

矿区林下经济植物种植对根际土壤生物群落特征及理化性质的影响

魏紫静¹, 邓敏¹, 余丙涛², 赖公政¹, 舒荣波¹, 代力¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局矿山生态保护修复技术中心(西部), 四川 成都 610041; 2. 西部(重庆)地质科技创新研究院有限公司, 重庆 400030)

摘要: 这是一篇矿山环境工程领域的论文。为评价离子型稀土矿区林下经济植物种植对根际土壤生物群落特征及理化性质影响, 选取何首乌、葛根等 7 种典型林药经济植物和黑麦草、狼尾草等 7 种典型林草经济植物为研究对象, 开展林下经济植物种植盆栽实验。通过测定植物株高、叶面积、地上/地下部生物量和土壤全磷、全钾、全氮、速效氮、速效磷、有机质、阳离子交换量以及微生物群落组成、丰富度、多样性等指标, 综合研究林下经济植物种植对根际土壤生物群落特征及理化性质的影响。结果表明: 种植中草药类植物会增加生物多样性, 而种植牧草类会对微生物群落组成产生一定的影响; 种植中草药类林下经济植物对土壤肥力有较明显的提高, 粉防己最为明显较对照全氮、碱解氮、有机质、分别提高 300.0%、118.5%、825.3%; 种植牧草类对土壤肥力影响不明显。通过本文研究表明, 种植林下经济植物会对土壤生物群落产生一定的影响, 并在一定程度上提高土壤肥力。

关键词: 矿山环境工程; 矿区; 林下经济; 生物群落特征; 土壤理化性质

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.022

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0144-09

离子型稀土矿又称风化型稀土矿, 是富含稀土元素的花岗岩经长期外力地质作用下溶解、迁移, 在合适环境条件下吸附沉积在前地表花岗岩风化壳中的蒙脱石、高岭土、伊利石等黏土矿物中形成的矿体^[1], 是全球稀土资源的重要组成部分。离子型稀土矿的开采历经池浸、堆浸以及原地浸矿 3 种工艺^[2], 目前主要采用原地浸矿工艺开采, 该工艺不开挖矿体、不剥离表层覆土、劳动强度较低, 且可充分利用低品位稀土资源, 是较为绿色高效的开采方式^[3]。

原地浸出开采占用山林面积大, 具有开采周期短和流动性强的特点^[4]。闭矿后, 开采企业搬迁, 矿区林地资源被忽略, 巨大的林地资源未能发挥应有的经济效益和社会效益, 造成了大量林

地资源浪费。因此, 有必要对矿区林地资源进行开发利用。目前, 林地资源的开发模式主要有: 林禽、林菌、林草、林药等模式^[5]。林禽模式可充分利用林下空间和杂草资源, 有较高经济效益, 但随着养殖规模扩大, 树下家禽密度过大, 易造成林下生态系统破坏, 不利于维护林地生态多样性^[6]。林菌模式生产效率高, 但栽培劳动强度较大、耗时较长, 对林下环境要求较高^[7]。林草模式可改善林地环境, 该模式针对畜类动物, 养殖密度大造成林地土壤板结, 森林水环境污染, 不利于林业资源的保护^[8]。林药模式栽培药材与林业作物生长几乎无矛盾, 根据林下生态环境选择适宜种植药材二者可相辅相生, 利用中草药植物特性可充分发挥出其药用价值^[6], 具有较好经济前景。

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(DD20221697); 四川省重点研发计划(面上项目)(22ZDYF0038)

作者简介: 魏紫静(1994-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为矿山生态修复。

通信作者: 邓敏(1992-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为矿山生态修复。

因此，本研究根据离子型稀土矿山分布情况，因地制宜选取以何首乌、葛根、魔芋、黄精、金银花、粉防己、茯苓苗为代表林药经济植物，以黑麦草、狼尾草、白茅、白三叶、牛鞭草、狗牙根为代表的林草经济植物，开展以本土特色品种为主的矿山林下经济作物种植研究，以期在多个成片矿区形成具有相当规模和地方特色的林下经济作物，发展矿区林下经济产业，助力矿山生态修

复与乡村产业振兴的高效融合。

1 实验

1.1 实验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自于江西某地，将采集的土壤剔除杂质风干，磨过尼龙筛后备用。土壤理化性质见表1。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

pH值	有机质/(g/kg)	阳离子交换量/(cmol/kg)	全氮/(g/kg)	全磷/(mg/kg)	全钾/(g/kg)	碱解氮/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)	有效磷/(mg/kg)
7.88	7.30	20.31	5.00	1440.00	7.60	56.10	171.00	2.89

1.1.2 实验试剂

本次研究所用的试剂均为分析纯(AR)，包括无水硫酸钠、磷酸氢二钾、硫酸镁、氯化铵、硫酸亚铁铵(六水)、氯化钠、尿素、异戊醇、尿素、过磷酸钙、硫酸钾等。

1.1.3 供试植物种子

本实验过程中采用的罗汉果(LHG)、何首乌(HSW)、葛根(GG)、金银花(JYH)、粉防己(FFJ)、茯苓苗(FLM)、黄精(HJ)、魔芋(MY)、牛鞭草(NBC)、狗牙根(GYG)、狼尾草(LWC)、白茅(BM)、白三叶(BSY)、黑麦草(HMC)的植物种子，均购置于篱丰种业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 盆栽实验

每盆装入土壤6.0 kg，按照每公斤土：0.2 g 尿素，0.4 g 过磷酸钙，0.6 g 硫酸钾施入底肥，拌匀，加入适量水分，待土壤稳定后种植作物，并设置对照组(CK)，均按照常规农艺管理措施和施肥量^[9]对植物全生育期进行管理和实验。

1.3 测试方法

1.3.1 植物生物量

植物成熟后，用剪刀将地上部与地下部剪开，用自来水冲洗干净后擦干，用直尺测定植物的株高、叶面积，用天平称取植物地上部、地下部生物量重量(鲜重)，记录数据。

1.3.2 土壤生物群落

土壤样本采集经液氮猝灭后送至北京诺禾致源科技股份有限公司进行16S rDNA基因扩增子高通量测序。具体流程为：采用CTAB法对样本DNA进行提取；采用通用引物515F和806R对

16S V4区进行PCR扩增；反应体系(30 μL)：2×Phusion Master Mix 15 μL，2 μmol/L Primer 3 μL，1 ng/μL DNA 10 μL，H₂O 2 μL；反应程序：98 °C 预变性1 min，30个循环包括(98 °C，10 s；50 °C，30 s；72 °C，30 s)，72 °C，5 min；PCR产物使用2%琼脂糖凝胶进行电泳检测；等浓度混样后用2%琼脂糖胶电泳纯化PCR产物；使用TruSeq DNA PCR-Free Library Preparation Kit建库试剂盒进行文库的构建，构建好的文库经过Qubit定量和文库检测，使用NovaSeq 6000进行上机测序。

1.3.3 土壤理化性质

土壤理化性质测试主要参照《土壤农化分析》^[10]，具体为：pH值检测采用电位法，总磷(P)和速效磷(AP)检测采用钼锑抗比色法，总钾(K)和速效钾(TK8)检测采用火焰光度计法，总氮(N)检测采用凯氏定氮法，速效氮(AN)检测采用碱解扩散法，阳离子交换量(CEC)采用氯化铵-乙酸铵交换法，有机质(SOM)测定采用重铬酸钾水合热法。

1.3.4 数据处理与统计

利用QIIME软件对高通量测序原始数据进行过滤除杂，以除去低质量序列、错配序列、引物序列和过长(≥500 bp)或过短序列(≤200 bp)，从而获得高质量的Clean data，根据Reads间的重叠关系将Reads拼接成Tags。不同样本在97%一致性阈值下，利用Mothur软件计算Alpha多样性，包括Chao1、Shannon、Simpson和Shannoneven指数^[11]；利用Qiime软件生成各分类学水平丰富度和Beta多样性^[12]的主坐标分析；利用软件USEARCH对拼接好Tags进行OTU聚类^[13]；利用Uparse和

Usearch 软件对 OTU 序列进行聚类 and 统计。

植物生物量数据 Origin2022 绘图，土壤基本理化性质数据 Microsoft Excel 2016 统计。

2 实验结果

2.1 林下经济作物生长特性

14 种林下经济作物种植 6 个月株高、叶面

积、地上及地下部生物量均不同 (表 2)。由图 1(a) 可知，何首乌、葛根、金银花、狼尾草等株高生长显著，罗汉果、何首乌、葛根、狼尾草、魔芋叶面长幅较大。结合图 1(b) 可知，罗汉果地上部分和白茅地下部分生物量最大，而黄精、牛鞭草、狗牙根、黑麦草、金银花生物量均较小，可能需要更长生长周期。

表 2 林下经济植物生物量
Table 2 Understory economic plant biomass

名称	株高/cm		叶长/cm		叶宽/cm		鲜重/g			
	初始	最终	初始	最终	初始	最终	地上部		地下部	
							初始	最终	初始	最终
三叶草	8.6	24.2	1.1	3.4	1.4	2.5	1.5	27.9	0.7	23.7
罗汉果	20.1	149.4	6.5	13.5	7.8	7.5	3.1	280.4	0.8	2.3
粉防己	/	80.3	/	4.9	/	3.9	/	6.8	1.2	31.8
黄精	/	20.1	/	6.2	/	2.5	/	7.4	13.3	19.8
牛鞭草	21.0	60.2	/	14.3	/	1.8	2.2	16.5	1.0	14.6
狗牙根	19.2	35.3	/	26.5	/	0.9	5.6	11.3	1.1	6.4
何首乌	15.0	320.4	/	8.1	/	4.5	/	26.8	/	34.8
黑麦草	28.3	70.1	/	21.4	/	0.5	2.4	76.3	14.5	17.6
葛根	7.3	258.3	3.3	7.4	2.3	6.3	/	17.2	/	13.6
白茅	24.0	87.1	/	48.6	/	1.2	4.7	73.3	1.6	59.3
金银花	41.3	310.3	1.7	2.8	0.9	1.5	/	71.3	/	13.2
茯苓苗	/	52.3	/	1.7	/	0.9	/	33.1	/	5.5
狼尾草	/	78.2	/	32.2	/	2.1	/	29.1	/	22.4
魔芋	/	68.4	/	11.3	/	4.3	/	34.9	21.6	31.8

“/”表示植物种植时为种子播种或生物量极小，无法测量相关数据。

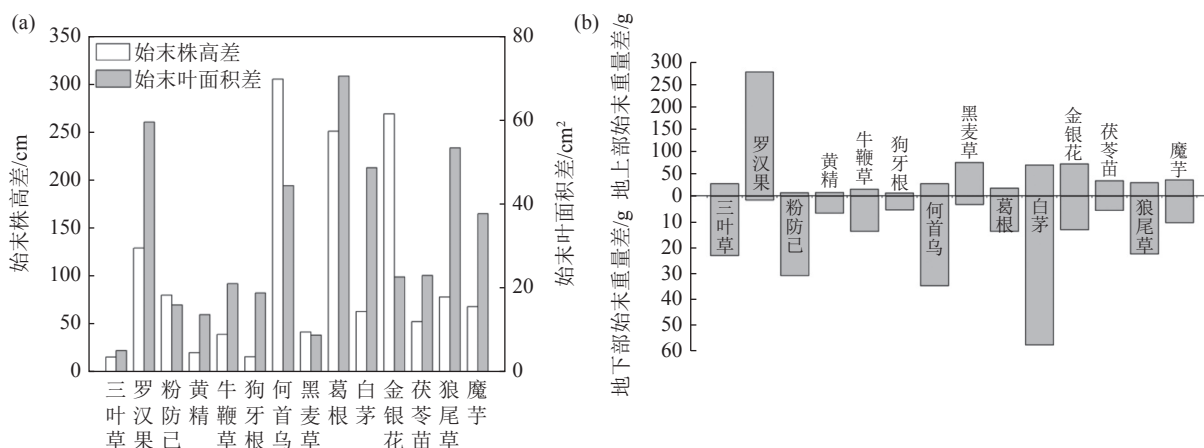


图 1 不同林下经济作物的生长特征

Fig.1 Growth characteristics of cash crops in different understory

2.2 林下经济植物种植土壤生物群落特征

2.2.1 种植不同植物根际土壤的细菌高通量测序结果及多样性分析

本研究对 15 个土壤样品进行分析，种植林下经济作物对土壤微生物的丰富度和多样性有一定影响。所有样本测序获得 1,168,322 对序列，有效序列 885,044 条，每样品平均产生 76,338 条高通量测序标签。分析测序覆盖率达 0.997 以上，各土壤样品测序结果可反映土壤微生物群落结构真实

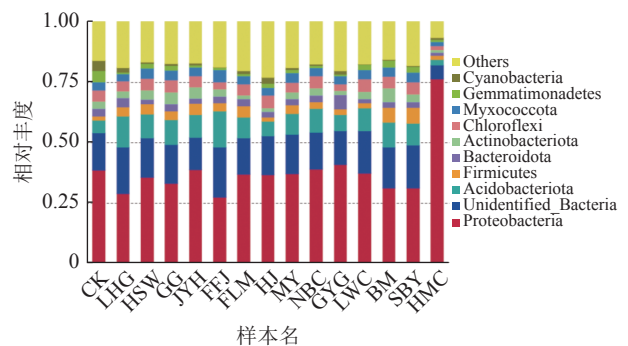
情况。Alpha 多样性分析反映，种植不同作物根系土壤微生物群落的丰度和多样性不同。从表 3 可知，何首乌土壤细菌的 Chao 1 指数最大且 Ace 指数较大，葛根土壤细菌 Ace 指数最大且 Chao 1 指数较大，说明种植何首乌和葛根中草药类的林下经济作物土壤细菌丰富度最大。与 CK 对比，种植各作物土壤细菌平均 Chao 1 指数、Shannon 指数和 Ace 指数均存在差异，但并不明显，说明种植作物对土壤群落丰度和多样性有影响，但影响有限。

表 3 不同林下经济作物种植对土壤细菌 Alpha 多样性指数的影响
Table 3 Effects of different understory cash crops on soil bacterial Alpha diversity index

样品编号	Simpson指数	Shannon指数	Chao 1指数	Ace指数
CK	0.993	9.052	2998.438	3070.002
罗汉果	0.997	9.885	3525.520	3583.180
何首乌	0.996	9.777	3768.356	3859.541
葛根	0.997	9.804	3764.043	3862.395
金银花	0.996	9.233	2613.071	2630.023
粉防己	0.997	9.849	3482.190	3516.295
茯苓苗	0.997	9.677	3209.872	3312.846
黄精	0.997	9.566	3205.294	3258.563
魔芋	0.998	9.976	3527.746	3580.656
牛鞭草	0.996	9.308	2691.654	2766.166
狗牙根	0.997	9.841	3367.000	3417.542
狼尾草	0.996	9.673	3376.653	3441.456
白茅	0.996	9.368	2854.791	2893.736
白三叶	0.997	9.688	3565.297	3660.292
黑麦草	0.751	5.033	2348.175	2416.727

2.2.2 种植不同植物根际土壤的细菌在门、属分类水平上的群落组成

对门水平上相对丰度前 10 位细菌门分析 (图 2)，各根际土样本中细菌在门、属分类水平上细菌种类基本相同，但种植林下经济作物样品中群落占比均与对照土壤存在差异。优势菌门有变形菌门 (*Proteobacteria*)、蓝藻细菌门 (*Cyanobacteria*)、放线菌门 (*Actinobacteria*)、芽单胞菌门 (*Gemmatimonadetes*)、酸杆菌门 (*Acidobacteria*) 等，较优菌门是变形菌门，其次是酸杆菌门，对应相对丰度分别为 27.55%~76.38% 和 5.73%~20.58%。种植作物除黑麦草外，酸杆菌门比例普遍增高，蓝藻细菌门降低；黑麦草种植后与其他作物细菌群落差异较大，变形菌门比例显著增高，其余优势菌门均降低。这些菌群被发现在不同林下经济作物土壤中，可认为是本土核心菌群。



Others 为图中 10 个门之外其他所有门的相对丰度之和。

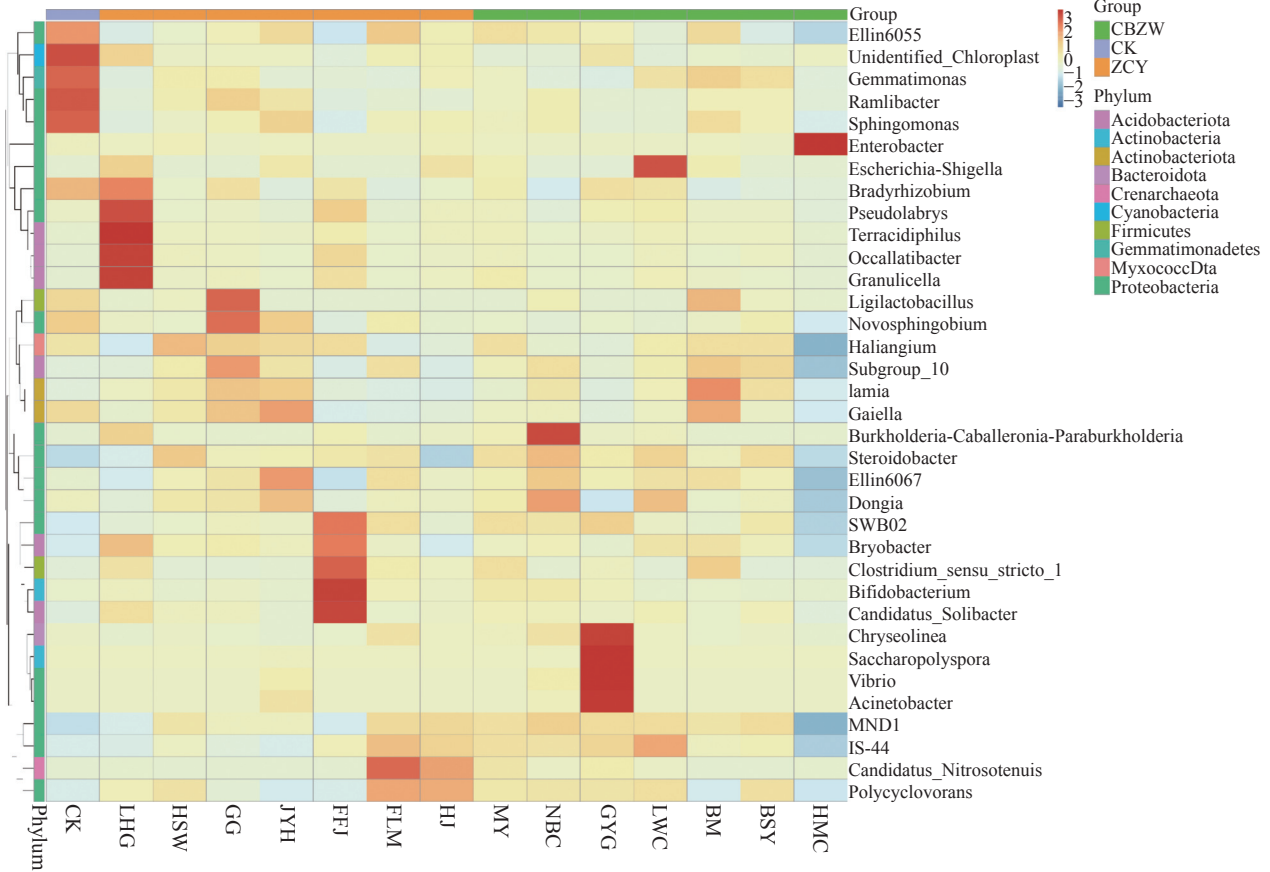
图 2 根际土壤细菌在门水平上的群落组成

Fig.2 Community composition of rhizosphere soil bacteria at phylum level

土壤细菌在属水平上存在差异 (图 3)，相对丰度 $\geq 1.00\%$ 条件下，相比对照样本 (CK)，罗汉果、葛根、粉防己、茯苓苗、牛鞭草、狗牙根、狼尾草和白茅样本中显著增加的菌属有分别

Terracidiphilus (1.34%)、*Novosphingobium* (1.38%)、*Bryobacter* (3.47%)，何首乌样本显著增加的菌属有 *Acinetobacter* (2.46%)，*Escherichia-Shigella* (3.04%)，*MND1* (4.04%)；以上作物样本中并没有

显著减少的菌属。黑麦草样本聚集较多的菌属为 *Enterobacter* (62.65%)，*MND1*、*Subgroup*、*IS-44* 菌属聚集较少。说明种植不同作物会对土壤细菌菌属种类产生影响。



纵向为样本信息，横向为物种注释信息，左侧聚类树为物种聚类树，热图对应值为每一行物种相对丰度经过标准化处理后得到的 Z 值。

图 3 土壤细菌在属水平上的群落组成

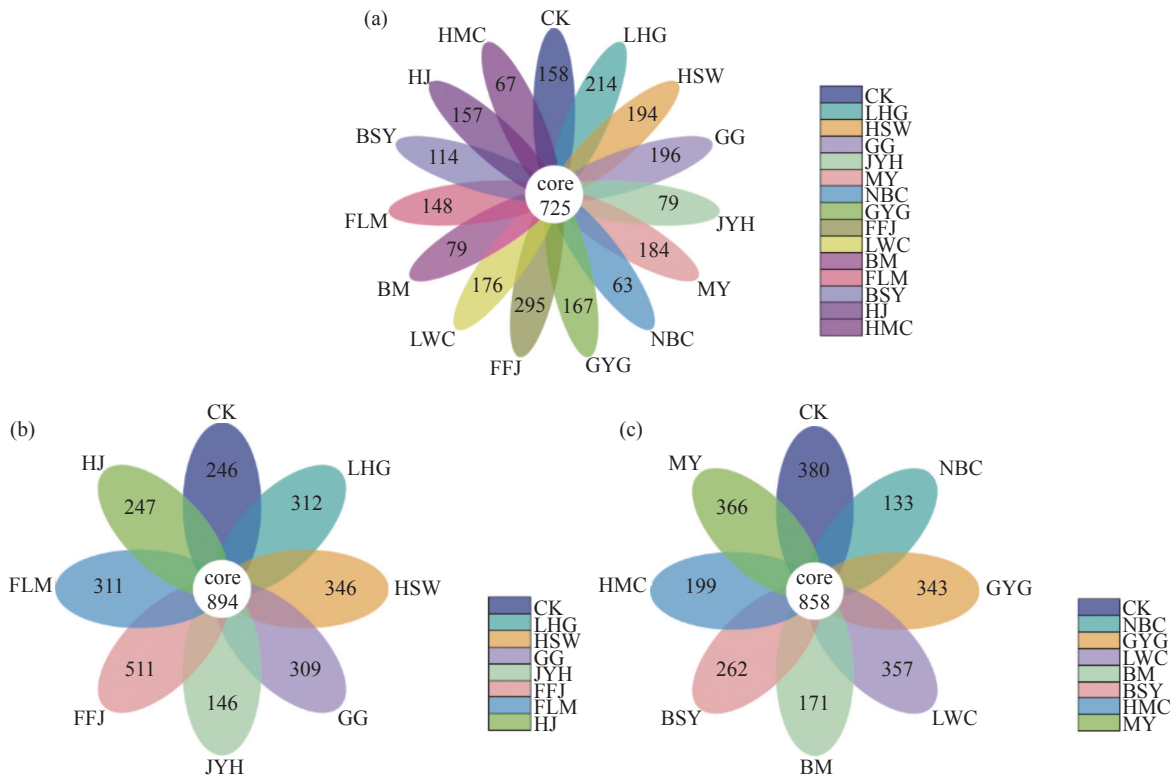
Fig.3 Community composition of soil bacteria at genus level

2.2.3 种植不同植物根际土壤的细菌核心菌群

对土壤细菌群落进行聚类分析 (图 4)，种植不同林下经济作物根际土壤和对照样本的核心细菌群落数目组成存在相似性、重叠性和特异性。由图 4(a) 可得，15 个样本共有物种数为 725，其中黑麦草、牛鞭草、白茅和金银花特有 OUT 数目较少，FFJ 特有 OUT 数目最多为 295，其余作物样本与 CK 样本相比 OUT 数目差异较小。图 4(b) 和 (c) 可知，中草药类和牧草类作物样本共有 OUT 数分别为 894 和 858，与 CK 相比种植粉防己土壤样本特有 OUT 数较高为 511。由此，各特异性细菌属占比较大，各样本中土壤细菌群落存在差异，牧草植物样本中菌群相似性相对较小。

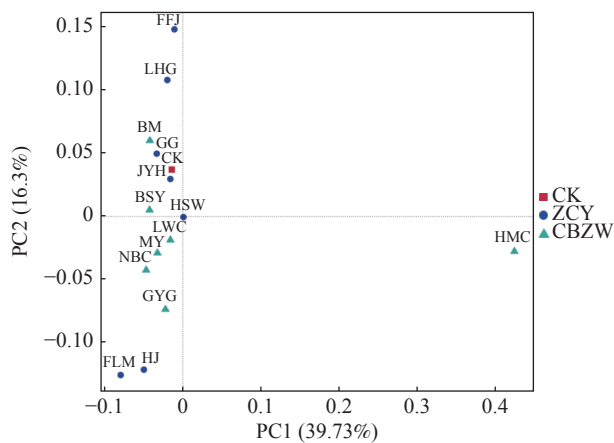
2.2.4 种植不同植物土壤的细菌群落比较

基于 R 语言对种植不同林下经济作物根际土壤细菌群落进行主坐标分析 (PCoA, Principal Coordinates Analysis)^[14]，图 5 可得，主坐标分析 1 和 2 贡献率分别为 39.73% 和 16.30%，累计 56.03%。魔芋、狼尾草和牛鞭草距离较近且距 CK 较远，说明种植该牧草植物对土壤细菌群落结构影响较大，牧草类植物间土壤细菌群落结构改变相似；葛根和金银花距离 CK 相对较近，表明种植该中草药类植物对土壤细菌群落结构影响有限；黑麦草与其余所有样本距离均较远，推断种植其对土壤微生物物种组成结构影响较大，使得与其余样本的群落存在较大差异，这与 2.2.1 和 2.2.2 结论一致。



其中，(a) 为包含所有土壤样本的花瓣 Venn，(b) 为包含中草药类样本的花瓣 Venn，(c) 为包含牧草植物样本的花瓣 Venn。将样本分为中草药和牧草植物两类，中草药 (ZCY) 类包含 LHG、HSW、GG、JYH、FFJ、FLM 和 HJ，牧草植物 (CBZW) 类包含 MY、NBC、GYG、LWC、BM、BSY 和 HMC。

图4 土壤细菌群落 Venn
Fig.4 Venn of soil bacterial community



15 个样本名称对应同表 3，作物分类同图 4 注释；横、纵坐标分别为 2 个主成分，百分比表示主成分对样本差异贡献值。

图5 基于 Weighted Unifrac 距离 PCoA 分析
Fig.5 Weighted Unifrac distance PCoA analysis

2.3 林下经济植物种植对土壤理化性质的影响

林下经济植物种植对土壤理化性质的影响见表 4，对照土壤有机质含量为 0.73%、全氮含量为 0.05%、碱解氮含量为 0.00561%、土壤速效磷含量

为 2.89 mg/kg、速效钾含量为 171.0 mg/kg、阳离子交换量为 20.31 cmol/kg，以全国第二次土壤普查为参考，对照土壤养分含量属于低水平。种植中草药和牧草类林下经济植物对土壤理化性质有一定的影响，但存在差异：种植中草药类林下经济植物对土壤肥力有较明显的提高，其中粉防己和罗汉果提升最为明显，粉防己较对照对全磷、全钾、全氮、碱解氮、速效钾、有机质、速效磷、pH 值、阳离子交换量分别提高 1.38%、35.6%、300%、118.5%、42.9%、825.3%、70.6%、3.8%、31.7%，罗汉果较对照对全磷、全钾、全氮、碱解氮、速效钾、有机质、阳离子交换量分别提高 12.4%、17.8%、275.0%、84.9%、29.9%、394.7%、69.5%、6.45%；种植牧草类对土壤肥力影响不明显，各肥力指标有升有降。

3 分析讨论

土壤微生物是最为活跃的土壤肥力因子之一，其群落结构的组成与多样性变化可显著反映

土壤生物活性。本研究显示,种植林下经济植物会对根际土壤细菌多样性以及微生物群落组成结构产生影响,种植中草药类植物会增加微生物多样性,而种植牧草类会对微生物群落组成产生一定的影响(见结果 2.2.1、2.2.3),与谢晓梅等^[15]、耿贵等^[16] 研究结果类似。这可能是因为:(1)中草药类林下经济植物的根系分泌物中富含有机酸,降低了土壤 pH 值,这为耐酸性细菌(如酸杆菌门:酸杆菌^[17]等)创造了适宜的生长环境,诱导耐酸细菌在根际聚集并刺激细菌代谢^[18],增加了细菌繁殖效率和机率,导致细菌多样性增加^[19]。(2)牧草类植物根系较为发达(结果见 2.1),吸收土壤肥力能力较强,但土壤养分较低,难以满足植物正常生长需求,为促进碳、氮循环与能量交

换,维持植物、土壤、微生物之间生态平衡,土壤变形菌门中大肠杆菌大量聚集以分解有机质,从而微生物群落组成发生改变^[20]。此外,黑麦草根系土壤中变形菌门数量增加最为显著,牧草植物中其地上部分生物量最大,根基土壤有机质含量明显增加。这可能是由于黑麦草地上部生物量较大,叶片光合作用较强对空气中 CO₂ 转换率增加^[21],促进碳转化在其根系产生大量碳源吸引变形菌门聚集^[22];黑麦草根毛比其他牧草植物发达,使得其根系吸收养分效率与腐解速度较大,其根系土中难以吸收的有机质增加无法满足植物正常生长,促使根毛产生调节植物-微生物联系的物质^[23-24],刺激大量变形菌门代谢分解有机质以满足植物体对养分需求。

表 4 种植林下经济植物对土壤理化性质的影响

Table 4 Impact of economic plants under planting forests on physical and chemical properties of soil

名称	P/(mg/kg)	K/%	全氮/%	碱解氮/%	速效钾/(mg/kg)	有机质/%	速效磷/(mg/kg)	pH值	阳离子交换量/(cmol/kg)
CK	1440	0.76	0.050	0.00561	171	0.73	2.89	7.88	20.31
罗汉果	1630	0.86	0.15	0.011	191	3.71	6.17	6.99	20.95
何首乌	1390	0.85	0.060	0.00724	139	0.80	3.71	7.88	21.05
葛根	1390	0.76	0.050	0.00550	141	0.80	2.94	7.88	20.21
金银花	1370	0.80	0.060	0.00813	156	0.87	4.10	7.75	20.00
粉防己	1470	0.99	0.16	0.013	210	6.94	6.21	7.12	25.92
茯苓苗	1450	0.73	0.040	0.00595	147	0.75	3.64	7.40	19.68
黄精	1450	0.76	0.030	0.00703	147	0.82	3.47	7.86	18.83
魔芋	1390	0.78	0.050	0.00698	151	0.81	3.57	7.86	25.60
牛鞭草	1430	0.77	0.10	0.00777	164	0.80	3.85	7.98	20.10
狗牙根	1460	0.76	0.070	0.00775	128	0.72	3.68	8.12	21.1
狼尾草	1440	0.72	0.050	0.00875	174	0.73	2.57	8.06	25.07
白茅	1340	0.73	0.060	0.00855	118	0.74	2.80	7.89	20.95
白三叶	1380	0.76	0.060	0.00654	142	0.80	2.90	7.97	20.3
黑麦草	1360	0.82	0.070	0.00612	209	1.11	2.57	7.89	22.75

本研究显示种植中草药类林下经济植物能提高全钾、全氮、碱解氮、速效钾、有机质、速效磷等养分含量,而种植牧草类林下经济植物对土壤肥力影响较小,这与孙磊等^[25]、李军等^[26] 研究结果类似。这可能是因为:(1)中草药类林下经济植物根系分泌物的酸化作用。根系可以分泌有机酸,所产生的有机酸阴离子可络合固定磷素的金属离子,增加难溶养分的溶解度,提高土壤养分的有效性^[27]。(2)中草药类根系分泌物的还原作用。根系分泌物中的还原物质可以改变土壤中离子态元素的氧化还原电位,使高价氧化态金属离子转化为植物易吸收的低价还原离子,从而提高了土壤的有效养分含量。(3)中草药类根系分泌物的螯合作用。植物根系所分泌出的许多化学物质一般通过螯合作用与难溶养分络合为植物提供养

分,如酸性土壤中,蚕豆根系会分泌酒石酸,酒石酸中的羧基和羟基可与 Fe-P、Al-P 螯合以增加对磷的吸收^[28]。而种植牧草类林下经济植物,其生物量较小,产生根系分泌物的量较低,不能对土壤中的动植物残体、有机磷、矿物态钾等不可被吸收养分原料进行有效转化,从而导致对土壤理化性质的影响不显著^[29]。

4 结 论

(1)种植林下经济作物可改良土壤性质,尤其种植中草药类植物对土壤肥力有明显提高。

(2)种植不同林下经济植物对土壤群落丰富度和多样性有一定影响,但影响有限;对群落结构和功能的几乎无影响,各作物的根际土壤细菌群落结构存在一定的共性和差异。

参考文献：

- [1] 周贺鹏, 胡洁, 张永兵, 等. 离子型稀土矿化学溶浸影响因素及其调控[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):146-151.
ZHOU H P, HU J, ZHANG Y B, et al. Influencing factors and control of chemical leaching of ion-type rare earth ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):146-151.
- [2] 詹光, 黄草明, 朱景和, 等. 南方离子型稀土冶炼废水治理现状与展望[J]. *矿产综合利用*, 2018(3):18-25.
ZHAN G, HUANG C M, ZHU J H, et al. Status and prospect of hydrometallurgy wastewater treatment technology in south rare earth[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(3):18-25.
- [3] 王瑞苹. 江西赣南离子型稀土矿原地浸矿可能引发的环境问题[J]. *科技资讯*, 2012(33):150-151.
WANG R P. Possible environmental problems caused by in-situ leaching of ion type rare earth ore in Gannan, Jiangxi[J]. *Science & Technology Information*, 2012(33):150-151.
- [4] 陈书, 舒荣波, 闵刚, 等. 南方稀土矿区隐伏断裂带高密度电法勘探实验[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):68-73.
CHEN S, SHU R B, MIN G, et al. High-density electrical exploration test of hidden fault zone in Southern rare earth mining area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):68-73.
- [5] 黄国宁. 发展林下经济新思路, 打造农林增收新亮点——海南林菌间作模式与草料培育菌苗技术推广示范[J]. *热带林业*, 2016, 4(4):28-29.
HUANG G N. New ideas for developing the economy under the forest and creating a new highlight for increasing the income of forest farmers - Hainan forest fungus intercropping model and the promotion and demonstration of forage cultivation and Seedling Technology[J]. *Tropical Forestry*, 2016, 4(4):28-29.
- [6] 丁知青. 林下经济的主要模式及其优劣势[J]. *乡村科技*, 2021, 12(1):79-80.
DING Z Q. Main modes of undergrowth economy and their advantages and disadvantages[J]. *Xiangcun Keji*, 2021, 12(1):79-80.
- [7] 李祖毅, 陈永力, 陆巍, 等. 林下经济的主要模式及优劣分析[J]. *种子科技*, 2020, 38(16):119-120.
LI Z Y, CHEN Y L, LU W, et al. Analysis of the main modes and advantages and disadvantages of undergrowth economy[J]. *Seed Technology*, 2020, 38(16):119-120.
- [8] 郑平. 林下经济的主要模式及优劣分析[J]. *绿色科技*, 2019(11):220-221.
ZHEN P. Analysis of the main modes and advantages and disadvantages of undergrowth economy[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(11):220-221.
- [9] 北京现代市场经济研究中心编. 中国农业科技种植养殖百科全书[M]. 北京: 世图音像电子出版社, 2002: 624.
Edited by Beijing Modern Market Economy Research Center. *Encyclopedia of Chinese agricultural science and technology planting and breeding*[M]. Beijing: Shitu Audio Video Electronic Publishing House, 2002: 624
- [10] 鲍士旦主编. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 495.
Edited by BAO S D. *Agrochemical analysis of soil*, 3rd Edition [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000: 495.
- [11] 王格, 董胜奇, 张涛, 等. 基于高通量测序分析豆粕发酵过程中细菌群落结构及多样性[J]. *华中农业大学学报(自然科学版)*, 2018(5):89-94.
WANG G, DONG S Q, ZHANG T, et al. High-throughput sequencing based analyses of structure and diversity of bacterial community during fermentation process of soybean meal[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018(5):89-94.
- [12] J G Caporaso, J Kuczynski, J Stombaugh, et al. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data[J]. *Nature Methods*, 2010, 335-336.
- [13] R C Edgar. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. *Nature Methods*, 2013, 996-998.
- [14] P R Minchin. An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination[J]. *Planet Ecology*, 1987, 69(1-3):89-107.
- [15] 谢晓梅, 廖敏, 杨静. 黑麦草根分泌物对污染土壤芘降解和土壤微生物的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10):2718-2724.
XIE X M, LIAO M, YANG J. Effects of ryegrass (Lolium perenne) root exudates dose on pyrene degradation and soil microbes in pyrene-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2718-2724.
- [16] 耿贵. 作物根系分泌物对土壤碳、氮含量、微生物数量和酶活性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.
GENG G. Effect of crop root exudates on carbon and nitrogen contents, microorganisms quantity and enzyme activities in soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.
- [17] 王光华, 刘俊杰, 于镇华, 等. 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 G H, LIU J J, YU Z H, et al. Research progress of acidobacteria ecology in soil[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, 32(2):14-20.
- [18] 凌霄. 有机质化学组成与微生物群落的相互关系及其对碳周转的调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
LING L. The dynamic of OM chemistry and microbial community and their interactions regulate carbon turnover [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [19] 高雪峰, 贾渊. 荒漠草原植物根分泌物中有机酸组分分析及其生态效应研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10):1927-1934.
GAO X F, JIA Y. Analysis of organic acid components in root exudates and their ecological effects of the plants in desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10):1927-1934.
- [20] 陈雪花, 杨静. 祁连山东部不同退化草地土壤细菌群落与环境因子的关系研究[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(1):1-8+15.
CHEN X H, YANG J. Environmental factors and soil bacterial communities in the degraded alpine grassland of Eastern Qilian Mountains[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49(1):1-8+15.
- [21] 蒋婷婷, 岳凤凤, 聂刘旺. 谈谈光合作用中 CO₂ 固定的几个主要途径[J]. *生物学教学*, 2022, 47(7):89-91.
JIANG T T, YUE F F, NIE L W. Several main ways of carbon dioxide fixation in photosynthesis[J]. *Biology Teaching*, 2022, 47(7):89-91.
- [22] 李秋梅, 黎胜杰, 王欣丽, 等. 改变碳输入对沂蒙山区典

型次生林土壤微生物碳源代谢功能的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10):4110-4119.

LI Q M, LI S J, WANG X L, et al. Influences of changing carbon inputs on soil microbial carbon metabolism in natural secondary forests in Yimeng mountainous area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10):4110-4119.

[23] 鲁莽. 植物根系及其分泌物对微生物生长及活性的影响[J]. 化学与生物工程, 2012, 29(3):18-21.

LU M. Effects of plant roots and root exudates on growth and activity of microorganism[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2012, 29(3):18-21.

[24] 李春俭, 马玮, 张福锁. 根际对话及其对植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(1):178-183.

LI C J, MA W, ZHANG F S. Rhizosphere dialogue and its impact on plant growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2008(1):178-183.

[25] 孙磊, 陈兵林, 周治国. 麦棉套作 Bt 棉花根系分泌物对土壤速效养分及微生物的影响[J]. 棉花学报, 2007(1):18-22.

SUN L, CHEN B L, ZHOU Z G. Effects of root exudates on available soil nutrition, micro-organism quantity of bt cotton in wheat-cotton intercropping system[J]. *Cotton Science*, 2007(1):18-22.

[26] 李军, 赵彩平. 不同林分下樟子松根系分泌物对土壤环境及微生物的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),

2022, 53(3):380-385.

LI J, ZHAO C P. Effects of root exudates of pinus sylvestris under different forest species on soil environment and microorganism[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(3):380-385.

[27] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J]. *土壤通报*, 2004(2):222-229.

HU H Q, LI Y, HE J Z. Interaction of organic acids and phosphorus in soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004(2):222-229.

[28] 吴清莹, 林宇龙, 孙一航, 等. 根系分泌物对植物生长和土壤养分吸收的影响研究进展[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(11):97-104.

WU Q Y, LIN Y L, SUN Y H, et al. Research progress on effects of root exudates on plant growth and soil nutrient uptake[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(11):97-104.

[29] 张楚, 王淼, 张宇, 等. 切根与施有机肥对羊草草甸草原打草场地上生物量与土壤养分的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(1):220-228.

ZHANG C, WANG M, ZHANG Y, et al. Effects of root cutting and organic fertilizer application on aboveground biomass and soil nutrients in the mowing grassland of *leymuschinensis* meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1):220-228.

Effects of Economic Plants Planting under Forest in Mining Area on Rhizosphere Soil Biological Community Characteristics and Physicochemical Properties

Wei Zijing¹, Deng Min¹, Yu Bingtao², Lai Gongzheng¹, Shu Rongbo¹, Dai Li¹

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Mine Ecological Protection and Restoration Technology Center (Western), China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China; 2. Western (Chongqing) Geological Technology Innovation Research Institute, Chongqing, China)

Abstract: This is an essay in the field of mining environmental engineering. In order to evaluate the influence of economic plant planting in the mining area on the rhizosphere soil biological community characteristics and physicochemical properties, 7 typical forest medicine economic plants such as *Fallopia multiflora*, *Pueraria lobata*, and 7 typical forest grasses such as *Perennial ryegrass* and *Pennisetum* were selected. Taking economic plants as the research object, the experiment of planting potted economic plants under forest was carried out. By measuring plant height, leaf area, aboveground/underground biomass and soil total phosphorus, total potassium, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, organic matter, cation exchange capacity, and microbial community composition, richness, diversity and other indicators, To comprehensively study the effects of economic plant planting under forest on the characteristics and physicochemical properties of rhizosphere soil. The results showed that planting Chinese herbal plants would increase microbial diversity, while planting forages would have a certain impact on the composition of microbial communities; planting Chinese herbal understory economic plants had a significant improvement in soil fertility, and the most obvious difference was the control. The total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, and organic matter in the group increased by 300.0%, 118.5%, and 825.3%, respectively; planting forages had no obvious effect on soil fertility. The research in this paper shows that planting understory economic plants will have a certain impact on the soil biome and improve soil fertility to a certain extent.

Keywords: Mining environmental engineering; Mining area; Understory economy; Biome characteristics; Soil physicochemical properties