Bureau, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Jiuzhaigou 623420, China)

**Abstract:** The Qinghai-Tibet Plateau is located in cold region with high altitude and anoxic environmental conditions, which is very sensitive to human disturbance and climate change. Human activities, such as road construction, have formed numerous engineering slopes, which have a large impact on the ecosystem. The development of ecological restoration of engineering slopes promotes the recovery of ecosystems. But the influence of environmental factors on soil and biological recovery in the ecological restoration process has not been investigated. In this study, we investigate the characteristics of soil nutrients, enzyme

activities and microbial communities in the plant-growth matrix under the altitude change on Pai-Mo Highway on the Qinghai-Tibet Plateau. The results of the study showed that the soil nitrogen and phosphorus nutrient contents increased and then decreased with the increasing elevation. The soil nutrients in the restoration sample site at an elevation of about 3100m were better than those in other elevations, and its available phosphorus content was the highest, while the contents of total nitrogen, available nitrogen and total phosphorus were also higher. In addition, the soil acid protease and amylase contents increased slightly with increasing altitude. Elevation did not significant effect soil acid phosphatase, cellulase, and sucrase activities. Besides, elevation changes significantly altered the relative abundance of soil nutrients and soil microorganisms ( $P < 0.05$ ), with Proteobacteria, Actinobacteria, Acidobacteria, and Chloroflexi being the dominant populations, accounting for 35.81%~53.82%, 35.81%~53.82%, 8.49%~40.74%, 5.98%~24.61%, and 3.17%~8.70% of the soil community, respectively. The results of microbial alpha and beta diversity indicated that altitude significantly affected soil bacterial community diversity, and the microbial community composition differed from the markers in species with different altitudes. The results of the study reveal the change pattern of soil and microorganisms in the reconstructed soil of ecological restoration under the altitude gradient, which is important for the scientific evaluation of ecological restoration effect.

**Key words:** altitude; soil enzyme activity; soil nutrient content; soil microbial characteristics; community structure

## 1 前言

工程创面是指伴随人类在生产、生活中所实施的各种工程措施而在地球表面所出现的破坏了原有自然环境的创伤面<sup>[1]</sup>。工程创面不仅会导致山体滑坡等自然灾害,影响工程建设安全与效益;同时,表层土壤中大量的种植资源会随着开挖过程一同被转移,导致生物多样性的下降,生态环境平衡被打破<sup>[2-4]</sup>。由于受损的创面生态系统很难通过自我修复能力恢复其原有的生态功能,因此以人为干预为主的生态修复措施对恢复受损生态系统保持水土、调节小气候、维护生物多样性等生态功能和开发利用等经济功能有极其重要的作用<sup>[5,6]</sup>。工程创面生态修复是具有创面防护和生态恢复双重意义的工程措施,在受损的工程创面上构建稳定的植生层,在维持边坡稳定的同时为植物生长提供充足的养分。当前,我国较为常用的边坡生态修复技术包括液压喷播技术、混喷植草技术、撒播技术、植生袋防护技术、植被混凝土技术等<sup>[7]</sup>。

海拔作为理想的“自然实验平台”<sup>[8]</sup>,其梯度变化会引起土壤性质的变化<sup>[9]</sup>。此外,其他环境因子也是影响土壤理化性质、酶活性、微生物群落结构及其多样性分布的重要因素<sup>[10,11]</sup>。土壤理化性质作为评价生态修复效果的重要指标,不仅能反映土壤养分随生态修复的变化<sup>[12]</sup>,还驱动着土壤酶活性和

微生物群落结构的变化<sup>[13]</sup>。相较于土壤理化性质,土壤酶活性和微生物群落结构对人为干预(如工程建设、生态修复等)的响应更为迅速<sup>[14]</sup>。因此,探究不同海拔梯度重构植生层土壤理化和生物性质对评价生态修复效果具有重要意义。

派墨公路位于西藏东南部,雅鲁藏布江下游,起于米林县派镇,止于墨脱县解放大桥<sup>[15]</sup>。气候特点为冬季温暖、小雨多雾,夏季雨量充沛,降水集中,空气湿润,相对湿度高,山地出现明显的气候垂直变化,主要包含了山地亚寒带、山地温带、山地亚热带和山地热带等垂直气候带<sup>[16-18]</sup>。综上,派墨公路气候、土壤和植被覆盖等具有明显过渡特征,是研究生物多样性和植被演替的理想对象<sup>[19-21]</sup>。然而,目前对于派墨公路不同海拔下工程创面生态修复后植物群落结构、土壤微生物群落结构变化未见报导。

为探究派墨公路沿线不同海拔梯度工程创面重构植生层对土壤理化性质、酶活性及土壤微生物群落多样性的影响差异,本研究通过对老虎嘴隧道口(LHZ)、派墨公路44 km处边坡(FOUR)、43 km处边坡(Three)、24 km处边坡(K24)、22 km处边坡(K22)、多雄拉隧道口(DXL)六个生态修复样地中重构植生层土壤的理化性质、酶活性以及微生物群落结构的监测,分析派墨公路不同海拔梯度创面重构植生层土壤理化性质、酶活性和微生物群落结构的变化,进而对修复效果做出评价,以期青藏高原

边坡生态修复、环境建设提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区域概况

本研究选取的生态修复示范区位于派墨公路,该路段起于米林县派镇,至松林口采用特长隧道穿越多雄拉山体后沿多雄河展线,经汗密、老虎嘴,止于墨脱县解放大桥,全线长约 66.7 km,海拔落差超过 2 890 m。属于典型的气候急变区。年降水量为 2 508.8~5 246.66 mm,其中 2020 年降水量最大 5 246.66 mm,年降水集中在 6、7 月份,其中月最大降水量维持在 1 200 mm。近 10 a 来,年蒸发量维持在 940 mm 左右;属热带山地河谷雨林和半常绿雨林(或称为“季节性雨林”,属雨林类型)。本文研究样地基本地形和气候特征如表 1 所示。

表 1 研究样地基本地形和气候特征

地点 /Site	经度 /E	纬度 /N	海拔 /m	坡向	年平均降水量 /mm	年平均温度 /℃
LHZ	95.155	29.351	1 750	阴坡		
Four	95.151	29.352	1 790	阳坡	103.32	20.19
Three	95.145	29.354	1 860	阳坡		
K24	95.017	29.456	3 080	阳坡		
K22	95.017	29.454	3 100	阴/阳坡	85.19	5.21
DXL	94.922	29.489	3 550	阳坡	70.31	3.13

### 2.2 样地设置及样品采集

实验选取派墨公路沿线 6 个生态修复示范区均位于不同海拔下(表 1),分别为老虎嘴隧道口边坡(LHZ)、派墨公路 44 km 处边坡(FOUR)、43 km 处边坡(Three)、24 km 处边坡(K24)、22 km 处边坡(K22)和多雄拉隧道口边坡(DXL),收集修复 1 a 后(2022.06.07)土壤样品。在每个样点,于 100 m<sup>2</sup> 内布置 4~5 个 1 m×1 m 的样方,采用五点取样法采集土壤表层(0~10 cm)和 中层(10~20 cm)两层土壤样品,各自混合均匀。土壤样品剔除碎石、根系和枯枝后分成两份,一份风干后过 2 mm 筛,用于检测土壤理化性质和酶活测定;一份置于冰盒中,尽快带回实验室,在 -20℃ 冻存,用于后续微生物群落特征的测定。

### 2.3 土壤理化性质测定方法

氨氮、全氮、速效磷、全磷均采用连续流动分析仪 AA3(SEAL, 英国)测定。反应原理如下:氨氮:样品与水杨酸钠和 DCI 反应生成蓝色化合物在 660 nm 波长下检测。全氮:样品和水杨酸钠及次氯酸钠反应生成一种蓝色化合物可以在 660 nm 处测定。速效磷:磷酸盐和钼酸盐及抗坏血酸反应生成

一种蓝色化合物在 660 nm 下检测。全磷:有机磷化合物和多磷酸盐在凯氏消解后转化为磷酸盐。

### 2.4 土壤酶活性测定方法

风干土壤样品在冰箱内 4℃ 保存用于土壤酶活性的测定。土壤纤维素酶活性采用蒽酮比色法测定,土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土壤 β-葡萄糖苷酶分解对-硝基苯-β-D-吡喃葡萄糖生成对-硝基苯酚,在 400 nm 有最大吸收峰;土壤淀粉酶与 3,5-二硝基水杨酸反应生成红棕色物质,在 540 nm 处有特征吸收峰;土壤酸性蛋白酶在酸性条件下催化酪蛋白水解产生酪氨酸,在碱性环境中酪氨酸还原磷钼酸化合物生成钨蓝,在 680 nm 有特征吸收峰。每份土壤样品设置 3 个重复,且每个处理均设置无机质对照组。

### 2.5 土壤微生物群落多样性和组成测定

土壤样本在去除动物、植物残留物、砾石和其他杂质后分装送往上海派森诺有限公司(中国上海)进行微生物测序和随后的分析。采用 Omega DNA 试剂盒提取微生物 DNA,使用引物 338F(5'-ATCCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R(5'-GACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对土壤细菌中的 16S rRNA 的 V3 和 V4 区域进行 PCR 扩增和测序。微生物生物信息学分析主要通过 QIIME2 进行,操作分类单元(OTU)聚类使用 Vsearch(v2.13.4)。分别使用 Vsearch 中的 fastq\_mergepairs、fastq\_filter 和 derep\_fulllength 函数进行合并、过滤和序列复制。将代表性序列与 mafft 比对,并用于 fasttree2 的系统发育树构建。

### 2.6 数据分析方法

土壤理化性质部分采用 Microsoft Excel 2016 处理数据并用 Origin95 作图,采用 SPSS 24.0 进行单因素方差分析检验和数据分析。微生物数据作图采用派森诺生物科技有限公司平台进行作图。

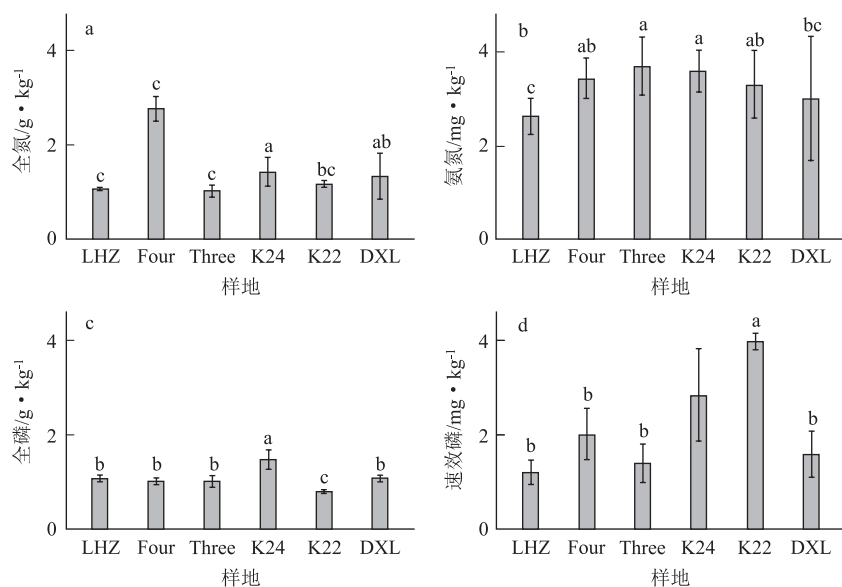
## 3 结果与分析

### 3.1 土壤理化性质分析

海拔作为重要的环境因素,对土壤理化性质和酶活性有显著的影响<sup>[24,25]</sup>。研究表明,随着海拔的升高,土壤温度和湿度会降低<sup>[26]</sup>,养分含量<sup>[27]</sup>、pH<sup>[28]</sup>等也会发生改变,这些环境因素的变化都会直接或间接地影响土壤酶活性和微生物群落结构<sup>[29,30]</sup>。土壤氮、磷作为重要的养分元素,对植被生长发育有显著的影响。本研究测定了不同海拔梯

度样地的全氮、氨态氮、全磷和速效磷,以分析不同海拔梯度对土壤理化性质的影响,如图 1 所示。结果表明,土壤全氮含量对海拔梯度变化的影响不一致。其中,K24 样地的全氮含量最高,且显著高于 LHZ、Three 和 Four 样地( $P < 0.05$ ) (图 1a)。重构植生层土壤的氨态氮含量随海拔升高呈先增加后减少的趋势,在 Three 样地中达到最大值,且显著大于 LHZ 和 DXL 样地中土壤氨态氮含量( $P < 0.05$ )

(图 1b)。不同海拔样地土壤全磷和速效磷无明显变化规律(图 1c、1d)。全磷含量在 Four 和 K22 样地中最高,速效磷含量在 K22 样地中最高,且均显著高于其他样地( $P < 0.05$ )。金章利等<sup>[27]</sup>的研究表明,随着海拔升高,土壤氮磷含量先升高后降低,与本研究的结果相似。综上,海拔 3 080 m 的 K24 修复区土壤养分均为组间较高值,土壤养分恢复效果较好。



注:图中小写字母表示不同样地间差异显著( $p < 0.05$ )

图 1 不同海拔对土壤理化性质的影响

### 3.2 土壤酶活性

土壤酶催化多种生化反应,转化有机质并释放用于植物生长的无机养分,在养分循环中起着重要作用<sup>[22]</sup>。本研究通过对比不同海拔梯度重构植生

层土壤酸性蛋白酶(图 2a)、酸性磷酸酶(图 2b)、纤维素酶(图 2c)、淀粉酶(图 2d)、蔗糖酶(图 2e)和  $\beta$  葡萄糖苷酶(图 2f)活性,分析海拔梯度变化对土壤酶活性的影响。

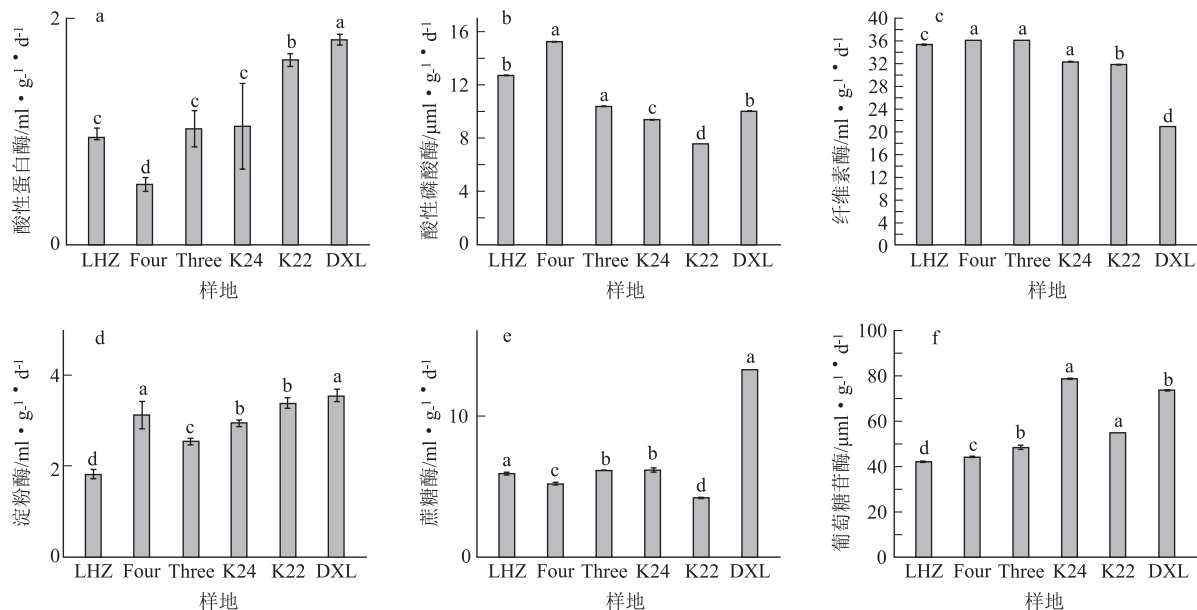


图 2 不同海拔对土壤酶活性的影响

由图 2 所示,随着海拔的升高,土壤酸性蛋白酶活性整体呈上升趋势,3 080 m 的 K24 和 DXL 样地土壤酸性蛋白酶含量显著高于其他样地( $P < 0.05$ ) (图 2a),这与金裕华等<sup>[31]</sup>对武夷山不同海拔植被带土壤酶活性的研究结果相似。K22 样地与 K24 样地海拔高度接近,因 K22 坡向为阴坡,导致 K22 样地土壤温度明显低于 K24 样地,进而使 K22 样地土壤酸性蛋白酶活性明显低于 K24 样地。酸性磷酸酶促进  $\text{PO}_4^-$  的释放,属于磷循环相关酶,土壤纤维素酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶分别催化纤维素和纤维二糖水解,与土壤蔗糖酶、淀粉酶同为碳循环相关酶<sup>[22]</sup>。由图 2b、2d 和 2e 可以看出,土壤酸性磷酸酶、淀粉酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶随海拔梯度升高变化的趋势类似,均随海拔升高先增大后减小再增大,这与万红云等<sup>[24]</sup>和元晓春等<sup>[32]</sup>的研究结果相似。土壤酸性磷酸酶活性在海拔为 1 790 m 的 Four 样地达到最大值;淀粉酶在海拔为 3 550 m 的 DXL 样地达到最大值; $\beta$ -葡萄糖苷酶活性的最大值在海拔为 3 080 m 的 K24 样地中出现。由图 2c 和 2e 可见,在 1 750~3 300 m 海拔区间内,海拔梯度的变化对土壤纤维

素酶和蔗糖酶活性没有显著影响。而在海拔为 3 550 m 的 DXL 样地中,纤维素酶活性最低,显著低于其他样地( $P < 0.05$ );蔗糖酶活性最高,显著高于其他样地( $P < 0.05$ )。

### 3.3 不同海拔梯度对土壤微生物多样性及群落组成的影响

对 6 个研究位点土壤微生物群落的组间差异进行了分析,细菌群落的  $\alpha$  多样性指数结果如图 3a 所示。所有研究地点土壤细菌和真菌群落的 Goods\_coverage 指标均大于 0.987,表示采样工作和测序工作的覆盖度已经达到了分析标准。分析结果显示,LHZ、Four、Three 为 3 个低海拔样地的以上指数均低于 K24、K22、DXL 这 3 个高海拔样地。说明在本研究地区,高海拔区域的土壤较低海拔地区的土壤具有更高的细菌丰度和多样性以及均匀度。此外,针对 K24、K22、DXL 此 3 组高海拔样地进行分析发现,在 3 090~3 550 m 的这 3 组研究位点中,土壤细菌群落的  $\alpha$  多样性指数随海拔升高呈现降低趋势,说明在超过某一范围之后,海拔的升高对土壤细菌的丰富度、多样性、均匀度呈负向影响。

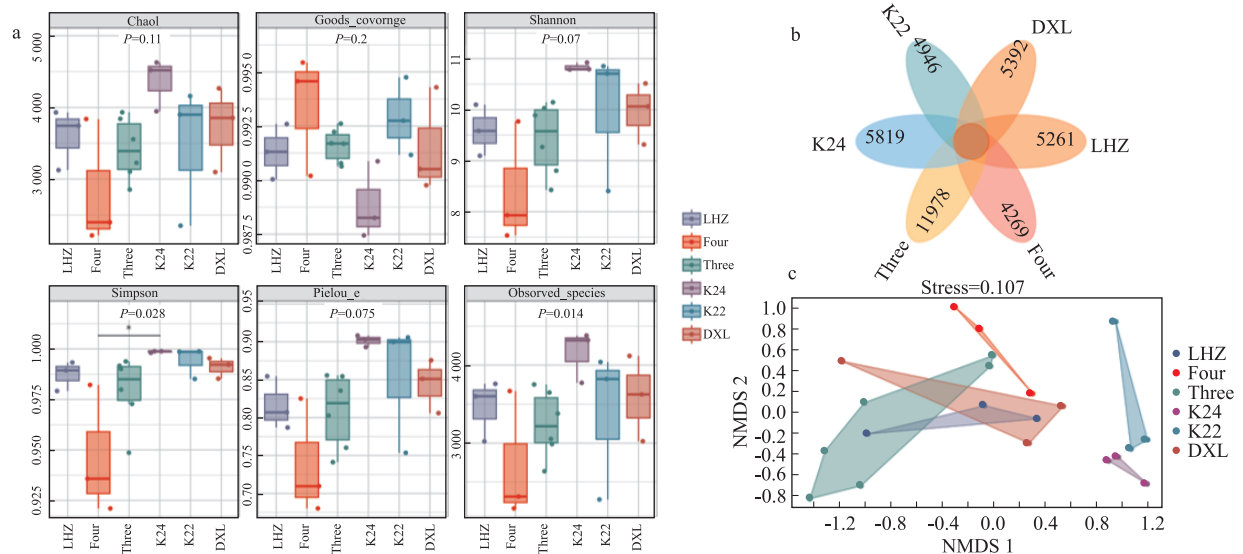
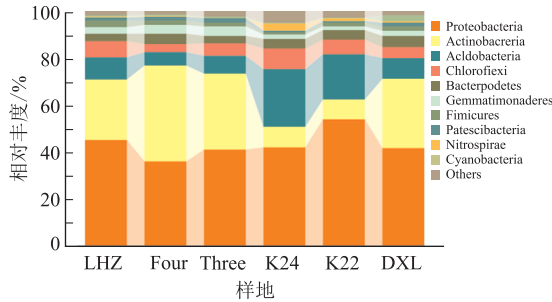


图 3 细菌群落  $\alpha$  多样性(a), OTU 数韦恩图(b)和  $\beta$  多样性分析(c)

对不同样地土壤微生物进行了  $\beta$  多样性分析以表征其结构特征。OTU 数韦恩图(图 3b)显示,所有样本共有的细菌群落的 OTU 数量为 251; Three 土壤独有的 OTU 数量最高(11 978 个),而 Four 土壤特有的 OTU 数量最低(4 269 个)。通过非计量多维标度(NMDS)分析比较了不同样地土壤细菌的组间相似性(图 3c)。分析的 Stress 值为 0.107 ( $< 0.2$ ),表明此次 NMDS 分析具有较高的可靠性。图中各样地色块较分散,说明不同海拔高度组间土

壤细菌群落差异较大,其中 DXL、LHZ 与 THREE 样地具有一定的重合度,表明三者之间细菌群落具有一定相似性。

对研究区域细菌丰度进行了统计分析(图 4)。结果表明,6 组不同海拔高度的样地土壤细菌群落中门水平上的优势种群为变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)等,这一规律在高海拔地区较为普遍<sup>[23]</sup>,但是同一优势菌门在不同样地的相对丰



注:变形菌门(Proteobacteria);放线菌门(Actinobacteria);酸杆菌门(Acidobacteria);绿弯菌门(Chloroflexi);拟杆菌门(Bacteroidetes);芽单胞菌门(Gemmatimonadetes);厚壁菌门(Firmicutes);蓝藻菌门(Patescibacteria);硝化螺旋菌门(Nitrospirae);Cyanobacteria;其他类(Others)。

图 4 细菌门水平上土壤微生物物种组成

度略有差异。

对不同样地土壤中的细菌群落进行了标志物种分析,总丰度排行前 20 的细菌门类在不同样地土壤中的相对丰度如图 5 所示。分析结果表明海拔高度

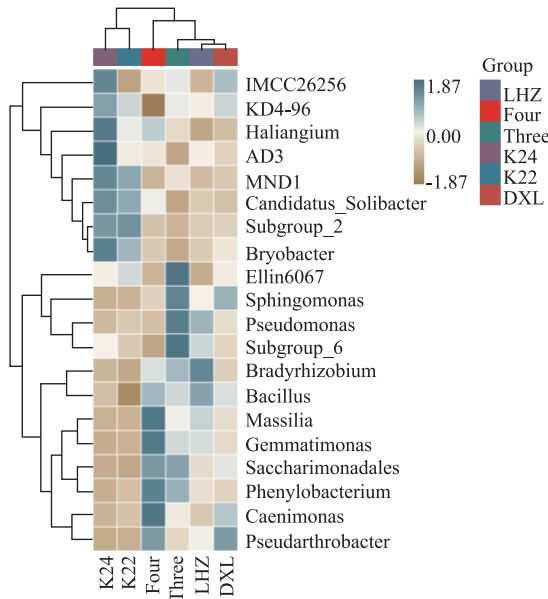


图 5 细菌门水平物种组成图

影响了土壤微生物群落在门水平上的标志物种的种类和丰度,其中,K24 样地(3 080 m)土壤中的 Haliangium、AD3、Bryobacter 的相对丰度比较高,Four 样地土壤中(1 790 m) Massilia、Gemmatimonas、Phenyllobacterium、Caenimonas 的相对丰度较高,Three 样地(1 860 m)土壤中的 Ellin6067、Sphingomonas、Pseudomonas、Subroup-6 的相对丰度较高。

不同海拔下土壤细菌的进化树图(图 6),总体而言,着色点为白色的组间无显著差异物种所占比例较高,高海拔下土壤(K24)细菌在纲水平上的主要有酸杆菌和硝化螺旋菌,在科水平有(i) Acidobacteriales、(a1) Pedosphaerales 和(y) Oligoflexales 等。3H(Three)在进化分支图科水平明显体现的细菌有(p) Corynebacteriales。其余样地细菌在科水平物种丰度较低。总体而言,研究区域内高海拔及低海拔样地的微生物群落均未出现显著的优势种群,而 3 100 m 海拔左右的微生物在各类水平均有较多的优势种群。

### 4 结论

青藏高原生态地质环境脆弱,对人类扰动及气候变化非常敏感。工程创面生态修复对高原生态恢复具有重要意义。本研究以派墨公路沿线不同海拔生态修复重构植生层土壤为研究对象,探究了不同海拔生态修复对工程创面生态修复过程中土壤养分、酶活性以及微生物群落结构的变化,所得主要结论如下:(1)生态修复重构植生层土壤养分含量随海拔升高先增加再减少,在海拔 3 100 m 处最优;(2)不同区域酶活性受到土壤养分含量的调控,其随海拔梯度的变化与土壤理化性质的变化趋势类似;(3)不同海拔重构植生层土壤的微生物群落组成有较大差异,其优势物种均为变形菌门、放线菌门和酸杆菌

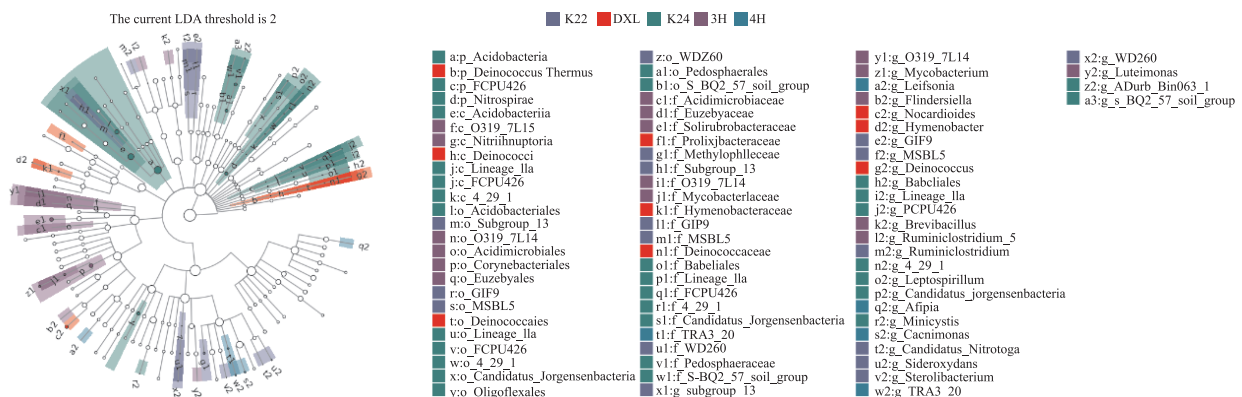


图 6 LefSe 分析

门;(4)生态修复重构植生层对派墨公路沿线各海拔梯度下的工程创面样地均有较好的修复效果,均能构建稳定的微生物群落结构。

## 参考文献

- [1] 顾卫,崔维佳,许映军,等. 工程创面生态恢复产业化问题初探[J]. 水利水电科技进展,2008,28(6):66-70.
- [2] 卜庆国,栗学铭,张姣,等. 公路建设表土资源保护与利用对工程创面生态修复的重要性——以京新高速公路 TJSTFH-1 段为例[J]. 交通建设与管理. 2014,(22):13-17.
- [3] 唐彪,宋凤鸣,黄蕾,等. 工程创面生态恢复技术的典型案例分折[J]. 中国园林. 2017,33(11):25-29.
- [4] GUAN Y, KANG R, LIU J. Evolution of the field of ecological restoration over the last three decades: a bibliometric analysis [J]. *Restoration Ecology*,2019,27(3):647-660.
- [5] 余海龙,顾卫,李哲峰. 我国工程创面生态恢复中存在的问题及研究展望[J]. 中国水土保持. 2010,(4):29-31.
- [6] LIU S, DONG Y, CHENG F, et al.. Practices and opportunities of ecosystem service studies for ecological restoration in China [J]. *Sustainability Science*,2016,11(6):935-944.
- [7] SHEN Y, LI Q, PEI X, et al.. Ecological Restoration of Engineering Slopes in China—A Review [J]. 2023, 15(6):53-54.
- [8] KORNER C. The use of 'altitude' in ecological research [J]. *Trends in Ecology & Evolution*,2007,22(11):569-574.
- [9] 张珊,田晓娟,顾振东,等. 甘肃亚高山不同海拔梯度云杉人工林土壤理化性质研究[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(06):111-118.
- [10] 褚海燕,王艳芬,时玉,等. 土壤微生物生物地理学研究现状与发展态势[J]. 中国科学院院刊,2017,32(6):585-592.
- [11] 张英,武淑霞,雷秋良,等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 土壤,2022,54(6):1175-1184.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护修复成效评估技术指南(试行)[S]. 2022.
- [13] QIN Y, YI S, REN S, et al.. Responses of typical grasslands in a semi-arid basin on the Qinghai-Tibetan Plateau to climate change and disturbances [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71(3):1421-1431.
- [14] GARCIA-GIL J C, PLAZA C, SOLER-ROVIRA P, et al.. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000,32(13):1907-1913.
- [15] 《水电站设计》编辑部. 派墨公路全线贯通 [J]. 水电站设计, 2022,38(2):96.
- [16] 陈银生,何天牛. 西藏墨脱公路地质灾害[J]. 资源环境与工程, 2009,23(S1):129-132+136.
- [17] 裴向军,黎俊豪. 西藏派墨公路不同砾石磨圆度开挖坡面土壤侵蚀特征研究[J]. 地质灾害与环境保护,2022,33(04):1-11.
- [18] 李宁. 西藏林芝市派墨公路地质灾害风险评价 [D]. 成都理工大学, 2016.
- [19] 马克平,叶万辉,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究Ⅷ. 群落组成随海拔梯度的变化[J]. 生态学报,1997,17(6):593-601.
- [20] 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.
- [21] OHSAWA T, IDE Y. Global patterns of genetic variation in plant species along vertical and horizontal gradients on mountains [J]. *Global Ecology and Biogeography*,2008,17(2):152-163.
- [22] ADETUNJI A T, LEWU F B, MULIDZI R, et al.. The biological activities of beta-glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,2017,17(3):794-807.
- [23] WAN Q. Effects of different restoration methods on soil microbial communities in alpine meadow [D]. Northwest A&F University,2022.
- [24] 万红云,陈林,庞丹波,等. 贺兰山不同海拔土壤酶活性及其化学计量特征[J]. 应用生态学报,2021,32(9):3045-3052.
- [25] 魏新,郑小锋,张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):9-14.
- [26] 刘西刚,王勇辉,焦黎. 夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(6):773-780.
- [27] 金章利,刘高鹏,周明涛,等. 喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征[J]. 生态环境学报,2019,28(04):661-668.
- [28] 李强,何国兴,文铜,等. 东祁连山高寒草甸土壤理化性质对海拔和坡向的响应及其与植被特征的关系[J]. 干旱区地理,2022,45(5):1559-1569.
- [29] 何中声,王紫薇,朱静,等. 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素[J]. 环境科学,2022,43(5):2802-2811.
- [30] 何中声,陈佳嘉,朱静,等. 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物功能多样性特征及影响因素[J]. 生态学报,2022,42(9):3504-3515.
- [31] 金裕华,汪家社,李黎光,等. 武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1955-1961.
- [32] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等. 武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J]. 生态学报,2022,42(4):1560-1570.

作者简介: 吕晶阳(1995—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,从事环境生物技术研究工作。E-mail:lvjy0825@163.com