

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202211015

韦建华, 俞月凤, 曾成城, 等, 2024. 间套种模式对喀斯特地区核桃根际土壤养分和微生态环境的影响 [J]. 广西植物, 44(3): 439–451.

WEI JH, YU YF, ZENG CC, et al., 2024. Effects of intercropping patterns on rhizosphere soil nutrients and microecological environment of walnut in karst area [J]. *Guihaia*, 44(3): 439–451.



间套种模式对喀斯特地区核桃根际土壤养分和微生态环境的影响

韦建华^{1,2}, 俞月凤², 曾成城², 李 琴², 苏利荣², 秦 芳², 杨钙仁^{1*}, 何铁光²

(1. 广西大学 林学院, 南宁 530004; 2. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 3. 广西耕地保育重点实验室, 南宁 530007)

摘 要: 为探究喀斯特地区间套种核桃对根际土壤养分及微生态环境的影响, 该研究以桂西北喀斯特地区间套种核桃-桑树(H-SS)、核桃-十大功劳(H-SD)、核桃-玉米(H-YM)以及核桃单种(H-D)的核桃根际和非根际土壤为试验对象, 基于室内化学实验和 Illumina Miseq PE300 高通量测序技术, 分析不同种植模式下核桃根际与非根际土壤理化性质和微生物特征。结果表明: (1) 不同模式核桃根际土壤对全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效磷(AP)、土壤有机碳(SOC)和交换性钙主要表现为不同程度的富集作用, 对速效氮(AN)有亏缺现象。H-SS对TN、TP和SOC富集作用明显, H-YM富集AP、速效钾(AK)和交换性钙的效果最佳。(2) 蔗糖酶活性、微生物量碳、氮及细菌均出现明显的根际效应, H-YM的蔗糖酶活性、磷酸酶活性和微生物量碳最高, 但间套种模式降低了微生物量氮和细菌的根际效应。(3) 3种间套种模式下根际土壤细菌 Shannon 指数均高于核桃单种。(4) 根际土壤微生物多样性主要受养分影响, 非根际主要受酶活性影响。综上认为, 间套种能够提高根际养分富集率、增强土壤酶活性、促进微生物增殖。此中, H-SS根际土壤对TN、TP和SOC的富集作用明显, 其土壤细菌含量也最高; H-YM根际土壤富集AP、AK和交换性钙的效果更佳。在实际生产中可根据当地经营习俗选择桑树或玉米进行间套种。

关键词: 喀斯特地区, 核桃, 间套种, 土壤养分, 微生物特征, 根际效应

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2024)03-0439-13

Effects of intercropping patterns on rhizosphere soil nutrients and microecological environment of walnut in karst area

WEI Jianhua^{1,2}, YU Yuefeng², ZENG Chengcheng², LI Qin²,
SU Lirong², QIN Fang², YANG Gairen^{1*}, HE Tieguang²

收稿日期: 2023-08-20 接受日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(32160284); 广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA297092); 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科2019ZX126)。

第一作者: 韦建华(1996—), 硕士研究生, 主要从事自然保护地管理与生态修复技术研究, (E-mail) weijianhua202209@163.com。

*通信作者: 杨钙仁, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文与生态工程研究, (E-mail) yanggr@gxu.edu.cn。

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Arable Land Conservation, Nanning 530007, China)

Abstract: To study the effects of intercropping walnut in karst area on rhizosphere soil nutrients and microecological environment, four different planting modes of walnut in the northwest Guangxi karst area were selected as experimental subjects. The modes included intercropping walnut with mulberry (H-SS), walnut with *Mahonia fortunei* (H-SD), walnut with corn (H-YM), and monoculture walnuts (H-D). The physicochemical properties and microbial characteristics of the walnut rhizosphere and non-rhizosphere soils under different planting modes were analyzed using laboratory chemical experiments and Illumina Miseq PE300 high-throughput sequencing technology. The results were as follows: (1) The walnut rhizosphere soils of different modes exhibited different degrees of enrichment in total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available phosphorus (AP), soil organic carbon (SOC), and exchangeable calcium, while available nitrogen (AN) showed a deficiency. Among them, H-SS showed significant enrichment effects on TN, TP, and SOC, while H-YM demonstrated the best enrichment effects on AP, AK, and exchangeable calcium. (2) Sucrase activity, microbial biomass carbon and nitrogen, and bacteria all exhibited significant rhizosphere effects, with H-YM showing the highest sucrase activity, phosphatase activity, and microbial biomass carbon. However, intercropping modes reduced the rhizosphere effects of microbial biomass nitrogen and bacteria. (3) Under the three intercropping modes, the Shannon index of rhizosphere soil bacteria was higher than that of monoculture walnuts. (4) Intercropping could enhance the diversity of rhizosphere soil bacteria. Moreover, the diversity of rhizosphere soil microorganisms was mainly influenced by nutrients, while non-rhizosphere soil was primarily affected by enzyme activities. In conclusion, intercropping can increase the enrichment ratio of rhizosphere nutrients, enhance soil enzyme activities, and promote microbial proliferation. Among the four different planting modes, H-SS shows significant enrichment effects on TN, TP, and SOC in rhizosphere soil, and it also has the highest soil bacterial content. H-YM exhibits better enrichment effects on AP, AK, and exchangeable calcium in rhizosphere soil. Therefore, in practical production, intercropping with mulberry or corn can be chosen based on local farming practices to optimize land use and improve ecological benefits. This study is of great significance for the development of sustainable agriculture in the northwest Guangxi karst area and provides a scientific basis for agricultural production and ecological conservation in similar ecological environments. Additionally, this research offers new ideas and methods for promoting agricultural modernization and facilitating the rational utilization of land resources and improvements in the ecological environment in karst area.

Key words: karst area, walnut, intercropping, soil nutrients, microbial characteristics, rhizosphere effect

植物根系通过在土壤穿插、分泌有机物等方式引起土壤微生物结构与功能变化,从而实现土壤的塑造(Kulmatiski et al., 2008)。塑造后土壤理化性质和微生物性质显著区别于土体,形成了土壤-根系-微生物相互作用的根际土壤,根际土壤是土壤中养分循环和能量流动最活跃部分,其范围一般为离根轴表面数毫米范围之内(咎看卓等,2022)。植物根系是根际土壤有机物、养分、土壤酶和土壤微生物组分结构的主要作用因子,其作用效应与植物种类、数量、土壤类型等密切相关(李丽娟等,2020)。

间套作是一种重要的作物多样化种植模式,可高效利用土壤养分等资源提高耕地产量(Chen et

al., 2019),其增产机制主要为生态位互补和种间促进磷吸收作用(Xue et al., 2016)。植物通过根系将富含维生素、酶、植物生长调节素以及氨基酸等物质分泌至根系周围,为土壤微生物提供丰富的碳源,使得根际土壤的微生物种类和数量等得到优化,加快根际土壤养分的转化速率(韩丽梅等,2000;朱丽霞等,2003;韩雪等,2006;由海霞等,2006)。已有研究显示,核桃树间套作也存在相似的促进作用,核桃树间套作作物(钱进芳,2013;周楷玲等,2019;曾成城等,2021)和药用植物(李晨晨等,2018)均可提高林地土壤有机质和氮磷钾养分含量并改善土壤物理结构。核桃间套作种植模式增加了土壤根系量和根系分泌物量,根际土壤占土

体比例较单作更高,根系死亡后作为有机物保留在土壤中,从而提高林地土壤的养分和有机质含量(汪其同等,2017)。同时,土壤团聚体和微生态环境也得到同步改善(伍家辉等,2019)。间套作有利于核桃园土壤微生物生物多样性的维持(李荣波等,2021)。此外,土壤微生物的多样性和群落结构会受核桃品种的影响,其中真菌受影响较大而细菌相对较小(鲍佳书等,2022)。

桂西北多为喀斯特地区,其基岩以碳酸盐岩为主,土壤为高钙和高 pH 值的棕色石灰土,土养分容易流失。而间套作有利于核桃园水土保持,并防止土壤养分流失(曾成城等,2021),但目前关于喀斯特地区棕色石灰土核桃园间套作对土壤养分和微生态环境的影响还鲜有研究。本研究以核桃-桑树(H-SS)、核桃-十大功劳(H-SD)、核桃-玉米(H-YM)、核桃单种(H-D)的核桃根际和非根际土壤为试验材料,基于室内化学实验和高通量测序技术,拟探讨以下问题:(1)喀斯特地区不同种植模式下根际和非根际土壤理化性质差异;(2)喀斯特地区不同种植模式下根际土壤养分富集率变化;(3)喀斯特地区不同种植模式下核桃根际土壤微生物特征。以期为揭示喀斯特核桃种植区微生物关系和核桃种植业提质增效等提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区河池市凤山县(106°40'—107°02' E、24°15'—24°49' N),地处云贵高原南部边缘地带,县境内的东部和中部为中山和低山,东北部和西部为峰丛洼地,南部为峰丛洼地和峰林槽谷。山脉岩性主要为砂岩、页岩和石灰岩,其中石灰岩约占全县土地总面积的41%,该地区石漠化较严重。自然土壤为棕色石灰土,适合种植核桃,该县核桃种植面积约占广西的72%。气候属于中亚热带山地季风气候,年平均气温 17.5 °C、日照时数 1 399.8 h、降水量 1 545.4 mm,年无霜期 325 d。

1.2 样地设置及样品采集

在凤山县典型核桃种植区,选择海拔、坡向、坡度、林龄、种植密度、间套种年限等因素相近且药肥管理相同的核桃-桑树(H-SS)、核桃-十大功劳(H-

SD)、核桃-玉米(H-YM)、核桃单种(H-D)林地各 1 个,分别建立 20 m × 20 m 的样地各 3 块,共计 12 块,样地基本情况见表 1。以根周 5 mm 内、外的土壤分别作为根际土和非根际土,根际土采用抖落法采集,非根际土采用“S”形采样法,总共采集土壤样品 24 份(根际土、非根际土各 12 份)。每份土样均分为 3 小份,1 小份采集后迅速放入液氮罐保存,带回实验室后保存于-80 °C 冰箱中用于高通量测序;1 小份迅速保存于-4 °C 冰箱中用于土壤微生物数量(细菌、真菌、放线菌)、土壤微生物生物量碳、氮和酶活性的测定(高日平等,2023);余下 1 小份常温保存用于土壤养分等的测定。

1.3 土壤样品测试项目和方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;全氮(TN)含量采用半微量凯氏法-流动注射仪法测定;全磷(TP)含量采用 NaOH 熔融,钼锑抗显色-紫外分光光度法测定;全钾(TK)含量采用 NaOH 熔融,火焰光度法测定;速效磷(AP)采用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃浸提法测定;速效钾(AK)和交换性钙(Ca)采用 NH₄OAc 浸提法测定;pH 值采用电极电位法测定;有效氮(AN)采用碱解扩散法测定。

1.3.2 土壤微生物生物量测定 微生物量氮采用 CHCl₃熏蒸 K₂SO₄提取-氮自动分析仪法测定;微生物量磷采用 CHCl₃熏-NaHCO₃提取-Pi 测定-外加 Pi 校正法——紫外分光光度法测定。微生物量碳、氮转换系数均为 0.45,微生物量磷转换系数为 0.40(何振立,1994)。

1.3.3 土壤微生物多样性分析 (1)微生物总 DNA 提取。采用 E. Z. N. A. 土壤 DNA 试剂盒(Omega Biotek, Norcross, GA, U.S.)进行微生物 DNA 抽提,按照试剂盒说明书进行具体操作。完成 DNA 抽提后,检测 DNA 浓度和纯度,利用 1%琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性。

(2)目标片段 PCR 扩增。取适量样品,对细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增(潘志针等,2022)。正向引物为 338F(CTCCTA CGGGAGGCAGCAG),反向引物为 806R(GCACTA CHVGGGTWTCTAAT),并在反向引物上引入 barcode。PCR 反应程序:95 °C 预变性 3 min,变性 30 s,55 °C 退火 30 s,72 °C 延伸 45 s,共循环 27 次;在 72 °C 下延伸 10 min。PCR 扩增体系:4 μL 的 5× Fast Pfu Buffer,2 μL 的 2.5 mmol · L⁻¹ dNTPs,

表 1 林地基本情况(平均值±标准差)
Table 1 Basic condition of forest land ($\bar{x}\pm s$)

种植类型 Planting type	核桃林龄 Walnut forest age (a)	间作年限 Intercropping years (a)	坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	树高 Tree height (m)	胸径 DBH (cm)
核桃-桑树 H-SS	9.5±1.41	6	中下坡 Medium downhill	12.5±3.54	5.15±0.07	11.30±0.71
核桃-十大功劳 H-SD	9.0±1.15	6	中下坡 Medium downhill	20.0±8.66	4.77±0.74	10.83±1.05
核桃-玉米 H-YM	10.1±1.10	6	中下坡 Medium downhill	10.7±3.64	5.43±0.78	11.03±2.40
核桃单种 H-D	9.8±0.71	—	中下坡 Medium downhill	20.0±7.07	5.55±1.06	12.30±0.71

0.8 μL 的 5 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 正反引物, 0.4 μL 的 Fast Pfu DNA 聚合酶, 10 ng 的 DNA 模板。

真菌 ITS rDNA 的 PCR 扩增程序: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 2 min, 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 30 s, 55 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s; 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 60 s; 共循环 35 次; 在 72 $^{\circ}\text{C}$ 下延伸 10 min。上下游引物分别为 TTAGCATGGAATAATRRRAATAGGA 和 TCTGGACCTGGTGAGTTTCC。扩增体系: 5 \times Fast Pfu Buffer, 4 μL ; 2.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ dNTPs, 2 μL ; 正反引物各 0.8 μL ; Fast Pfu Buffer DNA 聚合酶 0.4 μL ; DNA 模板 10 ng。扩增产物用 2% 的琼脂糖凝胶提取, 用 Axy Prep DNA 凝胶提取试剂盒 (Axygen Biosciences, Union City, CA, USA) 进行纯化, 使用 Quanti Fluor TM-ST (Promega, USA) 进行定量。

(3) 建库和测序。根据定量检测结果, 将扩增产物混合为 1 个样本, 构建克隆文库。根据库检结果计算每个文库的上样量, 用双末端测序方法进行高通量测序。测序数据先通过 QIME 软件过滤, 去除低质量的序列, 再通过 Flash 软件拼接和 Uparse 软件聚类, 依据 97% 相似度将序列聚集为 OTUs (操作分类单元: operational taxonomic unit), 应用 RDP Classifier 程序将序列与 UNITE + INSD (International Nucleotide Sequence Databases: NCBI, EMBL, DDBJ) 数据库进行比对测出对应的微生物群落组成。

基于 Illumina Miseq PE300 平台, 委托上海美吉生物医药科技有限公司完成对 PCR 扩增产物的高通量测序。

1.3.4 土壤酶活性测定 采用 ELISA 检测试剂盒 (上海瑞番生物科技有限公司), 即 RF-Z310 土壤脲酶 (UREASE) ELISA 试剂盒、RF10806-B 土壤过氧化氢酶 (CAT) ELISA 试剂盒、RF12984 土壤酸性磷酸酶 (ACP) ELISA 试剂盒、RF-Z319 蔗糖酶 (invertase) ELISA 试剂盒测定土壤相关呼吸酶活性。

1.4 数据处理

根际富集率 (enrichment ratio, E) 反映养分的富集程度, 计算公式如下:

$$E = \frac{\text{根际含量} - \text{非根际含量}}{\text{非根际含量}} \times 100\%$$

采用 Excel 2019 软件和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验不同类型样地土壤理化性质、微生物特性和酶活性指标及植物养分之间的差异性, 用最小显著差数法 (least significant difference, LSD) 检验差异显著性。用 R 3.6.3 中 Corplot 包绘制 Pearson 相关性图。

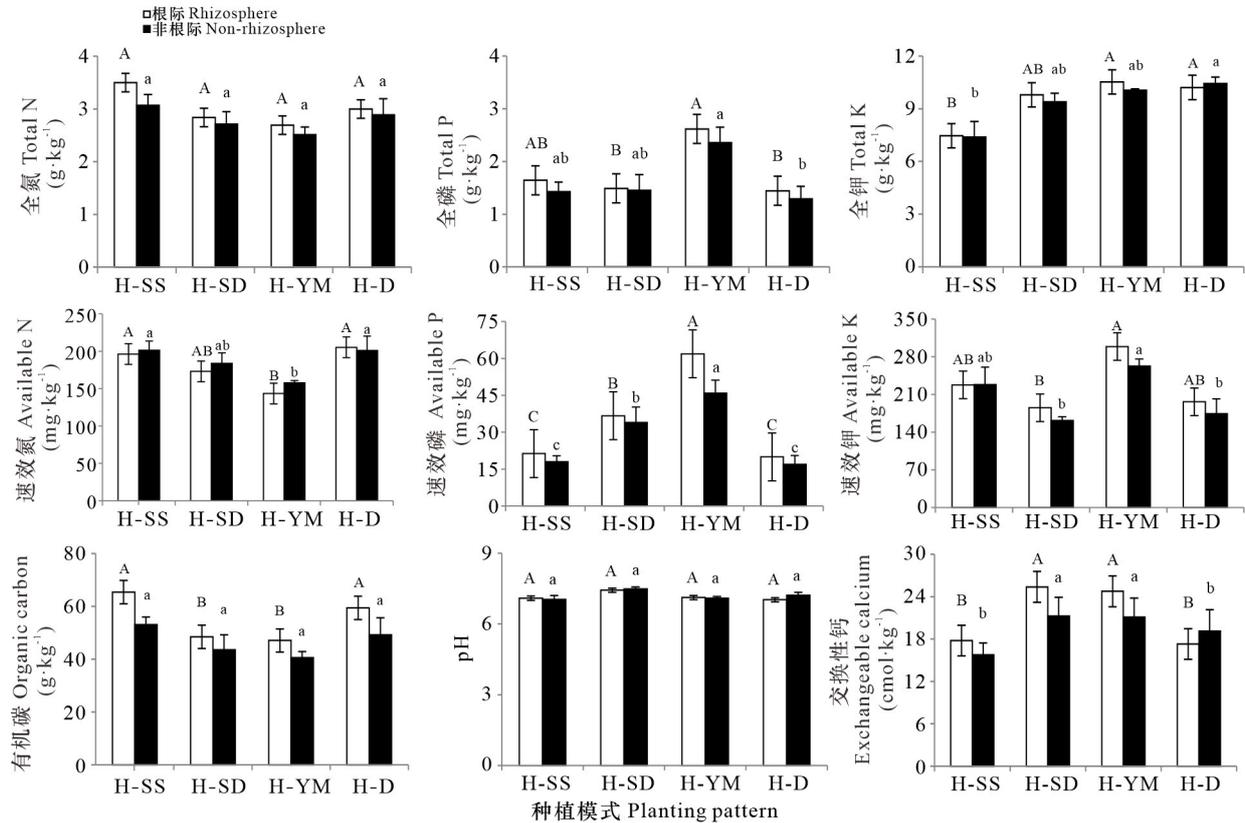
2 结果与分析

2.1 不同种植模式核桃根际和非根际土壤的化学性质

由图 1 可知, 除了速效氮 (AN) 外, 各间套种模式根际土壤养分含量均高于非根际, 并且根际土壤各养分的变化趋势和差异与非根际相似。除了全氮 (TN) 和 pH 外, 其他养分在不同种植模式之间均存在显著差异, H-YM 根际、非根际土壤全磷 (TP)、速效磷 (AP) 和速效钾 (AK) 的含量均高于其他模式, 而 AN 却最低, 这与玉米本身对 N 元素的大量需求有关。

2.2 不同种植模式核桃根际土壤养分富集率

由表 2 可知, H-SS 根际土壤 TN 和 TP 富集率分别为 14.01% 和 14.92%; 除了 H-D 外, 3 种间套种模式 AN 富集率都出现了不同程度亏缺现象, 最明显的是 H-SD, 为 -5.91%; H-YM 的 AP 富集率为 34.79%; H-SS 模式 AK 出现轻微亏缺现象; 不同种植模式 SOC 富集率由大到小依次表现为 H-SS > H-D > H-YM > H-SD; H-D 交换性钙富集率出现明显亏缺现象, 其他 3 种植模式富集率都大于 10%。各间套



不同大小写字母表示不同种植模式之间根际或非根际土壤养分差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences in rhizosphere or non-rhizosphere soil nutrients between different planting patterns ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同种植模式核桃根际和非根际养分特征

Fig. 1 Rhizosphere and non-rhizosphere nutrient characteristics of walnut under different planting patterns

表 2 不同种植模式核桃根际养分富集率

Table 2 Rhizosphere nutrient enrichment ratios of walnut under different planting patterns

种植模式 Planting pattern	根际养分富集率 Rhizosphere nutrient enrichment ratio (%)							
	TN	TP	TK	AN	AP	AK	SOC	Ca
H-SS	14.01	14.92	1.04	-2.58	18.11	-0.20	23.15	12.90
H-SD	4.55	2.52	4.18	-5.91	8.05	14.54	11.08	19.42
H-YM	7.30	10.88	4.67	-1.07	34.79	13.68	16.01	17.19
H-D	3.69	11.60	-2.14	2.04	17.68	12.50	20.72	-9.48

种植模式 TN、TK 和交换性钙根际养分富集率高于核桃单种,表明间套种总体上有利于根际营养的富集。

2.3 不同种植模式核桃根际和非根际土壤酶活性和可培养微生物丰度

由图 2 可知,所有种植模式根际土壤蔗糖酶活性都高于非根际,其中 H-YM 最明显;而脲酶含量

非根际均高于根际,H-SS 根际和非根际脲酶活性均高于 H-D;H-YM 磷酸酶活性最低。由图 3 可知,所有种植模式根际微生物量碳、氮和细菌含量均高于非根际,但不同种植模式间的变化规律不同,非根际微生物量碳由大到小依次表现为 H-SD > H-D > H-SS > H-YM。H-SS 根际和非根际可培养细

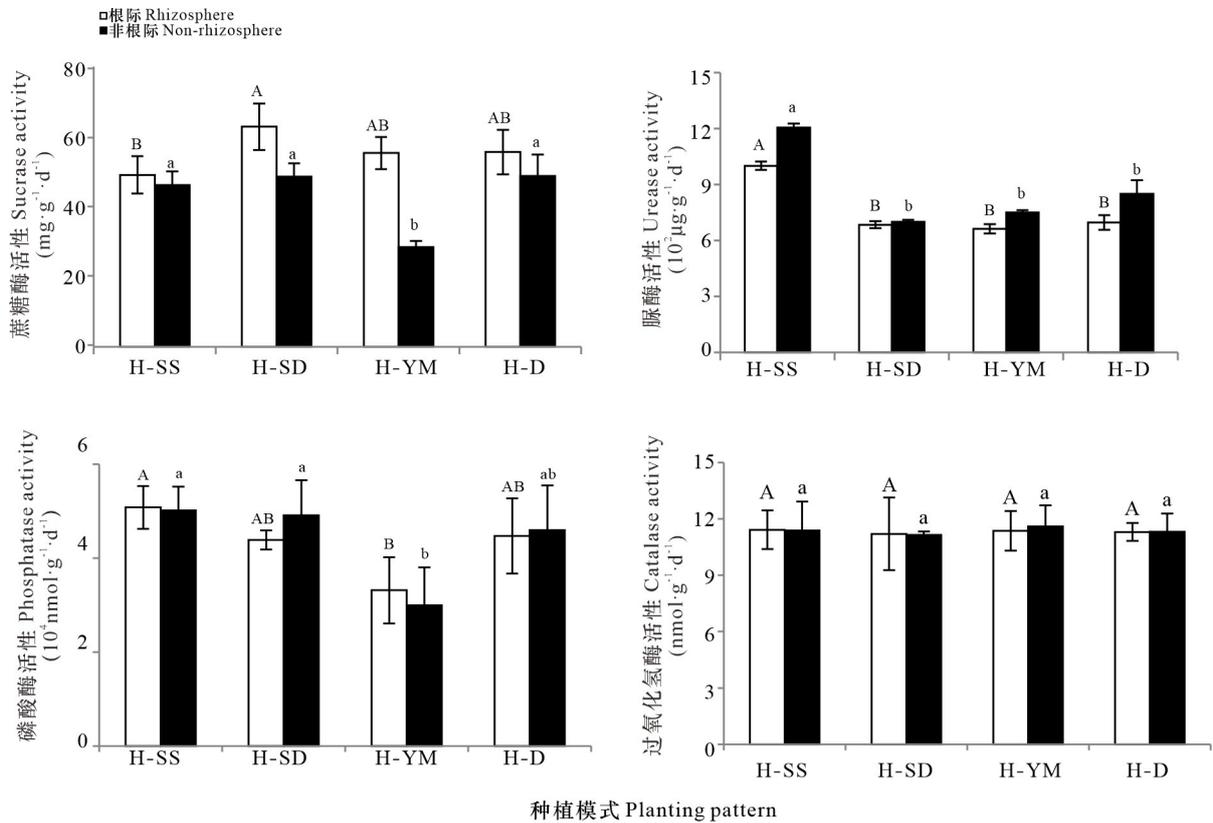


图 2 不同种植模式核桃根际与非根际土壤酶活性

Fig. 2 Enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of walnut under different planting patterns

菌均高于 H-D; H-YM 非根际微生物量磷最高, 而根际最低; H-SS 和 H-SD 根际土壤可培养真菌高于 H-D; 间套种模式放线菌都低于单种模式。除了过氧化氢酶和根际微生物量碳外, 其余土壤微生物在不同种植模式之间均存在差异, 并且根际和非根际土壤表现不一样。

2.4 不同种植模式核桃土壤酶活性和可培养微生物的根际效应

由表 3 可知, 各种种植模式土壤蔗糖酶活性均出现根际效应, 其中 H-YM 最高, 为 1.94; 土壤脲酶活性根际效应均小于 1, 表现为根际负效应; 各间套种模式的微生物量氮、磷和细菌根际效应均低于单种模式, 间套种模式的微生物量磷均出现负根际效应, 其中 H-YM 最明显, 比值仅为 0.41; H-YM 微生物量碳表现出了较强根际效应。所有种植模式细菌均出现根际效应且核桃单种最高。间套种模式的真菌只有 H-SD 出现根际效应且高于 H-D。

2.5 不同种植模式核桃根际和非根际土壤微生物多样性及群落组成

由表 4 可知, 不同种植模式根际和非根际土壤细菌和真菌覆盖率范围为 0.899~0.998, 说明测序能够比较真实地反映土壤样本的微生物群落特征。3 种间套种模式下核桃根际和非根际土壤细菌 Shannon 指数均高于单种模式; 除了 H-SS 根际外, 其他间套种模式根际细菌 Ace 指数都高于 H-D; 间套种模式非根际真菌 Ace 指数也都高于核桃单种, 不同间套种模式的细菌和真菌非根际 Chao 指数都高于 H-D。3 种间套种模式对根际和非根际土壤细菌、真菌多样性影响不一, 总体上根际略优于非根际, 间套种略优于单种。

由图 4:a 可知, 不同种植模式下核桃根际和非根际土壤细菌优势菌群在分类层次的门水平上, 相对丰度大于 10% 的分别为放线菌门 (Actinobacteriota, 25.7%~34.1%)、变形菌门 (Proteobacteria, 18.2%~20.6%)、酸杆菌门 (Acidobacteriota,

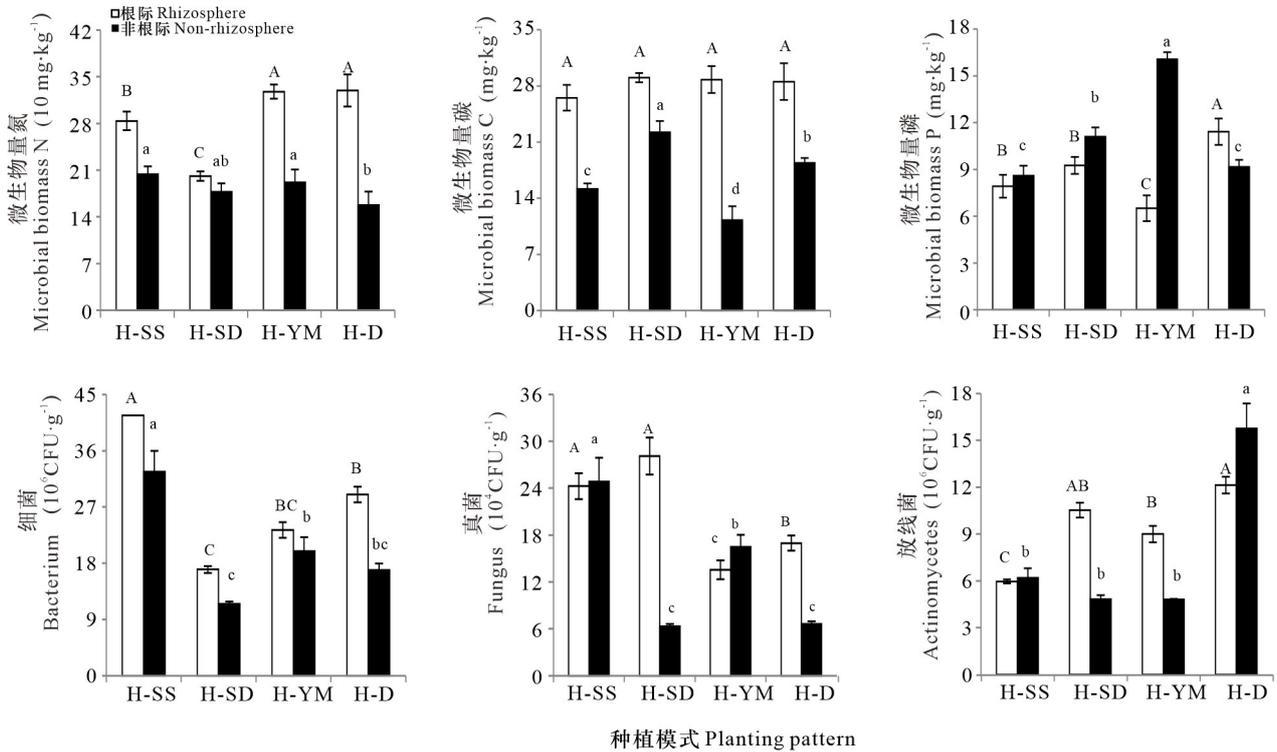


图 3 不同种植模式核桃根际与非根际土壤可培养微生物丰度

Fig. 3 Abundance of rhizosphere and non-rhizosphere soils culturable microorganisms of walnut under different planting patterns

11.0% ~ 21.0%)、绿弯菌门 (Chloroflexi, 10.3% ~ 14.7%), 在不同种植模式及根际和非根际土壤间均无显著差异。由图 4:b 可知, 土壤真菌在分类层次的门水平上, 优势菌群有子囊菌门 (Ascomycota)、担子菌门 (Basidiomycota)、毛霉门 (Mucoromycota)、未分类的 SAR_k_norank, 其中子囊菌门的相对丰度最高, 为 71.0% ~ 89.2%, 各优势菌群在不同种植模式及根际和非根际土壤间均无显著差异, 说明间套种模式对核桃根际和非根际土壤细菌和真菌的优势菌群没有产生显著变化。

2.6 土壤微生物多样性和其他指标的相关性

由图 5 可知, 根际土壤真菌 Shannon 指数与全氮及有机碳显著负相关 ($P < 0.05$), 细菌 Ace 指数和 Chao 指数均与速效磷极显著正相关 ($P < 0.01$); 非根际土壤真菌 Shannon 指数与磷酸酶极显著正相关 ($P < 0.01$), 与过氧化氢酶显著负相关 ($P < 0.05$), Simpson 指数则与磷酸酶极显著负相关 ($P < 0.01$), 与过氧化氢酶显著正相关 ($P < 0.05$); 细菌 Simpson 指数与脲酶和磷酸酶显著负相关 ($P < 0.05$)。这表明根际和非根际土壤微生物多样性分别主要受土壤养分和酶活性的影响。

3 讨论与结论

3.1 不同种植模式对核桃土壤养分及根际养分富集率的影响

土壤养分是反映土壤肥力的重要指标, 研究土壤养分在不同套种模式下的变化特征, 可以反映土壤养分受种植作物的影响情况 (何婕平和康师安, 1994; 王作梅和宋秀琴, 1995; 贾树海等, 2014)。间套种作物在垂直空间上与核桃形成分层, 其叶片、枝以及茎可降低雨滴、刮风对土壤表面的冲刷。同时, 套种作物导致更密集的根系能更好地固土、减少水土流失, 最大程度地保持土壤肥力 (葛乐等, 2011)。间作不同作物对土壤 N、P、K 有不同影响 (李尚玮等, 2016)。本研究表明, 除全氮和 pH 外, 其他养分在不同种植模式之间均存在差异, 不同养分表现不一致; 根际土壤养分含量高低与非根际土壤在不同种植模式之间表现一致, 其中 H-YM 模式 AK、TP、AP、交换性钙的含量高于其他种植模式, 可能是间套种玉米会进行秸秆还田的原因。本研究发现, 除 H-SS 外, 其余 2 种

表 3 不同种植模式土壤酶活性及微生物特征的根际效应

Table 3 Rhizosphere effects of soil enzyme activities and microbial characteristics under different planting patterns

种植模式 Planting pattern	蔗糖酶 Sucrase	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase	微生物 量氮 Microbial biomass nitrogen	微生物 量碳 Microbial biomass carbon	微生物 量磷 Microbial biomass phosphorus	细菌 Bacterium	真菌 Fungus	放线菌 Actinomyces
H-SS	1.06	0.83	1.01	1.00	1.39	1.75	0.92	1.28	0.98	0.96
H-SD	1.29	0.98	0.89	1.01	1.13	1.31	0.83	1.48	4.44	2.18
H-YM	1.94	0.88	1.11	0.98	1.71	2.55	0.41	1.17	0.82	1.88
H-D	1.14	0.82	0.97	1.00	2.09	1.55	1.25	1.71	2.56	0.77

表 4 不同种植模式核桃根际与非根际土壤细菌和真菌多样性

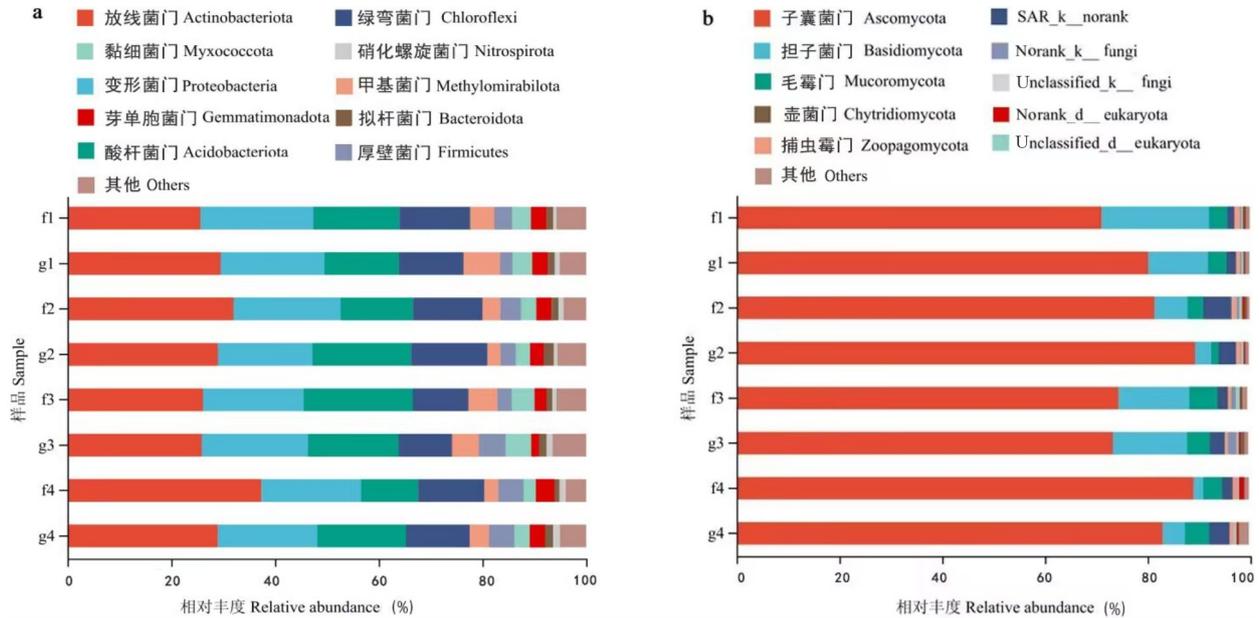
Table 4 Variation of bacterial and fungal diversities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of walnut under different planting patterns

菌种 Strain	种植模式 Planting pattern	部位 Position	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Ace 指数 Ace index	Chao 指数 Chao index	覆盖率 Coverage rate
细菌 Bacterium	H-SS	根际 Rhizosphere	5.878	0.006	964.400	957.150	0.907
		非根际 Non-rhizosphere	5.830	0.005	1 022.825	1 013.477	0.909
	H-SD	根际 Rhizosphere	5.821	0.007	1 161.421	1 066.831	0.911
		非根际 Non-rhizosphere	5.824	0.006	1 002.989	1 001.829	0.911
	H-YM	根际 Rhizosphere	5.918	0.005	1 172.178	1 185.115	0.899
		非根际 Non-rhizosphere	5.789	0.007	1 182.869	1 017.078	0.909
真菌 Fungus	H-D	根际 Rhizosphere	5.768	0.007	1 003.686	1 008.411	0.918
		非根际 Non-rhizosphere	5.600	0.008	896.052	891.665	0.926
	H-SS	根际 Rhizosphere	2.655	0.125	109.921	109.617	0.996
		非根际 Non-rhizosphere	3.072	0.079	116.658	113.741	0.996
	H-SD	根际 Rhizosphere	3.143	0.075	112.235	113.744	0.997
		非根际 Non-rhizosphere	3.056	0.082	106.428	106.385	0.997
	H-YM	根际 Rhizosphere	2.903	0.095	102.324	103.465	0.997
		非根际 Non-rhizosphere	2.560	0.157	106.926	105.597	0.996
	H-D	根际 Rhizosphere	2.970	0.100	110.612	112.459	0.997
		非根际 Non-rhizosphere	2.852	0.113	91.197	91.847	0.998

间套种模式土壤有机碳含量均显著低于核桃单种,这与 Rodney 等(2006)的研究结果不一致,作为衡量土壤肥力的重要指标(朱锟恒等,2021),说明十大功劳和玉米生长较旺盛对土壤碳库吸收量大,导致土壤有机碳含量减少,对此,可适当使用有机肥来解决。

根际效应指植物通过根系不断从土壤中吸收大量养分,由于不同植物的吸收速率不一致,根际土壤的养分容易出现富集或是贫乏的现象(司莉

青,2021)。本研究发现,H-SS 的 TN、TP、TK、AP、SOC 和交换性钙以及 H-YM 的 TN、TK、AP、AK、交换性钙的根际养分富集率均大于 H-D,证明间套种模式活化土壤养分,提高核桃根系吸收营养的能力(张璞进等,2009;韩福贵等,2021)。此外,软绳武和刘芷宇(1984)研究显示,当土壤中肥料氮的供应受到限制时,AN 在土壤中亏缺区延伸大于 AP 和 AK,而本研究发现所有间套种模式根际 AN 富集率均出现负数且小于 H-D,这与间套种模式



f1. H-D 非根际土壤; **g1.** H-D 根际土壤; **f2.** H-SS 非根际土壤; **g2.** H-SS 根际土壤; **f3.** H-SD 非根际土壤; **g3.** H-SD 根际土壤; **f4.** H-YM 非根际土壤; **g4.** H-YM 根际土壤。

f1. H-D non-rhizosphere soil; **g1.** H-D rhizosphere soil; **f2.** H-SS non-rhizosphere soil; **g2.** H-SS rhizosphere soil; **f3.** H-SD non-rhizosphere soil; **g3.** H-SD rhizosphere soil; **f4.** H-YM non-rhizosphere soil; **g4.** H-YM rhizosphere soil.

图 4 不同种植模式核桃根际和非根际土壤细菌和真菌群落优势菌门相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of dominant bacteria and fungi in rhizosphere and non-rhizosphere soils of walnut under different planting patterns

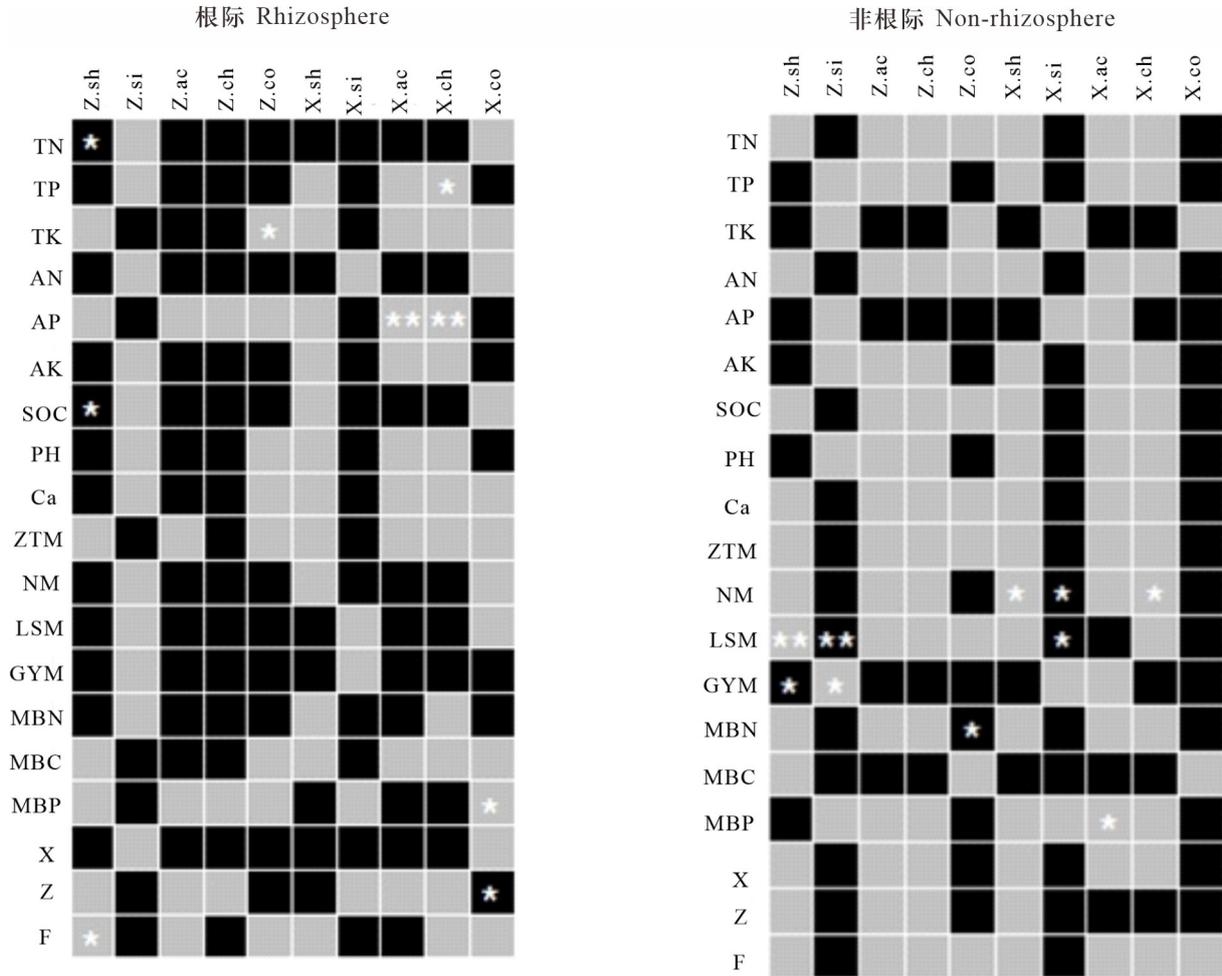
对土壤 AN 消耗较单种更快有关,可适当追加氮肥来缓解。

3.2 不同种植模式下核桃土壤酶活性、微生物特征及根际效应

土壤酶参与土壤环境中的一切生物化学过程,与营养物质循环、有机质的分解、能量转移、环境质量等密切相关(弋良朋和张辉, 2011; 夏雪等, 2011)。蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性之间的关系以及总体活性对评估土壤肥力水平的高低具有重要指导意义(Jing et al., 2017)。本试验数据显示,除了过氧化氢酶活性在各处理间无显著差异外,不同间套种模式土壤根际和非根际蔗糖酶、脲酶和磷酸酶均存在一定的差异,说明间套种对其林下土壤酶活性具有促进或者抑制作用,与曾成城等(2021)研究核桃林下种植农作物对其林下土壤酶活性具有较明显促进作用的结论存在差异,可能与取样时间不一致以及不同施肥方式等有关。

土壤微生物参与土壤碳氮转化、养分和能量循环等土壤过程,并且性状受土地利用方式、施肥、污染等因素影响较大,是最为敏感的土壤质量

生物学指标(Giller, 1996; Anderson, 2003)。本研究发现所有种植模式根际土壤微生物量氮、碳、细菌以及间套种模式的放线菌均高于非根际,表明非根际土壤微生物更容易受到环境影响。在不同间套种模式中,核桃间套种玉米模式的根际微生物量氮、碳高于非根际,是玉米根际能够提高脲酶活性、利于碳氮积累的结果,戴建军等(2013)也有此发现。间套种模式微生物量磷均表现为根际小于非根际,这主要是由于在土壤根际周围有较多的解磷细菌,它们的存在迫使根际处的磷进行溶解扩散,进而容易被植物吸收与利用,非根际周围反而拥有较多的磷(吴龙华等, 2000; 赵小蓉等, 2001)。在 H-SD 模式中,根际土壤周围拥有较多的真菌,在此种植模式下,核桃能够更好地吸收和利用矿物质与营养物质。H-SD 和 H-YM 根际土壤含有较多的放线菌,这与黄小龙等(2012)的研究结果一致,是因为放线菌与根瘤能产生共生作用,从而促进非豆科植物形成根瘤或茎瘤并固定分子态氮气供植物利用,也可能是由于这 2 种间套种模式根际拥有较多病原真菌,而放线菌对多种植



□表示正相关; ■表示负相关; ☆表示相关性显著 ($P < 0.05$); ☆☆表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。TN. 全氮; TP. 全磷; TK. 全钾; AN. 速效氮; AP. 速效磷; AK. 速效钾; SOC. 有机碳; Ca. 交换性钙; ZTM. 蔗糖酶; NM. 脲酶; LSM. 磷酸酶; GYM. 过氧化氢酶; MBN. 微生物量氮; MBC. 微生物量碳; MBP. 微生物量磷; X. 细菌; Z. 真菌; F. 放线菌; Z.sh. 真菌 Shannon 指数; Z.si. 真菌 Simpson 指数; Z.ac. 真菌 Ace 指数; Z.ch. 真菌 Chao 指数; Z.co. 真菌覆盖率; X.sh. 细菌 Shannon 指数; X.si. 细菌 Simpson 指数; X.ac. 细菌 Ace 指数; X.ch. 细菌 Chao 指数; X.co. 细菌覆盖率。

□ indicates positive correlation; ■ indicates negative correlation; ☆ indicates significant correlation ($P < 0.05$); ☆☆ indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$). TN. Total nitrogen; TP. Total phosphorus; TK. Total potassium; AN. Available nitrogen; AP. Available phosphorus; AK. Available potassium; SOC. Soil organic carbon; Ca. Exchange calcium; ZTM. Sucrase; NM. Urease; LSM. Phosphatase; GYM. Catalase; MBN. Microbial biomass nitrogen; MBC. Microbial biomass carbon; MBP. Microbial biomass phosphorus; X. Bacteria; Z. Fungi; F. Actinomyces; Z.sh. Fungal Shannon index; Z.si. Fungal Simpson index; Z.ac. Fungal Ace index; Z.ch. Fungal Chao index; Z.co. Fungal coverage rate; X.sh. Bacterial Shannon index; X.si. Bacterial Simpson index; X.ac. Bacterial Ace index; X.ch. Bacterial Chao index; X.co. Bacterial coverage rate.

图 5 不同种植模式核桃根际与非根际土壤理化性状、土壤酶活性、微生物数量与微生物多样性相关分析

Fig. 5 Correlation analysis of physicochemical properties, soil enzyme activities, microbial quantities and microbial diversities in walnut rhizosphere and non-rhizosphere soils under different planting patterns

物病原真菌有强烈的拮抗作用,进而导致根际放线菌的提高(Basil et al., 2004)。本研究还发现,微生物量碳、氮以及细菌均表现出明显的根际效应,这是根际活动与外界维持碳氮平衡的结果,并且离根越近,效果越明显(罗敏等,2017)。微生物

量碳根际效应除了 H-SD 略低于 H-D 外,其余 2 种间套种模式均高于 H-D,说明间套种更有利于作物的生长。

3.3 不同种植模式下土壤养分与微生物特征的相关性
土壤微生物群落 Shannon 指数、Chao 指数和

Ace 指数越大, 被测样品群落多样性越高, 而 Simpson 指数越高, 表明生物多样性越低(张媚, 2018)。本研究中, 真菌 Shannon 指数范围在 2.560~3.143 之间, 仅为细菌的二分之一, Ace 指数、Chao 指数只有细菌的十分之一, Simpson 指数则是细菌的十倍, 表明细菌在土壤微生物多样性中细菌占主导地位。无论细菌还是真菌, 同一指数的根际和非根际在不同种植模式间高低不同, 所有间套种模式根际和非根际细菌 Shannon 指数都高于核桃单种, 而 Simpson 指数除了 H-SD 根际与 H-D 持平外, 其余都低于核桃单种, 说明间套种模式提高了土壤细菌物种多样性。而除真菌 H-SD 外, 其余 2 种间套种模式微生物多样性均出现了低于 H-D 的现象, 是受到根系分泌物抑制作用的影响(刘丽丽等, 2022)。

了解不同种植模式下核桃林土壤养分与土壤微生物根际效应, 可以为喀斯特地区核桃种植的施肥、管理、高产化以及石漠化的生态修复提供科学依据。本研究中, 根际土壤真菌 Shannon 指数与 TN、SOC 显著负相关($P < 0.05$), 细菌 Ace 指数和 Chao 指数均与 AP 极显著正相关($P < 0.01$), 非根际土壤真菌 Shannon 指数与磷酸酶极显著负相关($P < 0.01$), Simpson 指数则与磷酸酶极显著负相关($P < 0.01$), 表明根际土壤微生物多样性主要受养分影响, 非根际主要受酶活性影响, 原因是根际土壤掺杂腐殖质等有机质较多, 给微生物提供了必要的栖息条件(魏媛, 2008)。同时, 微生物能够将有机质进行分解, 使得根际土壤养分更高, 形成一个正相关循环过程。此外, 微生物降解有机质的过程需要借助其产生的酶来实现, 非根际土壤相比根际降解强度要弱, 导致非根际土壤保留了更多的酶。同时, 间套种不同作物会改变土壤养分和土壤微生物多样性, 这与不同间套种树种对土壤养分需求以及间套种树种跟核桃之间的相互作用有关。

综上所述, 核桃林下间套种不同作物对根际土壤养分及微生物多样性的提高大于非根际。相较于核桃单种, 间套种在整体上能够增强土壤酶活性、促进微生物增殖、提高根际养分富集率, 强化微生态环境稳定性。其中, H-SS 根际土壤对 TN、TP 和 SOC 富集作用明显, 其可培养土壤细菌含量最高; H-YM 根际土壤富集 AP、AK 和交换性钙的综合效果更好。所有间套种模式根际土壤

AN 富集率和微生物量氮根际效应均低于 H-D, 可适当增加氮肥且在施肥过程中尽量靠近根际来缓解。在实际生产中可根据实际土壤状况以及当地习俗优先选择桑树或者玉米进行间套种。然而, 本研究得到各种间套种模式间存在差异, 未考虑间套种前土壤存在的差异, 因此, 在今后研究中, 应全面考虑各方面因素, 做好间套种前土壤的调查检测, 从而更加准确地揭示不同间套种模式核桃林的土壤效应。

参考文献:

- ANDERSON TH, 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 98(1/2/3): 285-293.
- BAO JS, TANG YJ, LIU JP, et al., 2022. Study on soil microbial diversity and community composition of different pecan plantations [J]. *J Cent S Univ For Sci Technol*, 42(9): 24-36. [鲍佳书, 汤玉洁, 刘俊萍, 等, 2022. 不同品种薄壳山核桃林地土壤微生物多样性及群落组成[J]. *中南林业科技大学学报*, 42(9): 24-36.]
- BASIL AJ, STRAP JL, SMITH HMK, et al., 2004. Studies on the microbial populations of the rhizosphere of big sagebrush (*Artemisia tridentata*) [J]. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 31(6): 278-288.
- CHEN P, SONG C, LIU XM, et al., 2019. Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system[J]. *Sci Total Environ*, 657: 987-999.
- DAI JJ, SONG PH, YAN MC, et al., 2013. Effects of different planting methods on soil enzyme activities and microbial carbon and nitrogen in inter-root soil of soybean and corn at seedling stage[J]. *J NE Agric Univ*, 44(2): 17-22. [戴建军, 宋朋慧, 闫暮春, 等, 2013. 不同种植方式对苗期大豆、玉米根际土壤酶活性及微生物量碳、氮的影响[J]. *东北农业大学学报*, 44(2): 17-22.]
- GAO RP, WANG WN, DI CX, et al., 2023. Effect of different cropping patterns of soybean and maize seedlings on rhizosphere soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Soil Fert Sci Chin*, (2): 43-53. [高日平, 王伟妮, 狄彩霞, 等, 2023. 有机肥和秸秆还田对河套灌区盐渍化土壤养分及微生物数量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, (2): 43-53.]
- GE L, YU MK, CHENG XR, et al., 2011. Preliminary study on soil improvement effect of different tree species under fir understory[J]. *Chin J Soil Sci*, 42(4): 948-952. [葛乐, 虞木奎, 成向荣, 等, 2011. 杉木林下套种不同树种对土壤改良效应初探[J]. *土壤通报*, 42(4): 948-952.]
- GILLER PS, 1996. The diversity of soil communities, the 'poor man's tropical rainforest' [J]. *Biodivers Conserv*, 5(2):

- 135-168.
- HAN FG, MAN DQ, ZHENG QZ, et al., 2021. Species diversity and soil nutrient changes of a *Nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake wetland [J]. *Acta Pratac Sin*, 30(1): 36-45. [韩福贵, 满多清, 郑庆钟, 等, 2021. 青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J]. *草业学报*, 30(1): 36-45.]
- HAN LM, WANG SQ, JU HY, et al., 2000. Identification and study on allelopathy of soybean root [J]. *Soybean Sci*, 19(2): 119-125. [韩丽梅, 王树起, 鞠会艳, 等, 2000. 大豆根分泌物的鉴定及其化感作用的初步研究[J]. *大豆科学*, 19(2): 119-125.]
- HAN X, PAN K, WU FZ, 2006. Effect of root exudates from cucumber cultivars on pathogen of Fusarium wilt [J]. *Chin Veg*, (5): 13-15. [韩雪, 潘凯, 吴凤芝, 2006. 不同抗性黄瓜品种根系分泌物对枯萎病病原菌的影响[J]. *中国蔬菜*, (5): 13-15.]
- HE JP, KANG SA, 1994. Application of major component analysis to evaluate the study of grassland soil fertilities [J]. *J Inner Mongolia For Coll*, 16(2): 52-57. [何婕平, 康师安, 1994. 主成份分析在研究草原土壤养分评价中的应用[J]. *内蒙古林学院学报*, 16(2): 52-57.]
- HE ZL, 1994. Methods for the determination of soil microbial load: status and prospects[J]. *Adv Soil Sci*, 22(4): 36-44. [何振立, 1994. 土壤微生物量的测定方法: 现状和展望[J]. *土壤学进展*, 22(4): 36-44.]
- HUANG XL, CHEN JL, LI JP, et al., 2012. Isolation, identification and bioactivity of rhizosphere actinobacteria from tropical medicinal plants [J]. *Biotechnol Bull*, (2): 121-127. [黄小龙, 陈吉良, 李建平, 等, 2012. 热带药用植物根际放线菌的分离、鉴定及生物活性分析[J]. *生物技术通报*, (2): 121-127.]
- JIA SH, LI M, XING ZK, et al., 2014. Effect of different agroforestry patterns on soil physico-chemical properties and enzyme activities [J]. *Chin J Soil Sci*, 45(3): 648-653. [贾树海, 李明, 邢兆凯, 等, 2014. 不同农林复合模式对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 45(3): 648-653.]
- JING DW, LIU FC, WANG MY, et al., 2017. Effects of root pruning on the physicochemical properties and microbial activities of poplar rhizosphere soil [J]. *PLoS ONE*, 12(11): e0187685.
- KULMATISKI A, BEARD KH, STEVENS JR, et al., 2008. Plant-soil feedbacks: a meta-analytical review [J]. *Ecol Lett*, 11(9): 980-992.
- LI CC, ZHOU ZZ, LIANG KN, et al., 2018. Physical and chemical properties of ecological forest soils using different agroforestry patterns of Chinese fir with medicinal plants [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 35(1): 51-59. [李晨晨, 周再知, 梁坤南, 等, 2018. 不同林药复合经营模式对杉木生态公益林土壤理化性质的改良效果[J]. *浙江农林大学学报*, 35(1): 51-59.]
- LI LJ, XIE TT, ZHANG SL, et al., 2020. Characteristics of nutrient content and enzyme activity in the rhizosphere and bulk soils of four suitable plant species in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecol Sin*, 40(21): 7611-7620. [李丽娟, 谢婷婷, 张松林, 等, 2020. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究[J]. *生态学报*, 40(21): 7611-7620.]
- LI RB, JING YB, MAO JH, et al., 2021. Correlation between arbuscular mycorrhizal in walnut orchards under different intercropping with soil factors [J]. *W For Sci*, 50(1): 71-78. [李荣波, 景跃波, 卯吉华, 等, 2021. 不同套种模式云南核桃丛枝菌根与土壤因子的相关性研究[J]. *西部林业科学*, 50(1): 71-78.]
- LI SW, YANG WQ, ZHAO R, et al., 2016. Effects of growing grass on soil fertility of the apple orchard [J]. *J Grassland*, 24(4): 895-900. [李尚玮, 杨文权, 赵冉, 等, 2016. 果树行间生草对苹果园土壤肥力的影响[J]. *草地学报*, 24(4): 895-900.]
- LIU LL, LI JH, LIU RM, et al., 2022. Characteristics of microbial community structure in rhizosphere soil of *Carya illinoensis* [J]. *Mod Agric Sci Technol*, (15): 59-62. [刘丽丽, 李建辉, 刘汝明, 等, 2022. 薄壳山核桃根际土壤微生物群落结构特征分析[J]. *现代农业科技*, (15): 59-62.]
- LUO M, HUANG JF, LIU YX, et al., 2017. Progress in effects of root bioturbation on dissimilatory iron reduction in the rhizosphere of wetland plants [J]. *J Ecol*, 37(1): 156-166. [罗敏, 黄佳芳, 刘育秀, 等, 2017. 根系活动对湿地植物根际铁异化还原的影响及机制研究进展[J]. *生态学报*, 37(1): 156-166.]
- PAN ZZ, CHEN Z, LIU B, et al., 2022. Characteristics of microbial diversity during membrane-covered high temperature aerobic composting [J]. *Fujian Agric Sci Technol*, 53(6): 8-18. [潘志针, 陈峥, 刘波, 等, 2022. 覆膜高温好氧堆肥过程中微生物群落组成及变化规律分析[J]. *福建农业科技*, 53(6): 8-18.]
- QIAN JF, 2013. Effects of sod-cultural practices on soil microbial diversity in the *Carya cathayensis* forest [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University: 41. [钱进芳, 2013. 生草栽培对山核桃林土壤微生物多样性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学: 41.]
- QIN SW, LIU ZY, 1984. Study on nutrient status of soil-root microregion—III. Changes of rhizosphere nitrogen in rice [J]. *J Soil Sci*, (3): 238-246. [钦绳武, 刘芷宇, 1984. 土壤—根系微区养分状况的研究——III. 水稻根际氮素的变化[J]. *土壤学报*, (3): 238-246.]
- RODNEY E, DANIEL M, RONALD L, et al., 2006. Nitrogen and phosphorus dynamics for 13-year-old loblolly pine stands receiving complete competition control and annual N fertilizer [J]. *For Ecol Manage*, 227: 155-168.
- SI LQ, 2021. Elemental stoichiometry characteristics of ryegrass

- and two leguminous forages under different planting modes [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 174-175. [司莉青, 2021. 黑麦草与两种豆科牧草不同种植模式下元素计量特征研究[D]. 北京: 北京林业大学: 174-175.]
- WANG QT, GAO MY, LIU ML, et al., 2017. Illumina Miseq sequencing-based fungal community of rhizosphere soils along root orders of poplar plantation [J]. *J Appl Ecol*, 28(4): 1177-1183. [汪其同, 高明宇, 刘梦玲, 等, 2017. 基于高通量测序的杨树人工林根际土壤真菌群落结构[J]. *应用生态学报*, 28(4): 1177-1183.]
- WANG ZM, SONG XQ, 1995. Investigation of soil nutrient status in different forest types [J]. *J Liaoning For Sci Technol*, (6): 42-43. [王作梅, 宋秀琴, 1995. 不同林分类型土壤养分状况的调查研究[J]. *辽宁林业科技*, (6): 42-43.]
- WEI Y, 2008. The soil biological characteristics in successional sequence of degraded karst area [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 105. [魏媛, 2008. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生物学特性研究[D]. 南京: 南京林业大学: 105.]
- WU JH, LUO YF, GONG W, et al., 2019. Effects of different planting patterns on composition and fractal dimension of soil micro-aggregates in young walnut forest [J]. *J NW A & F Univ (Nat Sci Ed)*, 47(12): 69-76. [伍家辉, 罗永飞, 龚伟, 等, 2019. 种植模式对核桃幼林土壤微团聚体组成与分形维数的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 47(12): 69-76.]
- WU LH, ZHANG SJ, LIU LM, et al., 2000. Rhizosphere effect of nutrients in different maize soils with different fertility levels [J]. *Chin J Appl Ecol*, 11(4): 545-548. [吴龙华, 张素君, 刘兰民, 等, 2000. 不同土壤类型和肥力玉米地土壤养分根际效应研究[J]. *应用生态学报*, 11(4): 545-548.]
- XIA X, GU J, CHE SG, et al., 2011. Effects of nitrogen application rates on microbial community and enzyme activities in Lou soil [J]. *Sci Agric Sin*, 44(8): 1618-1627. [夏雪, 谷洁, 车升国, 等, 2011. 施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 44(8): 1618-1627.]
- XUE YF, XIA HY, CHRISTIE P, et al., 2016. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review [J]. *Ann Bot*, 117(3): 363-377.
- YI LP, ZHANG H, 2011. Characteristics of soil enzymatic activities and relationship with the main nutrient in the rhizosphere of four littoral halophytes [J]. *Ecol Environ Sci*, 20(2): 270-275. [弋良朋, 张辉, 2011. 滨海4种盐生植物根际土壤酶活性特征与主要养分的关系[J]. *生态环境学报*, 20(2): 270-275.]
- YOU HX, LIANG YL, LÜ W, et al., 2006. Reseach on the allelopathy of root secretion of different crops on cucumber (*Cucumis staturus* L.) [J]. *J NW A & F Univ (Nat Sci Ed)*, 34(6): 101-105. [由海霞, 梁银丽, 吕文, 等, 2006. 不同作物根系分泌物对黄瓜的化感作用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 34(6): 101-105.]
- ZAN KZ, ASHANJIANG YIMINIJIANG, LIU C, et al., 2022. Physicochemical properties and stoichiometric characteristics of rhizosphere and bulk soils of alfalfa of different fall dormancy types [J]. *Acta Agr Sin*, 30(4): 957-965. [咎看卓, 阿山江·伊米尼江, 刘丛, 等, 2022. 不同秋眠类型紫花苜蓿根际与非根际土壤理化性质及化学计量特征[J]. *草地学报*, 30(4): 957-965.]
- ZEN CC, QIN F, SU LR, et al., 2021. Effects of different walnut intercropping patterns on soils nutrients, microorganisms and enzymatic activity [J]. *SW J Agric*, 34(2): 258-263. [曾成城, 秦芳, 苏利荣, 等, 2021. 核桃不同套种模式对土壤养分、微生物数量及酶活性的影响[J]. *西南农业学报*, 34(2): 258-263.]
- ZHANG M, 2018. The microbial diversity difference in the *Carya cathayensis* forest soil under different management models [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University: 25-26. [张媚, 2018. 不同经营模式山核桃林土壤微生物多样性差异[D]. 杭州: 浙江农林大学: 25-26.]
- ZHANG PJ, YANG J, SONG BY, et al., 2009. Spatial heterogeneity of soil resources of *Caragana tibetica* community [J]. *J Plant Ecol*, 33(2): 338-346. [张璞进, 杨劼, 宋炳煜, 等, 2009. 藏锦鸡儿群落土壤资源空间异质性[J]. *植物生态学报*, 33(2): 338-346.]
- ZHAO XR, LIN QM, SUN YX, et al., 2001. Phosphobacteria distribution in rhizosphere and nonrhizosphere soil of corn [J]. *Chin J Ecol*, 20(6): 62-64. [赵小蓉, 林启美, 孙焱鑫, 等, 2001. 玉米根际与非根际解磷细菌的分布特点[J]. *生态学杂志*, 20(6): 62-64.]
- ZHOU KL, CHEN XW, GONG W, et al., 2019. Effects of compound planting under walnut plantation on soil fertility [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 37(6): 807-813. [周楷玲, 陈绪文, 龚伟, 等, 2019. 核桃林下复合种植对土壤培肥效果的影响[J]. *四川农业大学学报*, 37(6): 807-813.]
- ZHU KH, DUAN LX, LI YC, et al., 2021. Research progress on organic carbon of soil aggregates [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 37(21): 86-90. [朱锟恒, 段良霞, 李元辰, 等, 2021. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. *中国农学通报*, 37(21): 86-90.]
- ZHU LX, ZHANG JE, LIU WG, 2003. Review of studies on interactions between root exudates and rhizospheric microorganisms [J]. *Ecol Environ*, (1): 102-105. [朱丽霞, 章家恩, 刘文高, 2003. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. *生态环境*, (1): 102-105.]