

热带砖红壤果园长期生草对土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响

赵秋芳^{1,2,3}, 魏长宾^{1,2,3*}, 马海洋^{1,2,4*}, 马智玲^{1,2,3}, 严程明^{1,2,4}, 洗皑敏^{1,2,3},
汤昕明^{1,2,3}, 时 晶^{1,2,3}, 曹鲁丹^{1,2,3}

1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091; 2. 海南省热带作物营养重点实验室, 广东湛江 524091;
3. 农业农村部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524091; 4. 广东省旱作节水农业工程技术研究中心, 广东湛江 524091

摘 要: 研究热带砖红壤果园长期生草对土壤养分、酶活性及土壤微生物多样性的影响, 为热带砖红壤肥力提升和土壤改良提供理论依据和技术支撑。试验以清耕为对照, 设置热研 2 号柱花草、Ubon 柱花草和自然生草 3 个处理, 采集 0~20、20~40 cm 土壤样品, 测定土壤有机质、pH、氮、磷、钾及其相关酶活性等指标, 并利用高通量测序平台对土壤细菌和真菌群落进行检测, 分析果园长期生草对砖红壤土壤理化性质、酶活性及微生物多样性的影响。结果表明: 5 a 果园长期生草显著提高了砖红壤有机质、全氮、碱解氮的含量, 且热研 2 号、Ubon 柱花草处理的有机质、全氮、碱解氮含量高于自然生草。自然生草显著提高了 0~20 cm 土层全磷含量, 而热研 2 号、Ubon 柱花草显著提高了 20~40 cm 土层土壤全磷含量。果园长期生草均显著增加了土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性, 对过氧化氢酶活性影响不显著, 且热研 2 号、Ubon 柱花草处理的土壤脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶活性高于自然生草。相关性分析表明, 土壤酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性均与土壤有机质、全氮、碱解氮呈极显著正相关, 土壤酸性磷酸酶活性与土壤 pH 呈显著正相关, 过氧化氢酶活性仅与有机质、碱解氮呈显著相关。果园长期生草特别是 Ubon 柱花草处理增加了 20~40 cm 土层细菌 OTUs 数量, 生草改变了土壤细菌和真菌群落组成结构。其中酸杆菌门、绿弯菌门、疣微菌门、变形菌门为细菌的优势菌门, 在 0~20 cm 土层, 生草增加了酸杆菌门、疣微菌门、变形菌门的相对丰度, 降低了绿弯菌门的相对丰度。真菌的优势菌门是子囊菌门、担子菌门、毛霉菌门。生草降低了子囊菌门的相对丰度, 提高了毛霉菌门的相对丰度。土壤环境因子与微生物群落的相关性分析表明, 土壤主要环境因子与微生物群落呈显著相关, 土壤酸性磷酸酶、有机质、脲酶、pH 是细菌菌落结构改变的主要环境贡献因子, 有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶是土壤真菌群落结构改变的主要环境贡献因子。综上, 果园长期生草特别是柱花草显著提高了砖红壤的有机质、全氮、碱解氮含量, 增加土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性, 同时改变了土壤细菌和真菌的群落结构和多样性, 起到提高土壤肥力, 改善土壤微生态环境的作用。

关键词: 果园生草; 柱花草; 热带砖红壤; 土壤养分; 土壤酶活性; 微生物群落结构

中图分类号: S156.6 文献标志码: A

Effects of Long-term Grass Cultivation on Soil Nutrients, Enzyme Activities and Microbial Diversity in Tropical Latosol Orchards

ZHAO Qiufang^{1,2,3}, WEI Changbin^{1,2,3*}, MA Haiyang^{1,2,4*}, MA Zhiling^{1,2,3}, YAN Chengming^{1,2,4},
XIAN Aimin^{1,2,3}, TANG Xinming^{1,2,3}, SHI Jing^{1,2,3}, CAO Ludan^{1,2,3}

1. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. Hainan Key Laboratory of Tropical Crops Nutrition, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 3. Key Laboratory of Tropical

收稿日期 2025-04-24; 接受日期 2025-08-05

基金项目 海南省自然科学基金面上项目 (No. 424MS103); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630062022004, No. 1630022025002)

作者简介 赵秋芳 (1986—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 作物栽培和土壤改良。*通信作者 (Corresponding author): 魏长宾 (WEI Changbin), E-mail: zbwcb@163.com; 马海洋 (MA Haiyang), E-mail: haiyangma2009@163.com。

Fruit Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 4. Guangdong Engineering Technology Research Center for Dryland and Water Saving Agriculture, Zhanjiang, Guangdong 524091, China

Abstract: This study aimed to study the effects of long-term grass planting on soil fertility, enzyme activity and microbial diversity in tropical latosol soil, providing theoretical and technical support for improving the fertility and amelioration of tropical latosol soil. Using clean tillage as the control and three grass-planting treatments were established: Reyan No. 2 *Stylosanthes* (Re) and Ubon *Stylosanthes* (Ub) and natural grass (NG). Soil samples from 0–20 cm and 20–40 cm layers were collected to measure soil organic matter, pH, nitrogen, phosphorus, potassium and related enzyme activities. Utilizing a high-throughput sequencing platform to analyze soil bacterial and fungal communities, and investigating the effects of long-term orchard grass cultivation on the physical and chemical properties, enzyme activity, and microbial diversity of latosol soil. Five years of grass cultivation significantly increased soil organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolyzed nitrogen, with higher levels in Reyan No. 2 and Ubon treatments compared to natural grass. Natural grass significantly increased total phosphorus in the 0–20 cm layer, while *Stylosanthes* treatments significantly enhanced total phosphorus in the 20–40 cm layer. Long-term grass planting significantly increased urease, acid phosphatase, and sucrase activities in both soil layers, with no notable effect on catalase activity. The *Stylosanthes* treatments showed higher urease, acid phosphatase, and sucrase activities than natural grass. Correlation analysis revealed that acid phosphatase, urease, and sucrase were extremely significantly positively correlated with organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen. Acid phosphatase was significantly positively correlated with pH, while catalase only correlated significantly with organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen. Long-term grass cultivation, particularly the Ubon treatment, increased bacterial OTUs numbers in the 20–40 cm layer. Grass cultivation altered bacterial and fungal community compositions. The dominated bacterial phyla were Acidobacteria, Chloroflexi, Verrucomicrobia and Proteobacteria. In the 0–20 cm layer, grass cultivation increased the relative abundances of Acidobacteria, Verrucomicrobia and Proteobacteria but reduced Chloroflexi. For fungal, Ascomycota, Basidiomycota and Mucoromycota were dominant. Grass cultivation decreased Ascomycota abundance while increasing Mucoromycota. Soil environmental factors significantly influenced microbial communities. Acid phosphatase, organic matter, urease and pH were key drivers of bacterial community changes, whereas organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, sucrase and urease primarily shaped fungal community structure. Long-term grass cultivation in orchards, particularly *Stylosanthes*, significantly increased the organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolyzable nitrogen content in latosol soil. It also enhanced the activities of soil urease, acid phosphatase, and invertase enzymes. Furthermore, it altered the community structure and diversity of both soil bacteria and fungi, thereby effectively improving soil fertility and ameliorating the soil micro-ecological environment.

Keywords: orchard grass cultivation; *Stylosanthes*; tropical latosol; soil nutrient; soil enzyme activity; microbial structure of community

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.024

砖红壤广泛存在于热带和亚热带地区，该类型土壤高度风化，有机质含量低，保水保肥能力差，酸化严重^[1-2]。如何针对砖红壤形成特点进行土壤培肥和改良，是热区农业生产亟待解决的问题。热带特色果树是热带经济的重要组成部分，已有研究表明，果园生草可以改变土壤的温度、湿度、水分等微气候环境，提高土壤的有机质、养分含量，从而影响土壤微生物的数量、结构和功能，改善土壤生态环境，提高果树产量和品质^[3-6]。果园生草是实现热带砖红壤果园土壤改良、果园管理模式优化的重要措施。

土壤养分含量能够直观反映土壤肥力水平，直接影响果树生长。郭晓睿等^[7]利用 Meta 分析发

现，与不生草果园相比，生草果园的土壤有机质、碱解氮、速效磷含量分别提高 18%、11%、27%；且与一年生草相比，果园连续多年生草，显著提升了果园土壤质量、果实产量和品质。秦秦等^[8]的研究表明，与清耕相比，猕猴桃园行间种草能显著提高土壤有机质含量，种植白三叶草能显著提高碱解氮含量，种植黑麦草显著提高速效钾含量。杨金鹏等^[9]研究发现苹果园自然生草和人工生草提高了 0~30 cm 土层土壤全氮、速效磷和速效钾含量。土壤微生物影响土壤重要的生态系统过程，包括土壤能量流动、元素循环、有机碳矿化和分解，以及作物生长必需养分的供应^[10-11]。研究表明，果园生草对土壤细菌、真菌的结构和

功能有显著影响,包括群落多样性和碳代谢相关活动^[12-13]。土壤酶主要来源于微生物和动植物残体,参与物质转化、元素循环和能量流动,促进有机质的矿化,其活性高低与土壤肥力质量和微生物活动密切相关^[14]。已有研究表明,果园生草可显著提高土壤脲酶、蔗糖酶、磷酸酶等碳、氮、磷相关转化酶的活性^[13-17],且碳、氮、磷相关转化酶活性与土壤养分呈显著正相关^[15]。果园因树种、种植模式、气候类型、土壤环境等不同,生草栽培对土壤性质、酶活性、微生物群落结构和多样性的影响也存在差异。以往大多果园生草的研究大多集中在苹果、柑橘等大宗果树上,对热带典型砖红壤,特色果树番石榴果园长期生草对土壤理化性质及微生物活动的报道较少。本研究以热带特色果园为研究对象,选择热带常见豆科牧草柱花草进行生草试验,分析长期生草对砖红壤果园土壤理化性质、酶活性及微生物群落结构与多样性的影响,并探讨三者间的相关关系。研究结果可为热带砖红壤果园生草栽培模式的推广提供理论依据,同时为土壤肥力提升与改良提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于广东湛江中国热带农业科学院南亚热带作物研究所试验基地(110°28'E, 21°16'N),年均降水量达 1550 mm。试验开始于 2016 年,按照 2.0 m×3.0 m 的株行距种植番石榴。试验初始土壤养分情况:pH 为 5.74,有机质含量为 19.06 g/kg,全氮含量为 1.09 g/kg,速效磷含量为 9.20 mg/kg,速效钾含量为 200.56 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验按照随机区组设计,分别设置 3 个生草处理:热研 2 号柱花草(Re)、Ubon 柱花草(Ub)、自然生草(NG),清耕处理作为对照(CK),各处理均不少于 6 行,每行选取 10 株为 1 个试验小区,外面 2 行果树作为保护行,采集中间 4 行作为试验的 4 次重复。生草区每年刈割 2 次,刈割的草撒放于行间还田。清耕对照区每年除草 4 次,保持长期清耕;自然生草区除去藤蔓类杂草,其他保持不变。其余田间施肥和灌水管理均相同。

1.2.2 土样采集 2021 年 9 月,在每个试验小区中按“S”型 5 点采样法用土钻采集 0~20 cm 和

20~40 cm 土层的土样,充分混合后作为 1 个土样存至自封袋中。混合土样除去石块、根系等杂物,一部分风干、磨细,过筛(2.000 mm、0.500 mm 和 0.149 mm)后,用于测定与土壤养分和酶活性,另一部分置于-80℃保存,用于土壤微生物高通量测序。

1.2.3 指标测定 (1)土壤理化性质及酶活性测定。采用 pH 计测定土壤 pH;采用硫酸-重铬酸钾氧化外加热法测定土壤有机质含量;采用浓硫酸加速剂消解-凯氏定氮仪测定全氮含量;采用硝酸高氯酸解-钼锑抗比色法测定全磷含量;采用硝酸高氯酸解-火焰光度计测定全钾含量;采用碱解扩散法测定碱解氮含量^[18]。采用北京索莱宝科技有限公司生产的酶活性测定试剂盒进行前处理,利用全自动酶标仪测定土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶等酶活性。

(2)土壤微生物高通量测序。采用 DNA kit 从土壤样本中提取基因组 DNA 后,用带有 barcode 的特异引物 341F 和 806R 对 16S rDNA 的 V3~V4 区进行 PCR 扩增,采用 ITS1F 和 ITS2R 对 ITS1~ITS2 区进行 PCR 扩增(表 1),纯化扩增产物,并将纯化后的扩增产物(即扩增子)连接测序接头,构建测序文库,illumina 上机测序。委托广州基迪奥生物科技有限公司进行高通量测序。

表 1 土壤微生物 DNA PCR 引物
Tab. 1 DNA PCR primers for soil microorganisms

测序类型	引物	引物序列(5'-3')
Sequencing type	Primer	Primer sequences (5'-3')
细菌 16S rRNA	341F	CCTACGGGNGGCWGCAG
	806R	GGACTACHVGGGTATCTAAT
真菌 ITS	ITS1F	GATGAAGAACGYAGYRAA
	ITS2R	TCCTCCGCTTATTGATATGC

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件整理试验数据,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,以 Duncan's 法进行差异显著性分析,采用双变量 Spearman 相关分析进行土壤养分和酶活性的相关性分析。采用 origin 2021 软件制图。对高通量测序得到的原始数据进行拼接、质控和过滤,去除嵌合体,得到优化序列。并将序列相似度≥97%的序列归类为同一分类操作单元(operational taxonomic unit, OTU),利用 omicsmart 数据分析平台进行微生物群落多样性和丰富度相关指数分析,并结合已有土壤环境因子,分析土壤微生物群落与环境因

子的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同生草处理对土壤理化性质的影响

由表 2 可知，随着土层深度的增加，土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾、有效磷含量均呈现降低趋势。不同处理的养分含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均存在显著差异，而土壤 pH 差异不显著。在 0~20 cm 土层，与 CK 相比，Re、Ub 和 NG 处理的有机质含量分别显著提高 54.7%、37.0%和 24.6%，其中以 Re 处理的有机质含量最高，显著高于 Ub 和 NG 处理，且 Ub 处理的有机质含量显著高于 NG；在 20~40 cm 土层，与 CK 相比，Re、Ub 和 NG 处理的有机质含量分别显著提高 28.0%、42.6%和 24.7%，以 Ub 处理的有机质含量最高，显著高于 Re 和 NG 处理，而 Re 和 NG 处理间的有机质含量差异不显著。在 0~20 cm 土层，与 CK 相比，Re、Ub 和 NG 处理的土壤全氮含量均显著提高，分别提高 52.2%、39.1%、

15.2%，且 3 个生草处理间差异显著；20~40 cm 土层中，全氮含量的变化趋势与 0~20 cm 相同，分别较 CK 增加 19.3%、18.1%和 1.2%，其中 Re、Ub 处理的全氮含量显著高于 CK 和 NG。碱解氮含量的变化趋势与全氮类似，在 0~20 cm 土层，Re、Ub 和 NG 处理的碱解氮含量分别较 CK 提高 40.4%、31.8%和 8.7%，Re、Ub 处理的碱解氮含量显著高于 CK 和 NG；20~40 cm 土层中，Re、Ub 处理的碱解氮含量也显著高于 CK 和 NG。在 0~20 cm 土层中，土壤全磷含量以 NG 处理最高，显著高于其他处理，并且其余处理间无显著差异；20~40 cm 土层中，Re、Ub 和 NG 处理的全磷含量均有提高，分别较 CK 提高 13.5%、30.3%和 30.3%，其中 Ub 和 NG 处理的全磷含量显著高于 CK。0~20 cm 土层中，与 CK 相比，Re、Ub 和 NG 处理的全钾含量分别提高 57.8%、21.0%和 30.8%，差异显著，同时 Re 处理的全钾含量显著高于 Ub 和 NG；20~40 cm 土层中的全钾含量以 CK 最高，显著高于其余处理。

表 2 不同生草处理的土壤理化性质
Tab. 2 Soil physicochemical property under different grass treatments

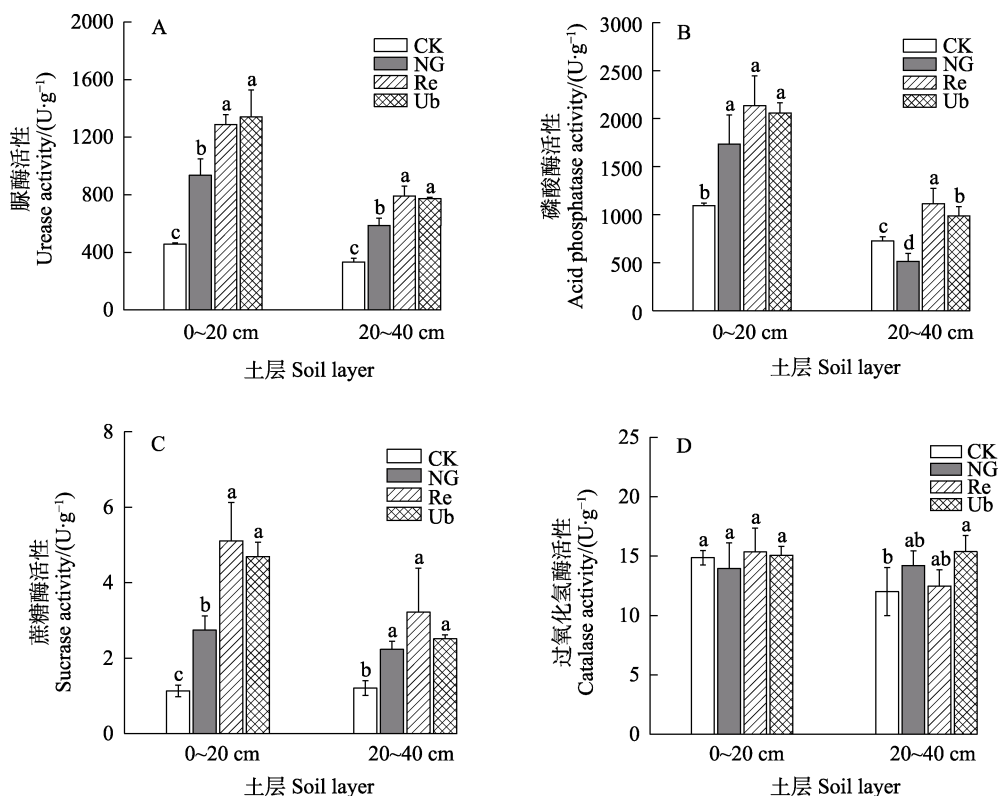
土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	pH	有机质 SOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)
0~20	CK	5.00 ^a	17.50 ^d	0.92 ^d	0.76 ^b	1.94 ^c	107.4 ^b
	NG	5.09 ^a	21.80 ^e	1.06 ^c	0.97 ^a	2.53 ^b	116.7 ^b
	Re	4.96 ^a	27.70 ^a	1.40 ^a	0.75 ^b	3.06 ^a	150.7 ^a
	Ub	4.99 ^a	23.97 ^b	1.28 ^b	0.77 ^b	2.34 ^b	141.5 ^a
20~40	CK	4.85 ^a	13.23 ^c	0.83 ^b	0.62 ^b	3.23 ^a	89.7 ^b
	NG	4.76 ^a	16.50 ^b	0.84 ^b	0.80 ^a	2.44 ^b	102.1 ^{ab}
	Re	4.81 ^a	16.93 ^b	0.99 ^a	0.70 ^{ab}	2.54 ^b	150.0 ^a
	Ub	4.86 ^a	18.87 ^a	0.98 ^a	0.80 ^a	2.39 ^b	111.0 ^a

注：同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same soil layer ($P<0.05$).

2.2 不同生草处理对土壤酶活性的影响

结果表明，生草显著提高了 0~20 cm 土层的土壤脲酶活性，Re、Ub 和 NG 处理的土壤脲酶活性分别较 CK 提高了 181.8%、193.4%、104.7%；20~40 cm 土层中，Re、Ub、NG 处理的土壤脲酶活性显著高于 CK，分别提高了 137.5%、131.8%、76.0%。（图 1A）。生草显著提高了 0~20 cm 土层的土壤酸性磷酸酶活性，Re、Ub 和 NG 处理的土壤酸性磷酸酶活性分别较 CK 提高了 95.0%、88.1%、58.4%；20~40 cm 土层中，Re、Ub 处理

的土壤酸性磷酸酶活性分别较 CK 增加了 53.1%、35.5%，差异显著，NG 处理的土壤酸性磷酸酶活性较清耕显著降低（图 1B）。在 0~20 cm 土层中，与 CK 相比，Re、Ub 和 NG 处理的土壤蔗糖酶活性分别提高了 352.2%、315.3%、142.5%；20~40 cm 土层中，Re、Ub 和 NG 处理的土壤蔗糖酶活性显著增加，分别较 CK 增加了 122.7%、108.6%、85.3%，表明果园生草可以显著提高土壤蔗糖酶活性（图 1C）。0~20 cm 土层中，各处理的土壤过氧化氢酶活性无显著差异；20~40 cm 土层中，Ub



不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same soil layer ($P<0.05$).

图 1 不同生草处理下的土壤酶活性

Fig. 1 Soil enzymes activity under different grass treatments

处理的土壤过氧化氢酶活性显著增加, 是 CK 的 1.28 倍, Re 和 NG 处理的土壤过氧化氢酶活性略高于 CK, 但差异不显著 (图 1D)。

2.3 不同生草处理下土壤理化性质与土壤酶活性的相关性分析

通过相关性分析表明, 不同生草处理下土壤 pH 与土壤酸性磷酸酶活性呈极显著正相关 ($P<0.01$); 土壤有机质与土壤全氮、碱解氮、酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性呈极显著正相关 ($P<0.01$); 土壤全氮与土壤碱解氮、酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性均呈极显著正相关; 土壤全磷、全钾与其他指标间均无显著相关性; 土壤碱解氮与土壤全氮、酸性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶活性均呈极显著正相关, 与过氧化氢酶活性呈显著正相关; 土壤酸性磷酸酶与脲酶、蔗糖酶呈极显著正相关; 蔗糖酶与脲酶呈显著正相关 (表 3)。

2.4 不同生草处理对土壤微生物群落结构和多样性的影响

2.4.1 土壤微生物 OTUs 数量 在 0~20 cm 土层中, CK、Re、Ub、NG 处理的土壤细菌的 OTUs 数量分别为 1898、1595、1769、1808 个, 其中共

有细菌的 OTUs 数量为 941 个 (图 2A)。20~40 cm 土层中, CK、Re、Ub、NG 处理的土壤细菌的 OTUs 数量分别为 1471、1388、1650、1336 个, 其中共有细菌的 OTUs 数量为 869 个, 占总数的 14.9% (图 2B)。与 CK 相比, 0~20 cm 土层中, 生草处理后土壤细菌 OTUs 数量减少, 且以 Re 处理最低; 20~40 cm 土层中, Ub 处理的土壤细菌 OTUs 数量增加, Re 和 NG 处理的 OTUs 数量减少。

在 0~20 cm 土层中, CK、Re、Ub、NG 处理的土壤真菌的 OTUs 数量分别为 726、829、866、789 个, 其中共有真菌的 OTUs 数量为 431 个 (图 3A)。20~40 cm 土层中, CK、Re、Ub、NG 处理的土壤真菌的 OTUs 数量分别为 726、842、810、568 个, 其中共有真菌的 OTUs 数量为 377 个 (图 3B)。与 CK 相比, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的种植柱花草处理的真菌 OTUs 数量均增加。

2.4.2 土壤微生物群落组成 在门水平, 0~20 cm 土层的土壤细菌群落平均相对丰度排名前 10 的门类为酸杆菌门 (Acidobacteriota, 28.8%~33.6%)、绿弯菌门 (Chloroflexi, 15.4%~24.3%)、疣微菌门 (Verrucomicrobiota, 8.8%~14.6%)、变形

表 3 土壤理化性质与土壤酶活性的相关性
Tab. 3 Correlation between soil nutrients and enzyme activities

指标 Index	pH	有机质 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	酸性磷酸酶 ACP	蔗糖酶 SC	脲酶 UE	过氧化氢酶 CAT
pH	1									
SOC	0.341	1								
TN	0.291	0.902**	1							
TP	0.093	0.344	0.252	1						
TK	-0.190	-0.057	-0.016	-0.181	1					
AN	0.282	0.892**	0.956**	0.232	0.002	1				
ACP	0.526**	0.868**	0.891**	0.197	-0.056	0.851**	1			
SC	0.022	0.760**	0.827**	0.218	0.040	0.804**	0.748**	1		
UE	0.117	0.845**	0.907**	0.298	0.023	0.921**	0.785**	0.907**	1	
CAT	0.194	0.551**	0.393	0.157	-0.298	0.472*	0.340	0.269	0.376	1

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)；**表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

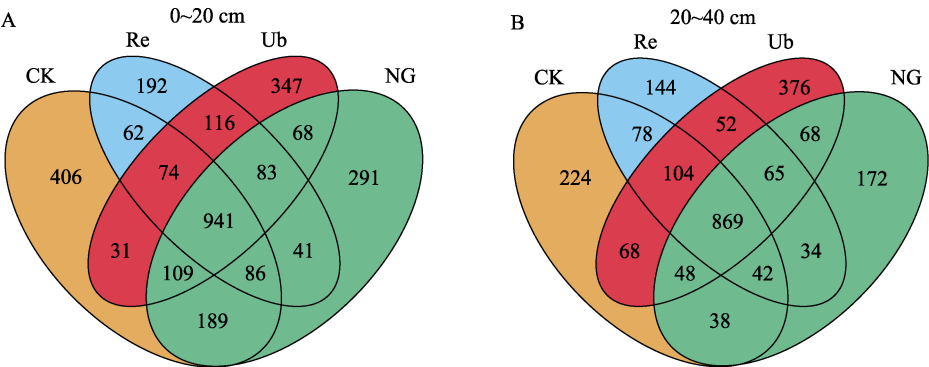


图 2 不同生草处理土壤细菌 OTUs 分布韦恩图
Fig. 2 Distribution of OTUs of soil bacteria in different grass treatment

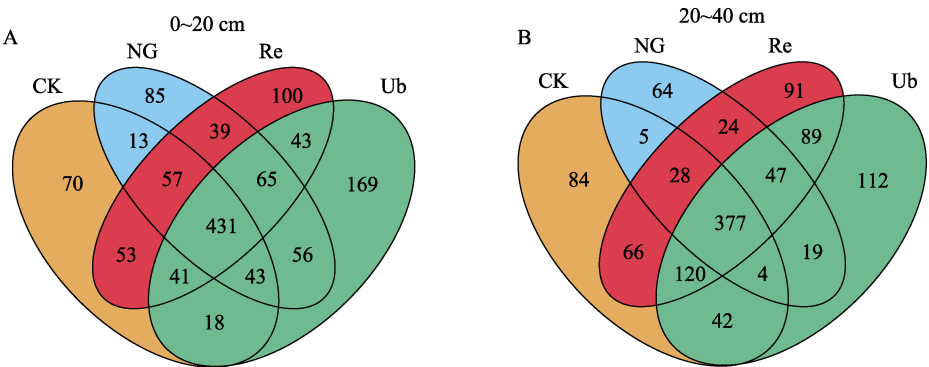


图 3 不同生草处理土壤真菌 OTUs 分布韦恩图
Fig. 3 Distribution of OTUs of soil fungi in different grass treatment

菌门 (Proteobacteria, 5.0%~9.9%)、放线菌门 (Actinobacteriota, 6.6%~8.1%)、酸杆菌门 (Patescibacteria, 2.6%~5.0%)、厚壁菌门 (Firmicutes, 3.2%~3.6%)、浮霉菌门 (Planctomycetota, 2.1%~2.8%)、拟杆菌门 (Bacteroidota, 1.5%~4.5%)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota, 0.6%~1.3%)，其中酸杆菌门、绿弯菌门、疣微菌门、变形菌门为细菌的优势菌门，占细菌相对丰度的 66.9%~69.2%；与 CK 处理相比，NG、Re、Ub 处理的酸杆菌门、疣微菌门、变形菌门相对丰度较高，而绿弯菌门相对丰度较低 (图 4A)。20~40 cm 土层的土壤细菌群落相对丰度排名前

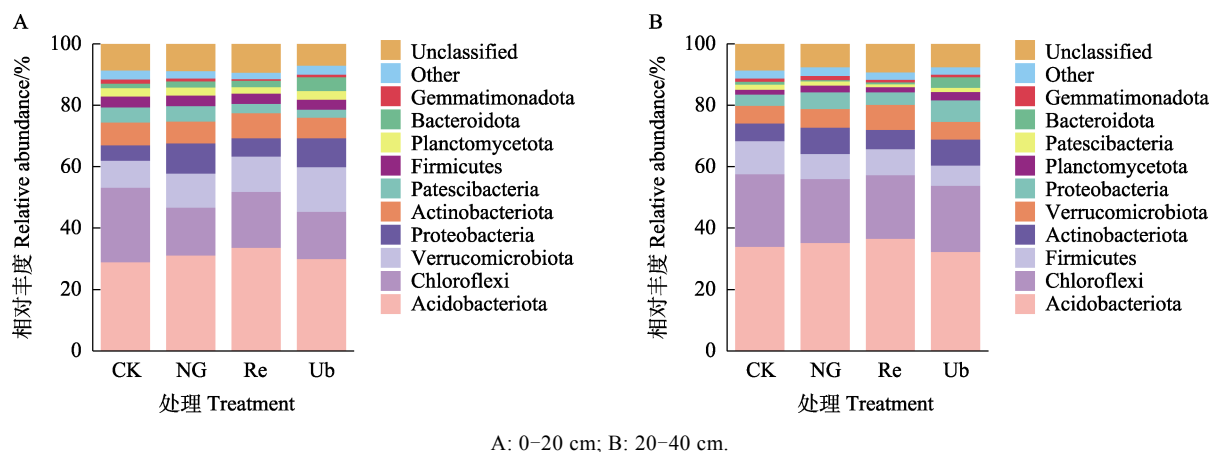


图 4 不同生草处理的土壤细菌门水平相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of soil bacterial phylum levels under different grass treatments

10 的菌门与 0~20 cm 土层基本一致, 但各菌门的相对丰度有差异。优势菌群主要为酸杆菌门、绿弯菌门和厚壁菌门, 占细菌相对丰度的 60.3%~68.2%。其中酸杆菌门的相对丰度最高, 在 32.2%~36.4% 之间, 其次为绿弯菌门; 与 CK 相比, NG、Re 处理的酸杆菌门相对丰度较高, 而绿弯菌门和厚壁菌门的相对丰度较低; Ub 处理的酸杆菌门、绿弯菌门和厚壁菌门的相对丰度均低于 CK, 而放线菌门、变形菌门、拟杆菌门的相对丰度高于 CK (图 4B)。

在门水平, 0~20 cm 土层的土壤真菌群落相对丰度最高的为子囊菌门 (Ascomycota, 40.2%~

67.2%), 其中各处理的子囊菌门相对丰度为 CK>Ub>Re>NG, 担子菌门 (Basidiomycota) 相对丰度为 Re>CK>Ub>NG, Ub 处理的毛霉菌门 (Mucoromycota) 相对丰度最高, 罗兹菌门为 Re 和 Ub 处理的特有菌, 且 Re 处理的罗兹菌门占比最高, 为 25.2% (图 5A)。20~40 cm 土层的土壤真菌优势菌群为子囊菌门和担子菌门, 相对丰度为 66.15%~89.51%, 其中 CK 处理的子囊菌门相对丰度最高, NG 处理的相对丰度最低, 各处理的担子菌门相对丰度差异不大, NG 处理的毛霉菌门相对丰度最高, CK 中该菌门的相对丰度最低, 仅为 0.7% (图 5B)。

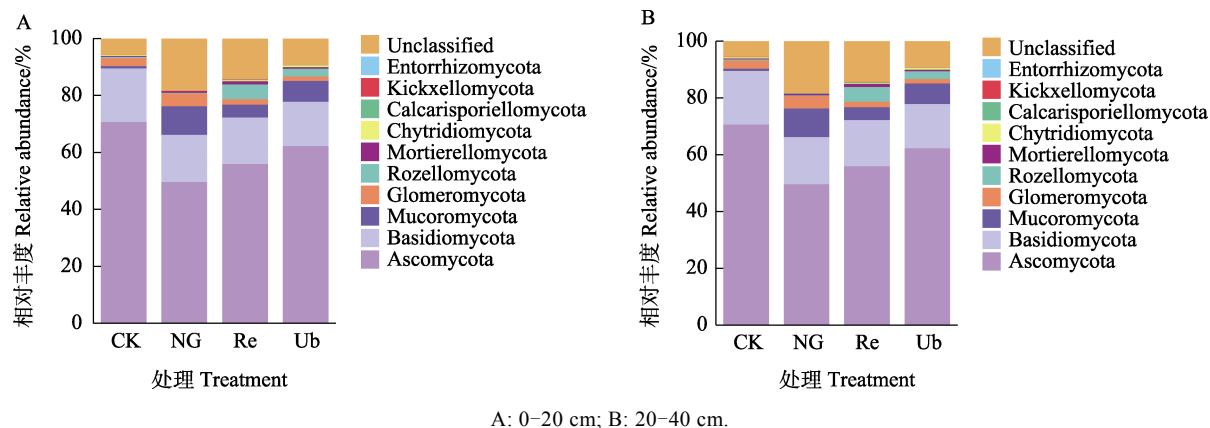


图 5 不同生草处理的土壤真菌门水平相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of soil fungal phylum levels under different grass treatments

2.4.3 土壤微生物 Alpha 多样性 覆盖度为群落均匀度指数, Ace、Chao1 指数为群落丰富度指数, Shannon、Simpson 指数为群落多样性指数。结果表明, 8 组土壤样本的细菌测序覆盖度均大于 98%, 说明土壤细菌测序数据可较为全面地揭示土壤样品的细菌群落组成。0~20 cm 土层中, Re

处理的土壤细菌 Shannon 指数显著低于 CK、NG、Ub 处理, Re 处理的 Ace 指数显著低于 Ub 处理, 与 CK、NG 处理间差异不显著。20~40 cm 土层中, NG 处理的土壤细菌 Ace 指数显著低于 CK、Re 和 Ub 处理; Ub 处理的 Shannon、Simpson 指数最高, 显著高于其余处理; 而且 Ub 处理的 Chao1

指数最高，显著高于 NG 处理，与 CK 和 Re 处理差异不显著（表 4）。

各处理中真菌的覆盖度均在 99%以上，说明土壤真菌微生物测序数据可较为全面地揭示土壤真菌微生物的组成。0~20 cm 土层中，Re 处理的 Shannon 指数显著低于 CK，与 NG、Ub 处理差异不显著，Re 处理的 Simpson 指数显著低于 CK 和 NG 处理，与 Ub 处理差异不显著；Ub 处

理的 Chao1 和 Ace 指数最高，显著高于 Re 处理，与 CK 和 NG 处理差异不显著；20~40 cm 土层中，各处理间真菌 Shannon、Simpson 指数差异不显著，NG 处理的真菌 Chao1 和 Ace 指数均最低，显著低于 CK、Re 和 Ub 处理，表明柱花草处理对 0~20 cm 土层真菌的丰富度和多样性影响较大，对 20~40 cm 土层土壤真菌群落多样性影响较小（表 5）。

表 4 不同生草处理的土壤细菌 Alpha 多样性指数
Tab. 4 Alpha diversity of soil bacteria community under different grass treatments

土层 Soil ayer/cm	处理 Treatment	覆盖度 Goods overage/%	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Chao1 指数 Chao1 index	Ace 指数 Ace index
0~20	CK	98.58	8.67±0.13 ^a	0.992±0.001 ^a	2624.7±42.8 ^a	2797.6±46.0 ^{ab}
	NG	98.43	8.59±0.16 ^a	0.991±0.001 ^a	2611.7±188.7 ^a	2790.6±194.0 ^{ab}
	Re	98.24	8.29±0.13 ^b	0.990±0.001 ^{ab}	2453.3±210.3 ^a	2625.4±228.2 ^b
	Ub	98.31	8.55±0.18 ^a	0.987±0.001 ^b	2694.6±99.9 ^a	2894.3±113.1 ^a
20~40	CK	98.51	8.06±0.06 ^b	0.989±0.001 ^b	2342.7±132.3 ^{ab}	2528.3±146.6 ^a
	NG	98.68	8.07±0.11 ^b	0.989±0.001 ^b	2094.7±43.6 ^b	2235.6±54.7 ^b
	Re	98.50	8.01±0.08 ^b	0.989±0.001 ^b	2289.1±2.5 ^{ab}	2481.2±12.1 ^a
	Ub	98.50	8.48±0.30 ^a	0.992±0.002 ^a	2460.3±131.5 ^a	2627.6±153.7 ^a

注：同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same soil layer ($P<0.05$).

表 5 不同生草处理的土壤真菌 Alpha 多样性指数
Tab. 5 Alpha diversity of soil fungi community under different grass treatments

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	覆盖度 Goods overage/%	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Chao1 指数 Chao1 index	Ace 指数 Ace index
0~20	CK	99.80	6.04±0.37 ^a	0.951±0.035 ^a	774.6±53.7 ^{ab}	784.9±52.9 ^{ab}
	NG	99.85	5.56±0.46 ^{ab}	0.944±0.019 ^a	779.0±14.8 ^{ab}	778.9±26.7 ^{ab}
	Re	99.88	5.12±0.66 ^b	0.869±0.068 ^b	741.9±38.5 ^b	743.9±33.4 ^b
	Ub	99.86	5.49±0.48 ^{ab}	0.926±0.043 ^{ab}	813.9±35.7 ^a	814.9±29.1 ^a
20~40	CK	99.85	5.77±0.68 ^a	0.938±0.040 ^a	756.0±29.6 ^a	759.6±36.6 ^a
	NG	99.78	5.72±0.58 ^a	0.947±0.034 ^a	545.8±112.7 ^b	553.6±111.3 ^b
	Re	99.76	6.61±0.29 ^a	0.971±0.008 ^a	770.0±27.1 ^a	773.4±28.7 ^a
	Ub	99.85	5.76±1.03 ^a	0.930±0.079 ^a	787.0±34.0 ^a	783.9±41.0 ^a

注：同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same soil layer ($P<0.05$).

2.4.4 土壤环境因子与土壤微生物群落结构的相关性 通过相关性分析表明，酸杆菌门（Acidobacteriota）与土壤 pH 呈极显著负相关，与 ACP 呈显著负相关；绿弯菌门（Chloroflexi）与土壤 UE、SOC、ACP、TN、SC 呈极显著负相关，与 TP、AN 呈显著负相关；芽单胞菌门（Gemmatimonadota）和厚壁菌门（Firmicutes）均与土壤 SOC、AN、TN、UE、ACP 和 SC 呈显著或极显著负相关，疣微菌门（Verrucomicrobiota）与土壤 SOC、

AN、TN、UE、ACP 和 SC 呈极显著正相关（图 6A）。表明土壤细菌优势菌门与土壤环境因子存在密切关系，土壤环境因子的改变可以显著影响土壤细菌优势菌属的分布和群落结构。通过分析细菌的环境因子贡献率表明，土壤 ACP、SOC、UE、pH 是细菌菌落结构的主要贡献因子（图 7A）。
对真菌而言，子囊菌门（Ascomycota）与土壤 AN、UE、SC 呈极显著负相关，与土壤 SOC、CAT

呈显著负相关；根肿黑粉菌门（*Entorrhizomycota*）与 TP 呈极显著正相关；罗兹菌门（*Rozellomycota*）与 SOC、AN、SC 呈极显著正相关，与 ACP、UE 呈显著正相关；毛霉菌（*Mucoromycota*）与 UE、SC 呈极显著正相关，与 SOC、ACP、AN、TP 呈显著正相关，与 TN 呈显著负相关；被孢霉门

（*Mortierellomycota*）与 AN、UE、SC 呈极显著正相关，与 ACP 呈显著相关（图 6B）。SOC、AN、SC、UE 是土壤真菌的主要环境贡献因子，贡献率分别为 20.39%、23.75%、24.33%、20.05%，表明土壤真菌群落结构主要受 SOC、AN、SC、UE 的影响（图 7B）。

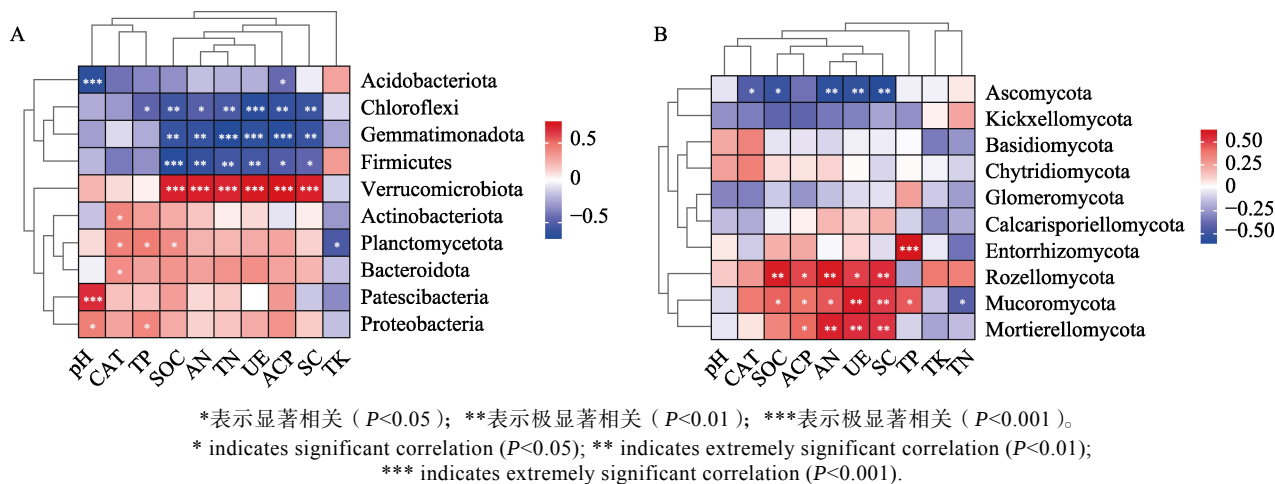


图 6 细菌 (A) 和真菌 (B) 门水平群落结构与土壤环境因子的相关性

Fig. 6 Correlation of horizontal community structure of bacteria (A) and fungi (B) with soil environmental factors

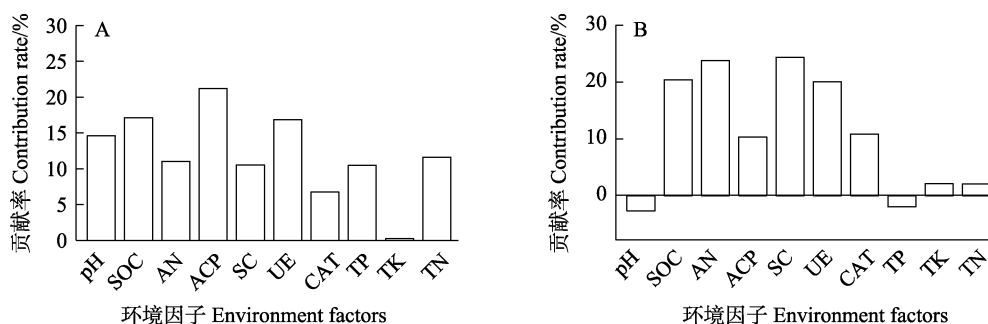


图 7 细菌 (A) 和真菌 (B) 的环境因子贡献率

Fig. 7 Contribution rates of environmental factors by bacteria (A) and fungi (B)

3 讨论

3.1 果园长期生草可提高砖红壤养分含量

果园 5 a 生草试验发现,种植柱花草或者自然生草均能够显著提高砖红壤有机质。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,热研 2 号柱花草有机质含量分别较清耕增加 54.7%、28.0%; Ubon 柱花草有机质含量分别提高 37.0%和 42.6%;自然生草有机质含量分别提高 24.6%和 24.7%,这与周春衡等^[19]、刘许霖等^[20]的研究结果一致,表明果园长期生草可提升砖红壤有机质。与清耕相比,在 0~20 cm 土层中,热研 2 号、Ubon 柱花草、自然生草处理的土壤全氮、碱解氮含量均显著增加;在 20~40 cm 土层中,热研 2 号和 Ubon 柱花草处理的土壤全

氮、碱解氮含量显著高于清耕,而自然生草的全氮、碱解氮与清耕差异不显著,表明果园行间种植柱花草可以显著提高砖红壤的全氮、碱解氮含量,而自然生草仅显著增加了 0~20 cm 土层的全氮、碱解氮含量,对深层土壤的影响较小,其原因可能是行间种植的豆科植物有大量的根瘤菌可进行固氮,进而提高了土壤深层土壤的氮含量。0~20 cm 土层的土壤全磷含量均以自然生草最高,热研 2 号柱花草、Ubon 柱花草处理与清耕差异不显著;而在 20~40 cm 土层中,生草处理的土壤全磷含量显著高于清耕,说明种植柱花草后在生长期对表土层磷的吸收利用大于其归还量,造成土壤磷含量下降,而自然生草对磷的吸收量较少,

从而相应增加了土壤磷的含量,这一研究结果与许彦明等^[21]、程滨等^[22]的研究结果一致,在热带砖红壤地区,磷肥施入土壤后,容易被土壤中的活性铁、锰等吸附和固定,导致磷利用率低,因此在砖红壤果园生草栽培中要注重土壤磷肥的补充。本研究中,果园长期生草增加了 0~20 cm 土壤的全钾含量,这与周春衡等^[23]的研究结果一致。

3.2 果园长期生草可提高砖红壤酶活性

土壤酶作为土壤生物活性及土壤肥力的重要组成部分,在土壤物质循环和能量转化中起着重要作用。程滨等^[22]研究发现,在桃园行间种植大豆显著提高了土壤脲酶活性,黑麦草显著提高了土壤蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性。靳旭妹等^[24]研究表明,与自然生草相比,有机猕猴桃园生草提高了土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性。葛永申等^[25]研究表明,梨园单播油菜、光叶紫花苕子或者油菜和光叶紫花苕子间作均提高了土壤脲酶、蔗糖酶活性。本研究中,土壤酶活性随着土层深度的增加而降低,与井赵斌等^[26]的研究结果一致,其主要原因可能是表层土壤是动植物和微生物的主要活动区域,生草处理后增加了表层土壤酶作用底物,对土壤酶活性的影响较大^[27]。热带砖红壤果园种植柱花草和自然生草均显著增加了土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性,而对过氧化氢酶活性的影响不大;且果园种植柱花草的土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性均高于自然生草,表明种植豆科植物柱花草更有利于土壤酶活性的提高。

土壤酶活性能够间接反映土壤肥力,因此土壤酶活性与土壤养分含量存在一定的相关性,但相关性的结果并不一致。本研究中土壤养分和土壤酶活性的相关性分析结果表明,土壤酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性均与土壤有机质、全氮、碱解氮呈极显著正相关,酸性磷酸酶活性与土壤 pH 呈显著正相关,过氧化氢酶活性仅与土壤有机质、碱解氮呈显著相关。土壤全磷、全钾与其他指标均无显著相关性。惠竹梅等^[28]在葡萄园生草发现,土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性与土壤有机质、全氮、碱解氮呈显著正相关,全钾与酶活性均无显著相关性,与本研究结果一致;而土壤过氧化氢酶活性与土壤养分指标均无显著相关性,且土壤 pH 与土壤酶活性之间均呈显著负相关,与本研究结果不一致,其原因可能是

葡萄园是碱性土壤,而本研究土壤为砖红壤,是强酸性土壤,因此土壤酶活性受 pH 的影响作用不同。

3.3 不同生草处理对土壤微生物群落组成及多样性的影响

在土壤生态系统中,土壤细菌和真菌是重要的分解者,它们通过分泌特定的细胞外酶(如纤维素酶、木聚糖酶、磷酸酶)进行分解、代谢和转化^[29]。果园生草会通过影响土壤细菌和真菌的生长代谢,进而改变微生物群落的结构和组成^[30-31]。本研究发现果园生草改变了砖红壤果园的土壤微生物数量和多样性,研究表明,生草处理均降低了 0~20 cm 土层土壤细菌 OTUs 数量,这与 ZANG 等^[31]的研究结果一致,20~40 cm 土层中,Ub 处理的 OTUs 数量增加,Re 和自然生草处理的 OTUs 数量降低。种植柱花草增加了真菌 OTUs 数,自然生草与清耕的真菌 OTUs 数差异不大。肖力婷等^[32]研究发现,人工生草南丰蜜果园的土壤细菌 OTUs 数显著高于清耕和自然生草,而真菌 OTUs 数量在不同处理间无显著差异,与本研究结果有一定差异,可能是由于种草类型及土壤环境不同所致。本研究中,在 20~40 cm 土层,Ub 处理的细菌 Shannon 指数和 Simpson 指数均显著高于清耕和自然生草,生草处理的 0~20 cm 土层土壤细菌多样性指数无显著影响,表明 Ub 柱花草主要影响深层土壤细菌群落多样性,对表层土作用不大。黄楚亦等^[33]和李承臻等^[34]研究发现,果园间作生草对土壤细菌群落的多样性指数并无显著影响,与本研究结果存在差异,这种差异可能是由于间作种草类型及种植年限的不同所致。而对土壤真菌而言,0~20 cm 土层中,Re 处理的 Shannon 指数低于清耕,Ub 处理的 Simpson 指数显著低于清耕,而 20~40 cm 土层中,各处理的 Shannon 指数和 Simpson 指数均差异不显著,表明果园种植柱花草仅降低表层土壤真菌的多样性,对深层土壤影响较小。

已有研究表明,果园生草对土壤细菌、真菌的结构和功能有显著影响,包括群落多样性和碳代谢相关活动等^[12-13]。本研究中,各处理均以酸杆菌门、绿弯菌门、疣微菌门、变形菌门为细菌的优势菌门,生草处理改变了土壤细菌群落组成,特别是表层土壤,在 0~20 cm 土层,生草增加了酸杆菌门、疣微菌门、变形菌门的相对丰度,降低了绿弯菌门的相对丰度;在 20~40 cm 土层,

NG、Re 处理的酸杆菌门相对丰度高于清耕, Ub 处理中低于清耕。酸杆菌偏爱酸性土壤^[35], 其在土壤中的相对丰度与 pH 呈负相关^[36], 本研究中酸杆菌与土壤 pH 呈显著负相关, 但处理间土壤 pH 无显著性差异, 这与颜彩缤等^[37]的研究结果一致, 其原因可能是酸杆菌的不同亚群对土壤 pH 的响应作用不同。绿弯菌门与土壤脲酶、有机质、酸性磷酸酶、全氮、蔗糖酶、全磷、碱解氮等环境因子均呈显著负相关, 与杜昊楠等^[38]和任晓旭等^[39]的研究结果一致。李承臻等^[34]研究表明, 土壤有效磷、硝态氮和有机质是间作柱花草引起土壤细菌群落变化的主要原因; 袁秉琛等^[40]研究发现, 土壤 pH、全钾、全磷和速效钾是影响土壤细菌门结构的主要理化因子。林洪鑫等^[41]研究发现, 有机质、pH 显著影响细菌属水平群落组成。本研究中酸性磷酸酶、有机质、脲酶、pH 是细菌群落结构的主要贡献因子, 与前人研究结果基本一致, 可见细菌群落结构主要受土壤中碳、氮、磷循环转化相关的环境因子的影响。本研究中, 土壤真菌的优势种群为子囊菌门、担子菌门、毛霉菌门, 其中子囊菌门占比在 40%以上, 生草处理降低了子囊菌门的相对丰度, 提高了毛霉菌门的相对丰度, 这与肖力婷等^[32]和刘业萍等^[42]的研究结果一致; 而且在柱花草处理中还出现特有的罗兹菌门, 推测罗兹菌门可能是柱花草的特有真菌, 这有待进一步研究。子囊菌是土壤中的主要真菌分解者, 能快速降解有机质, 对土壤养分循环起关键作用, 子囊菌门与土壤碱解氮、脲酶、蔗糖酶、有机质、过氧化氢酶呈显著负相关, 表明生草处理提高了土壤肥力水平, 进而降低了子囊菌门的相对丰度。与子囊菌门相反, 罗兹菌门、毛霉菌门、被孢菌门与土壤主要环境因子呈显著正相关。肖力婷等^[32]研究发现, 有机质、速效磷、全磷、速效钾和全氮对真菌群落结构影响较大, 而本研究中土壤真菌群落结构主要受土壤有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶的影响。

4 结论

5 a 果园生草试验发现果园生草可以显著提高土壤有机质、全氮、碱解氮含量, 而对土壤全磷、全钾、pH 的提升效果不显著, 同时果园生草提高了果园土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性, 且种植柱花草处理对土壤养分和酶活性的提升效果优于自然生草。果园长期生草改变了土壤细菌

数目和多样性, 对真菌的影响较小。果园生草也改变土壤细菌和真菌的群落组成, 各处理土壤细菌均以酸杆菌门、绿弯菌门、疣微菌门、变形菌门为优势菌门, 且生草处理显著影响表层土壤细菌的群落组成。土壤真菌均以子囊菌门、担子菌门、毛霉菌门为优势菌门, 生草处理降低了子囊菌门的相对丰度, 提高了毛霉菌门的相对丰度, 改变了土壤真菌的群落组成。土壤环境因子显著影响土壤细菌和真菌的群落组成和多样性, 其中土壤酸性磷酸酶、有机质、脲酶、pH 是细菌群落结构的主要贡献因子, 土壤真菌群落结构主要受有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶的影响。

本研究从土壤养分和酶活性的变化、微生物群落组成及多样性方面, 分析果园长期生草对砖红壤理化性质和生物多样性的影响, 结果表明, 砖红壤果园种植热研 2 号柱花草和 Ubon 柱花草均能显著提高土壤养分含量和土壤酶活性, 改善土壤微生物群落组成和多样性, 因此, 可在热带砖红壤区域的多年生果园中推广应用。

参考文献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 李进, 段婷婷, 高宇, 邓凯, 梁燕秋, 邓卓楠, 钟来元, 蔺中, 邓超. 不同种植模式对雷州半岛玄武岩母质砖红壤氮磷钾养分状况的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(2): 62-69.
LI J, DUAN T T, GAO Y, DENG K, LIANG Y Q, DENG Z N, ZHONG L Y, LIN Z, DENG C. Effects of different tillage modes on the status of nitrogen, phosphorus and potassium in Lei zhou Peninsula latosol from basalt[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(2): 62-69. (in chinese)
- [3] 梁青, 张体彬, 程煜, 高伟强, 邝雨欣, 冯浩. 绿肥间作对渭北果园土壤水分、养分及苹果产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 250-259.
LIANG Q, ZHANG T B, CHENG Y, GAO W Q, KUANG Y X, FENG H. Effects of green manure intercropping on soil moisture, nutrients, and apple yield in a Weibei apple orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 250-259. (in Chinese)
- [4] XIANG Y, CHANG S X, SHEN Y, CHEN G Z, LIU Y, YAO B, XUE J, LI Y. Grass cover increases soil microbial abundance and diversity and extracellular enzyme activities in orchards: a synthesis across China[J]. *Apple Soil Ecology*,

- 2023, 182: 104720.
- [5] 杨建利, 贾如浩, 王春丽, 张智, 王小军, 王周礼, 赵西宁, 冯浩. 黄土高原苹果园间作油菜对土壤水分与苹果品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1397-1406.
YANG J L, JIA R H, WANG C L, ZHANG Z, WANG X J, WANG Z L, ZHAO X N, FENG H. Effects of intercropping rape on soil moisture and quality of apple fruit in an apple orchard in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(8): 1397-1406. (in Chinese).
 - [6] FANG L F, SHI X J, ZHANG Y Y, YANG Y, ZHANG Y H, WANG X L, ZHANG X Z, YU T. The effects of ground cover management on fruit yield and quality: a meta-analysis[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 68(13): 1890-1902.
 - [7] 郭晓睿, 宋涛, 邓丽娟, 张卫峰, 焦小强. 果园生草对中国果园土壤肥力和生产力影响的整合分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4021-4028.
GUO X R, SONG T, DENG L J, ZHANG W F, JIAO X Q. Effects of grass growing on soil fertility and productivity of orchards in China: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4021-4028. (in Chinese)
 - [8] 秦秦, 宋科, 孙丽娟, 孙雅菲, 王峻, 江建兵, 薛永. 猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J]. 果树学报, 2020, 37(1): 68-76.
QIN Q, SONG K, SUN L J, SUN Y F, WANG J, JANG J B, XUE Y. Effect of inter-row sod system on the contents and availability of soil nutrients in a kiwifruit orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(1): 68-76. (in Chinese)
 - [9] 杨金鹏, 牟兰, 仇嘉悦, 吴宗烨, 张鑫亮, 张美艳, 蔡明, 黄必志. 生草对滇中苹果园土壤酶活性和微生物群落多样性的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(2): 419-428.
YANG J P, MU L, QIU J Y, WU Z Y, ZHANG X L, ZHANG M Y, CAI M, HUANG B Z. Effects of grass cultivation on soil enzyme activity and microbial community diversity of apple orchards in Dianzhong area of China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 419-428. (in Chinese)
 - [10] ZHANG M H, LI Z, ZHANG B, ZHANG R H, XING F. Planting grass enhances relations between soil microbes and enzyme activities and restores soil functions in a degraded grassland[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1290849.
 - [11] VUKICEVICH E, LOWERY T, BOWEN P, ÚRBEZ-TORRES J, HART M. Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36(3): 48.
 - [12] WAN P, HE R R. Short-term effects of cover grass on soil microbial communities in an apple orchard on the Loess Plateau[J]. Forests, 2021, 12(12): 1787.
 - [13] QIAN X, GU J, PAN H J, ZHANG K Y, SUN W, WANG X J, GAO H. Effects of living mulches on the soil nutrient contents, enzyme activities, and bacterial community diversities of apple orchard soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2015, 70: 23-30.
 - [14] TRAP J, RIAH W, AKPA-VINCESLAS M, BAILLEUL C, LAVAL K, TRINSOUTROT-GATTIN I. Improved effectiveness and efficiency in measuring soil enzymes as universal soil quality indicators using microplate fluorimetry[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 98-101.
 - [15] 王娜, 李乐, 勾蒙蒙, 简尊吉, 胡建文, 陈会玲, 肖文发, 刘常富. 长期生草对柑橘园土壤化学及生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5890-5901.
WANG N, LI L, GOU M M, JIAN Z J, HU J W, CHEN H L, XIAO W F, LIU C F. Effects of long-term living grass mulching on soil chemical and biological properties in different soil layers of a citrus orchard[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5890-5901. (in Chinese)
 - [16] 田玉莉, 吴小苹, 陈欣佛, 郭亚茹, 李泽林, 倪新华, 张嘉涛, 李会科. 黄土高原果园不同覆盖模式对土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2581-2589.
TIAN Y L, WU X P, CHEN X F, GUO Y R, LI Z L, NI X H, ZHANG J T, LI H K. Effect of diversity mulching model on soil enzyme activities in the Loess Plateau orchard[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10): 2581-2589. (in Chinese)
 - [17] 张朋朋, 胡雯, 管增辉, 王朝, 马学海, 邹养军. 生草对苹果园土壤养分、酶活性及细菌群落的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 86-96.
ZHANG P P, HU W, GUAN Z H, WANG Z, MA X H, ZOU Y J. Effects of grass on soil nutrients, enzyme activities and bacterial community in apple orchard[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024, 52(9): 86-96. (in Chinese)
 - [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
 - [19] 周春衡, 谭秋锦, 王文林, 覃振师, 郑树芳, 黄锡云. 生草对澳洲坚果果园土壤理化性质与果实品质的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(7): 101-109.
ZHOU C H, TAN Q J, WANG W L, QIN Z S, ZHENG S F, HUANG X Y. Effects of grass cultivation on soil physico-chemical properties and fruit quality in the macadamia orchard[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(7): 101-109. (in Chinese).
 - [20] 刘许霖, 郇恒福, 黄冬芬, 刘国道, 胡安, 杨孝奎. 间作柱花草作绿肥对椰园土壤肥力的作用[J]. 草业科学, 2023, 40(1): 79-89.

- LIU X L, HUAN H F, HUANG D F, LIU G D, HU A, YANG X K. Effects of intercropping *Stylosanthes guianensis* as a green manure on the soil fertility of coconut plantations[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(1): 79-89. (in Chinese).
- [21] 许彦明, 刘彩霞, 吴慧, 彭映赫, 张震, 李芳, 龚玉子, 杨小胡, 陈永忠, 陈隆升. 油茶林生草栽培对土壤理化性质、微生物多样性及酶活性的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 45-51.
- XU Y M, LIU C X, WU H, PENG Y H, ZHANG Z, LI F, GONG Y Z, YANG X H, CHEN Y Z, CHEN L S. Effect of sod culture on soil physical and chemical characteristics, microbial diversity and enzyme activities of *Camellia oleifera* forest[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(1): 45-51. (in Chinese)
- [22] 程滨, 赵瑞芬, 滑小赞, 郑普山, 王森, 王钊. 行间生草对核桃园土壤养分、有机碳组分及酶活性影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 57-64.
- CHENG B, ZHAO R F, HUA X Z, ZHENG P S, WANG S, WANG Z. Effects of interrow grass on soil nutrients, organic carbon components and enzyme activities in walnut orchard[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(6): 57-64. (in Chinese)
- [23] 周春衡, 王文林, 郑树芳, 覃振师, 谭秋锦, 黄锡云. 基于隶属函数法的不同生草栽培模式下澳洲坚果果园土壤理化性质综合评价[J]. 热带作物学报, 2024, 45(11): 2362-2370.
- ZHOU C H, WANG W L, ZHENG S F, QIN Z S, TAN Q J, HUANG X Y. Comprehensive evaluation of soil physico-chemical properties in the macadamia orchard under different sod-cultural practices based on membership function method[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(11): 2362-2370. (in Chinese)
- [24] 靳旭妹, 王莹莹, 刘崇义, 陈新义, 龙明秀, 何树斌. 生草对关中地区有机猕猴桃园土壤养分及细菌群落的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(10): 53-63.
- JIN X M, WANG Y Y, LIU C Y, CHEN X Y, LONG M X, HE S B. Effects on soil nutrients and bacterial communities of different cover crops in an organic kiwifruit orchard in the Guan zhong region of China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(10): 53-63. (in Chinese)
- [25] 葛永申, 岳绪国, 万春雁, 霍恒志, 王睿璇, 杨军, 陈雪平. 果园不同生草方式对土壤养分及微生物的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2024, 45(2): 42-50.
- GE Y S, YUE X G, WAN C Y, HUO H Z, WANG R X, YANG J, CHEN X P. Effects of different sod culture on soil nutrients and microorganisms in orchard[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2024, 45(2): 42-50. (in Chinese)
- [26] 井赵斌, 李腾飞, 龙明秀, 马文娟. 生草对猕猴桃果园土壤酶活性和土壤微生物的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1710-1718.
- JING Z B, LI T F, LONG M X, MA W J. Effects of planted grasses on soil enzyme activities and microbial communities in a kiwifruit orchard[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1710-1718. (in Chinese)
- [27] 左玉环, 刘高远, 杨莉莉, 梁连友, 同延安. 陕西渭北柿子园种植白三叶草对土壤养分和生物学性质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 518-524.
- ZUO Y H, LIU G Y, YANG L L, LIANG L Y, TONG Y A. Effect of planting white clover on nutrients and biological properties of soils in persimmon orchard of Weibei, Shaanxi province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 518-524. (in Chinese)
- [28] 惠竹梅, 岳泰新, 张瑾, 程建梅, 李华. 西北半干旱区葡萄园生草体系中土壤生物学特性与土壤养分的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2310-2317.
- HUI Z M, YUE T X, ZHANG J, CHENG J M, LI H. Relationship between soil biological characteristics and nutrient content under intercropping system of vineyard in north-western semiarid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(11): 2310-2317. (in Chinese)
- [29] WANG H, WANG S L, WANG R, WANG L X, LIU J. Conservation tillage increased soil bacterial diversity and improved soil nutrient status on the Loess Plateau in China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(11): 1509-1519.
- [30] LI T F, WANG Y Y, KAMRAN M, CHEN X Y, TAN H, LONG M X. Effects of grass inter-planting on soil nutrients, enzyme activity, and bacterial community diversity in an apple orchard[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 901143.
- [31] ZANG X P, LI K, YUN T Y, RASHED A A, MELEBARI D M, DING Z L, OSMAN E H, EISSA M A, HE Y D, JING T, WANG L X, LIU Y X, XIE J H, MA W H, WEI C B. Comparison between tropical legumes and natural grasses in improving tropical rainforest soil health: a case study in guava (*Psidium guajava* L.) orchards[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25: 378.
- [32] 肖力婷, 杨慧林, 黄文新, 付学琴. 生草栽培对南丰蜜橘园土壤微生物群落结构与功能特征的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(1): 190-200.
- XIAO L T, YANG H L, HUANG W X, FU X Q. Effects of grass cultivation on soil microbial community structure and functional characteristics in Nanfeng tangerine orchard[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(1): 190-200. (in Chinese)
- [33] 黄楚亦, 胡青, 赵敏, 陆斌, 张光华, 王猛. 间作模式对油

- 橄榄土壤养分及土壤微生物的影响[J]. 经济林研究, 2024, 42(4): 155-165.
- HUANG C Y, HU Q, ZHAO M, LU B, ZHANG G H, WANG M. Effects of intercropping modes of olive on soil nutrients and soil microorganisms[J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(4): 155-165. (in Chinese)
- [34] 李承臻, 袁秉琛, 王燕茹, 蓝俊, 罗丽娟, 虞道耿. 荔枝园间作柱花草对土壤理化性质和土壤细菌群落结构的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(6): 1194-1204.
- LI C Z, YUAN B C, WANG Y R, LAN J, LUO L J, YU D G. Effects of intercropping *Stylosanthes guianensis* on soil physicochemical properties and bacterial community structure in a litchi orchard[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(6): 1194-1204. (in Chinese)
- [35] HORTON D J, THEIS K R, UZARSKI D G, LEARMAN D R. Microbial community structure and microbial networks correspond to nutrient gradients within coastal wetlands of the Laurentian Great Lakes[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2019(4): 95.
- [36] YANG W, JEELANI N, ZHU Z H, LUO Y Q, CHENG X L, AN S Q. Alterations in soil bacterial community in relation to *Spartina alterniflora* Loisel. invasion chronosequence in the eastern Chinese coastal wetlands[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 38-43.
- [37] 颜彩缤, 胡福初, 赵亚, 王祥和, 陈哲, 张世青, 吴凤芝, 范鸿雁. 荔枝园间作平托花生对土壤理化性质、酶活性和微生物群落结构及多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 203-210.
- YAN C B, HU F C, ZHAO Y, WANG X H, CHEN Z, ZHANG S Q, WU F Z, FAN H Y. Effects of intercropping pinto peanuts on soil physicochemical properties, enzyme activity, bacterial community structure and diversity[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(5): 203-210. (in Chinese)
- [38] 杜昊楠, 兰国玉, 吴志祥, 陈伟, 杨川. 海南热带雨林土壤细菌组成与多样性分析[J]. 南方农业学报, 2022, 53(3): 840-849.
- DU H N, LAN G Y, WU Z X, CHEN W, YANG C. Study on soil bacterial composition and diversity of tropical rainforest in Hainan Island[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(3): 840-849. (in Chinese)
- [39] 任晓旭, 周建金, 应武, 程大军, 严建立, 徐卫军, 阮松林, 许寿增. 三叶青不同种植模式对土壤微生物群落结构的影响[J]. 西南农业学报, 2025, 38(1): 55-63.
- REN X X, ZHOU J J, YING W, CHENG D J, YAN J L, XU W J, RUAN S L, XU S Z. Effects of different planting patterns of *Tetrastigma hemsleyanum* on structure of soil microbial communities[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025, 38(1): 55-63. (in Chinese)
- [40] 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 *Grona styracifolia* 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)
- [41] 林洪鑫, 袁展汽, 肖运萍, 汪瑞清, 吕丰娟, 张志华. 施氮和间作花生对木薯根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 56-65.
- LIN H X, YUAN Z Q, XIAO Y P, WANG R Q, LYU F J, ZHANG Z H. Effects of nitrogen application and intercropping with peanut on bacterial community structure in cassava rhizosphere soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 56-65. (in Chinese)
- [42] 刘业萍, 毛云飞, 胡艳丽, 张璐璐, 尹伊君, 庞会灵, 宿夏菲, 杨露, 沈向. 苹果园生草对土壤微生物多样性、酶活性及碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1792-1805.
- LIU Y P, MAO Y F, HU Y L, ZHANG L L, YIN Y J, PANG H L, SU X F, YANG L, SHEN X. Effects of grass planting in apple orchard on soil microbial diversity, enzyme activities and carbon components[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(10): 1792-1805. (in Chinese)