

研究报告

云南普朗铜矿周边优势草本根际土壤养分与细菌群落结构特征

李伟^{1,2}, 李博², 湛方栋², 郭佳玮², 杨继清³, 董恒文¹, 杨继华^{*1}

1 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

2 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201

3 云南农业大学建筑工程学院, 云南 昆明 650201

李伟, 李博, 湛方栋, 郭佳玮, 杨继清, 董恒文, 杨继华. 云南普朗铜矿周边优势草本根际土壤养分与细菌群落结构特征[J]. 微生物学通报, 2024, 51(5): 1566-1582.

LI Wei, LI Bo, ZHAN Fangdong, GUO Jiawei, YANG Jiqing, DONG Hengwen, YANG Jihua. Rhizosphere soil nutrients and bacterial community structures of dominant herbs around Pulang Copper Mine in Yunnan Province[J]. Microbiology China, 2024, 51(5): 1566-1582.

摘要: 【背景】矿产开采会对矿场周边生态环境造成严重影响, 探究矿场周边土壤养分及细菌群落结构特点对矿区周边植被恢复具有重要意义。【目的】探究云南香格里拉普朗铜矿矿场周边不同小生境的土壤养分与细菌群落结构特征。【方法】以普朗铜矿周边4个小生境(亚高山草甸、山谷草地、矿山林地和亚高山林地)夏季和冬季优势草本植物的根际土壤为研究对象, 分析根际土壤的养分与细菌群落结构特征。【结果】矿山林地的草本根际土壤养分含量最高, 总体处于中等及以上水平。普朗铜矿周边4个小生境土壤细菌的优势菌门分别为酸杆菌门(*Acidobacteriota*)、放线菌门(*Actinobacteriota*)和变形菌门(*Proteobacteria*), 相对丰度占比为11.7%–60.4%, 优势菌属分别为慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、阿菲波菌属(*Afipia*)和节杆菌属(*Arthrobacter*), 相对丰度占比为6.1%–53.6%。Mantel分析结果表明, 在细菌属水平分类下, 土壤有机质对土壤细菌群落有显著影响。【结论】夏季土壤细菌群落相对丰度显著高于冬季($P<0.05$), 但夏冬两季普朗铜矿周边4个小生境之间的土壤细菌群落相对丰度和多样性无显著性差异($P>0.05$)。本研究将有助于拓展对矿山生态系统的认识, 可为矿区植被恢复和土壤污染治理提供理论依据。

关键词: 普朗铜矿; 亚高山草本; 土壤细菌群落; 养分; 多样性

资助项目: 校企合作项目(20200618); 云南省教育厅基金(2021J123)

This work was supported by the University-enterprise Cooperation Project (20200618) and the Fund Project of Education Department of Yunnan Province (2021J123).

*Corresponding author. E-mail: 15187203688@163.com

Received: 2023-09-17; Accepted: 2023-10-27; Published online: 2023-12-28

Rhizosphere soil nutrients and bacterial community structures of dominant herbs around Pulang Copper Mine in Yunnan Province

LI Wei^{1,2}, LI Bo², ZHAN Fangdong², GUO Jiawei², YANG Jiqing³, DONG Hengwen¹, YANG Jihua^{*1}

1 Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Limited Company, Kunming 650051, Yunnan, China

2 College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China

3 College of Architecture and Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China

Abstract: [Background] Mining practices has a serious impact on the eco-environment around the mine. It is of great significance to explore the characteristics of soil nutrients and bacterial community structure around the mine for vegetation restoration. [Objective] To explore the characteristics of soil nutrients and bacterial community structures in different habitats around the Pulang Copper Mine in Shangri-La, Yunnan province. [Methods] The rhizosphere soil samples of dominant herbaceous plants were collected from four habitats (subalpine meadow, valley meadow, mine woodland, and subalpine woodland) around the Pulang Copper Mine to reveal the characteristics of soil nutrients and bacterial community structures of different habitats around the mine. [Results] The soil samples from the mine woodland had the highest nutrient content, which generally reached the medium or above level. *Acidobacteriota*, *Actinobacteriota*, and *Proteobacteria* were the dominant phyla of soil bacteria in the four habitats around the mine, with relative abundance ranging from 11.7% to 60.4%. *Bradyrhizobium*, *Afipia*, and *Arthrobacter* were the dominant genera, with relative abundance ranging from 6.1% to 53.6%. Mantel test results showed that soil organic matter had significant effects on the soil bacterial community structure at the genus level. [Conclusion] The results suggested that soil bacterial abundance was higher in summer than in winter ($P < 0.05$), while there were no significant differences in soil bacterial relative abundance and diversity between the four habitats around the Pulang Copper Mine in summer and winter ($P > 0.05$). The findings contribute to the understanding of mine ecosystems and provide a theoretical basis for the ecological restoration and soil pollution treatment in mining areas.

Keywords: Pulang Copper Mine; subalpine meadow; soil bacterial community; nutrient; diversity

随着社会经济的快速发展,人类对各种矿产资源的的需求与日俱增,矿产的开采过程会直接或间接破坏地表环境,造成大面积的土壤环境破坏及污染^[1-2],不仅使土壤养分流失^[3],也对矿区附近土壤细菌群落的多样性造成影响^[4],改变了矿区周边生态系统的稳定性^[5]。普朗铜

矿作为我国西南地区主要矿场,为我国工业发展提供了丰富的矿藏资源,矿产的开采对矿区周边土壤养分及微生物群落的影响也越来越受关注。

土壤微生物在全球生态系统平衡中扮演着重要的角色^[6],细菌作为土壤微生物中数量最

大、种类最多的类群,其群落结构和功能对维持土壤生态系统稳定具有重要意义^[7]。Fuke 等^[8]研究表明,土壤微生物在调节土壤肥力方面具有极其重要的作用。刘泽勋等^[9]对山西省大同市支家地铅锌矿区尾矿不同污染区(重度污染区、中度污染区、轻度污染区和清洁区)的土壤细菌群落结构进行研究发现,与清洁区相比,重度污染区土壤养分流失严重,细菌群落多样性和相对丰度都显著降低。目前,已有学者对扰动矿区土壤微生物群落及多样性的影响展开相关研究^[10-11],但关于矿区周边土壤细菌群落结构的季节动态及其与土壤养分关系的研究却鲜有报道。

本文以普朗铜矿周边 4 个小生境(亚高山草甸、山谷草地、矿山林地和亚高山林地)为研究对象,采集夏、冬 2 个季节的优势草本植物根际土壤,分析草本植物根际土壤养分与细菌群落结构特征,以期为普朗铜矿周边生态系统的恢复提供科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品

普朗铜矿位于香格里拉市,离香格里拉县城 72 km,矿区面积 6.052 1 km²,地理坐标为 99°57'57"–99°59'57"E, 27°59'59"–28°05'59"N,海拔为 3 600–4 500 m^[12]。

选取普朗铜矿矿区周边 4 个不同小生境(亚高山草甸、山谷草地、矿山林地和亚高山林地)进行研究,其中亚高山草甸和山谷草地为香格里拉市的 2 种典型高寒草甸,亚高山林地和矿山林地是普朗铜矿周边的 2 种典型林地。于 2020 年冬季(2020 年 11 月)和 2021 年夏季(2021 年 6 月)采集土壤样品,用蛇形采样法采集,土壤采样深度为 0–20 cm,再用四分法分取,共采集 28 份土壤样品,采样完毕后除去土样中的植物根系和砾石,做好标记放入无菌采样袋中,带回实验室。采样点基本信息见表 1。

表 1 采样点基本信息表

Table 1 Basic information about the sample plots

生境类型 Habitat	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	土壤类型 Soil type	海拔 Altitude (m)	草本植物编号 Herbaceous plants ID
矿山林地 Mine woodland (M)	99°57'25"	28°04'31"	暗棕壤 Dark-brown earths	3 596	鸢尾 M-YW、接骨 M-JG <i>Iris tectorum</i> M-YW, <i>Sambucus chinensis</i> M-JG
亚高山草甸 Subalpine meadow (ZC)	99°57'58"	27°52'00"	棕壤 Brown earths	3 299	鸢尾 ZC-YW、秦艽 ZC-QJ、狼毒 ZC-LD、草甸羊茅 ZC-CD <i>Iris tectorum</i> ZC-YW, <i>Gentiana macrophylla</i> ZC-QJ, <i>Stellera chamaejasme</i> ZC-LD, <i>Festuca pratensis</i> ZC-CD
山谷草地 Valley meadow (SS)	99°40'22"	27°59'32"	棕壤 Brown earths	3 433	鸭茅 SS-YM、早熟禾 SS-ZS、三叶草 SS-ZS、黄花木 SS-HH <i>Dactylis glomerata</i> SS-YM, <i>Poa annua</i> SS-ZS, <i>Trifolium subterraneum</i> SS-ZS, <i>Piptanthus concolor</i> SS-HH
亚高山林地 Subalpine woodland (F)	99°58'90"	28°01'08"	暗棕壤 Dark-brown earths	3 427	秦艽 F-QJ、鸢尾 F-YW、接骨草 F-JG、小报春 F-BC <i>Gentiana macrophylla</i> F-QJ, <i>Iris tectorum</i> F-YW, <i>Sambucus chinensis</i> F-JG, <i>Primula forbesii</i> F-BC

1.1.2 主要试剂和仪器

AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒, 爱思进生物技术(杭州)有限公司; E.Z.N.A.[®] Soil DNA Kit, Omega 公司。

pH 计, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; 紫外可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; 恒温摇床, 上海天呈实验仪器制造有限公司; 超低温冰箱, 澳柯玛股份有限公司; 马弗炉, 天津市泰斯特仪器有限公司; 恒温培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 火焰光度计, 上海仪电分析仪器有限公司; PCR 仪, Promega 公司。

1.2 土壤理化性质的测定和细菌群落的测定

1.2.1 土壤理化性质的测定^[13]

土壤 pH 值采用电位法测定, 水土比为 2.5:1; 土壤有机质含量采用 K_2CrO_7 容量法(氧化-外加热法)测定; 土壤水解氮含量采用碱解-扩散法测定; 土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定; 土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 土壤有效磷含量采用 $NaHCO_3$ 浸提法测定; 土壤全钾含量采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定; 土壤速效钾含量使用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.2.2 细菌群落的测定

细菌群落多样性由北京果壳生物科技有限公司采用 PCR 扩增高通量测序的方法测定分析。引物设计为 341F (5'-CCTAYGGGRBGCAS CAG-3') 和 806R (5'-GGACTACNNGGGTATCT AAT-3'); 利用 E.Z.N.A.[®] Soil DNA Kit 提取基因组 DNA, 利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA, 按指定测序区域 V3-V4 合成带有 barcode 的特异引物。PCR 反应体系: 5×FastPfu buffer (4 μL), dNTPs (2.5 mmol/L) 2 μL, 上游引物 (5 μmol/L) 0.8 μL, 下游引物 (5 μmol/L) 0.8 μL, FastPfu Polymerase 0.4 μL, BSA 0.2 μL, 模板 DNA 10 ng, ddH₂O 补足 20 μL。PCR 反应条件: 95 °C 3 min; 95 °C 30 s, 55 °C 30 s, 72 °C 45 s,

32 个循环; 72 °C 10 min; 10 °C 至结束。PCR 产物用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测。

1.3 数据分析

采用 SPSS25.0 和 Excel 软件进行数据统计分析和单因素方差分析(ANOVA)。使用 QIIME 中的 OTU 表计算操作分类单元中 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数及 Sobs 指数, 采用 Origin2021 和 Omicstudio 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

夏季普朗铜矿周边矿山林地和亚高山林地有机质分别为 188.5 g/kg 和 176.0 g/kg, 显著高于亚高山草甸和山谷草地; 矿山林地全氮、全磷及速效磷含量分别为 6.3 g/kg、1.35 g/kg 和 20.1 mg/kg, 均显著高于其他 3 个生境; 山谷草地的碱解氮含量最低, 为 87.5 mg/kg, 显著低于其他 3 个生境, 此外, 4 个不同生境间全钾和速效钾含量并无显著性差异。

冬季土壤有机质呈现出与夏季相同的趋势, 矿山林地和亚高山林地含量显著高于亚高山草甸和山谷草地; 矿山林地土壤全氮、全磷、碱解氮、速效钾和速效磷分别为 6.8 g/kg、1.0 g/kg、651.8 mg/kg、47.6 mg/kg 和 21.1 g/kg, 均高于其他 3 个生境(表 2)。与夏季趋势相同, 全钾含量在 4 个生境间也无显著性差异。

与夏季相比, 冬季矿山林地土壤全磷、亚高山草甸有机质、亚高山林地全钾、山谷草地有机质、全氮含量显著低于夏季($P<0.05$), 冬季土壤速效钾含量在 4 个生境中均呈现出显著低于夏季的趋势($P<0.05$), 而速效磷含量在夏季与冬季间无显著性差异($P>0.05$) (表 3)。

2.2 土壤养分分级评价

采用全国第二次土壤普查暂行技术规程^[14]对普朗铜矿周边不同生境的土壤养分进行评价,

表 2 研究区植物根际土壤理化性质

Table 2 Soil nutrient contents in investigation regions

季节	生境类型	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效钾	速效磷
Season	Habitat	SOM (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	AN (mg/kg)	AK (mg/kg)	AP (mg/kg)
夏季	M	188.5±1.8a	6.3±0.1a	1.35±0.9a	15.4±0.9a	217±9.9a	177.4±5.3a	20.1±1.0a
	ZC	105.4±26.9b	4.0±1.3b	0.7±0.1b	14.7±3.4a	155.8±28.8b	196.8±44.9a	7.8±1.4c
	SS	76.28±38.8c	2.5±0.4c	0.9±0.1b	13.6±3.7a	87.5±9.0c	201.0±23.9a	7.0±2.7c
	F	176.0±5.8a	5.2±0.6b	0.6±0.2b	15.9±1.1a	222.2±41.4a	247.9±54.5a	13.3±2.0b
冬季	M	143.6±28.2a	6.8±1.3a	1.0±0.2a	12.3±1.1a	651.8±201.7a	47.6±14.6a	21.1±10.9a
	ZC	32.3±4.1b	2.4±1.1b	0.8±0.1a	12.8±1.0a	248.4±28.9b	12.5±3.8c	9.0±2.9b
	SS	22.4±10.6b	1.6±0.6b	0.7±0.2a	13.2±0.5a	154.8±76.8b	25.0±12.4b	8.9±4.7b
	F	126.4±60.3a	5.0±1.0c	1.0±0.1a	11.2±2.3a	487.8±53.0c	30.5±5.7b	15.8±6.4a

同列数据后不同小写字母表示调查区间差异显著($P<0.05$). M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences in the survey interval ($P<0.05$). M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

表 3 研究区植物根际夏、冬两季土壤理化性质比较

Table 3 Comparison of soil nutrient contents of plant rhizosphere in investigation regions under summer and winter

生境类型	季节	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效钾	速效磷
Habitat	Season	SOM (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	AN (mg/kg)	AK (mg/kg)	AP (mg/kg)
M	夏季 Summer	188.5±1.8a	6.3±0.1a	1.35±0.9a	15.4±0.9a	217±9.9b	177.4±5.3a	20.1±1.0a
	冬季 Winter	143.6±28.2a	6.8±1.3a	1.0±0.2b	12.3±1.1a	651.8±201.7a	47.6±14.6b	21.1±10.9a
ZC	夏季 Summer	105.4±26.9a	4.0±1.3a	0.7±0.1a	14.7±3.4a	155.8±28.8b	196.8±44.9a	7.8±1.4a
	冬季 Winter	32.3±4.1b	2.4±1.1a	0.8±0.1a	12.8±1.0a	248.4±28.9a	12.5±3.8b	9.0±2.9a
SS	夏季 Summer	76.28±38.8a	2.5±0.4a	0.9±0.1a	13.6±3.7a	87.5±9.0a	201.0±23.9a	7.0±2.7a
	冬季 Winter	22.4±10.6b	1.6±0.6b	0.7±0.2a	13.2±0.5a	154.8±76.8a	25.0±12.4b	8.9±4.7a
F	夏季 Summer	176.0±5.8a	5.2±0.6a	0.6±0.2b	15.9±1.1a	222.2±41.4b	247.9±54.5a	13.3±2.0a
	冬季 Winter	126.4±60.3a	5.0±1.0a	1.0±0.1a	11.2±2.3b	487.8±53.0a	30.5±5.7b	15.8±6.4a

同列数据后不同小写字母表示调查区间差异显著($P<0.05$). M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences in the survey interval ($P<0.05$). M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

六级指标中将三级定为中等, I–VI级分别代表含量很丰富、丰富、中等、缺乏、很缺乏和极缺乏。夏季矿山林地土壤除全钾为中等外, 其余指标均达到丰富及以上水平。亚高山草甸土壤有机质、全氮、碱解氮含量均值分别为 105.4 g/kg、4.0 g/kg 和 155.8 mg/kg, 处于很丰富水平。山谷草地除有机质、全氮、全磷和速效钾均达到丰富及以上水平, 全钾、碱解氮

和速效磷含量均值分别为 13.6 g/kg、87.5 mg/kg 和 7.0 mg/kg, 处于缺乏状态。夏季期间呈现出矿山林地与亚高山林地土壤养分分级高于山谷草地与亚高山草甸的趋势(表 4)。

冬季山谷草地土壤全氮和碱解氮含量均值分别为 1.6 g/kg 和 154.8 mg/kg, 处于丰富及以上水平, 其余指标均处于中等及以下水平。亚高山草甸土壤有机质、全氮、全磷和碱解氮含

量均处于丰富及以上状态,速效钾、速效磷及全钾低于中等水平。矿山林地与亚高山林地有相同趋势。与夏季期间分级相似,冬季期间矿山林地与亚高山林地土壤养分分级也高于山谷草地与亚高山草甸(表 4)。

四个不同生境中,夏季土壤养分分级整体高于冬季,其中山谷草地夏季土壤有机质营养分级高于冬季,夏季土壤有机质营养分级为一级,冬季为三级,全氮、全磷和速效钾也有相同的趋势,原因可能是夏季气温更高,雨水更丰沛,植物生长快,从而加速了植物根际土壤养分的积累。四个生境中土壤养分最高的是矿山林地与亚高山林地,其原因可能是矿山林地所处的普朗铜矿为地下开采模式,对矿区表层土干扰较少,而亚高山林地处于林下山地,腐殖质较多,受外界干扰少。

2.3 土壤样品细菌 α 多样性

夏季矿山林地 ACE 指数和 Chao1 指数最高,山谷草地最低,说明矿山林地土壤细菌群落相对丰度最高,山谷草地土壤细菌群落相对丰度最低。亚高山林地 Shannon 指数最高,表明亚高山林地土壤细菌群落多样性最高。不同

生境间土壤细菌群落相对丰度及多样性均无显著性差异($P>0.05$)。

冬季亚高山林地 ACE 指数和 Chao1 指数最高,表明冬季亚高山林地土壤细菌群落相对丰度最高。亚高山草甸 Shannon 指数最高,表明亚高山草甸土壤细菌多样性高于山谷草地、矿山林地及亚高山林地。与夏季趋势相同,冬季不同生境土壤间的 Shannon 指数、ACE 指数和 Chao1 指数均无显著差异($P>0.05$)。

与夏季相比,冬季土壤 Chao1 指数和 ACE 指数均显著低于夏季($P<0.05$),表明夏季土壤细菌群落相对丰度显著高于冬季,但同一生境,夏季与冬季土壤 Shannon 指数无显著差异($P>0.05$) (表 5)。

2.4 土壤细菌 β 多样性分析

夏季土壤样品通过高通量测序及分析得到可分类 OTU 共 8 835 个。4 个生境特有的 OTU 数目及其所占比例分别为矿山林地 691 个、7.8%,亚高山草甸 2 085 个、23.6%,山谷草地 935 个、10.6%,亚高山林地 865 个、9.8%; 4 个生境所共有的 OTU 数目为 1 695 个,占总 OTU 数目的比例为 19.2% (图 1A)。

表 4 研究区土壤养分分级评价结果

Table 4 Classification of soil nutrient contents in investigation regions

季节 Season	生境类型 Habitat	有机质 SOM (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)	全钾 TK (g/kg)	碱解氮 AN (mg/kg)	速效钾 AK (mg/kg)	速效磷 AP (mg/kg)
夏季 Summer	M	I	I	I	III	I	II	II
	ZC	I	I	III	IV	I	II	IV
	SS	I	I	II	IV	IV	I	IV
	F	I	I	III	III	I	I	III
冬季 Winter	M	I	I	II	IV	I	V	II
	ZC	II	I	II	IV	I	VI	IV
	SS	III	II	III	IV	I	VI	IV
	F	I	I	II	IV	I	V	III

同列数据后不同小写字母表示调查区间差异显著($P<0.05$)。I至VI: 一至六级; M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences in the survey interval ($P<0.05$). I–VI: Level 1 to level 6; M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

表 5 夏季、冬季土壤细菌多样性指数比较

Table 5 Comparison of soil alpha diversity index under summer and winter

生境类型 Habitat	季节 Season	ACE index	Chao1 index	Shannon index
SS	夏季 Summer	2 592.95±224.76a	2 553.50±228.4a	5.98±0.15a
	冬季 Winter	1 248.10±66.21b	1 260.98±65.52b	7.43±0.40a
F	夏季 Summer	2 645.85±145.52a	2 580.35±135.62a	6.22±0.13a
	冬季 Winter	1 399.53±48.13b	1 402.35±47.64b	8.08±0.18a
M	夏季 Summer	3 208.95±360.85a	3 119.05±337.85a	6.21±0.29a
	冬季 Winter	1 346.30±54.90ab	1 368.30±70.50b	7.86±0.16a
ZC	夏季 Summer	3 003.85±113.94a	2 864.48±110.52a	5.86±0.17a
	冬季 Winter	1 335.10±33.18b	1 362.15±35.77b	8.37±0.12a

同列数据后不同小写字母表示调查区间差异显著($P<0.05$)。M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences in the survey interval ($P<0.05$). M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

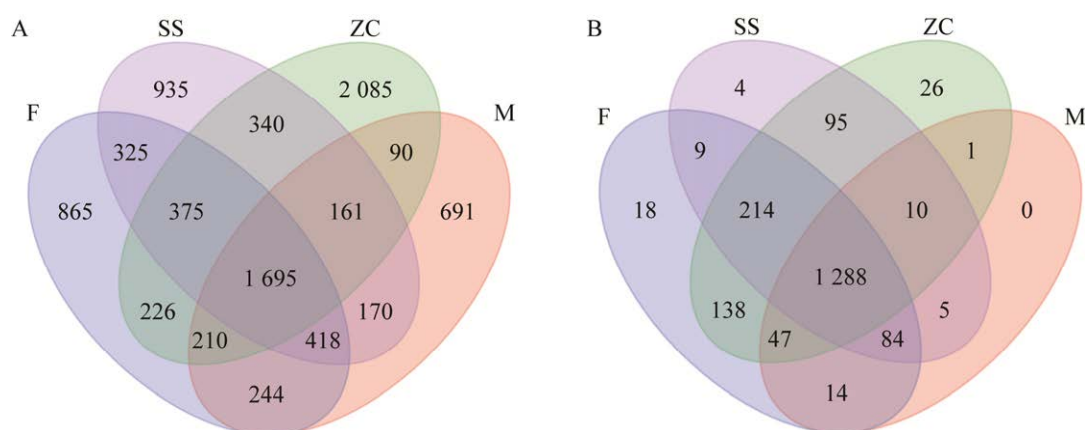


图 1 夏季(A)和冬季(B)草本植物根际土壤细菌 OTU Venn 图 M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Figure 1 Venn diagram of bacterial operational taxonomic units in rhizospheric soil of herbaceous plants in summer (A) and winter (B). M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

冬季土壤样品通过高通量测序及分析得到可分类 OTU 共 1 953 个。与夏季不同, 冬季 4 个生境所含 OTU 相似度极高, 4 个生境所共有的 OTU 数目为 1 288 个, 占总 OTU 数的 65.9%。4 个生境特有的 OTU 数目较少, 在亚高山草甸、山谷草地及亚高山林地中特有的 OTU 数目分别为 26、4 和 18 个, 矿山林地则无特有 OTU (图 1B)。

为进一步阐明群落组成的相似性, 根据所有样品的物种注释结果和夏季、冬季草本植物根际土壤细菌 OTU 的相对丰度信息, 在属水平分类单元进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。结果表明, 夏季根际土壤样品中属水平分类下细菌群落的主成分 1 (PC1)和主成分 2 (PC2)的样品差异性贡献率分别达到

31.3%和 20.4% (图 2A)。夏季 4 个小生境优势草本植物根际土壤细菌群落相对集中, 亚高山林地与矿山林地细菌群落相似。冬季根际土壤样品中属水平分类下细菌群落的主成分 1 (PC1) 和主成分 2 (PC2) 的样品差异性贡献率分别达到 21.2%和 15.8% (图 2B), 其中亚高山林地、矿山林地和山谷草地细菌群落组成相似。

2.5 土壤细菌群落结构组成

土壤样品共检测出 41 个门 134 个纲 321 个目 525 个科 1 016 个属 2 357 个种。夏季期间, 从门水平上, 细菌主要分布在放线菌门 (*Actinobacteriota*)、变形菌门 (*Proteobacteria*)、酸杆菌门 (*Acidobacteriota*)、绿弯菌门 (*Chloroflexi*) 和厚壁菌门 (*Firmicutes*), 且 4 个不同生境中占比最高的 3 个菌门分别为放线菌门 (*Actinobacteriota*)、变形菌门 (*Proteobacteria*) 和酸杆菌门 (*Acidobacteriota*), 3 个优势菌在亚高山林地相对丰度分别为 32.6%、26.5%和 15.0%, 在矿山

林地相对丰度分别为 25.1%、28.9%和 14.8%, 在山谷草地相对丰度分别为 31.8%、23.9%和 14.2%, 在亚高山草甸相对丰度分别为 26.5%、23.2%和 13.5% (图 3A)。

冬季期间, 从门水平上, 细菌主要分布在酸杆菌门 (*Acidobacteriota*)、放线菌门 (*Actinobacteriota*)、变形菌门 (*Proteobacteria*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*) 和芽单胞菌门 (*Gemmatimonadetes*), 与夏季一样, 4 个地区中相对丰度最高的 3 个菌门分别是酸杆菌门 (*Acidobacteriota*)、放线菌门 (*Actinobacteriota*) 和变形菌门 (*Proteobacteria*), 3 个优势菌在亚高山林地相对丰度分别为 41.2%、26.2%和 19.5%, 在矿山林地相对丰度分别为 40.4%、19.1%和 25.0%, 在山谷草地相对丰度分别为 31.1%、38.7%和 13.9%, 在亚高山草甸相对丰度分别为 14.0%、60.4%和 11.7% (图 3B)。说明普朗铜矿周边地区不同季节、不同生境间主要菌门无显著性差异。

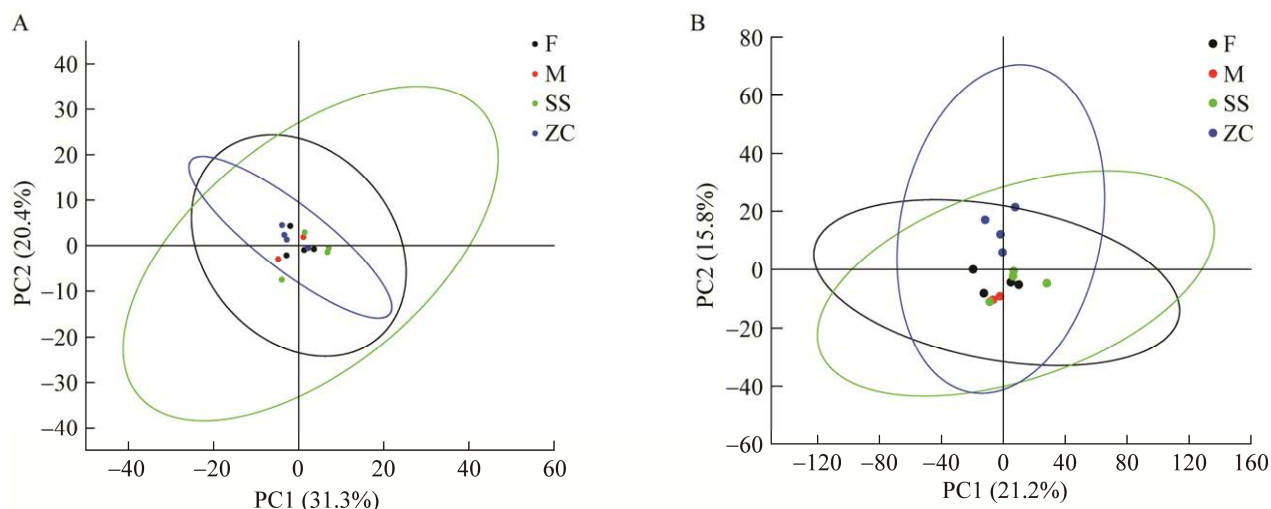


图 2 夏季(A)和冬季(B)草本植物根际土壤细菌 PCA 图 M: 矿山林地; ZC: 亚高山草甸; SS: 山谷草地; F: 亚高山林地

Figure 2 Principal component analysis diagram of soil bacterial communities in rhizospheric soil of herbaceous plants in summer (A) and winter (B). M: Mine woodland; ZC: Subalpine meadow; SS: Valley meadow; F: Subalpine woodland.

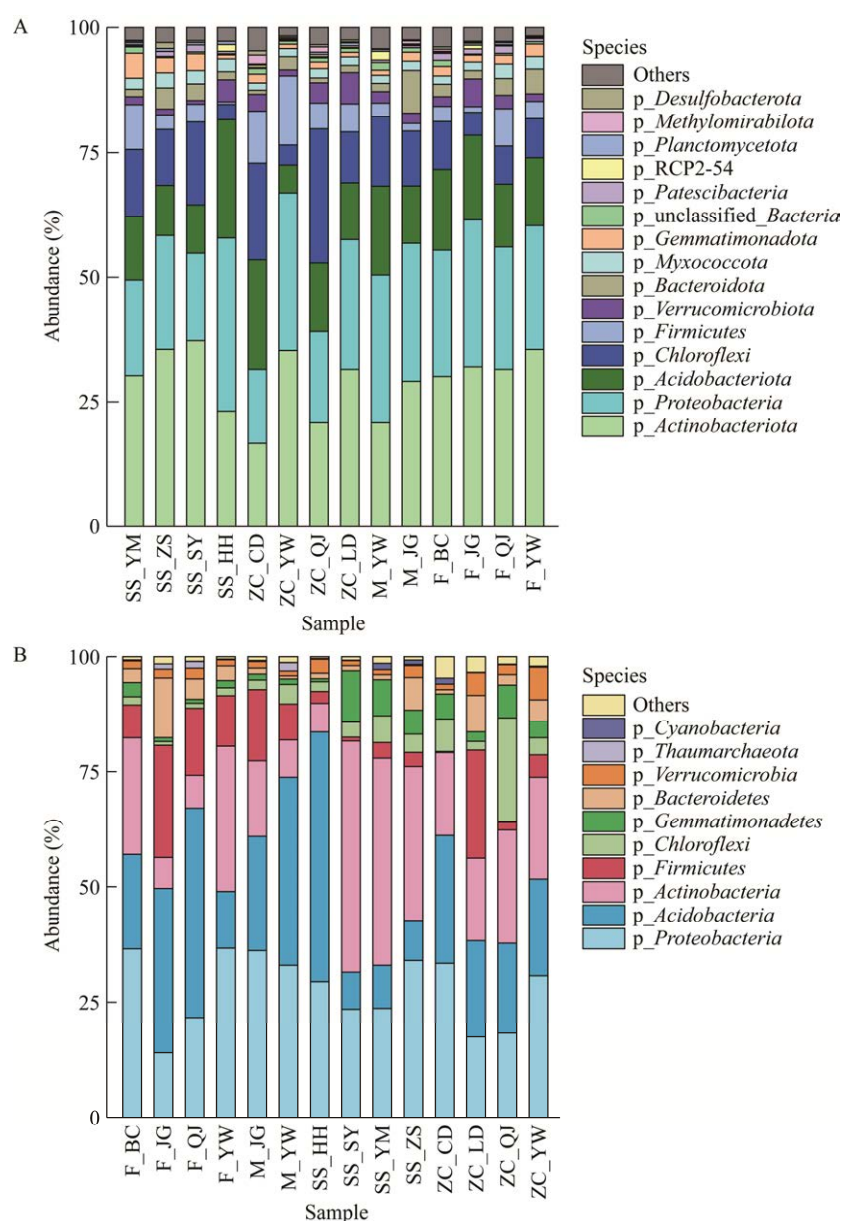


图3 夏季(A)和冬季(B)样品细菌群落在门水平上的组成

Figure 3 Bacterial communities composition on phylum level in summer (A) and winter (B).

夏季属水平上, 4 个生境中排名前三的属为慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、热酸菌属(*Acidothermus*)和芽胞杆菌属(*Bacillus*)。山谷草地和亚高山林地相对丰度最高的属均为慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*), 占比分别为 6.1%和 7.3%; 矿山林地相对丰度最高的属为热酸菌属(*Acidothermus*), 占比为 7.3%; 亚高山草甸相对

丰度最高的属为芽胞杆菌属(*Bacillus*), 占比为 6.5% (图 4A)。冬季属水平上, 细菌主要分布在阿菲波菌属(*Afipia*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、热酸菌属(*Acidothermus*)、乳杆菌属(*Lactobacillus*)和芽单胞菌属(*Gemmatimonas*), 其中亚高山林地与矿山林地相对丰度最高的属均为阿菲波菌属(*Afipia*), 占比分别为 19.5%和 25.0%; 而山谷

草地与亚高山草甸相对丰度最高的属则为节杆菌属(*Arthrobacter*), 占比分别为 35.5%和 53.6% (图 4B)。

2.6 土壤细菌优势菌群与环境因子相关分析

夏季环境因子与细菌属水平分类优势菌群的 Mantel 分析结果(图 5)表明, 慢生根瘤菌属

(*Bradyrhizobium*)、热酸菌属(*Acidothermus*)和芽胞杆菌属(*Bacillus*)均与土壤有机质含量呈显著正相关($P<0.05$), 慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、热酸菌属(*Acidothermus*)与速效钾、总磷含量呈负相关。可见, 土壤有机质含量对土壤优势细菌属影响最大。

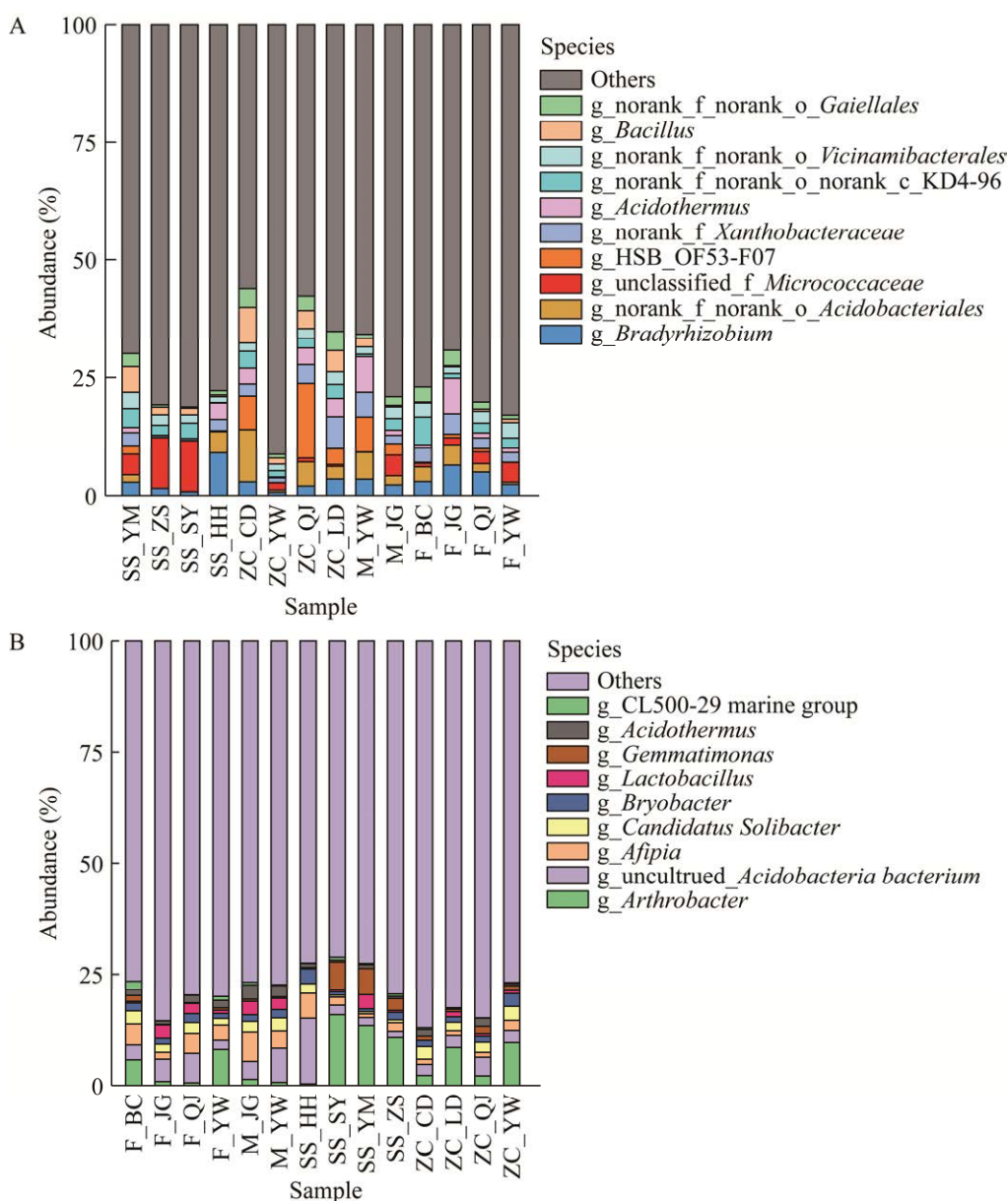


图 4 夏季(A)和冬季(B)样品细菌群落在属水平上的组成

Figure 4 Bacterial communities composition on genus level in summer (A) and winter (B).

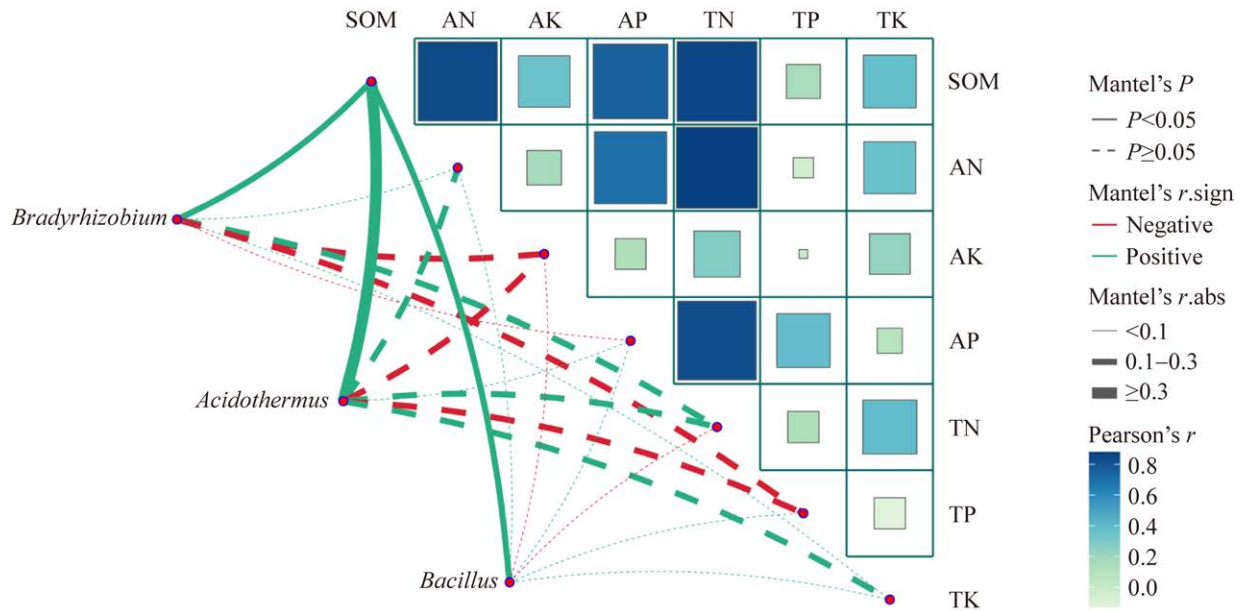


图5 夏季细菌群落优势属与环境因子 Mantel 分析

Figure 5 Mantel test under dominant genus of bacterial communities and environmental factors in summer.

冬季亚高山林地与矿山林地相对丰度最高的属均为阿菲波菌属(*Afipia*)，山谷草地与亚高山草甸相对丰度最高的属则为节杆菌属(*Arthrobacter*)，可见，冬季阿菲波菌属(*Afipia*)和节杆菌属(*Arthrobacter*)为普朗铜矿周边4个小生境中土壤的优势菌属。环境因子与细菌属水平分类优势菌群的 Mantel 分析结果(图6)表明，阿菲波菌属(*Afipia*)与土壤碱解氮含量呈显著正相关($P < 0.05$)，与有机质、速效钾、全氮和全磷含量呈正相关，与全钾含量呈负相关；节杆菌属(*Arthrobacter*)与全磷含量呈正相关。

3 讨论与结论

3.1 不同类型生境土壤养分的差异

土壤环境是陆地植物赖以生存的物质基础，是生态系统中物质和能量交换的重要场所^[15]。土壤微生物是土壤肥力和土壤质量的重要参考依据^[16]，微生物参与土壤碳、氮和磷循环等生态过程，是生态系统的重要组成部分^[17]，且微生物

对土壤肥力的提高及生态系统的稳定发挥了重要作用^[18]。土壤肥力与细菌群落结构显著相关，不同肥力的土壤其细菌群落结构也有所不同^[19]，改变土壤理化性状，增加土壤细菌群落多样性，有利于提高土壤肥力。李梦杰^[20]对甘肃白银铜矿的研究结果表明，矿区不同位置的重金属含量有一定差异。黄健等^[21]对安徽铜陵狮子山矿区4种不同土地利用类型(菜园、尾矿库、堆矿区和选矿区)的研究发现，矿区周边4种土地利用类型均受到采矿活动干扰，呈现出重金属超出背景值的现象。宓展盛^[22]对白云鄂博矿区周边土壤进行研究，结果表明，矿区周边所有采样点位重金属含量均超过背景值，采矿活动加剧了土壤的重金属污染，使得矿区周边土壤养分含量降低。余梓鹏等^[23]研究发现，矿区周边农田土壤遭受多种金属复合污染，且对农作物的生长和安全产生巨大的威胁。本研究结果表明，夏季与冬季相比，土壤养分分级整体更高。四个生境类型中土壤养分最高的是矿山林地，

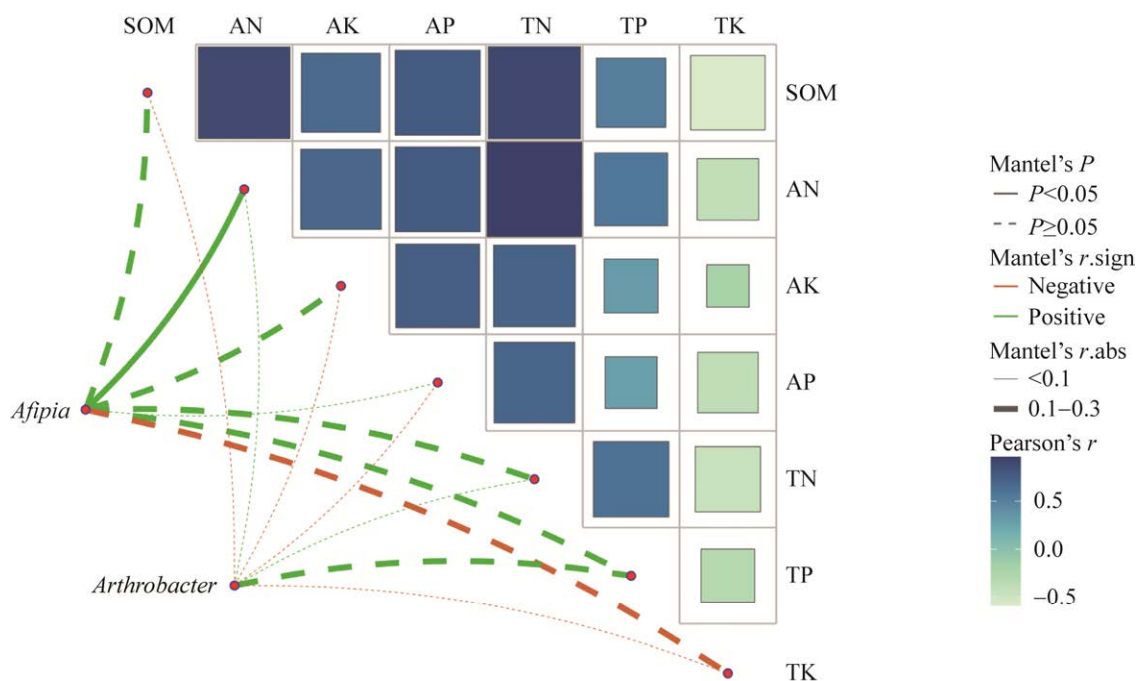


图 6 冬季细菌群落优势属与环境因子 Mantel 分析

Figure 6 Mantel test under dominant genus of bacterial communities and environmental factors in winter.

其次是亚高山林地，其原因可能是矿区所处的普朗铜矿为地下开采模式，对矿区表层土干扰较少，而亚高山林地处于林下山地，腐殖质较多，受外界干扰少。亚高山草甸和山谷草地的土壤养分分级较低，原因可能是山谷草地属于公路修建后人为修复地带，植被尚未覆盖完整。

3.2 季节动态对土壤细菌群落的影响

季节差异通过温度和水分等环境因子的差异影响微生物活性，也能通过改变输入土壤养分的数量和成分影响微生物群落的多样性^[24]。季节变化可反映水热条件的年内动态变化及其对植被物候、土壤性质的改变，不同学者对矿山林地土壤细菌群落结构特征做了一系列研究^[25-26]，其结果显示矿山林地土壤细菌群落的结构、多样性、相对丰度和功能在季节间存在显著差异，且地区规律不尽相同。本研究结果显示，土壤全钾、有机质和速效钾等土壤养分含量夏季(6月)高于冬季(11月)，同时，夏季

土壤细菌群落相对丰度显著高于冬季，这与卢虎等^[27]研究结果一致。

Grishkan 等^[28]研究表明，有机质含量对土壤微生物群落种类的影响高于水分和温度。秋冬季节大量枯落物的富集为土壤微生物提供了丰富的碳源，为其生长提供所需能量^[29]，而夏季土壤养分主要被植物吸收利用，且食微生物动物对特定土壤细菌的取食增加^[30]，这可能是细菌物种多样性在冬季更高的原因之一。本研究结果显示冬季土壤细菌群落多样性高于夏季，原因可能是不同生境的优势草本不同，冬季地表掉落物不同，不同的优势草本决定了地表凋落物的组成和土壤碳氮比，从而影响了微生物群落结构。值得注意的是，土壤微生物群落也随季节变化而波动，近年来在不同时间尺度(小时^[31]、月和季^[32]、年内和年际^[33])下土壤细菌群落结构和功能对环境因子响应规律的研究表明，季节变化主要通过气温与降水等环境

因子的周期改变影响土壤理化性质和生化反应进程,从而导致土壤细菌群落的分布和结构发生变化^[34-36],但各区域间响应规律存在差异。可见,土壤微生物分布受植被、环境因子等因素综合影响,需要对微生物群落开展长期观测以掌握其季节动态和周期规律。

3.3 土壤理化性质对细菌群落的影响

土壤是地球生命之本,是历史自然体,是人类依存的关键所在。然而,由自然因素和人为条件引起的土壤环境质量变化,冲击土壤圈与大气圈、水圈、生物圈和岩石圈之间的动态平衡,威胁土壤的生态功能和人类社会的可持续发展^[37]。其中铜矿的开采过程中产生的废水^[38]和固体废物^[39]等对周边生态环境造成极大影响,矿区周边农田 Cd、Cu 和 Cr 等重金属污染严重,其含量超过农用地风险筛选值,使土壤质量下降^[40],严重威胁到人类健康^[41]。土壤微生物是维持土壤质量的重要因素^[42],土壤的健康情况可以通过土壤微生物群落状态和功能变化来表明^[43]。土壤养分改变会影响到植物的生长和发育,而植物的生长又可以改变土壤养分^[44-45]。

有研究表明,采样时间对微生物的群落组成影响较小^[46-47],然而 Habekost 等^[48]和 Lan 等^[49]的结果表明,土壤微生物的群落组成存在明显的季节变化。本研究结果显示,夏季普朗铜矿周边不同生境(亚高山草甸、山谷草地、矿山林地和亚高山林地)根际土壤细菌群落的 ACE 指数、Chao1 指数及 Shannon 指数并无显著差异($P>0.05$),冬季期间也有相同的趋势。夏季根际土壤细菌群落的 ACE 指数、Chao1 指数高于冬季,夏季根际土壤细菌群落物种的相对丰度比冬季高。

黄健等^[21]研究发现,在矿区周边不同土地利用类型中,土壤微生物群落结构多样性存在区域性变化,其变化均不同, *Proteobacteria*、

Firmicutes 和 *Bacteroidetes* 对重金属污染有耐受能力,在污染较强的区域仍有较大的相对丰度。贺龙等^[50]发现矿区复垦土壤的优势菌群多为 *Nitrospira*、*Sphingomonas*、*Arthrobacter*、*Brachybacterium*、*Rhizobium* 及 *Mesorhizobium* 等或参与氮循环和降解多环芳烃类有机物等有利于污染土壤生态修复和土壤肥力恢复的功能细菌属。Jia 等^[51]对山西运城铜尾矿土壤细菌多样性及不同垦殖年限土壤理化性质的研究表明,随着逐年垦殖,微生物多样性升高。本研究表明,普朗铜矿周边 4 个不同生境(亚高山草甸、山谷草地、矿山林地和亚高山林地)根际土壤中细菌群落相对丰度最高的 3 个菌门均为 酸杆菌门 (*Acidobacteriota*)、放线菌门 (*Actinobacteriota*)和变形菌门(*Proteobacteria*)。酸杆菌门(*Acidobacteriota*)是土壤中一类重要的细菌类群,其数量与变形菌门(*Proteobacteria*)相当,在土壤物质循环和生态环境构建过程中起着极为重要的作用^[52]。放线菌门(*Actinobacteriota*)也是土壤中主要的微生物菌群之一,旱区土壤接种放线菌不仅可显著增强红豆草根系形态发育及抗旱性生理特性,还能增加根际土壤微生物数量和土壤酶活性,提高土壤养分转化及肥力水平,具有促进植被恢复与土壤改良的双重效果^[53]。

相关研究发现,土壤有机质含量与土壤微生物多样性呈正相关^[54],在本次调查研究中,速效磷、全氮和有机质对细菌微生物群落结构的影响程度较高,这与史策等^[55]的研究结果一致,普朗铜矿周边优势草本根际土壤样品中优势菌属慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、热酸菌属(*Acidothermus*)和芽胞杆菌属(*Bacillus*)均与土壤有机质含量呈显著正相关($P<0.05$),阿菲波菌属(*Afipia*)与土壤碱解氮含量呈显著正相关($P<0.05$)。因此,应保护好普朗铜矿周边地区草

甸和林地中现有的草本和树种, 维持土壤养分和土壤微生物的稳定与平衡, 以促进高寒草甸生态系统和矿区生态系统的恢复与良性发展。

REFERENCES

- [1] HADDAWAY NR, COOK SJ, LESSER P, MACURA B, NILSSON AE, TAYLOR JJ, RAITO K. Evidence of the impacts of metal mining and the effectiveness of mining mitigation measures on social-ecological systems in Arctic and boreal regions: a systematic map protocol[J]. *Environmental Evidence*, 2019, 8(1): 1-11.
- [2] 李玲, 宋莹, 陈胜华, 胡振琪. 矿区土壤环境修复[J]. *中国水土保持*, 2007(4): 22-24.
- LI L, SONG Y, CHENG SH, HU ZQ. Soil environment rehabilitation of mining area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(4): 22-24 (in Chinese).
- [3] 兰利花, 田毅. 土壤地带性分布下的典型矿区土壤修复模式[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(1): 40-49.
- LAN LH, TIAN Y. Soil remediation model of regional mining area based on zonal distribution of soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(1): 40-49 (in Chinese).
- [4] 陈晨, 陈湮, 李彦澄, 唐欣, 王乐乐, 赵若男. 贵州典型煤矸石堆场微生物群落结构及功能特征[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(12): 5300-5319.
- CHEN C, CHEN L, LI YC, TANG X, WANG LL, ZHAO RN. Structural and functional characteristics of microbial communities of typical coal gangue dumps in Guizhou Province[J]. *Microbiology China*, 2023, 50(12): 5300-5319 (in Chinese).
- [5] ZHANG M, WANG JM, LI SJ. Tempo-spatial changes and main anthropogenic influence factors of vegetation fractional coverage in a large-scale opencast coal mine area from 1992 to 2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232:940-952.
- [6] van der HEIJDEN MGA, BARDGETT RD, van STRAALLEN NM. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(3): 296-310.
- [7] 傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 109-115.
- FU LS. A review and perspective on soil biodiversity research[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 109-115 (in Chinese).
- [8] FUKU P, T MOHAN MANU, KUMAR M, SAWARKAR AD, PANDEY A, SINGH L. Role of microbial diversity to influence the growth and environmental remediation capacity of bamboo: a review[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 167: 113567.
- [9] 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲. 大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征[J]. *环境科学*, 2023, 44(7): 4191-4200.
- LIU ZX, ZHUANG JY, LIU C, ZHENG K, CHEN L. Analysis of soil bacterial community structure and ecological function characteristics in different pollution levels of lead-zinc tailings in Datong[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(7): 4191-4200 (in Chinese).
- [10] 英高飞, 张爽, 王伟东, 晏磊. 甘肃白银铜矿矿坑土壤细菌和古菌的多样性及坡度分布特征[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(1): 35-47.
- YING GF, ZHANG S, WANG WD, YAN L. Diversity and slope distribution of bacteria and archaea in the soil of Baiyin Copper Mine pit from Gansu Province[J]. *Microbiology China*, 2023, 50(1): 35-47 (in Chinese).
- [11] 湛方栋, 何永美, 李元, 祖艳群. 云南会泽废弃铅锌矿区和非矿区三种野生植物根际微生物研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 337-341.
- ZHAN FD, HE YM, LI Y, ZU YQ. The study on rhizosphere microorganisms of 3 wild plants in abandoned lead-zinc mine and non-mining area in Huize, Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2):337-341 (in Chinese).
- [12] 杨俊鹏, 戴华阳, 赵溪, 徐伯恩, 刘大为. 滇西北高寒地区金属矿山土地复垦技术探究: 以普朗铜矿区为例[J]. *中国矿业*, 2015, 24(12): 66-69.
- YANG JP, DAI HY, ZHAO X, XU BE, LIU DW. Study on the technology of land rehabilitation of metal mine area in alpine region of northwestern Yunnan: a case study of taking Pulang copper mine area[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(12): 66-69 (in Chinese).
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- BAO SD. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114 (in Chinese).
- [14] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
- National Soil Survey Office. *Provisional Technical Regulations for the Second National Soil Survey*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979 (in Chinese).
- [15] 王占青, 张杰雪, 杨雪莲, 黄霞, 陈斯亮, 乔有明. 高寒草甸不同斑块草地土壤微生物多样性特征研究[J]. *草地学报*, 2021, 29(9): 1916-1926.
- WANG ZQ, ZHANG JX, YANG XL, HUANG X,

- CHEN SL, QIAO YM. Characteristics of soil microbial diversity in different patches of alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1916-1926 (in Chinese).
- [16] LI Y, ZHANG QP, CAI YJ, YANG Q, CHANG SX. Minimum tillage and residue retention increase soil microbial population size and diversity: implications for conservation tillage[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137164.
- [17] 李桂花. 不同施肥对土壤微生物活性、群落结构和生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 204-208.
- LI GH. Effect of organic amendments and chemical fertilizer on soil microbial activity, biomass and community structure[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(14): 204-208 (in Chinese).
- [18] 李明锐, 李天国, 李博, 秦丽, 蒋明, 李元, 何永美. 元阳梯田核心区森林群落土壤微生物数量与养分含量的分布特征[J]. *西部林业科学*, 2019, 48(5): 49-55, 62.
- LI MR, LI TG, LI B, QIN L, JIANG M, LI Y, HE YM. Soil microorganisms quantities and nutrients contents of different forest communities at core zone in Yuanyang Terrace[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(5): 49-55, 62 (in Chinese).
- [19] 熊涵, 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 黄兴成, 杨叶华, 朱华清, 蒋太明. 长期不同施肥模式对黄壤旱地土壤细菌群落结构和土壤养分的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1949-1956.
- XIONG H, LIU YL, LI Y, ZHANG YR, HUANG XC, YANG YH, ZHU HQ, JIANG TM. Effects of long-term fertilization patterns on bacterial community structure and soil nutrients in dryland of yellow soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1949-1956 (in Chinese).
- [20] 李梦杰. 重金属污染矿区微生物多样性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2017.
- LI MJ. Microbial diversity in mine environment with metal pollution[D]. Xi'an: Master's Thesis of Xi'an University of Architecture and Technology, 2017 (in Chinese).
- [21] 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青. 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5550-5560.
- HUANG J, ZHU XY, LU J, SUN Y, ZHAO XQ. Effects of different land use types on microbial community diversity in the Shizishan mining area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5550-5560 (in Chinese).
- [22] 宓展盛. 白云鄂博矿区重金属污染对酶活性和微生物生态多样性的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学硕士学位论文, 2020.
- FU ZS. Effects of heavy metal pollution on enzyme activity and microbial ecological diversity[D]. Baotou: Master's Thesis of Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020 (in Chinese).
- [23] 余梓鹏, 王宝娥, 王柳玲, 张日红, 万泉. 生态修复后某矿区下游农田土壤金属污染特征与风险评价[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(5): 134-144.
- SHE ZP, WANG BE, WANG LL, ZHANG RH, WAN Q. Characteristics and risk assessment of soil metal pollution in farmland downstream of mining area after ecological restoration[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(5): 134-144 (in Chinese).
- [24] 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成. 黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态[J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6339-6353.
- WANG Z, LIU Y, WANG F, WANG YC. Effects of vegetation types and seasonal dynamics on the diversity and function of soil bacterial communities in the upper reaches of the Heihe River[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 6339-6353 (in Chinese).
- [25] 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓. 三峡库区消落带两种适生草本植物根际细菌群落季节变化特征及功能预测[J]. *生态学报*, 2023, 43(23): 1-11.
- TAN X, DONG Z, ZHANG LM, YUAN ZX, LI CX. Seasonal dynamics and functional prediction of bacterial community in the region rhizosphere of two suitable herbaceous species in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 1-11 (in Chinese).
- [26] 赵兴鸽, 张世挺, 牛克昌. 高寒草甸植物群落功能属性与土壤细菌多样性关系[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(1): 70-80.
- ZHAO XG, ZHANG ST, NIU KC. Association of soil bacterial diversity with plant community functional attributes in alpine meadows[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2020, 50(1): 70-80 (in Chinese).
- [27] 卢虎, 李显刚, 姚拓, 蒲小鹏. 高寒生态脆弱区“黑土滩”草地植被与土壤微生物数量特征研究[J]. *草业学报*, 2014, 23(5): 214-222.
- LU H, LI XG, YAO T, PU XP. Characteristics of vegetation and soil microorganisms of molehill grassland in an ecologically vulnerable alpine region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 214-222 (in Chinese).
- [28] GRISHKAN I, NEVO E. Spatiotemporal dynamics of culturable microfungi in soil of Mount Hermon,

- Israel[J]. *Plant Biosystems-an International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2012, 146(sup1): 150-163.
- [29] XU WH, XU HM, DELGADO-BAQUERIZO M, GUNDALE MJ, ZOU XM, RUAN HH. Global meta-analysis reveals positive effects of biochar on soil microbial diversity[J]. *Geoderma*, 2023, 436: 116528.
- [30] 张卫信, 申智锋, 宋博, 马子鹤, 邵元虎, 傅声雷. 土壤食物网调控及其生态功能研究的困境与思考[J]. *科技导报*, 2022, 40(3): 52-63.
- ZHANG WX, SHEN ZF, SONG B, MA ZH, SHAO YH, FU SL. Soil food web manipulation and ecological functions: challenges and perspectives[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(3): 52-63 (in Chinese).
- [31] AMINIYAN MM, HOSSEINI H, HEYDARIYAN A. Microbial communities and their characteristics in a soil amended by nanozeolite and some plant residues: short time in situ incubation[J]. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2018, 7(1): 9-19.
- [32] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 937-944.
- LIU MQ, HU F, HE YQ, LI HX. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 937-944 (in Chinese).
- [33] 易桂田, 王晓丽, 刘占锋, 蔡锡安, 傅声雷, 周丽霞. 亚热带地区不同人工林配置下土壤微生物量碳及微生物熵的年际动态[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(2): 224-231.
- YI GT, WANG XL, LIU ZF, CAI XA, FU SL, ZHOU LX. Interannual dynamics of soil microbial biomass carbon under different plantations in subtropical China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(2): 224-231 (in Chinese).
- [34] PLASSART P, VINCESLAS MA, GANGNEUX C, MERCIER A, BARRAY S, LAVAL K. Molecular and functional responses of soil microbial communities under grassland restoration[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(3/4): 286-293.
- [35] LIU JJ, SUI YY, YU ZH, SHI Y, CHU HY, JIN J, LIU XB, WANG GH. High throughput sequencing analysis of biogeographical distribution of bacterial communities in the black soils of northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 70: 113-122.
- [36] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍祖. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(1): 170-176.
- HU YL, WANG SL, YAN SK. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 170-176 (in Chinese).
- [37] 吴同亮, 刘存, 周东美, 陈怀满, 王玉军. 环境土壤学—回顾与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1-19.
- WU TL, LIU C, ZHOU DM, CHEN HM, WANG YJ. *Environmental Soil Science: Retrospect and Prospect*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1-19 (in Chinese).
- [38] SCHWARZ A, NANCUCHEO I, GAETE MA, MUÑOZ D, SANHUEZA P, TORREGROSA M, RÖTTING T, SOUTHAM G, AYBAR M. Evaluation of dispersed alkaline substrate and diffusive exchange system technologies for the passive treatment of copper mining acid drainage[J]. *Water*, 2020, 12(3): 854-854.
- [39] 袁霜. 金属矿山固废堆场生态修复技术研究与实践[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2023, 75(5): 167-174.
- YUAN S. Research and practice on ecological restoration technology of solid waste storage yard in metal mines[J]. *Nonferrous Metals (Mine Section)*, 2023, 75(5): 167-174 (in Chinese).
- [40] 许妍妍, 李璞, 刘江, 王鹤, 刘钟森, 吴聪聪, 陈学礼. 废弃铜矿周边农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(8): 165-167, 172.
- XU YY, LI P, LIU J, WANG H, LIU ZS, WU CC, CHEN XL. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in farmland soil around an abandoned copper mine[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(8): 165-167, 172 (in Chinese).
- [41] 孟磊, 吴亮亮, 李昊, 龚雪刚, 王琼. 典型铜矿区废石堆场周边环境风险研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(10): 135-140.
- MENG L, WU LL, LI H, GONG XG, WANG Q. Study on environmental risk around waste rock dump site in typical copper mining area[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(10): 135-140 (in Chinese).
- [42] 湛方栋, 何永美, 陈建军, 祖艳群, 李元, 韩明珠. 施氮量对丘北辣椒土壤微生物数量的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2010(6): 854-861.
- ZHAN FD, HE YM, CHEN JJ, ZU YQ, LI Y, HAN MZ. Effects of nitrogen application rate on the quantity of soil microorganisms in Qiubei pepper field[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2010(6): 854-861 (in Chinese).
- [43] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 胡会峰, 郑晓翊, 吴雅琼. 人工油松林(*Pinus tabulaeformis*)恢复过程中土壤微

- 生物生物量 C、N 的变化特征[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1011-1018.
- LIU ZF, LIU GH, FU BJ, HU HF, ZHENG XX, WU YQ. Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1011-1018 (in Chinese).
- [44] CONRADI T, KOLLMANN J. Species pools and environmental sorting control different aspects of plant diversity and functional trait composition in recovering grasslands[J]. Journal of Ecology, 2016, 104(5): 1314-1325.
- [45] 李媛媛, 董世魁, 朱磊, 温璐, 李小艳, 王学霞. 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4683-4691.
- LI YY, DONG SK, ZHU L, WEN L, LI XY, WANG XX. Adaptation strategies of reproduction of plant community in response to grassland degradation and artificial restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4683-4691 (in Chinese).
- [46] ZHANG J, JIAO S, LU YH. Biogeographic distribution of bacterial, archaeal and methanogenic communities and their associations with methanogenic capacity in Chinese wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 664-675.
- [47] FIERER N, JACKSON RB. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(3): 626-631.
- [48] HABEKOST M, EISENHAUER N, SCHEU S, STEINBEISS S, WEIGELT A, GLEIXNER G. Seasonal changes in the soil microbial community in a grassland plant diversity gradient four years after establishment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(10): 2588-2595.
- [49] LAN GY, LI YW, LESUEUR D, WU ZX, XIE GS. Seasonal changes impact soil bacterial communities in a rubber plantation on Hainan Island, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 626: 826-834.
- [50] 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑. 矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 752-759.
- HE L, LI YQ, LI BC, LI JJ. Effects of different vegetation types and reclamation years on soil bacterial community structure in reclaimed mine areas[J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 752-759 (in Chinese).
- [51] JIA T, WANG R, CHAI B. Effects of heavy metal pollution on soil physicochemical properties and microbial diversity over different reclamation years in a copper tailings dam[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 74(5): 439-448.
- [52] 王光华, 刘俊杰, 于镇华, 王新珍, 金剑, 刘晓冰. 土壤酸杆菌门细菌生态学研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(2): 14-20.
- WANG GH, LIU JJ, YU ZH, WANG XZ, JIN J, LIU XB. Research progress of *Acidobacteria* ecology in soils[J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(2): 14-20 (in Chinese).
- [53] 曹书苗, 王强民, 杨凡, 杨建, 张海涵, 许刚刚, 朱世彬. 放线菌对旱区露天煤矿排土场红豆草根系生长及根际土壤肥力的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 95-103.
- CAO SM, WANG QM, YANG F, YANG J, ZHANG HH, XU GG, ZHU SB. Effects of actinomycetes on root growth of *Onobrychis viciaefolia* and rhizosphere soil fertility in dumping site of open-pit mine in arid area[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 95-103 (in Chinese).
- [54] SESSITSCH A, WEILHARTER A, GERZABEK MH, KIRCHMANN H, KANDELER E. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(9): 4215-4224.
- [55] 史策, 聂立水, 魏一凡, 祝琳, 杨昊, 张润哲, 聂浩亮, 王江, 薄慧娟. 北京海坨山典型林分土壤固氮菌群落特征研究[J]. 林业科学研究, 2022, 35(4): 153-161.
- SHI C, NIE LS, WEI YF, ZHU L, YANG H, ZHANG RZ, NIE HL, WANG J, BO HJ. Characteristics of soil nitrogen-fixing bacteria community of typical forest stands at Haituo Mountain, Beijing[J]. Forest Research, 2022, 35(4): 153-161 (in Chinese).