

胶园间作不同马铃薯品种对土壤性质及微生物多样性的影响

傅泳维^{1,2}, 张振华³, 涂敏^{2*}, 蔡海滨², 张红骥³, 于德才^{3*}

1. 海南大学生态与环境学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571101; 3. 云南农业大学植物保护学院, 云南昆明 650201

摘要: 本研究以橡胶单作为对照, 采用生物化学分析方法和高通量测序技术, 分析间作不同马铃薯品种后胶园土壤化学性质、酶活性以及微生物多样性的变化规律。研究结果表明: 胶园间作不同马铃薯相比橡胶单作能显著提高土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮和有效磷含量及土壤 β -葡萄糖苷酶、N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性, 不同品种间存在显著差异, 对土壤养分影响排序为: 剑川红>紫薯>大牛角, 对土壤酶活性影响排序为: 大牛角>剑川红>紫薯。胶园间作马铃薯显著提高土壤微生物的丰富度指数和多样性指数, 品种间不存在显著差异。但不同品种对土壤特定菌群丰度影响存在显著差异, 总体趋势是显著降低特有细菌如绿弯菌门(Chloroflexi)、脱硫菌门(Desulfobacterota)等的丰度, 显著增加特有真菌如被孢菌门(Mortierellomycota)、壶菌门(Chytridiomycota)、梳霉门(Kickxellomycota)等的丰度。LEfSe分析发现间作马铃薯富集了一些参与物质循环或具有拮抗植物病原菌的有益微生物, 大牛角、紫薯和剑川红分别富集了16、26和31种标志微生物。冗余分析和相关性分析发现, 土壤养分和酶活性与胶园土壤特定细菌、真菌门丰度有显著相关性, 养分和酶活性增加, 降低细菌门丰度, 增加真菌门丰度。综上所述, 间作马铃薯显著提高了胶园土壤养分、酶活性以及土壤微生物群落多样性, 降低特定细菌门和增加特定真菌门的丰度; 不同马铃薯品种对土壤养分和酶活性的影响存在显著差异, 可能与其富集不同有益微生物相关。本研究为胶园林下间作提供了新的思路和数据支撑。

关键词: 橡胶树; 马铃薯; 间作; 土壤化学性质; 酶活; 微生物多样性

中图分类号: S154.3; S532 **文献标志码:** A

Effect Analysis of Rubber Plantation Intercropped with Different Potato Varieties on Soil Properties and Microbial Diversity

FU Yongwei^{1,2}, ZHANG Zhenhua³, TU Min^{2*}, CAI Haibin², ZHANG Hongji³, YU Decai^{3*}

1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: The changing patterns of soil chemical properties, enzyme activity, and microbial diversity in rubber plantations intercropped with three potato varieties (Jianchuanhong or JCH, Zishu or ZS, Daniujiao or DJN) were studied in this study. The results showed that rubber plantation intercropped with potatoes could significantly increase the soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline dissolved nitrogen, effective phosphorus, soil β -glucosidase, N-acetyl β -D-glucosidase, acid phosphatase and aryl sulfatase activities, compared with rubber monoculture. There were significant differences among different potato varieties, with nutrient contents ranked as JCH>ZS>DJN, and enzyme activity ranked as DJN>JCH>ZS. Potatoes intercropped significantly increased the richness and diversity indexes of soil microorganisms, and no significant differences among potato varieties. However, there was significant difference in the influence of different potato varieties on the abundance of specific microorganisms in soil.

收稿日期 2024-01-29; 修回日期 2024-03-16

基金项目 海南省重点研发计划项目(No. ZDYF2021XDNY291)。

作者简介 傅泳维(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 种质资源与胶园生态保护。*通信作者(Corresponding author): 涂敏(TU Min), E-mail: tm_tumin@163.com; 于德才(YU Decai), E-mail: 459025316@qq.com。

The overall trend was that the abundance of specific bacterial such as Chloroflexi, Desulfobacterota were significantly decreased; the abundance of specific fungal such as Mortierellomycota, Chytridiomycota, and Kickxellomycota were significant increased. LEfSE analyses revealed that some beneficial microorganisms involved in material cycle or antagonistic to plant pathogens were enriched in the intercropped soil. DJN, ZS and JCH enriched 16, 26 and 31 marker microorganisms, respectively. Redundancy and correlation analysis showed that soil nutrient and enzyme activity were significantly correlated with the abundance of specific bacteria and fungi in the soil of rubber plantation. The increase of soil nutrients and enzyme activity decreased the abundance of specific bacterial and significantly increased the abundance of specific fungi. In conclusion, potato intercropped significantly increased soil nutrients, enzyme activity and soil microbial community diversity, but decreased the abundance of specific bacteria and increased the abundance of specific fungi. There were significant differences in the effects of different potato varieties on soil nutrients and enzyme activity, which may be related to the enrichment of different beneficial microorganisms. This study would provide a new idea and data support for the intercropping in rubber plantation.

Keywords: rubber tree; potato; intercropping; soil chemical property; enzyme activity; microbial diversity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.09.010

橡胶树是一类喜温暖和高光强, 适于土层深厚、肥沃湿润的酸性砂壤土种植的经济乔木^[1]。我国现有橡胶种植面积位列世界第四, 植胶业已成为我国热区重要产业^[2-3]。近年来研究发现长期单一种植橡胶树会对土壤环境产生一定的影响, 表现为土壤结构恶化、保水保肥能力下降、微生物多样性损失等方面^[4-5]; 而合理的胶园间作不仅能增加单位面积的经济效益, 而且还能在调节胶园土壤养分循环、增强土壤酶活性、丰富土壤微生物多样性等方面发挥作用^[6-7], 使胶园成为拥有良性循环系统的生态群落, 促进橡胶产业可持续发展。

马铃薯作为世界第三大粮食作物, 块茎中富含淀粉、蛋白质、矿质元素、维生素等多种人体所需的营养物质, 被广泛应用于食品和加工原料^[8]。海南岛橡胶种植区属热带季风气候, 土壤为酸性, 冬季温度高、光照充足, 降雨量少^[9], 特有的地理及气候优势适合马铃薯种植。本实验室前期在海南多个胶园进行了马铃薯间作, 对冬季胶园不同种植密度下马铃薯长势和产量进行分析, 并评估了马铃薯品质。冬季胶园间作马铃薯的优势在于, 冬季是橡胶树的落叶期和停割期, 橡胶树争水夺肥的能力较弱; 林间阳光照射充足, 大大减轻了对马铃薯现蕾期到开花期的遮蔽, 为马铃薯的正常生长提供了较好的光照条件; 同时冬季降雨量较少还降低了马铃薯病害的发生和流行, 研究得出海南冬季胶园林下套种马铃薯存在较大可行性^[10]。

目前, 马铃薯间作主要作物为玉米、豆科、燕麦、向日葵等^[11-14]。研究发现, 间作马铃薯可改善土壤微生物区系、土壤养分及酶活性, 如马

铃薯-豆科间作系统中, 可以发现间作后土壤 pH 和阳离子交换量 (CEC 值) 显著升高, 以及土壤 P、N 和 C 浓度较高^[15]; 马铃薯-玉米间作系统发现可以显著提高脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性^[16], 还可以改善细菌群落结构, 提高土壤细菌的多样性水平^[17]; 真菌群落在门、纲和目分类水平上发生改变, 表现为有害的致病真菌菌属消失或比例下降, 出现部分有益功能真菌^[18]。但目前关于胶园间作马铃薯后对土壤性质和微生物等方面的影响尚未明确, 鉴于此, 本研究以橡胶单作和间作不同马铃薯品种 1 年后的胶园为研究对象, 通过传统生物化学方法和高通量测序技术, 分析橡胶树根际土壤化学性质、酶活性和微生物群落多样性, 探究间作模式下根际土壤性质的变化规律, 为胶园间作马铃薯模式提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试马铃薯品种共 3 个, 为适应海南气候的马铃薯品种大牛角 (DJN)、紫薯 (ZS) 和剑川红 (JCH), 具体信息见表 1, 由云南农业大学植物保护学院提供。

1.2 方法

1.2.1 实验设计 实验点位于海南省五指山市毛阳镇毛阳农场 (18.9426°N, 10.95145°E), 橡胶树品种为 PR107, 种植于 1982 年, 橡胶树行距 7 m, 株距 3 m。整个小区长 133.4 m, 宽 100 m, 小区总面积 13 340 m², 划分为 4 块样地, 每块样地面积 3335 m², 随机选择其中 1 块地为橡胶树单作地, 另外 3 块地作为橡胶树马铃薯间作地。马

表 1 供试马铃薯品种名称及特征
Tab. 1 Varieties and characteristics of tested potato varieties

品种 Variety	薯形 Tuber shape	大小 Size	颜色 Tuber color	薯皮光滑度 Potato skin smoothness	来源 Source
剑川红	椭圆微弯	中	浅红	光滑	云南大理白族自治州剑川县
紫薯	圆形	小	紫	中	云南普洱市澜沧拉祜族自治县
大牛角	椭圆	大	浅紫	中	云南迪庆藏族自治州维西傈僳族自治县

铃薯种植时间 2021 年 12 月 15 日,收获时间 2022 年 4 月 30 日。胶园马铃薯间作和管理方法参考王瑞仙等^[10]适当改进,马铃薯行距 30 cm,株距 25 cm,通过起垄、点播方式种植马铃薯。

1.2.2 土壤样品采集 马铃薯收获后,分别从每块样地中按照“Z”型选择 15 个土壤采集点,用直径为 5 cm 的取土钻对 0~20 cm 土层进行取样,每 3 个点的土样混合为 1 个正式样品,每块样地得到 5 个样品。橡胶间作马铃薯土壤样品共 15 份,依照间作马铃薯品种的不同,分别命名为 DJN 1~5、ZS 1~5、JCH 1~5;橡胶单作土壤样品 5 份,标记为 CK 1~5。将土样使用 10 目土壤筛过筛 2 次,得到的每份样品平均分成 3 份,其中 2 份迅速带回实验室分别保存在-80 ℃用于土壤微生物测序及土壤酶活性分析,一份自然风干、研磨过筛后用于土壤化学性质测定。

1.2.3 土壤化学性质、酶活性及微生物高通量测序 参照常規土壤农化分析方法^[19]测定 8 个土壤化学性质指标:土壤 pH、有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)。

采用苏州科铭试剂盒通过微量法测定土壤 β-葡萄糖苷酶(S-β-GC)、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶(S-NAG)、酸性磷酸酶(S-ACP)和芳基硫酸酯酶(S-ASF)。

分别利用细菌通用引物 515F(5'-GTGCCA

GCMGCCGCGG-3')、806R(5'-GGACTACHVG GGTWTCTAAT-3')和真菌通用引物 ITS1F(5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3')、ITS2R(5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3')扩增土壤中细菌 16S rRNA 基因区域和真菌 ITS 基因区域。委托上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行预处理,采用 SPSS 27 软件进行差异显著性检验,利用美吉生物 i-sanger 云平台对测序结果进行分析绘图。

2 结果与分析

2.1 胶园间作不同马铃薯品种土壤化学性质比较

由表 2 可知,与 CK 相比,胶园间作 JCH 马铃薯显著降低了土壤 pH,显著增加土壤全磷含量($P<0.05$),胶园间作均显著增加土壤有机质、有效磷含量($P<0.05$)。另外,胶园间作 JCH 和 ZS 显著增加土壤碱解氮和全氮含量,胶园间作 DJN 和 ZS 显著增加土壤全钾含量,说明间作马铃薯可以提高胶园土壤养分含量。但间作不同马铃薯品种间表现出一定的差异,其中,间作 JCH 土壤有机质显著高于间作 DJN 和 ZS 的土壤,其土壤的全氮和全磷显著高于间作 DJN 土壤($P<0.05$)。

表 2 胶园土壤化学性质比较
Tab. 2 Comparison of soilchemical properties in rubber plantation

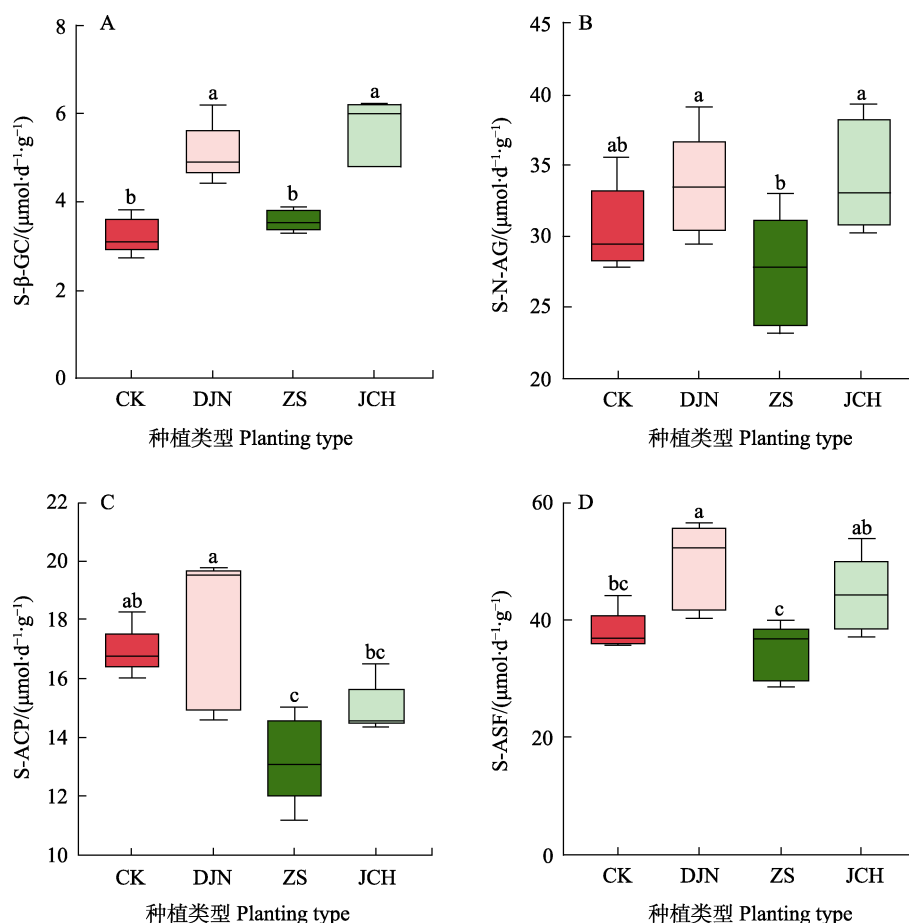
种植类型 Planting type	pH	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)
CK	5.73±0.42 ^a	24.01±1.59 ^c	86.30±2.49 ^b	0.49±0.09 ^b	40.91±3.13 ^a	0.84±0.02 ^c	0.14±0.01 ^b	16.74±1.36 ^b
DJN	5.49±0.07 ^{ab}	33.15±2.59 ^b	114.75±4.96 ^{ab}	3.43±1.39 ^a	24.07±8.07 ^a	1.04±0.19 ^{bc}	0.15±0.04 ^b	21.34±0.58 ^a
ZS	5.37±0.24 ^{ab}	32.22±2.16 ^b	137.05±23.00 ^a	3.23±0.66 ^a	41.41±6.45 ^a	1.10±0.08 ^{ab}	0.20±0.01 ^{ab}	20.83±0.94 ^a
JCH	5.12±0.06 ^b	41.27±1.25 ^a	140.20±12.57 ^a	2.80±1.05 ^a	44.51±9.63 ^a	1.29±0.03 ^a	0.23±0.01 ^a	18.08±1.79 ^{ab}

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 胶园间作不同马铃薯品种土壤酶活性比较

根据间作不同马铃薯品种对胶园土壤酶活性结果可知(图 1), 间作 DJH、JCH 马铃薯相比 CK 显著增加土壤 S- β -GC、S-NAG 的活性($P < 0.05$)。

ZS 的土壤 S-ACP 活性显著降低($P < 0.05$)。整体而言, 胶园间作后土壤酶活性表现较高的品种为 DJN 和 JCH, 而间作 ZS 品种的土壤酶活相对较低。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 胶园土壤酶活性比较

Fig. 1 Comparison on soil enzyme activities in rubber plantation

2.3 胶园间作不同马铃薯品种土壤微生物多样性分析

2.3.1 间作不同马铃薯对土壤微生物多样性的影响 本研究共选择了 4 种 α 多样性指数, 代表物种多样性的 Shannon、Simpson 指数和代表物种丰富度的 ACE、Chao1 指数。胶园土壤细菌多样性指数分析结果(表 3)显示, 间作马铃薯后均显著提高了土壤细菌的 ACE、Chao1 指数($P < 0.05$), 但 3 个马铃薯品种间的各类细菌多样性指数差异不显著。对于胶园土壤真菌多样性指数分析发现, 间作马铃薯相比橡胶单作均显著提高了土壤中真菌的 ACE、Chao1、Shannon 指数, 降低了 Simpson

指数($P < 0.05$), 3 个马铃薯品种间的各类真菌多样性指数差异不显著。结果表明, 在胶园间作马铃薯可以显著提高土壤真菌和细菌的多样性丰富和丰富度, 但间作不同马铃薯品种对土壤多样性的影响差异不显著。

2.3.2 间作不同马铃薯对土壤微生物群落结构的影响 对间作不同品种马铃薯的胶园土壤中细菌和真菌的 OTU 数量进行了分析(图 2)。细菌群落中, 间作 DJN、ZS 和 JCH 以及 CK 的总 OTU 分别为 4058、4192、4065、3665, 间作马铃薯相比橡胶单作分别增加 10.72%、14.37%、10.91%。在真菌群落中, 间作 DJN、ZS 和 JCH 以及 CK

表 3 胶园土壤微生物 α 多样性指数比较
Tab. 3 Comparison on alpha diversity indices of soil microorganism in rubber plantation

类型 Type	种植类型 Planting type	ACE 指数 ACE index	Chao1 指数 Chao1 index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index
细菌	CK	2334.94±130.87 ^b	2348.31±136.99 ^b	5.59±0.06 ^a	0.145±0.01 ^a
	DJN	3090.30±176.56 ^a	2986.47±126.81 ^a	5.86±0.06 ^a	0.137±0.01 ^a
	ZS	2977.65±133.66 ^a	2973.52±144.05 ^a	5.85±0.13 ^a	0.151±0.01 ^a
	JCH	2944.75±90.81 ^a	2908.19±90.51 ^a	5.93±0.08 ^a	0.121±0.01 ^a
真菌	CK	286.81±39.47 ^b	278.14±46.05 ^b	1.97±0.58 ^b	0.43±0.14 ^a
	DJN	631.28±21.62 ^a	636.05±23.33 ^a	4.18±0.36 ^a	0.07±0.03 ^b
	ZS	709.43±39.05 ^a	716.36±37.08 ^a	3.75±0.32 ^a	0.14±0.05 ^b
	JCH	709.28±55.92 ^a	728.13±55.98 ^a	4.05±0.46 ^a	0.10±0.06 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

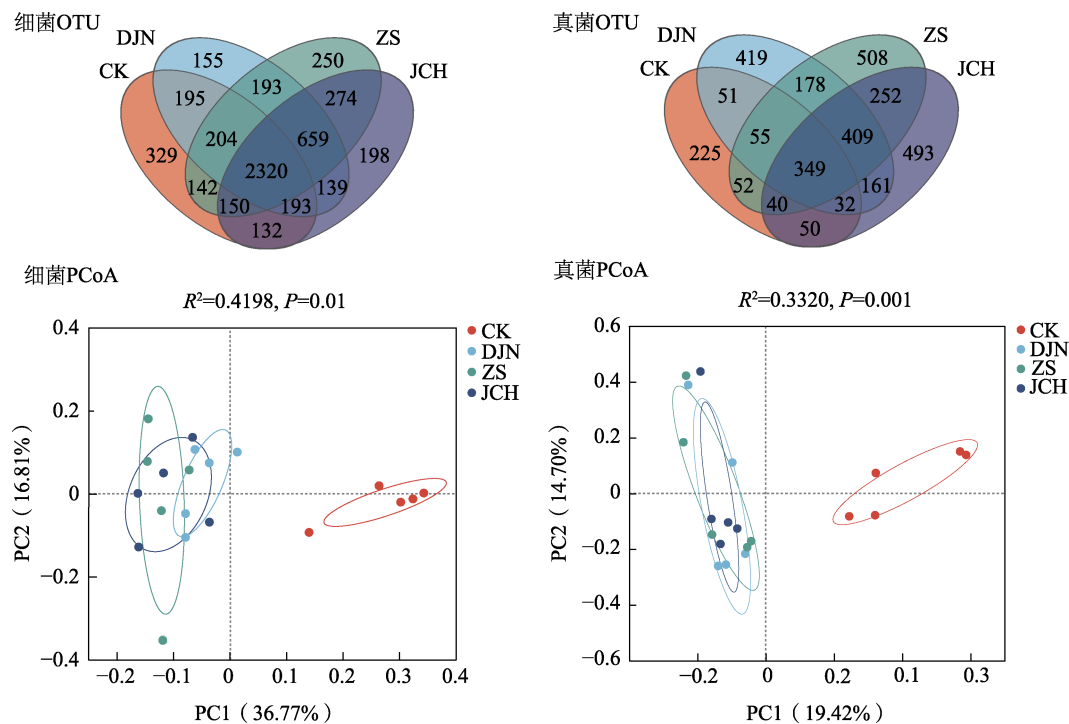


图 2 胶园土壤微生物群落结构差异
Fig. 2 Structure differences of soil microbial communities in rubber plantation

的总 OTU 分别为 1654、1843、1786、854，间作相比橡胶单作分别增加 93.67%、115.80%、109.13%。表明胶园间作马铃薯会增加细菌和真菌总 OTU 数量，增加特有真菌 OTU 数量，降低特有细菌的 OTU 数量。

细菌 PCoA 分析的第 1 主成分和第 2 主成分分别解释了 36.77%和 16.81%的群落变异，真菌 PCoA 分析的第 1 主成分和第 2 主成分分别解释了 19.42%和 14.70%的群落变异。间作样品与单作样品存在明显分离，表明间作马铃薯后，土壤中细菌和真菌的组成与橡胶单作的土壤差异较

大，且间作马铃薯对土壤中细菌群落 ($R^2=0.4198$, $P=0.01$) 的影响程度要大于真菌群落 ($R^2=0.3320$, $P=0.001$)。同时，不同品种马铃薯样品间出现重叠和聚集，表明胶园间作不同马铃薯品种后土壤微生物组成具有较大的相似性。

2.3.3 间作不同马铃薯对土壤微生物组成的影响

根据门水平的胶园细菌群落 TOP10 组成 (图 3) 可知，间作并未改变单作胶园的优势细菌菌门种类，放线菌门 (Actinobacteriota)、变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteriota)，平均相对丰度总占比为 54.55%~68.41%。但间作

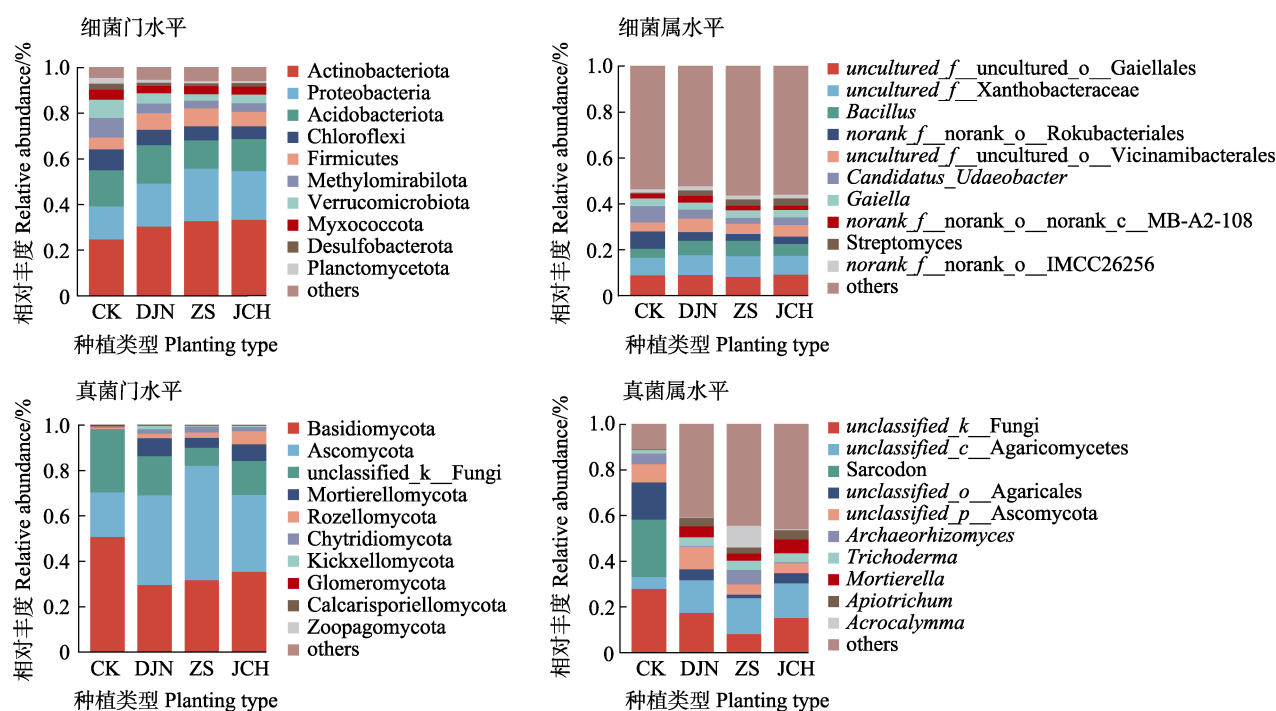


图 3 胶园土壤微生物群落组成差异
Fig. 3 Composition differences of soil microbial community in rubber plantations

马铃薯后显著降低了绿弯菌门 (*Chloroflexi*)、脱硫菌门 (*Desulfobacterota*) 以及 *Methyloirabilota* 的相对丰度 ($P<0.05$)。间作 DJN 分别降低 26.24%、51.82%、51.01%；间作 ZS 分别降低 33.54%、61.06%、50.33%；间作 JCH 分别降低 37.68%、56.65%、41.48%。在属水平上，间作马铃薯后显著增加了土壤中链霉菌属 (*Streptomyces*) 相对丰度 ($P<0.05$)，其中间作 DJN、ZS 和 JCH 分别提高 295.66%、368.55%、417.76%。

基于门水平的胶园真菌群落 TOP10 组成可知，胶园优势真菌菌门为担子菌门 (*Basidiomycota*)、子囊菌门 (*Ascomycota*)，平均相对丰度总占比为 68.54%~81.99%。间作马铃薯后，并未改变优势真菌菌门的种类，但显著提高了被孢菌门 (*Mortierellomycota*)、壶菌门 (*Chytridiomycota*)、梳霉门 (*Kickxellomycota*)、罗兹菌门 (*Rozellomycota*) 的相对丰度 ($P<0.05$)。间作 DJN 分别提高 14049.58%、411.46%、193.06%、831.51%；间作 ZS 分别提高 7587.86%、503.11%、253.91%、162.65%；间作 JCH 分别提高 12755.19%、375.92%、7697.66%、204.50%。在属水平上，间作 3 种马铃薯后抑制了肉齿菌属 (*Sarcodon*) 活性，且显著增加了被孢霉菌属 (*Mortierella*) 以及 *Apiotrichum*、*Acrocalymma* 的

相对丰度 ($P<0.05$)，间作 DJN 分别提高 13229.63%、1391.77%、910.55%；间作 ZS 分别提高 8476.17%、996.67%、77229.54%；间作 JCH 分别提高 166625.76%、1417.84%、2924.35%。

进一步通过 LEfSe 分析 (图 4) 筛选间作不同品种马铃薯下的标志细菌和真菌 ($LDA>3$, $P<0.05$)。橡胶单作的标志细菌多为未鉴定细菌，并未检测到标志真菌；间作 DJN 土壤检测出 1 种未鉴定标志细菌以及青霉菌 (*Penicillium*)、*Verruconis* 等 15 种标志真菌；间作 ZS 土壤共测出慢生根瘤菌 (*Bradyrhizobium*)、鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*) 等 9 种标志细菌和沙蜥属 (*Saitozyma*) 以及 *Acrocalymma* 等 17 种标志真菌；间作 JCH 土壤主要检测出链霉菌属 (*Streptomyces*)、红球属 (*Rhodococcus*) 等 8 种标志细菌以及被孢霉属 (*Mortierella*)、地星属 (*Geastrum*) 等 23 种标志真菌。

2.4 土壤性质与微生物相关性分析

图 5 冗余分析 (RDA) 表明，土壤细菌的 RDA 第一轴和第二轴的特征值分别为 44.38% 和 17.95%，可以解释约 62.33% 的土壤细菌群落总变异，其中土壤 pH、有机质、碱解氮、全氮、全磷、土壤 β -葡萄糖苷酶是细菌群落变异的 6 个关键影响因子 ($P<0.05$)。土壤真菌 RDA 的第一个轴值

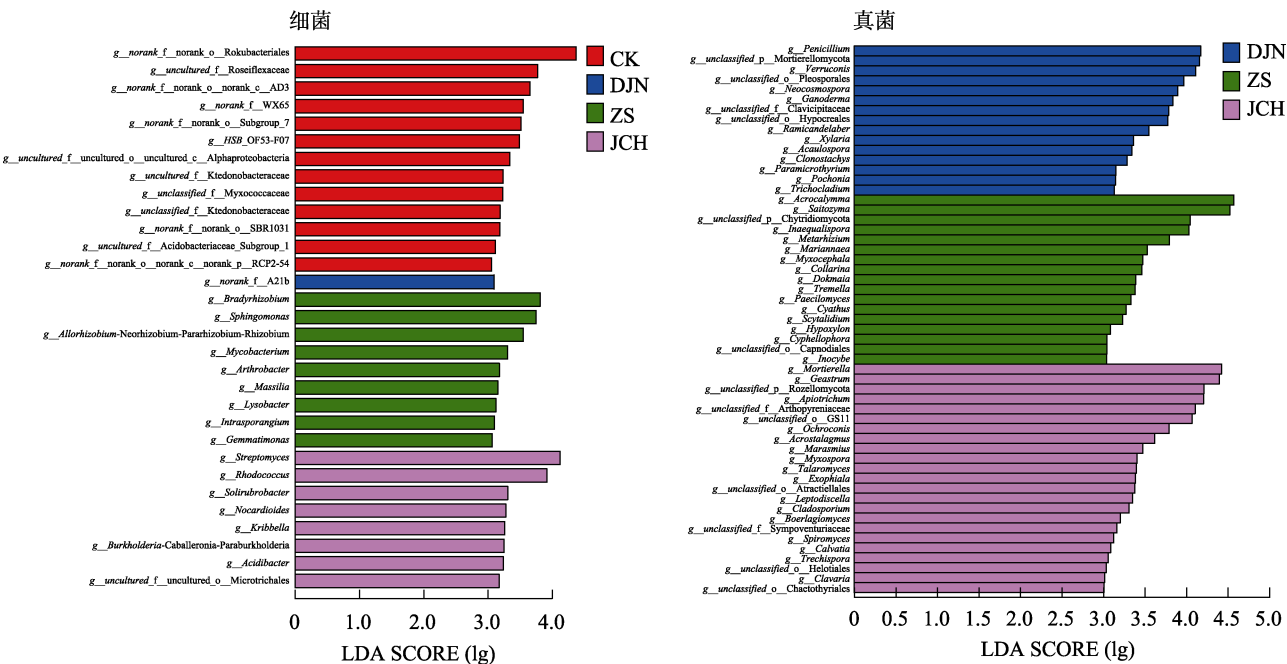


图 4 胶园土壤微生物的 LefSe 分析

Fig. 4 LefSe analysis of soil microorganisms in rubber plantation

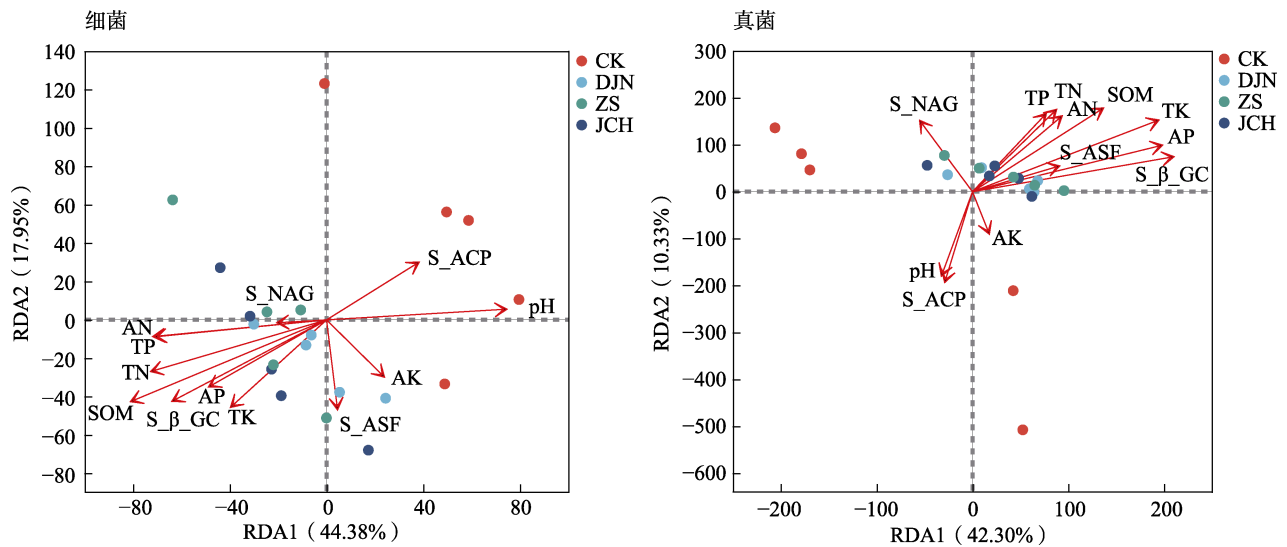


图 5 土壤微生物群落结构与土壤性质的冗余分析 (RDA)

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of soil microbial community structure and soil properties

为 42.30%，第二个轴值为 10.33%，可以解释约 52.63% 的土壤真菌群落变异，其中土壤有效磷、全钾、土壤 β -葡萄糖苷酶是真菌群落变异的 3 个关键影响因子 ($P<0.05$)。

进一步分析土壤细菌和真菌群落中门水平前 10 菌群和土壤性质的相关性热图也支持了冗余分析的结果 (图 6)。结果表明，细菌门水平上，pH 与酸杆菌门、绿弯菌门、粘菌门、Mthylomirabilota 呈显著正相关。全氮、全磷、有机质、碱解氮、土壤 β -葡萄糖苷酶与浮霉菌门、绿弯菌门、酸杆

菌门呈显著负相关。Methylomirabilota 与全氮、全钾、碱解氮、有效磷、有机质、土壤 β -葡萄糖苷酶呈显著负相关。Verrucomicrobiota 与有机质、全磷、全钾、有效磷和土壤 β -葡萄糖苷酶呈显著负相关。粘菌门与全氮、碱解氮、有机质呈显著负相关。脱硫菌门与有机质、有效磷和土壤 β -葡萄糖苷酶呈显著负相关。浮霉菌门与全钾呈显著负相关。在真菌门水平上，罗兹菌门与全磷呈现显著正相关；壶菌门与全钾呈显著正相关；罗兹菌门和被孢霉菌门与有机质呈显著正相关。

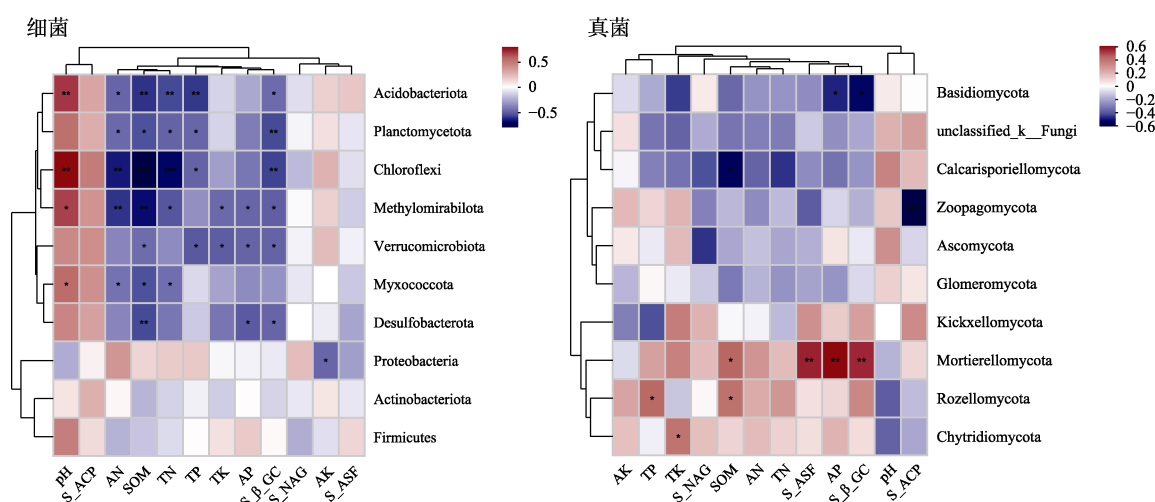


图 6 优势菌门与土壤性质的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between dominant phyla and soil properties

3 讨论

间作已被证实可以改善土壤养分, 提高土壤酶活性^[20]。ZHOU 等^[21]通过研究烤烟间作时, 发现间作相比单作显著提高土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾、脲酶活性和蔗糖酶活性, 丁怡飞等^[22]研究发现油茶地间作鼠茅草可以显著提高有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷与速效钾, 还显著提高土壤脲酶、酸性磷酸酶与过氧化氢酶的活性。本研究结果与他们的研究基本一致, 胶园间作不同马铃薯品种相比橡胶单作显著增加土壤养分含量及酶活性, 可能是由于间作马铃薯土壤的凋落物和根系分泌物等有机物的数量增加所导致^[23], 还可能与试验中施有机肥有关, 能够促进释放养分, 增强土壤酶活性^[24], 不同马铃薯品种间土壤性质与酶活性存在显著差异的原因可能与其自身根系分泌物有关^[25-26]。

间作能够影响微生物多样性与组成^[27]。本研究结果表明, 间作马铃薯显著提高了胶园根际土壤微生物丰富度指数和多样性, 变形菌门、放线菌门、酸杆菌门、子囊菌门和担子菌门为主要的优势菌门, 同前人研究结果一致^[28]。但间作马铃薯后土壤细菌特有 OTU 降低和真菌特有 OTU 增加, 导致绿弯菌门、脱硫菌门以及 Methyloirabilota 特定细菌丰度受到抑制, 而被孢菌门、壶菌门、梳霉门、罗兹菌门特定真菌丰度得到提升, 上述微生物在土壤生态系统中发挥重要作用^[29-31]。导致这种变化的原因可能是间作条件下增加的土壤有机质和养分可能促进了真菌与马铃薯根系之间的共生, 这种共生关系有助于

增加了真菌的多样性和丰度^[32], 真菌和细菌间的相互作用或者根系释放的分泌物可能影响土壤微生物群落丰度^[33-35]。同时, 间作不同马铃薯品种对土壤性质影响有显著差异, 可能与其对功能性细菌和真菌的特定菌群富集^[21]能力相关, 尤其是能参与物质循环和拮抗植物病原菌的有益微生物^[36-37]。

4 结论

综上所述, 胶园间作马铃薯显著降低了土壤 pH, 提高土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷含量, 改善土壤养分状况。除 ZS 外, 还显著提高土壤 β -葡萄糖苷酶、N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和芳基硫酸酯酶, 不同品种间存在显著差异。同时, 胶园间作马铃薯显著提升土壤微生物的丰富度和多样性, 并富集一些参与物质循环和拮抗植物病原菌的有益微生物, 不同品种富集能力也存在显著差异。本研究探讨了胶园林下间作对土壤生态的影响, 由于选取的样本为马铃薯一个生育期后的土壤, 为数据分析带来一定的影响, 但与相关学者的研究结果较为一致, 可为胶园林下间作生态研究提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 原慧芳, 黄菁, 岳海, 田耀华. 保水处理对橡胶树叶片生理特性及胶乳产量的影响初探[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2097-2104.
- YUAN H F, HUANG J, YUE H, TIAN Y H. Effects of wa-

- ter-retention treatment on the physiological characteristics and latex yield of *Hevea brasiliensis*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(11): 2097-2104. (in Chinese)
- [2] 李达, 张绍文. 中国橡胶主产区橡胶种植规模发展动态研究[J]. 林业经济问题, 2021, 41(5): 472-480.
LI D, ZHANG S W. Research on the development trend of rubber planting scale in China's main rubber producing areas[J]. Issues of Forestry Economics, 2021, 41(5): 472-480. (in Chinese)
- [3] 江军, 张慧坚. 基于区域竞争力的中国天然橡胶产业政策研究[J]. 热带农业科学, 2020, 40(12): 126-132.
JIANG J, ZHANG H J. Analysis of natural rubber industry policies in China based on the natural rubber regional competitive capability[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(12): 126-132. (in Chinese)
- [4] CHEN C F, LIU W J, WU J E, JIANG X J, ZHU X A. Can intercropping with the cash crop help improve the soil physico-chemical properties of rubber plantations[J]. Geoderma, 2019, 335: 149-160.
- [5] MONKAI J, PURAHONG W, NAWAZ A, WUBET T, GOLDBERG S D, MORTIMER P E, XU J C, HARRISON R D. Conversion of rainforest to rubber plantations impacts the rhizosphere soil mycobiome and alters soil biological activity[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(17): 3411-3426.
- [6] LI J, ZHOU L, LIN W. Calla lily intercropping in rubber tree plantations changes the nutrient content, microbial abundance, and enzyme activity of both rhizosphere and non-rhizosphere soil and calla lily growth[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 132: 344-351.
- [7] LIU C G, JINY Q, HU Y N, TANG J W, XIONG Q L, XU M X, FARKHANDA B B, KINGSLY C B. Drivers of soil bacterial community structure and diversity in tropical agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 278: 24-34.
- [8] 庞泽, 田国奎, 王海艳, 李凤云, 潘阳, 丁凯鑫, 李明雪, 王立春. 我国马铃薯产业发展现状及展望[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 148-154.
PANG Z, TIAN G K, WANG H Y, LI F Y, PAN Y, DING K X, LI M X, WANG L C. Present situation and prospect of potato industry in China[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(7): 148-154. (in Chinese)
- [9] LAN G, LI Y W, WU Z X, XIE G S. Soil bacterial diversity impacted by conversion of secondary forest to rubber or eucalyptus plantations: a case study of Hainan Island, South China[J]. Forest Science, 2017, 63(1): 87-93.
- [10] 王瑞仙, 张红骥, 蔡海滨, 宋双伟, 李晓波, 李海建, 徐雅, 涂敏, 于德才. 海南省冬季橡胶林下马铃薯套种效果及种植密度筛选[J]. 热带农业科学, 2018, 38(4): 1-5.
WANG R X, ZHANG H J, CAI H B, SONG S W, LI X B, LI H J, XU Y, TU M, YU D C. Intercropping of potatoes in rubber plantations and their planting densities in Hainan province[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(4): 1-5. (in Chinese)
- [11] 王顶, 伊文博, 李欢, 陈林康, 赵平, 龙光强. 玉米间作和施氮对土壤微生物代谢功能多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 793-800.
WANG D, YI W B, LI H, CHEN L K, ZHAO P, LONG G Q. Effects of intercropping and nitrogen application on soil microbial metabolic functional diversity in maize cropping soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 793-800. (in Chinese)
- [12] SHADRA O N, NANCY N K, CHARLES K K G, HARUN I G, EIMAR S G, MONICA P. Optimizing soil nitrogen balance in a potato cropping system through legume intercropping[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117: 43-59.
- [13] 彭良斌, 周杰, 马怀英, 臧华栋, 靳建刚, 薛志强, 杨亚东, 曾昭海. 燕麦与马铃薯带状间作产量优势及土地利用效率[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(3): 38-49.
PENG L B, ZHOU J, MA H Y, ZANG H D, JIN J G, XUE Z Q, YANG Y D, ZENG Z H. Yield advantage and land utilization of oats and potato strip intercropping system[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(3): 38-49. (in Chinese)
- [14] 董宛麟, 张立桢, 于洋, 苟芳, 赵沛义, 妥德宝, 潘学标. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 127-133.
DONG W L, ZHANG L Z, YU Y, GOU F, ZHAO P Y, TUO D B, PAN X B. Productivity and water use in sunflower intercropped with potato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 127-133. (in Chinese)
- [15] HARUN I G, CHARLES K K, NANCY N K, SOLOMON K, SHADRA N, ELMAR S G. Potato-legume intercropping on a sloping terrain and its effects on soil physico-chemical properties[J]. Plant and Soil, 2019: 438(1/2): 447-460.
- [16] 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀. 玉米间作马铃薯对根际土壤酶活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 123-132.
LU M, ZHAO J X, LI Y M, WANG Z L, FAN M P. Effects of intercropping of maize and potato on rhizosphere soil enzyme activity and aggregate stability[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 123-132. (in Chinese)
- [17] 王娜, 陆姗姗, 马琨, 刘萍. 宁夏南部山区马铃薯不同间作模式对根际土壤细菌多样性的影响[J]. 干旱区资源与

- 环境, 2016, 30(12): 193-198.
- WANG N, LU S S, MA K, LIU P. The genetic diversity of rhizosphere soil bacteria under different intercropping patterns for potato in southern mountainous area of Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(12): 193-198. (in Chinese)
- [18] 张晓岗, 刘萍, 马琨, 王娜. 间作栽培对宁夏南部山区马铃薯根际土壤真菌菌群结构的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(12): 1875-1882.
- ZHANG X G, LIU P, MA K, WANG N. Effect of potato intercropping on fungal community composition of rhizosphere soil in southern mountainous area of Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(12): 1875-1882. (in Chinese)
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [20] CURTRIGHT A J, TIEMANN L K. Intercropping increases soil extracellular enzyme activity: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 319(2): 107489.
- [21] ZHOU M Q, SUN C L, DAI B, HE Y, ZHONG J. Intercropping system modulated soil-microbe interactions that enhanced the growth and quality of flue-cured tobacco by improving rhizospheric soil nutrients, microbial structure, and enzymatic activities[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1233464.
- [22] 丁怡飞, 曹永庆, 姚小华, 傅松玲, 张平安, 楼新良. 鼠茅草间作对油茶林地土壤养分及酶活性的影响[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(2): 170-175.
- DING Y F, CAO Y Q, YAO X H, FU S L, ZHANG P A, LOU X L. Effects of intercropping with *Vulpia myuros* on soil nutrients and enzyme activity of *Camellia oleifera* forest[J]. *Forest Research*, 2018, 31(2): 170-175. (in Chinese)
- [23] 王顶, 李欢, 伊文博, 陈林康, 赵平, 龙光强. 马铃薯间作对土壤微生物代谢功能多样性的促进效应及其氮素调控作用[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(7): 1164-1173.
- WANG D, LI H, YI W B, CHEN L K, ZHAO P, LONG G Q. Promoting effect of potato intercropping on functional diversity of soil microbial metabolism and nitrogen regulation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(7): 1164-1173. (in Chinese)
- [24] ZHANG J F, SAYER E J, ZHOU J G, LI Y W, LI Y X, LI Z A, WANG F M. Long-term fertilization modifies the mineralization of soil organic matter in response to added substrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149341.
- [25] 赵卫松, 郭庆港, 李社增, 鹿秀云, 勾建军, 马平. 土壤添加西兰花残体对棉花根际土壤酶活性的影响及其与碳代谢特征的关系[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(11): 2092-2105.
- ZHAO W S, GUO Q G, LI S Z, LU X Y, GOU J J, MA P. Effect of broccoli residues on enzyme activity of cotton rhizosphere soil and relationships between enzyme activity and carbon metabolism characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(11): 2092-2105. (in Chinese)
- [26] 李增亮, 任晶, 梁鑫宇, 张国辉, 潘凯. 七种植物秸秆对连作番茄苗生长及土壤酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2019(20): 17-24.
- LI Z L, REN J, LIANG X Y, ZHANG G H, PAN K. Effect of seven plant straws on the growth of continuous cropping tomato and the activity of soil enzyme[J]. *Northern Horticulture*, 2019(20): 17-24. (in Chinese)
- [27] 李巧玲, 肖忠, 任明波, 韩风, 胡开治. 间作不同作物对柃子根际土壤微生态的影响[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(10): 3588-3602.
- LI Q L, XIAO Z, REN M B, HAN F, HU K Z. Effect of *Gardenia jasminoides* ellis with different intercropping crops on soil microecology[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(10): 3588-3602. (in Chinese)
- [28] 吴希慧, 王蕊, 高长青, 高胜, 杜兰兰, KHAN A, BARMON M, 郭胜利. 土地利用驱动的土壤性状变化影响微生物群落结构和功能[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 7989-8002.
- WU X H, WANG R, GAO C Q, GAO S, DU L L, KHAN A, BARON M, GUO S L. Variations of soil properties effect on microbial community structure and functional structure under land uses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 7989-8002. (in Chinese)
- [29] LIU Y, SHEN J P, ZHANG C H, CHEN Z. Impact of rubber-based land use changes on soil properties and carbon pools: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2023, 227: 4357689.
- [30] CUARTERO J, PASCUAL J A, VIVOJ M, ZBOLAT O, SANCHEZ-NAVARRO V, EGEA-CONTINER M, ZORNOZR R, MENA M M, GARCIA E, ROS M. A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 328: 107856.
- [31] DAI Z M, SU W Q, CHEN H H, ALBERT B, ZHAO H C, YU M J, YU L, PHILIP C, CHRISTOPHER W, SCOTT X, XU J M. Longterm nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agroecosystems across the globe[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3452-3461.
- [32] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 俞慎. 丛枝菌根真菌参与下植物: 土壤系统的养分交流及调控[J]. *生态学报*, 2016, 36(14): 4233-4243.

- WEI L L, LU C Y, DING J, YU S. Functional relationships between arbuscular mycorrhizal symbionts and nutrient dynamics in plant-soil-microbe system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(14): 4233-4243. (in Chinese)
- [33] LI M J, SONG Z, LI Z B, YE R Q, ZHANG P D, DING C J, XIE J B, CHEN Y L, GUO H. Populus root exudates are associated with rhizosphere microbial communities and symbiotic patterns[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 1042944.
- [34] NAVARRETE A, VENTURINI A M, MEYER K, KLEIN A, TIEDJE J, BOHANNAN B, NÜSSLEIN K, TSAI S, RODRIGUES J. Differential response of acidobacteria subgroups to forest-to-pasture conversion and their biogeographic patterns in the western brazilian amazon[J]. *Frontiers in microbiology*, 2015, 6: 1443.
- [35] YANG Y, DOU Y X, WANG B R, XU Z J, WANG Y Q, AN S S, CHANG SCOTT X. Deciphering factors driving soil microbial life-history strategies in restored grasslands[J]. *IMeta*, 2022, 2(1): e66-e66.
- [36] 袁秉琛, 王燕茹, 孙郁婷, 李承臻, 虞道耿. 荔枝园分别间作距瓣豆与广东金钱草对土壤养分、微生物群落结构及多样性影响研究[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(7): 1411-1419.
- YUAN B C, WANG Y R, SUN Y T, LI C Z, YU D G. Effect of intercropping *centrosema pubescens* or *gronastyracifolia* of litchi orchard on the soil nutrients, microbial community structure and diversity[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(7): 1411-1419. (in Chinese)
- [37] GAO J X, XIE H. Daylily intercropping: effects on soil nutrients, enzyme activities, and microbial community structure[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1107690.