

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

李承臻^{1,3}, 袁秉琛^{1,3}, 王燕茹^{2,3}, 蓝俊^{1,3}, 罗丽娟¹, 虞道耿^{3*}

1. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学林学院, 海南海口 570228; 3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101

摘要: 探究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, 为荔枝园间作柱花草提供理论依据。以荔枝园间作柱花草和荔枝单作 2 种模式的土壤样品进行土壤理化性质的测定, 并进行细菌扩增子 16S 测序分析。结果显示: 在荔枝园间作柱花草后, 0~20 cm 土层中, 硝态氮含量显著提高 47.52%, 有效磷含量极显著提高 141.53%, 速效钾含量极显著降低 125.59%; 20~40 cm 的土层深度, 硝态氮含量极显著提高 76.02%, 有效磷含量显著提高 48.52%, 速效钾含量极显著降低 188.57%。Alpha 细菌多样性方面, 在荔枝园间作柱花草后, 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层中, Chao1 指数、AEC 指数、Simpson 指数和 Shannon 指数并无显著变化。在土壤细菌群落结构方面, 土壤样品中主要的优势菌门均为 Acidobacteriota、Proteobacteria、Firmicutes、Chloroflexi、Bacteroidota、Verrucomicrobiota、Actinobacteriota、Gemmatimonadota、Myxococcota, Crenarchaeota 为 0~20 cm 土层深度下间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌门, Proteobacteria、Verrucomicrobiota、Gemmatimonadota 的相对丰度在间作柱花草后的各土层深度均有提高; 在属水平上, 在 0~20 cm 土层, *Candidatus_Nitrosotalea* 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌属, 在 0~40 cm 土层, *Nitrospira* 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌属; 冗余分析结果表明, 土壤细菌群落主要受有效磷、硝态氮和有机质的影响。综上所述, 荔枝园间作柱花草会改善荔枝园土壤的理化性质和改变土壤细菌群落结构, 对荔枝园土壤的环境条件起到一定的优化作用。

关键词: 荔枝; 间作; 柱花草; 土壤养分; 土壤细菌群落结构

中图分类号: S667.1; S551 文献标志码: A

Effects of Intercropping *Stylosanthes guianensis* on Soil Physicochemical Properties and Bacterial Community Structure in a Litchi Orchard

LI Chengzhen^{1,3}, YUAN Bingchen^{1,3}, WANG Yanru^{2,3}, LAN Jun^{1,3}, LUO Lijuan¹, YU Daogeng^{3*}

1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: The study was aimed to investigate the effects of litchi orchard intercropping *Stylosanthes guianensis* on soil physicochemical properties and soil bacterial community structure, and to provide theoretical basis for litchi orchard intercropping *S. guianensis*. Soil samples from litchi orchard intercropped with *S. guianensis* and litchi monocropping modes were used to determine soil physicochemical properties and analyzed by bacterial amplicon sequencing. After intercropping *S. guianensis* in litchi orchard, in the soil layer depth of 0–20 cm, nitrate nitrogen content significantly increased by 47.52%, available phosphorus content highly significantly increased by 141.53% and available potassium content highly significantly reduced by 125.59%; in the soil layer depth of 20–40 cm, nitrate nitrogen content highly

收稿日期 2023-11-01; 修回日期 2024-01-24

基金项目 国家荔枝龙眼产业技术体系项目 (No. CARS-32-20); 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所成果转移转化项目“果园间作牧草技术模式研究与示范” (No. PZS2022001)。

作者简介 李承臻 (1997—), 男, 硕士, 研究方向: 绿肥利用。*通信作者 (Corresponding author): 虞道耿 (YU Daogeng), E-mail: geng0209@126.com。

significantly increased by 76.02%, available phosphorus content highly significantly increased by 48.52%, and available potassium content highly significantly reduced by 188.57%. In terms of alpha bacterial diversity, there were no significant changes in Chao1 index, AEC index, Simpson index and Shannon index in 0–20 cm soil layer and 20–40 cm soil layer after intercropping *S. guianensis* in litchi orchard. In terms of soil bacterial community structure, the main dominant phyla in the soil samples were all Acidobacteriota, Proteobacteria, Firmicutes, Chloroflexi, Bacteroidota, Verrucomicrobiota, Actinobacteriota, Gemmatimonadota, Myxococcota, Crenarchaeota, and Crenarchaeota were soil-specific relative abundances greater than 1% of the phyla after intercropping *S. guianensis* at 0–20 cm soil depth; at the genus level, in the 0–20 cm soil layer, *Candidatus_Nitrosotalea* was the genus with soil-specific relative abundance greater than 1% after intercropping *S. guianensis*, and at the 0–40 cm soil level, *Nitrospira* was the genus with soil-specific relative abundance greater than 1% after intercropping *S. guianensis*, Proteobacteria, Verrucomicrobiota, and Gemmatimonadota increased at all soil depths after intercropping *S. guianensis*; the results of the redundancy analysis showed that the soil bacterial community was mainly affected by effective phosphorus, nitrate nitrogen, and organic matter. In summary, intercropping litchi orchard with *S. guianensis* would improve the physicochemical properties and change the structure of soil bacterial community in litchi orchard soil, and play a certain role in optimizing the environmental conditions of litchi orchard soil.

Keywords: litchi; intercropping; *Stylosanthes guianensis*; soil nutrients; soil bacterial community structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.06.011

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 为无患子科, 荔枝属常绿乔木, 起源于中国^[1]。在中国, 荔枝有着非常悠久的栽培历史, 具有良好的食用价值、药用价值和经济价值^[2-4]。妃子笑是海南栽培十分广泛的荔枝品种, 但此品种在成花过程中产生的花量较多, 当土壤中的养分和水分不足时, 其花、叶的生长发育就会受到严重影响^[5-6]。目前我国荔枝主要栽培于酸性较强的赤红壤和红壤山地地区, 这些土壤的有机质含量和土壤中的阳离子交换量较低, 在农户缺乏正确的田间管理技术的情况下, 经常发生过量施肥, 导致植物生长发育受到影响、土壤肥力下降、造成环境污染等情况, 抑制了荔枝产业的发展^[7-8]。在果园中间作绿肥作物能有效改善土壤质量、提高果树产量和果实品质, 是一种经济效益和生态效益同时兼顾的种植模式^[9]。间作绿肥也会改变土壤细菌的群落结构, 而土壤细菌在土壤生态系统中扮演着至关重要的角色, 其对于改善土壤肥力和维护生态系统结构的平衡具有重要的作用, 研究特定功能的土壤细菌种群的数量和分布, 是了解间作对土壤生态系统的有效方式之一^[10-11]。柱花草 (*Stylosanthes guianensis*) 作为热带地区普遍种植的豆科绿肥, 能显著改善土壤质量、提高作物的产量^[12]。目前已有许多关于间作柱花草对果园土壤的改良影响的研究, 但关于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研究尚无报道^[13-14]。为此, 本研究以荔枝单作为对照, 间作柱花草为处理, 对土壤理化性质和土壤细菌群落进行测定和分

析, 为荔枝间作柱花草的栽培模式提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究所用材料妃子笑荔枝 (*Litchi chinensis* cv feizhixiao)、柱花草 (*Stylosanthes guianensis*) 均来自中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所。

试验地位于中国海南省儋州市那大镇中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所十队试验基地 (19°53'N, 109°57'E, 海拔 121.87 m), 属热带季风气候, 年平均温度 21 °C, 年平均最低温度 7 °C, 年平均最高温度 29 °C, 年平均降水量 1757 mm, 土壤为红壤土, 理化性质见表 1。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 间作试验开始于 2020 年 3 月, 采用随机区组设计, 以荔枝单作为对照 (CK), 荔枝间作柱花草为处理 (T), 设 3 个重复。荔枝树于 2018 年定植, 种植规格为 4 m×5 m。柱花草于 2020 年 3 月定植于荔枝树茎基部 1.5 m 处的荔枝行间, 株间距为 0.5 m×0.5 m, 小区面积为 6 m×18 m。柱花草长期种植于小区内, 当柱花草株高达 80 cm 以上时进行刈割, 刈割高度 30 cm, 刈割后的柱花草在小区内进行覆盖, 并使刈割后剩余的柱花草能够继续生长。于 2023 年 3 月, 测量荔枝树株高、冠幅大小、地径 (离地 20 cm); 在试验小区内使用土钻采用五点取样法, 分别采集 0~20 cm 和

表 1 基础土壤理化性质
Tab. 1 Physical and chemical properties of the base soil

土层 Soil layer/cm	有机碳 TOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	6.42±0.84	0.46±0.04	0.85±0.03	3.96±0.23	26.74±0.98	2.79±0.37	0.69±0.07	39.00±1.42	5.58±0.12
20~40	5.08±0.76	0.45±0.04	0.83±0.07	4.34±0.41	25.02±0.74	1.61±0.21	0.63±0.05	65.00±3.37	5.66±0.14

20~40 cm 土层的土壤 (CK₁: 单作 0~20 cm 土层, CK₂: 单作 20~40 cm 土层, T₁: 间作 0~20 cm 土层深度, T₂: 间作 20~40 cm 土层深度)。每份土样分成 2 份, 一份用液氮速冻后置于-80 °C 冰箱保存, 用于土壤细菌群落测定; 另一份风干后过 1 mm 筛, 用于土壤理化性质测定。

1.2.2 土壤理化因子分析和土壤微生物 DNA 提取 土壤基础养分测定参照鲍士旦^[15]、ABDALLA 等^[16]、鲁如坤^[17]的测定方法。采用凯氏定氮法测定全氮; 采用重铬酸钾氧化法测定有机碳; 采用连续流动分析仪测定铵态氮、硝态氮和有效磷; 采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定全磷; 采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定全钾; 采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾; 采用电位法测定土壤 pH。将土壤放入离心管中, 并使用干冰保存运输至深圳微科盟科技有限公司, 对土壤中的细菌进行 16S 扩增子测序, 使用磁珠法土壤和粪便基因组 DNA 提取试剂盒提取 DNA; 用 341F (5'-CCTAYGGGRBGCASCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACNNGGGTATCTAAT-3') 引物对 V3+V4 可变区进行 PCR 扩增。

1.3 数据处理

使用 Qiime 2 软件中的 DADA2 插件对所有样品的全部原始序列进行质量控制、去噪、拼接、去嵌合体, 形成 ASVs。Alpha 多样性指数利用 QIIME2 core-diversity 插件计算; 用 R 语言 microeco

包进行 LEfSe 分析, 阈值 $P < 0.05$ 、 $LDA \geq 2$; 采用 SPSS 26.0 独立 t 检验分析土壤理化因子差异性; 用 R 语言 vegan 软件包构建微生物菌门与土壤理化因子的相关性; 用 R 语言 psych 包和 pheatmap 包, 绘制相关性 heatmap 图, 分析细菌菌属和土壤理化因子的相关性。

2 结果与分析

2.1 间作柱花草对土壤理化性质的影响

由表 2 可知, T₁ 相比于 CK₁ 土壤硝态氮含量提高了 47.52%, 差异显著 ($P < 0.05$); 有效磷含量提高了 141.53%, 差异极显著 ($P < 0.05$); 速效钾含量降低了 125.59% ($P < 0.05$); 有机碳、全氮、全磷、全钾、铵态氮和 pH 均无显著差异。T₂ 土壤的硝态氮含量比 CK₂ 提高 76.02% ($P < 0.05$); 有效磷含量比 CK₂ 提高 48.52% ($P < 0.05$); 速效钾含量比 CK₂ 降低 188.57% ($P < 0.05$); 有机碳、全氮、全磷、全钾、铵态氮和 pH 均无显著差异。

2.2 间作柱花草对土壤细菌群落多样性变化的影响

Alpha 多样性分析结果表明, ACE 指数和 Chao1 指数能够体现土壤细菌群落的丰富程度, Simpson 指数和 Shannon 指数能够体现土壤细菌群落的多样性和均匀程度。由表 3 可知, T₁ 与 CK₁ 相比、T₂ 与 CK₂ 相比土壤的 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数、Simpson 指数均无显著差异。

表 2 不同间作处理土壤养分含量
Tab. 2 Soil nutrient content under different intercropping treatments

处理 Treatment	总有机碳 TOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP /(g·kg ⁻¹)	全钾 TK /(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ /(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	pH
T ₁	9.58±0.28 ^a	0.66±0.09 ^a	0.94±0.03 ^a	3.22±0.58 ^a	27.28±2.57 ^a	5.96±0.27 ^a	1.57±0.17 ^a	54.67±1.45 ^b	5.61±0.06 ^{Aa}
CK ₁	6.49±0.88 ^b	0.72±0.11 ^a	0.94±0.11 ^a	3.35±0.64 ^a	22.78±1.63 ^a	4.04±0.41 ^b	0.65±0.09 ^b	123.33±3.84 ^a	5.89±0.09 ^{Aa}
T ₂	6.40±0.92 ^a	0.59±0.04 ^a	0.97±0.10 ^a	3.25±1.06 ^a	24.37±1.99 ^a	3.45±0.17 ^a	1.01±0.11 ^a	35.00±2.31 ^b	5.55±0.04 ^{Aa}
CK ₂	6.38±1.12 ^a	0.54±0.05 ^a	0.88±0.06 ^a	3.40±0.63 ^a	20.27±0.99 ^a	1.96±0.43 ^b	0.68±0.03 ^b	101.00±8.02 ^a	5.73±0.08 ^{Aa}

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$), different capital letters in the same column indicate extremely significant difference among treatments ($P < 0.01$).

表 3 不同间作处理的 α 多样性指数
Tab. 3 α diversity index under different intercropping treatments

土层 Soil layer/cm	Chao1 指数 Chao1 index	ACE 指数 ACE index	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index
T ₁	2313.13±25.89 ^a	2314.68±26.78 ^a	9.96±0.05 ^a	0.9974±0.00 ^a
CK ₁	2334.93±68.77 ^a	2338.83±68.66 ^a	9.92±0.10 ^a	0.9968±0.00 ^a
T ₂	2196.36±155.36 ^a	2198.48±156.85 ^a	9.78±0.18 ^a	0.9966±0.00 ^a
CK ₂	2172.41±71.53 ^a	2173.67±72.72 ^a	9.73±0.05 ^a	0.9965±0.00 ^a

注：同列相同小写字母表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。
Note: Same lowercase letters in the same column indicate no significant difference among treatments ($P>0.05$).

2.3 间作柱花草对土壤细菌群落结构的影响

2.3.1 门水平结构分析 由图 1 可知，T₁ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的菌门有 10 个，CK₁ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的菌门有 9 个，Crenarchaeota 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌门。T₁ 与 CK₁ 相比，Proteobacteria、Bacteroidota、Verrucomicrobiota 和 Gemmatimonadota 的相对丰度分别提高 15.69%、80.10%、13.12% 和 27.45%；Acidobacteriota、Firmicutes、Chloroflexi、Actinobacteriota 和 Crenarchaeota 的相对丰度分别降低了 17.05%、13.98%、7.09%、13.30% 和 4.50%。

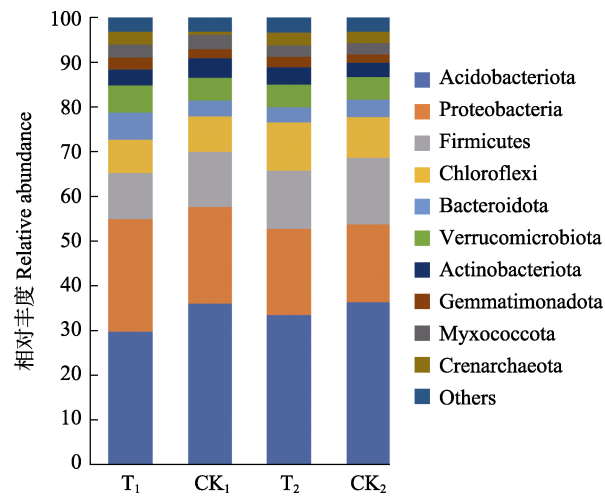


图 1 土壤细菌群落门水平上组成变化
Fig. 1 Changes in composition of soil bacterial communities at the phylum level

T₂ 和 CK₂ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的菌门共有 10 个。T₂ 与 CK₂ 相比，Proteobacteria、Chloroflexi、Verrucomicrobiota、Actinobacteriota、Gemmatimonadota 和 Crenarchaeota 的相对丰度分别提高 12.29%、17.39%、4.96%、15.06%、41.86% 和 13.07%；Acidobacteriota、Firmicutes、Bacteroidota 和 Myxococcota 的相对丰度分别降低 9.43%、

13.80%、19.27% 和 9.66%。
2.3.2 属水平结构分析 由图 2 可知，T₁ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的属有 9 个，CK₁ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的属有 8 个，Candidatus_Nitrosotalea 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌属。T₁ 与 CK₁ 相比，Bryobacter、Candidatus_Solibacter、Gemmatimonas、Rhizomicrobium 和 Nitrospira 的相对丰度分别提高了 22.52%、14.08%、22.75%、29.90% 和 3.81%；酸杆菌门（Acidobacteriota）的亚群 Gp2、Candidatus_Koribacter、Ktedonobacter 和 Xanthobacteraceae 的相对丰度分别降低 49.72%、3.02%、14.81% 和 0.66%。

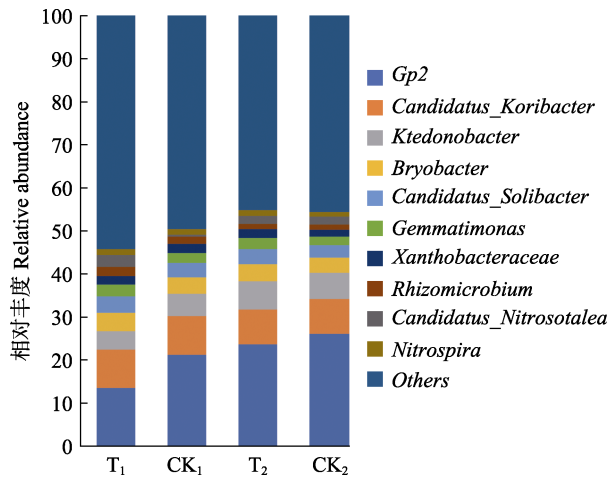


图 2 土壤细菌群落属水平上组成变化
Fig. 2 Changes in the composition of soil bacterial communities at the genus level

T₂ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的属有 9 个，CK₂ 土壤细菌群落结构相对丰度大于 1% 的属有 8 个，Nitrospira 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌属。T₂ 与 CK₂ 相比，Ktedonobacter、Bryobacter、Candidatus_Solibacter、Gemmatimonas 和 Xanthobacteraceae 的相对丰度分别提高 6.00%、9.69%、19.15%、38.06% 和

25.94%; 酸杆菌门 (Acidobacteriota) 的亚群 *Gp2*、*Candidatus_Koribacter*、*Rhizomicrobium* 和 *Candidatus_Nitrosotalea* 的相对丰度分别降低 12.62%、1.35%、7.27% 和 6.49%。

2.3.3 LefSe 分析 由图 3 可知, Actinobacteria (*p*_Actinobacteria) 在组间存在显著差异, 且在 CK₂ 土壤中被显著富集, 丰度最高 (CK₂ 土壤中

Actinobacteria 的丰度显著高于其他各组); 同时, Actinobacteria 的 LDA 得分值大于其他分类单元, 表明其对组间差异的影响更大。酸杆菌门 (Acidobacteriota) 的亚群 *Gp2* (*g*_Gp2) 且在 CK₂ 土壤中被显著富集, 丰度最高; *Gp2* 的 LDA 得分值大于其他分类单元, 表明其对组间差异的影响更大。

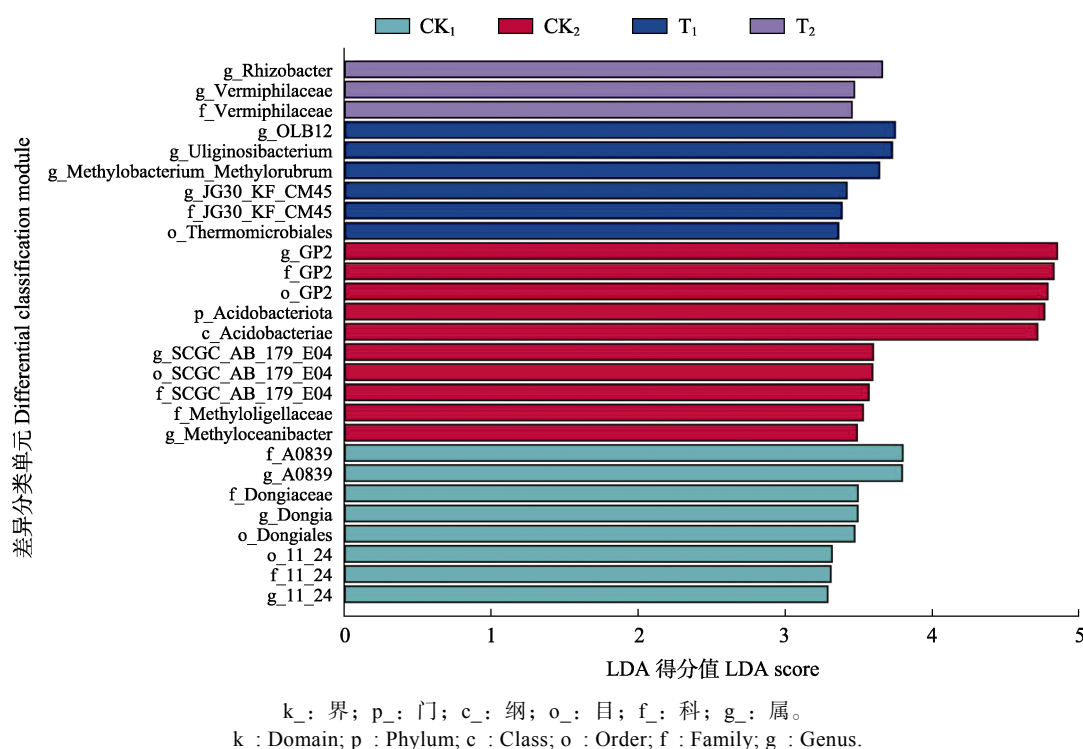


图 3 显著差异物种 LDA 值分布柱状图

Fig. 3 Histogram of the distribution of LDA values for significantly different species

2.4 土壤细菌与理化因子的相关性分析

2.4.1 土壤细菌门水平与理化因子的相关性分析 在门水平上, 对相对丰度 1% 以上的细菌中进行冗余分析。由图 4 可知, 在间作的土壤细菌群落主要受有效磷、硝态氮和有机质的影响; 其中 Gemmatimonadota、Proteobacteria、Bacteroidota、Verrucomicrobiota、Crenarchaeota 与有效磷和有机质呈正相关, Chloroflexi、Firmicutes、Acidobacteriota、Myxococcota 和 Actinobacteriota 与有效磷和全钾呈负相关; 硝态氮与 Actinobacteriota、Myxococcota、Gemmatimonadota、Proteobacteria、Bacteroidota、Verrucomicrobiota 呈正相关, 与 Acidobacteriota、Firmicutes、Chloroflexi、Crenarchaeota 呈负相关。

2.4.2 土壤细菌属水平与理化因子的相关性分析 在属水平上, 对相对丰度 1% 以上的细菌与土壤理

化因子进行相关性分析 (图 5)。*Rhizomicrobium* 与总有机碳、有效磷、硝态氮呈正相关 ($P < 0.05$); *Xanthobacteraceae* 与铵态氮呈正相关; *Candidatus_Nitrosotalea* 与速效钾呈负相关 ($P < 0.05$); *Bryobacter* 与铵态氮、有效磷呈正相关 ($P < 0.01$), 与 pH、速效钾呈负相关 ($P < 0.01$); *Candidatus_Solibacter* 与铵态氮 ($P < 0.05$)、有效磷 ($P < 0.01$) 呈正相关, 与 pH ($P < 0.01$)、速效钾 ($P < 0.05$) 呈负相关; 酸杆菌门 (Acidobacteriota) 的亚群 *Gp2* 与硝态氮 ($P < 0.01$)、有效磷 ($P < 0.05$) 呈负相关; *Ktedonobacter* 与硝态氮呈负相关 ($P < 0.05$)。

2.5 间作柱花草对荔枝树株高、冠幅大小、地径的影响

由图 6 可知, 间作柱花草后荔枝树的株高对比 CK 提高了 17.41% ($P < 0.05$), 这说明间作柱花草有利于荔枝树株高的提高; 间作柱花草后荔枝

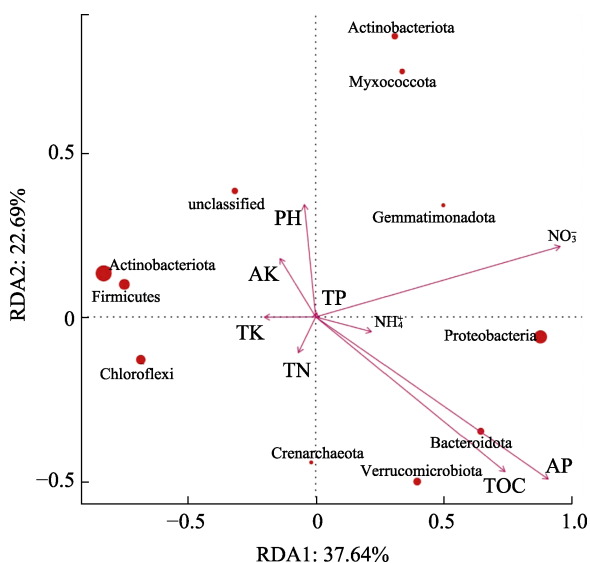


图 4 土壤细菌门水平与土壤养分的相关性

Fig. 4 Correlation between soil bacteria phylum level and soil nutrients

树的冠幅对比 CK 提高了 19.09% ($P < 0.05$), 这说明间作柱花草有利于荔枝树冠幅的增加; 间作柱花草后荔枝树的冠幅对比 CK 无显著差异 ($P < 0.05$), 这说明间作柱花草对荔枝树地径的影响不大。

3 讨论

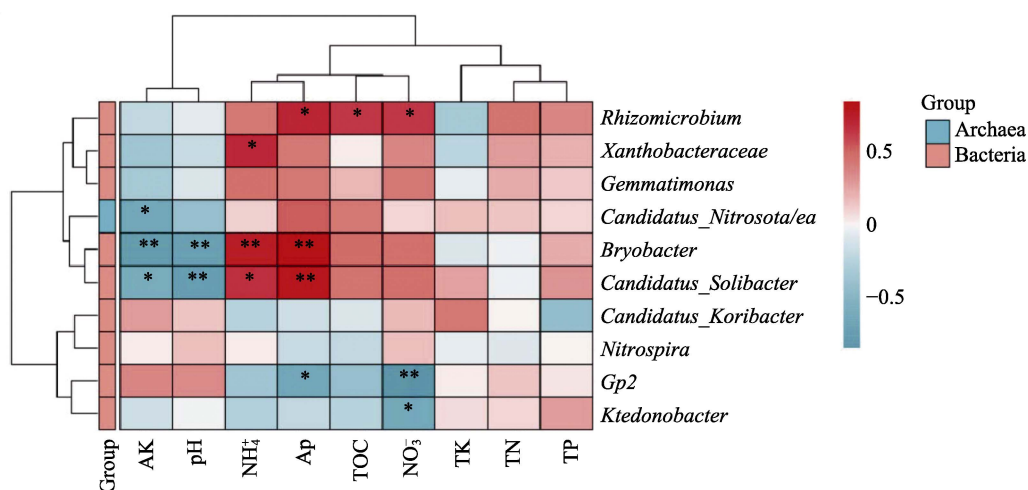
3.1 间作柱花草对土壤理化性质的影响

南方热区普遍出现土壤酸化及缺磷等问题, 磷是植物生长发育的基本元素之一, 能够促进植物根系的生长和形成、提高果实品质、增强植物的抗逆性。有研究表明种植豆绿肥能够有效提高

土壤有效磷的含量, 其自然脱落物在腐解的过程中能够产生有机酸类可以吸收部分难溶性养分, 转化为有效的形态, 绿肥作物体内所含有的磷在此过程中释放到土壤内, 提高土壤的有效磷含量^[18]。本研究在荔枝间作柱花草后, T_1 、 T_2 有效磷含量有显著提高, T_1 比 CK_1 提高了 141.53%, T_2 比 CK_2 提高了 48.52%, 说明间作柱花草能够显著提高土壤表层的有效磷含量。在荔枝间作柱花草后, T_1 和 T_2 的速效钾含量分别显著降低 125.59% 和 188.57%, 可能是由于海南的降雨频繁, 降雨量大, 土壤中的钾离子容易被雨水淋溶和冲刷流失, 加之柱花草生长时对速效钾吸收, 导致了土壤的速效钾含量降低^[19]。在荔枝间作柱花草后, T_1 和 T_2 的硝态氮含量分别显著提高 47.52% 和 76.02%, 可能是与豆科植物有自生固氮和共生固氮的能力能够从大气中捕获分子氮和通过与根瘤菌共生固氮有关^[20-22]。

3.2 间作柱花草对土壤细菌群落多样性的影响

作为评估微生物群落多样性的指标之一, Alpha 多样性指数能够反映土壤微生物群落中的物种组成概况, 揭示微生物种群的均匀度与丰富度^[23]。研究发现, 合理的间作策略可以增加土壤中细菌、真菌等微生物的数量, 提高土壤微生物群落的多样性及功能性, 优化微生物群落结构, 保持微生态系统的平衡^[24-26]。同时, 部分研究显示, 长期豆科植物间作可能导致土壤细菌数量的降低, 但其丰富度不受影响^[27]。这些结果表明,

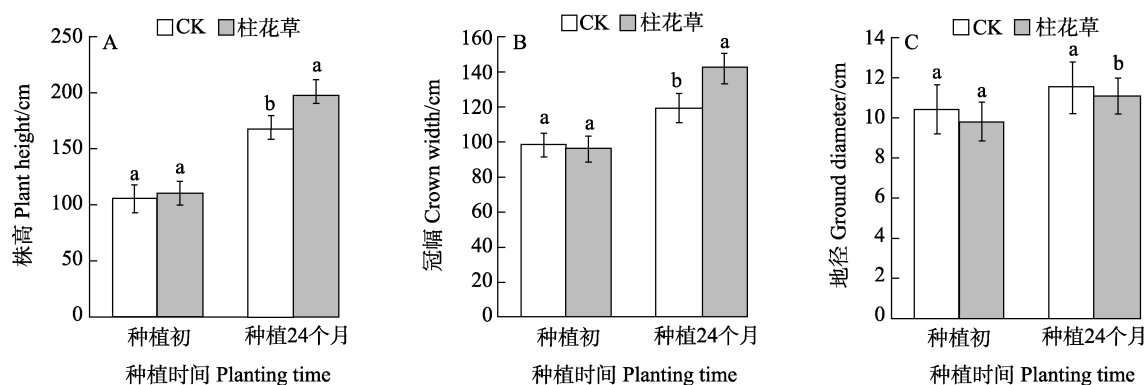


*表示显著相关 ($P < 0.05$), **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

* indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

图 5 土壤细菌属水平相对丰度与土壤理化性质的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between relative abundance of soil bacterial genus levels and soil physical and chemical properties



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 6 间作处理对荔枝树株高、冠幅和地径的影响

Fig. 6 Effects of intercropping treatments on plant height, crown width and ground diameter of litchi trees

间作对土壤微生物群落多样性的影响可能与间作植物种类的差异有关。

在本研究中, 柱花草间作期间土壤 Alpha 多样性各项指标的差异均未达到显著水平, 表明间作柱花草不会影响菌群的均匀度与丰富度。

3.3 间作柱花草对土壤细菌群落结构的影响

菌群的相对丰度变化能够体现土壤环境的变化, 通过菌群丰度的变化能够较地了解土壤环境的变化过程^[28]。

在门水平上, Bacteroidota 是土壤微生物中一类重要的细菌, 可以分解土壤中的有机物质, 产生酸性物质与土壤中的某些全氮化合物相互作用, 促进全氮化合物的分解和释放, 可以将有机氮化合物转化为铵态氮或硝态氮^[29]。Proteobacteria 在土壤中的主要作用是分解有机物质和固氮, 部分 Proteobacteria 类群的成员也与植物共生, 能够通过固氮帮助植物获取营养^[30]。Verrucomicrobiota 在降解有机物方面有重要作用^[31]。本研究在 T_1 和 T_2 中均观察到相对丰度提高的菌门, 如 Proteobacteria、Bacteroidota、Verrucomicrobiota 等, 其中部分菌门在 2 个土层中都呈现相似的变化趋势, 可能与土壤养分中氮含量的增加和植物脱落物的分解有关。Acidobacteriota 是一种普遍存在于土壤中的嗜酸菌, 既往的研究表明, Acidobacteriota 的比例可以反映土壤的酸性条件, 并且与土壤 pH 存在极显著的负相关关系^[32]。然而, 在本研究中, Acidobacteriota 及酸杆菌门 (Acidobacteriota) 的亚群 Gp2 与土壤 pH 并未显示出显著的相关性, 这可能意味着在本研究的特定环境条件下, 酸杆菌及其亚群 Gp2 的存在可能受到

其他环境因素的影响, 而非仅仅与土壤的 pH 有关。Crenarchaeota 是土壤中占主导地位的氨氧化微生物^[33]。在本研究中 Crenarchaeota 菌门仅在 T_1 中表现出相对丰度大于 1%, 这表明间作柱花草后土壤铵态氮含量的提高可能对土壤微生物群落的结构产生了一定影响。

在属水平上, 在 T_1 中细菌群落相对丰度大于 1% 的属增加到 9 个, 而 CK_1 土壤中只有 8 个。其中, *Candidatus_Nitrosotalea* 是间作柱花草后土壤特有的相对丰度大于 1% 的菌属, 这表明间作柱花草可能提高了土壤中的氮循环能力, 因为 *Candidatus_Nitrosotalea* 属包含已知的氨氧化微生物, 它们在土壤氮循环中扮演着重要角色^[34]。Bryobacter 是一类能够分解有机质, 并降解咪唑啉酮类和氟草净除草剂的厌氧细菌^[35]。*Candidatus_Solibacter* 可以分解复杂的有机物质, 利用碳源的菌属^[36]。*Nitrospira* 是一种已知的硝化细菌, 是氮循环的主要参与者, 能够为土壤提供植物可以利用的氮源^[37]。*Gemmatimonas* 在土壤中的主要功能通常包括有机物质的分解, 同时也涉及氮素的代谢^[38]。*Bryobacter*、*Candidatus_Solibacter*、*Gemmatimonas* 和 *Nitrospira* 等属的相对丰度在间作柱花草土壤中均有所提高。这些菌属通常与有机物的分解和氮的循环相关联, 它们的提升可能意味着间作柱花草提高了土壤的肥沃度。在 20~40 cm 的土层中, 与 0~20 cm 土层相似, T_2 增加了相对丰度大于 1% 属的数量, *Nitrospira* 为间作柱花草后土壤特有相对丰度大于 1% 菌属, *Nitrospira* 的提升对土壤氮循环尤其重要, 因为该属是已知的硝化作用关键参与者^[37]。

3.4 土壤细菌与理化因子的相关性分析

对土壤细菌群落的冗余分析揭示了土壤中某些重要物质因子对细菌群落结构的显著影响。冗余分析结果表明,有效磷、硝态氮和有机质是影响柱花草间作阶段土壤细菌群落变化的主要因素,这3种因素通常被视为极其重要的土壤属性,它们在地球化学循环,尤其是氮和磷循环中起着关键作用,并且影响微生物的生活力和生产力^[39]。土壤细菌门水平相对丰度有显著变化的 *Bacteroidota* 和 *Gemmatimonadota* 与有效磷呈正相关, *Acidobacteriota* 与有效磷和硝态氮呈负相关,说明有效磷是间作过程中影响土壤细菌群落变化的主要环境因子,这与前人研究^[40-41]发现的 pH 或碱解氮为影响土壤细菌群落变化的主要环境因子不同。

本研究发现,在属水平上 *Rhizomicrobium*、*Candidatus_Solibacter*、*Xanthobacteraceae*、*Ktedonobacter*、*Bryobacter* 和 *Gp2* 与土壤氮素形态(硝态氮、铵态氮)显著相关,说明这些细菌可能参与了土壤氮素循环过程。它们在氮素转化过程中的作用可能有助于柱花草间作对土壤氮素状况的改善。*Rhizomicrobium*、*Bryobacter*、*Candidatus_Solibacter* 和 *Gp2* 与铵态氮、硝态氮、有效磷和速效钾有着多重相关性,而间作柱花草改变了其相对丰度,又显著改变了土壤硝态氮、有效磷和速效钾的含量。说明间作可以改变土壤微生物群落结构,这些相对丰度的变化可能与间作柱花草导致的氮、磷、钾等养分含量变化有关。

3.5 不同间作模式对荔枝树生长的影响

果园间作绿肥在影响荔枝树的生长方面可能表现出正面或负面的效果,这些效果受到种植的果树品种、选择的间作作物、土壤条件以及管理措施等多种因素的影响^[42]。例如杏树与苜蓿进行间作,尽管在资源上存在一定程度上的争夺,但仍然有助于提高林下土壤的理化性质,从而有效地促进杏树的生长和发育^[43];库尔勒香梨与豆科牧草间作,通过根系相互作用,也已被证实有助于增加库尔勒香梨的产量^[44]。间作柱花草后,荔枝树的株高得到了明显的提升,这可能是由于柱花草在土壤中形成良好的生态环境,通过改善土壤结构或提高土壤有机质水平,从而增强荔枝树的生长。荔枝树冠幅对比 CK 组增加了 19.09%,可能因为柱花草的间作增加土壤中的氮含量,进

而提高植物的营养物和水分吸收,利于冠幅增大。本研究发现,间作柱花草能够极显著增加荔枝树的株高和冠幅,表明间作柱花草对荔枝树的生长有促进作用。

4 结论

研究表明,间作柱花草对荔枝树生长具有积极影响。具体表现为荔枝树株高提高了 17.41%,冠幅提高了 19.09%。此外,间作柱花草能增加土壤有效磷含量和硝态氮含量,从而为荔枝树提供了更多的营养物质,但间作柱花草降低了土壤速效钾的含量,说明长期间作柱花草需要适量补施钾肥。同时,研究发现间作柱花草有助于改善土壤微生物群落结构,增加部分有利于氮循环和有机物降解的菌门及菌属相对丰度。本研究探讨了荔枝园间作柱花草模式下对土壤养分、微生物多样性和荔枝树植物指标的影响,为今后的生产实践及研究提供理论依据。

参考文献

- [1] 吴淑嫻. 中国果树志:荔枝卷[M]. 北京:中国林业出版社, 1998.
WU S X. Chinese fruit tree history: Lychee roll[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [2] 萤烛. 药食同源话荔枝[J]. 解放军健康, 2016(4): 32.
YING Z. Lychee of medicine and food[J]. PLA Health, 2016(4): 32. (in Chinese)
- [3] 刘玉壶, 罗献瑞. 中国植物志:第四十七卷[M]. 北京:科学出版社, 1985: 69-70.
LIU Y H, LUO X R. Flora of China: volume XLVII[M]. Beijing: Science Press, 1985: 69-70. (in Chinese)
- [4] 吴宇. 海南妃子笑荔枝高产的栽培技术的探讨[J]. 农业科技通讯, 2019(8): 389-391.
WU Y. Discussion on cultivation technology of high-yield lychee of litchi Feizixiao in Hainan[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019(8): 389-391. (in Chinese)
- [5] 吴定尧, 张海岚. 妃子笑荔枝的特性[J]. 中国南方果树, 1997(5): 26-27.
WU D Y, ZHANG H L. Characteristics of Feizixiao lychee[J]. South China Fruits, 1997(5): 26-27. (in Chinese)
- [6] 胡福初, 范鸿雁, 何凡, 华敏, 王祥和. 妃子笑荔枝高效花穗处理及保果壮果技术[J]. 中国热带农业, 2014(3): 65-67.
HU F C, FAN H Y, HE F, HUA M, WANG X H. High-efficiency flower spike treatment and fruit preservation

- technology of Feizixiao lychee[J]. *China Tropical Agriculture*, 2014(3): 65-67. (in Chinese)
- [7] 陈明智, 林彬, 谢国干, 谢延坤, 苏林啸. 海南荔枝园土壤基本养分状况分析[J]. *海南师范学院学报(自然科学版)*, 2001, 14(2): 57-59.
- CHEN M Z, LIN B, XIE G G, XIE Y K, SU L X. An analysis of the basic nutrients in the soil of Hainan's litchi orchards[J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2001, 14(2): 57-59. (in Chinese)
- [8] 周兆禧, 林兴娥, 刘永霞, 王必遵, 明建鸿, 高宏茂, 毛海涛, 许方瑜. 海南荔枝果园土壤存在的问题及提肥增效措施[J]. *中国热带农业*, 2018(5): 23-24.
- ZHUO Z X, LIN X E, LIU Y X, WANG B Z, MING J H, GAO H M, MAO H T, XU F Y. Problems in the soil of Hainan litchi orchards and measures to improve fertilizer efficiency[J]. *China Tropical Agriculture*, 2018(5): 23-24. (in Chinese)
- [9] 范鸿雁, 赵亚, 冯学杰, 胡福初, 王祥和, 郭利军, 罗志文, 许书海. 槟榔林下复合栽培产业现状及发展对策[J]. *中国热带农业*, 2019(5): 10-14.
- FAN H Y, ZHAO Y, FENG X J, HU F C, WANG X H, GUO L J, LUO Z W, XU S H. The current situation and development strategies of betel nut under forest complex cultivation industry[J]. *China Tropical Agriculture*, 2019(5): 10-14. (in Chinese)
- [10] BUNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, CREAMER R E, DE DEYN G. Soil quality: a critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.
- [11] ZHAO X H, DONG Q Q, HAN Y, ZHANG K Z, SHI X L, YANG X, YUAN Y, ZHOU D Y, WANG K, WANG X G, JIANG C J, LIU C J, LIU X B, ZHANG H, ZHANG Z M, YU H Q. Maize/peanut intercropping improves nutrient uptake of side-row maize and system microbial community diversity[J]. *BMC Microbiology*, 2022, 22: 14.
- [12] 周颜. 橡胶园间作不同柱花草后土壤肥力变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- ZHOU Y. Research on the soil fertility changes of rubber plantation after different stylosanthes intercropping[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [13] 刘晓霞, 陶云彬, 章日亮. 不同绿肥连续还田对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(9): 1379-1382.
- LIU X X, TAO Y B, ZHANG R L. Effects of continuous application of green manure on rice yield and soil fertility[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(9): 1379-1382. (in Chinese)
- [14] 张久东, 包兴国, 曹卫东, 车宗贤, 胡志桥, 卢秉林. 间作绿肥作物对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, 50(4): 43-47.
- ZHANG J D, BAO X G, CAO W D, CHE Z X, HU Z Q, LU B L. Effects of intercropping green manure crops on maize yield and soil fertility[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2013, 50(4): 43-47. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [16] ABDALLA M, HASTINGS A, CHENG K, YUE Q, CHADWICK D, ESPENBERG M. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(8): 2530-2543.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Soil agrochemical analytical methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [18] 吴双. 夏绿肥植物还田对休耕农田土壤磷素的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- WU S. Effects of summer green manure plants on soil phosphorus in fallow farmland[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020. (in Chinese)
- [19] 李盟军, 艾绍英, 宁建凤, 王荣辉, 姚建武, 余丹妮. 不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(1): 33-42.
- LI M J, AI S Y, NING J F, WANG R H, YAO J W, WU D N. Runoff characteristics of phosphorus and potassium from a perennial vegetable field under different nutrition managements[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 33-42. (in Chinese)
- [20] 张秋磊, 林敏, 平淑珍. 生物固氮及在可持续农业中的应用[J]. *生物技术通报*, 2008(2): 1-4.
- ZHANG Q L, LIN M, PING S Z. Biological nitrogen fixation and its application in sustainable agriculture[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2008(2): 1-4. (in Chinese)
- [21] 赵叶舟, 王浩铭, 汪自强. 豆科植物和根瘤菌在生态环境中的地位和作用[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(4): 7-12.
- ZHAO Y Z, WANG H M, WANG Z Q. The role of leguminous plants and rhizobium in ecological environment[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(4): 7-12. (in Chinese)
- [22] 张志权, 束文圣, 廖文波, 蓝崇钰. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J]. *生态学杂志*, 2002(2): 47-52.
- ZHANG Z Q, SHU W S, LIAO W B, LAN C Y. Role of legume species in revegetation of mined wastelands[J]. *Chi-*

- nese Journal of Ecology, 2002(2): 47-52. (in Chinese)
- [23] 姚玉娇, 梁婷, 马源, 周会程, 肖海龙, 孙斌, 张德罡, 陈建纲. 土壤微生物群落多样性对高寒草甸退化程度的响应[J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1489-1497.
YAO Y J, LIANG T, MA Y, ZHOU H C, XIAO H L, SUN B, ZHANG D G, CHEN J G. Response of soil microbial community diversity to degradation degree of alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6): 1489-1497. (in Chinese)
- [24] 赵春晓, 郑海春, 邵翻身, 高娃, 王霞, 王昇. 不同处理对河套灌区玉米土壤硝态氮和铵态氮动态及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 99-104.
ZHAO C X, ZHENG H C, GAO F S, GAO W, WANG X, WANG S. Effect of different materials on dynamic change of soil nitrate and ammonium nitrogen and N uptake by maize in Hetao irrigation area[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(6): 99-104. (in Chinese)
- [25] 刘广勤, 朱海军, 周蓓蓓, 生静雅, 张萌. 鼠茅覆盖对梨园杂草控制及土壤微生物和酶活性的影响[J]. 果树学报, 2010, 27(6): 1024-1028.
LUI G Q, ZHU H J, ZHOU B B, SHENG J Y, ZHANG M. Effects of sod culture with *Vulpia myuros* on weed control, soil microbial biomass and soil enzyme activities in pear orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(6): 1024-1028. (in Chinese)
- [26] DING T T, YAN Z C, ZHANG W Z, DUAN T Y. Green manure crops affected soil chemical properties and fungal diversity and community of apple orchard in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21: 1089-1102.
- [27] ZHONG Z M, HUANG X S, FENG D Q, XING S H, WENG B Q. Long-term effects of legume mulching on soil chemical properties and bacterial community composition and structure[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 268: 24-33.
- [28] 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)
- [29] CHU H, FIERER N, LAUBER C L. Soil bacterial diversity in the Arctic is not fundamentally different from that found in other biome[J]. Environmental Microbiology, 2010, 12(11): 2998-3006.
- [30] LI Y, ZHANG Q, LI M, SAN W J, WANG Y, WU L F, YANG Y Q. Bioaugmentation of sequencing batch reactor for aniline treatment during start-up period: investigation of microbial community structure of activated sludge[J]. Chemosphere, 2020, 243: 125426.
- [31] JI B, ZHANG M, GU J, MA Y Q, LIU Y. A self-sustaining synergetic microalgal-bacterial granular sludge process towards energy-efficient and environmentally sustainable municipal wastewater treatment[J]. Water Research, 2020, 179: 115884.
- [32] HUANG J J, MA K, XIA X X, GAO K L, LU Y H. Biochar and magnetite promote methanogenesis during anaerobic decomposition of rice straw[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 143: 107740.
- [33] SHEN J P, ZHANG L M, DI H J, HE J Z. Are view of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in Chinese soils[J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3: 296.
- [34] 翁泽斌, 彭世文, 王淑民, 何东东, 郑国建, 徐辰生, 蔡海洋, 刘泓, 陈志厚. 钾对烟草根际氮细菌、氮古菌群落及氮代谢的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 39-47.
WENG Z B, PENG S W, WANG S M, HE D D, ZHENG G J, XIU C S, CAI H Y, LIU H, CHEN Z H. Effect of different potassium levels on nitrogen metabolism, nitrogen bacteria and nitrogen archaea bacteria communities in rhizosphere of tobacco plant[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(2): 39-47. (in Chinese)
- [35] PERTILE M, SOUSA R M S, MENDES L W, ANTUNES J E L, OLIVEIRA L M S. Response of soil bacterial communities to the application of the herbicides imazethapyr and flumyazin[J]. European Journal of Soil Biology, 2021, 102: 103252.
- [36] 杜思瑶, 于森, 刘芳华, 肖雷雷, 张洪霞, 陶军, 顾卫, 顾京晏, 陈茜. 设施种植模式对土壤细菌多样性及群落结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1615-1625.
DU S Y, YU M, LIU F H, XIAO L L, ZHANG H X, TAO J, GU W, GU J Y, CHEN X. Effect of facility management regimes on soil bacterial diversity and community structure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1615-1625. (in Chinese)
- [37] 凌宇, 赵远哲, 王海燕, 闫国凯, 常洋, 董伟羊, 储昭升, 王欢. HRT 对 A/O-BF 处理低碳氮比农村生活污水脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 927-935.
LING Y, ZHAO Y Z, WANG H Y, YAN G K, CHANG Y, DONG W Y, CHU Z S, WANG H. Effects of HRT on A/O-BF nitrogen removal of low C/N rural domestic sewage[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(4): 927-935. (in Chinese)

- [38] 刘士奇. 热活化过硫酸盐处理利福霉素菌渣及其菌渣肥对土壤性能影响研究[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2022.
LIU S Q. Effect of rifamycin mycelial dreg treated by thermally activated persulfate and its mycelial dreg fertilizer on soil properties[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [39] DELGADO-BAQUERIZO M, CASTILLO-MONROY A P, MAESTRE F T, GALLARDO A. Plants and biological soil crusts modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010(42): 376-378.
- [40] 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)
- [41] 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/OL]. *热带作物学报*, [2023-05-19]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WdAl4K16JyUqBORn3molZzGtAjrjmj2Yu-DfC8-Nhs-Pc9AuBSdcCCK8enTGC0PJ0tLrpOy6UeD-VpSucvBU3tagWUS9CqH1OHPW7LN2Ie-fEKNqEzIoTQwBZokI-jgEqL4f-6oUBZg4=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
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/OL]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, [2023-05-19]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WdAl4K16JyUqBORn3molZzGtAjrjmj2Yu-DfC8-Nhs-Pc9AuBSdcCCK8enTGC0PJ0tLrpOy6UeD-VpSucvBU3tagWUS9CqH1OHPW7LN2Ie-fEKNqEzIoTQwBZokI-jgEqL4f-6oUBZg4=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>. (in Chinese)
- [42] 覃婵婵. 荔枝幼龄果园间作对荔枝生长发育和根际生态的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
QIN C C. Effects of intercropping on growth and rhizosphere ecology of Litchi in young orchards[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese)
- [43] 姜黎, 郑银, 王平, 刘国军. 刈割对杏树间作的紫花苜蓿根系和土壤理化性质的影响[J]. *北方园艺*, 2017(24): 123-128.
JIANG L, ZHENG Y, WANG P, LIU G J. Effect of mowing on the root system distribution of alfalfa under apricot intercropping and lateral root distribution of apricot and soil physical and chemical properties in the apricot garden[J]. *Northern Horticulture*, 2017(24): 123-128. (in Chinese)
- [44] 王宁欣. 豆科牧草与库尔勒香梨间作下生物固氮与转移效率的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
WANG N X. Study of biological nitrogen fixation and transfer efficiency under the intercropping of legumes and *Pyrus sinkiangensis*[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. (in Chinese)