

DOI: 10.11766/trxb202506120277

CSTR: 32215.14.trxb202506120277

陈红兴, 莫云聪, 许亚东, 苏兰茜, 白亭玉, 吴刚, 荀卫兵, 徐志辉, 赵青云. 不同有机肥料对波罗蜜根际微生物碳源利用、线虫群落及养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 1336–1347.

CHEN Hongxing, MO Yuncong, XU Yadong, SU Lanxi, BAI Tingyu, WU Gang, XUN Weibing, XU Zhihui, ZHAO Qingyun. Effects of Different Organic Fertilizers on Rhizosphere Microbial Carbon Source Utilization, Nematode Community, and Nutrient Absorption of Jackfruit[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 1336–1347.

## 不同有机肥料对波罗蜜根际微生物碳源利用、线虫群落及养分吸收的影响\*

陈红兴<sup>1, 2</sup>, 莫云聪<sup>1, 2</sup>, 许亚东<sup>3</sup>, 苏兰茜<sup>1†</sup>, 白亭玉<sup>1</sup>, 吴刚<sup>1</sup>, 荀卫兵<sup>4</sup>, 徐志辉<sup>4</sup>, 赵青云<sup>1</sup>

(1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/国家热带植物种质资源库木本粮食种质资源分库/农业农村部万宁野外综合科学观测研究站/海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 海南万宁 571533; 2. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; 3. 郑州大学农学院, 郑州 450001; 4. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京, 210095)

**摘要:** 研究不同有机类肥料对波罗蜜根际微生物、线虫群落及养分吸收的调控差异, 从而根据土壤状况选择适宜的有机类肥料构建健康土壤微生态, 为实现土壤质量的定向调控提供理论依据。以马来西亚 1 号嫁接苗为材料, 花岗岩发育形成的砖红壤为供试土壤, 设置 CK (不施肥)、DF (黄豆粉有机肥)、YF (羊粪有机肥)、JF (鸡粪有机肥)、NF (牛粪有机肥)、CF (单施化肥) 6 个处理, 比较不同肥料对波罗蜜生物量积累、养分吸收及土壤微环境的影响。结果表明, 施用有机肥总体上促进了波罗蜜的生物量积累及养分吸收, 增加了土壤 pH 和有机质。其中, NF 提高土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾养分的比例显著优于其他处理, 但提高土壤有效磷的比例显著低于其他有机肥处理。施用 JF 对土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量也有明显的提高作用。YF 处理对土壤碱解氮和速效钾含量的提升效果在所有有机肥处理中最弱。YF 处理的土壤总线虫及不同食性线虫数量最多, NF 处理次之, 有机肥处理的土壤线虫香农-维纳多样性指数和均匀度指数均显著高于 CK 和 CF 处理。不同施肥处理的土壤微生物群落均表现为对碳水化合物类、氨基酸类和羧酸类碳源的代谢较为活跃, 而对多聚物类、酚酸类和胺类碳源代谢能力则较弱。DF 处理的土壤微生物群落结构多样性和均匀度指数均显著高于其他有机肥处理。植株生物量、线虫群落、线虫营养类群、微生物碳源利用与土壤 pH 的曼特尔 (Mantel) 分析显著相关, 线虫群落、食细菌线虫和杂食/捕食性线虫与有机质的 Mantel 分析也显著相关。施用有机肥可促进波罗蜜的生长及养分吸收, 增加土壤有机质, 改善土壤微生态。其中, 羊粪和牛粪有机肥有利于增加土壤线虫总数和各营养类群线虫数量, 黄豆粉有机肥可提高根际微生物的活性, 促进对碳源的利用。在实际应用中, 可根据土壤基础条件选用特定有机类肥料或其组合进行土壤健康的定向调控, 为作物高产和资源高效利用提供理论依据。

**关键词:** 有机类肥料; 波罗蜜; 养分吸收; 线虫群落; 微生物代谢多样性

**中图分类号:** S158.3      **文献标志码:** A

\* 海南省科技专项 (ZDYF2025XDNY111, ZDYF2024HXGG002) 和海南省现代农业产业技术体系专项资金项目资助 Supported by the Science and Technology Special Fund of Hainan Province, China (Nos. ZDYF2025XDNY111 and ZDYF2024HXGG002) and the Earmarked Fund for Hainan Agricultural Production Research System, China

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sulanxi1988@163.com

作者简介: 陈红兴 (2002—), 男, 云南玉溪人, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: 1581079649@qq.com

收稿日期: 2025-06-12; 收到修改稿日期: 2025-09-06; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-10-14

## Effects of Different Organic Fertilizers on Rhizosphere Microbial Carbon Source Utilization, Nematode Community, and Nutrient Absorption of Jackfruit

CHEN Hongxing<sup>1, 2</sup>, MO Yuncong<sup>1, 2</sup>, XU Yadong<sup>3</sup>, SU Lanxi<sup>1†</sup>, BAI Tingyu<sup>1</sup>, WU Gang<sup>1</sup>, XUN Weibing<sup>4</sup>, XU Zhihui<sup>4</sup>, ZHAO Qingyun<sup>1</sup>

(1. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/National Tropical Plants Germplasm Resource Center-Sub Centre of Germplasm Resource for Woody Grain/Wanning Comprehensive Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops of Hainan Province, Wanning, Hainan 571533, China; 2. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China; 3. School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** [ Objective ] This study aimed to investigate the regulatory differences of various organic fertilizers on the rhizosphere microorganisms, nematode communities, and nutrient absorption of jackfruit, so as to select suitable organic fertilizers to construct a healthy soil microecology, and provide a theoretical basis for targeted regulation of soil quality. [ Method ] Malaysian No.1 grafted seedlings were used as experimental materials, and the latosol formed by granite was used as test soil in this study. The experiment was designed to have six treatments: CK(no fertilizer), DF(soybean flour), YF(sheep manure), JF(chicken manure), NF(cow manure), and CF(chemical fertilizer only), for comparing the effects of different fertilizers on the biomass accumulation, nutrient absorption, and soil microenvironment of jackfruit. [ Result ] The application of organic fertilizer generally promoted the biomass accumulation and nutrient absorption of jackfruit, and increased the soil pH and organic matter. NF significantly improved the proportion of soil organic matter, available nitrogen, and potassium nutrients, but significantly reduced the proportion of soil available phosphorus compared to other treatments. The application of JF also significantly increased the contents of soil available nitrogen, phosphorus, and potassium; however, YF treatment induced the weakest effect among all organic fertilizer treatments. Also, the YF treatment had the highest number of soil nematodes and nematode abundance in each trophic group, followed by the NF treatment. The Shannon-Weiner diversity index and evenness index of soil nematodes in the organic fertilizer treatment were significantly higher than those in the CK and CF treatments. In addition, the soil microbial communities under different fertilization treatments all exhibited relatively active metabolism towards carbohydrates, amino acids and carboxylic acids, while their metabolic capabilities towards polymers, phenolic acids, and amides were weaker. The diversity and evenness index of soil microbial community structure in the DF treatment were significantly higher than those in other organic fertilizer treatments. Mantel analysis showed a significant correlation between plant biomass, nematode community, nematode trophic groups, microbial carbon source utilization, and soil pH. Also, the Mantel analysis of nematode community, bacterial-feeding nematode, and omnivorous/predacious nematode with soil organic matter showed significant correlation. [ Conclusion ] The application of organic fertilizer can promote the growth and nutrient absorption of jackfruit, increase soil organic matter, and improve soil microecology. Moreover, organic fertilizers from sheep and cow manure is beneficial for increasing the total number of soil nematodes and the number of nematodes in each trophic group, while soybean flour can enhance the activity of rhizosphere microorganisms and promote carbon source utilization. For practical applications, specific organic fertilizers or their combinations can be selected based on the basic soil conditions for targeted regulation of soil health, providing a theoretical basis for high crop yield and efficient resource utilization.

**Key words:** Organic fertilizers; Jackfruit; Nutrient absorption; Nematode community; Microbial metabolic diversity

波罗蜜可粮果两用，是热带地区农业增效、农民增收和农村增绿的优势特色产业。然而，波罗蜜园大多建在山坡地或村庄边角地，土壤有机质含量

普遍较低，立地条件相对较差，且长期单一集约化种植和大量化肥投入造成果园土壤养分利用率下降，土壤生态系统功能退化及农业面源污染等环境

问题发生,不利于农业可持续发展。有机物料还田是一种可持续的农田管理策略,在维持作物高产的同时,改善土壤的碳氮循环并激活土壤微生物群落结构及功能多样性<sup>[1]</sup>。不同种类有机物料的化学组成和碳氮比不同,对土壤微生物群落碳源利用潜能及功能多样性的影响不一<sup>[2]</sup>,必然导致以微生物为食的捕食者如线虫群落结构变化,最终对土壤理化性质的改变发挥重要作用。研究不同有机类肥料对波罗蜜根际微生物、线虫群落及养分吸收的调控差异,可为果园土壤地力提升和作物增产提供有效的改良措施。

Yang 等<sup>[3]</sup>研究表明,施用有机肥会影响土壤微生物群落结构,改变土壤理化性质,并增加柑橘幼苗叶片中的矿质元素。杜少平等<sup>[4]</sup>在砂田西瓜地施用不同有机肥,结果发现施用猪粪和鸡粪较优,这表明施用有机肥的种类需根据当地的土壤肥力和作物需肥特性选择。研究<sup>[5]</sup>表明,施用有机肥对土壤微生物的多样性和丰富度产生了积极影响,增加有益微生物,增强玉米季节土壤微生物的代谢活性,改善土壤健康。Sant'Anna 等<sup>[6]</sup>指出,使用粪肥后,不仅引入了非本土微生物类群,还增加了土壤微生物丰度,并且微生物群落结构受肥料种类和土壤条件的差异化影响。土壤线虫作为土壤生物区系的重要组成部分,其群落特征通常反映了土壤生态系统受干扰的程度,对土壤微生态环境具有重要的调节作用<sup>[7]</sup>。施用不同有机肥料可增加线虫多样性,调

节线虫的群落结构,提高土壤生态系统的稳定性<sup>[8]</sup>。同时,有机肥料会释放不利于植食性线虫的物质,从而减少危害植物的有害线虫<sup>[9]</sup>。

当前有关波罗蜜施肥管理的研究多聚焦于有机肥替代化肥的效应,而关于不同种类有机肥对土壤微生态的调控作用尚未见相关报道。加之市场上有机肥种类繁多,肥效不一,如何科学合理地选择有机肥种类以实现波罗蜜养分高效利用的目标,是当前产业可持续发展的重要环节。本研究比较不同有机类肥料对波罗蜜根际微生物、线虫群落及养分吸收的调控差异,从而有效利用有机类肥料构建健康土壤微生态,最终为实现土壤质量调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本试验于 2024 年在万宁兴隆的中国热带农业科学院香料饮料研究所温室进行,该地区年日照时数 1 800~2 300 h,年平均气温 24.6 °C,有明显多雨季和少雨季,年平均降水量 1 990~2 400 mm,多集中在 5—10 月,属于典型的热带季风气候。供试土壤为花岗岩发育形成的砖红壤,采自波罗蜜幼龄种植园,土壤质地为砂壤土<sup>[10]</sup>。

供试波罗蜜苗为“马来西亚 1 号”嫁接苗。供试肥料养分如表 1 所示,均购买自海南宜康生态农业开发有限公司。

表 1 供试肥料养分含量

Table 1 Nutrient contents of fertilizers

肥料种类 Fertilizer type	酸碱度 pH	有机质			
		有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	氮 N/(g·kg <sup>-1</sup> )	五氧化二磷 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(g·kg <sup>-1</sup> )	氧化钾 K <sub>2</sub> O/(g·kg <sup>-1</sup> )
黄豆粉 Soybean flour	6.98	730	27.7	37.8	5.9
羊粪 Sheep manure	7.98	574	16.4	20.1	13.9
鸡粪 Chicken manure	7.32	504	8.0	30.4	33.9
牛粪 Cow manure	7.24	508	15.6	47.2	12.9
尿素 Urea			460		
过磷酸钙 Calcium superphosphate				120	
硫酸钾 Potassium sulfate					450

## 1.2 试验设计

试验共设不施肥 (CK)、黄豆粉有机肥 (DF)、羊粪有机肥 (YF)、鸡粪有机肥 (JF)、牛粪有机肥 (NF)、单施化肥 (CF) 共 6 个施肥处理。化肥施用量参考波罗蜜幼龄树推荐施肥量<sup>[11]</sup>测算 (每月用量: N 1.25 g·plant<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.625 g·plant<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 1.25 g·plant<sup>-1</sup>)。有机肥处理按照与化肥相等

的含氮量进行添加 (4 个月所用肥料用量见表 2)。磷肥和有机肥用作基肥一次性施入, 氮、钾肥分 4 次等量作追肥施用。供试土壤过 8 mm 筛后装盆, 每盆装土 8 kg, 肥料拌入后移栽一株三叶一心的波罗蜜苗。试验采用完全随机设计, 每个处理设置 3 个重复, 每个重复 6 株, 常规管理 120 d 后测定各项指标。

表 2 不同处理的肥料用量

Table 2 Fertilizer application rate for different treatments

处理 Treatment	有机肥 Manure/ (g·plant <sup>-1</sup> )	尿素 Urea/ (g·plant <sup>-1</sup> )	过磷酸钙 Calcium superphosphate/ (g·plant <sup>-1</sup> )	硫酸钾 Potassium sulfate/(g·plant <sup>-1</sup> )
CK	0.00	0.00	0.00	0.00
DF	181.00	3.39	39.33	2.87
YF	305.00	2.37	27.53	2.01
JF	625.00	1.70	19.67	1.43
NF	321.00	1.02	11.80	0.86
CF	0.00	10.87	20.83	11.11

注: CK, 不施肥; DF, 黄豆粉有机肥; YF, 羊粪有机肥; JF, 鸡粪有机肥; NF, 牛粪有机肥; CF, 单施化肥。下同。Note: CK, no fertilizer; DF, soybean flour; YF, sheep manure; JF, chicken manure; NF, cow manure; CF, chemical fertilizer only. The same below.

## 1.3 测定项目与方法

每个处理选取 9 株长势健康一致的波罗蜜苗进行样品采集, 植物样品分为根、茎、叶 3 部分, 用去离子水清洗干净, 用烘干称重法测定干物质质量<sup>[12]</sup>。每株苗的根围土壤 (紧贴根系约 2 mm 的土壤) 分为 3 份, 分别置于 4℃ 冰箱、常温和风干储存, 用于后续微生物代谢多样性、线虫分离鉴定和理化指标测定。

## 1.4 线虫收集与形态鉴定

采用浅盘法分离收集土壤线虫<sup>[13]</sup>, 用体视显微镜对线虫数量进行计数, 用 Olympus BX51 光学显微镜观察形态, 根据其形态和食性划分营养类群<sup>[14-15]</sup>, 并计算线虫生态指数<sup>[16]</sup>。

## 1.5 土壤微生物群落代谢功能测定

利用 Biolog ECO 微平板法检测各孔吸光值的变化, 测定土壤微生物的代谢活性, 并反映其代谢功能的多样性<sup>[17-18]</sup>。根据培养 192 h 趋于稳定的数据计算微生物群落功能多样性<sup>[19]</sup>。

## 1.6 波罗蜜各器官离子含量测定

将 1.3 烘干的波罗蜜叶片样品称重后粉碎, 过 0.2 mm 孔径筛, 称取 0.5 g 样品, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮至澄清, 测定叶片全氮、全磷和全钾含量<sup>[20]</sup>。

## 1.7 土壤理化性质测定

土壤 pH、有机质和碱解氮、有效磷、速效钾含量参照《土壤农化分析》<sup>[20]</sup>进行测定。

## 1.8 数据处理

在 SPSS 26 软件中对实验数据进行单因素方差分析 (ANOVA), 处理间的差异显著性用邓肯 (Duncan) 新复极差法进行检验 ( $P < 0.05$ ), 并利用 Origin 2024 软件绘图。运用 R 软件计算出土壤理化性质的斯皮尔曼 (Spearman) 相关系数, 并使用 linkET 包对数据进行曼特尔检验 (Mantel test) 分析。

## 2 结果

### 2.1 不同肥料处理的波罗蜜生长特性及其养分吸收

由表 3 可以看出, 肥料类型对波罗蜜各器官生

物量有一定影响。黄豆粉 (DF)、羊粪 (YF) 和鸡粪 (JF) 较对照降低根系干物质量的比例分别为 45.71%、48.32% 和 41.37% ( $P < 0.05$ )。NF 处理对波罗蜜茎干物质量的提升作用显著优于其他有机肥处理, 较 CF 增加茎、叶干物质量的比例分别为 32.59% 和 41.63%, 但与 CK 差异不显著。NF 和 JF 对叶片干物质量的提升作用显著优于 DF 和 YF 处理。

不同肥料处理对波罗蜜各器官氮素含量的影响不同, 有机肥处理 (除 JF 处理) 的根部氮含量全部高于 CF 和 CK 处理, 其中, DF、YF 和 NF 处理的

根部氮含量分别较 JF 处理显著提高了 36.9%、32.9% 和 17.3%。CF、YF、DF 和 NF 处理的茎部氮含量显著高于 CK, 而叶部的氮含量在 CF 处理中最高, 其次是 DF、JF 和 NF。YF 和 NF 处理的根部磷含量显著高于 DF、JF 和 CF, 茎部的磷含量在 YF 处理中最高, 较 CF 处理显著增加了 171.9%。YF、JF 和 NF 处理的叶片磷含量显著高于 CK 和 CF 处理。DF、JF、NF、CF 处理的根部钾含量显著高于 CK 和 JF 处理。JF 和 NF 处理茎部钾含量显著高于 CK 和 YF 处理。叶片的钾含量在 DF 处理中最高, 其次是 JF, 分别显著高于 CF 处理 24.5% 和 13.9%。

表 3 不同肥料类型下波罗蜜各器官生物量及养分积累

Table 3 Biomass and nutrient accumulation in various organs of jackfruit under different fertilizer types

器官 Organ	处理 Treatment	干物质量 Dry biomass/ (g·plant <sup>-1</sup> )	氮 N/ (mg·g <sup>-1</sup> )	磷 P/ (mg·g <sup>-1</sup> )	钾 K/ (mg·g <sup>-1</sup> )
根 Root	CK	8.05 ± 2.42a	7.47 ± 0.43d	2.46 ± 0.52bc	4.95 ± 0.74b
	DF	4.37 ± 0.49b	16.73 ± 1.52a	1.19 ± 0.26d	7.93 ± 0.99a
	YF	4.17 ± 0.91b	16.24 ± 1.27ab	3.40 ± 0.52a	4.76 ± 0.50b
	JF	4.72 ± 0.56b	12.22 ± 0.84c	2.04 ± 0.16c	7.93 ± 1.08a
	NF	6.15 ± 1.21ab	14.33 ± 0.78b	3.00 ± 0.45ab	9.54 ± 1.57a
	CF	5.73 ± 2.24ab	11.13 ± 1.49c	1.23 ± 0.30d	8.11 ± 0.71a
茎 Stem	CK	8.04 ± 0.96ab	5.26 ± 0.25c	2.27 ± 0.20b	7.08 ± 0.54d
	DF	5.57 ± 0.64cd	10.68 ± 1.30ab	1.69 ± 0.38c	11.95 ± 0.38b
	YF	4.52 ± 0.82d	11.25 ± 0.65a	3.48 ± 0.13a	9.42 ± 0.54c
	JF	6.88 ± 0.25bc	9.08 ± 0.84b	2.65 ± 0.26b	13.33 ± 0.91a
	NF	8.87 ± 0.13a	9.57 ± 0.53ab	2.73 ± 0.21b	12.74 ± 1.14ab
	CF	6.69 ± 1.07bc	11.19 ± 1.60a	1.28 ± 0.22c	11.63 ± 0.57b
叶 Leaf	CK	8.61 ± 0.72ab	15.93 ± 0.22d	1.67 ± 0.17c	11.17 ± 1.38e
	DF	6.72 ± 1.48b	24.52 ± 1.58b	1.91 ± 0.21bc	18.14 ± 0.84a
	YF	3.36 ± 1.26c	21.30 ± 1.62c	2.30 ± 0.19a	12.81 ± 0.18d
	JF	8.68 ± 1.35ab	23.68 ± 0.61b	2.04 ± 0.11ab	16.59 ± 0.76b
	NF	10.58 ± 0.76a	23.25 ± 0.45b	2.04 ± 0.07ab	13.90 ± 0.55cd
	CF	7.47 ± 0.83b	26.68 ± 1.15a	1.68 ± 0.13c	14.57 ± 0.55c

注: 同列不同小写字母表示相同器官不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ) between treatments for the same organ. The same below.

## 2.2 不同肥料处理的土壤理化特征

土壤 pH 在各处理中的表现为, YF > JF、NF、DF > CK、CF (表 4)。NF 处理的土壤有机质含量最

高, 较 CF 增加的比例为 603.7%, 其次是 JF、YF、DF, 较 CF 增加的比例分别为 248.6%、128.8% 和 114.1%。与 CF 相比, 除 YF 处理的速效钾含量较低

外，其他有机肥处理的碱解氮、有效磷、速效钾含量均显著增加。其中 NF 处理的土壤碱解氮和速效钾的含量最高，较 CF 处理分别显著增加 100.9% 和 28.8%，JF 处理对土壤有效磷和速效钾含量的提升

效果最优，较 CF 显著增加 79.5% 和 28.8%。NF 处理下的有效磷含量较 CF 显著提高了 16.3%。YF 处理对土壤碱解氮和速效钾含量的提升效果在所有有机肥处理中最弱。

表 4 不同肥料类型下土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties under different fertilizer types

处理 Treatment	土壤 pH Soil pH	土壤有机质 Soil organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkalizable nitrogen / (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus / (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	6.64 ± 0.06c	8.12 ± 0.14e	29.43 ± 1.19f	6.15 ± 0.86f	75.16 ± 7.41e
DF	6.88 ± 0.10b	16.29 ± 0.32d	100.30 ± 1.08c	47.72 ± 0.78c	1 071.65 ± 12.83b
YF	7.43 ± 0.08a	17.41 ± 0.41c	81.43 ± 1.06d	59.58 ± 1.02b	840.70 ± 12.83d
JF	7.01 ± 0.04b	26.53 ± 0.73b	106.17 ± 1.82b	64.27 ± 1.49a	1 148.63 ± 12.83a
NF	6.96 ± 0.08b	53.55 ± 0.78a	113.70 ± 1.47a	41.63 ± 0.56d	1 148.63 ± 12.83a
CF	6.53 ± 0.10c	7.61 ± 0.39e	56.60 ± 0.92e	35.80 ± 0.39e	892.03 ± 12.83c

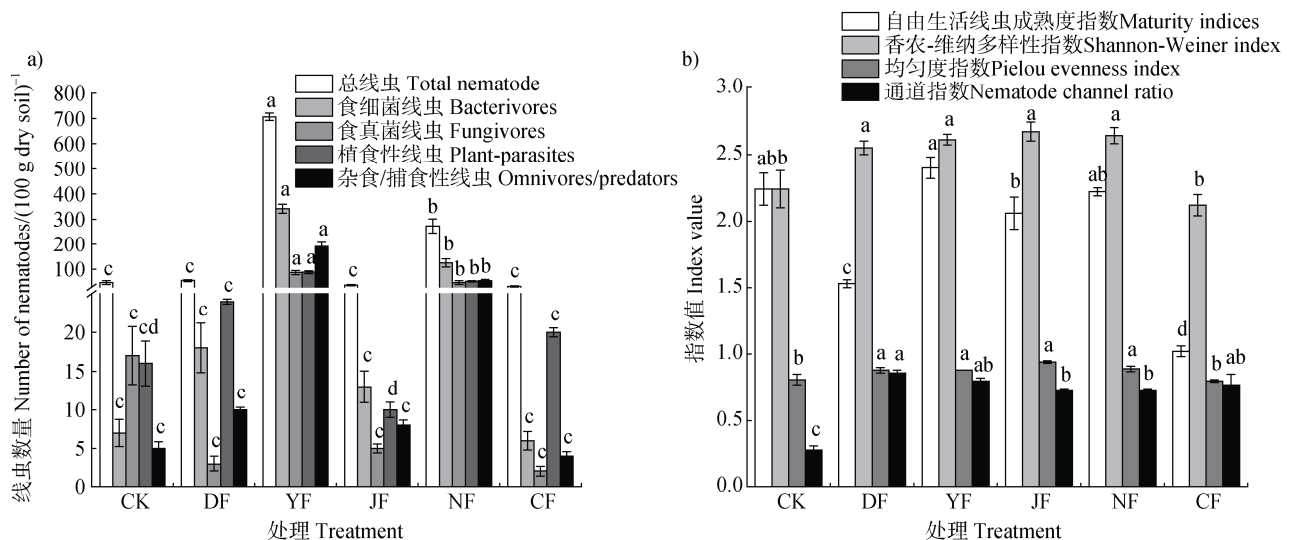
注：同列不同小写字母表示各施肥处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ) between different fertilizer types.

### 2.3 不同肥料处理的土壤线虫营养结构和群落多样性

不同肥料处理对土壤线虫的营养结构有显著影响 (图 1a)。总线虫和不同食性线虫的数量均在 YF

处理中最高，NF 处理次之。除 JF 处理中的植食性线虫数量最低外，CK、DF、JF、CF 各处理中的总线虫和不同食性线虫的数量无显著性差异。

不同肥料处理对线虫生态指数的影响也存在明



注：同色柱子上不同小写字母表示各指标在不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters in columns of the same color indicate significant differences between different treatments for each indicator ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 1 不同肥料类型下土壤线虫营养类群丰度 (a) 和生态指数 (b)

Fig. 1 The abundance of soil nematodes relative to trophic groups (a) and ecological indices (b) under different fertilizer types

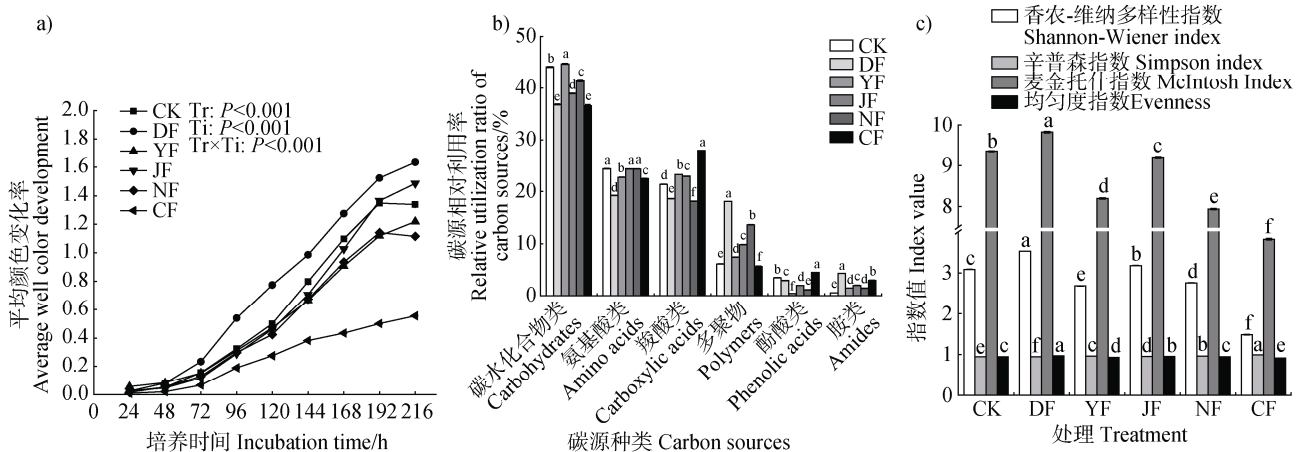
显差异 (图 1b)。自由生活线虫成熟度指数在各处理中的表现为, YF、NF、CK>JF>DF>CF。有机肥处理中的香农-维纳 (Shannon-Weiner) 多样性指数和均匀度指数均显著高于 CK 和 CF。施肥处理中的线虫通道指数 NCR 均显著高于 CK。

#### 2.4 不同肥料处理的土壤微生物碳源利用特征

不同施肥处理的土壤微生物对碳源利用强度 (平均颜色变化率 AWCD) 随培养时间呈增长态势 (图 2a)。施肥处理和培养时间及它们之间的交互作用显著影响 AWCD 值。所有处理的 AWCD 值在开始的 24 h 内变化不明显, 而在培养 72 h 后进入快速上升阶段, 96~192 h 期间呈指数增长趋势, 192 h 后达到稳定期, AWCD 在各肥料处理表现为: DF>JF>CK>NF>YF>CF, 这表明了 DF 处理的土壤微生物对生态板环境的适应性最强, 与其他处理相比展现出最高的代谢活性和碳源利用率。培养 192 h 后, DF、JF、YF 和 CF 处理组中土壤微生物群落的碳源利用率仍在缓慢上升, 而 CK 和 NF 处理组则呈现下降趋势。Biolog-ECO 微平板的 31 种碳源归为 6

类: 碳水化合物类、氨基酸类、羧酸类、多聚物类、酚酸类和胺类 (图 2b)。不同施肥处理显著影响土壤微生物群落的碳源利用偏好, YF 处理的土壤微生物更偏好利用碳水化合物类碳源, 而 CK、JF 和 NF 处理的土壤微生物偏好利用氨基酸类碳源, CF 处理的土壤微生物偏好利用羧酸类和酚酸类碳源, DF 处理的土壤微生物偏好利用多聚物类和胺类碳源。可见, 不同施肥处理的土壤微生物群落均表现为优先利用简单碳源 (如碳水化合物、氨基酸和羧酸类), 而对结构复杂的多聚物类、酚酸类及胺类碳源的代谢效率普遍偏低。

土壤微生物群落结构多样性的结果如图 2c, 土壤微生物香农-维纳 (Shannon-Wiener) 多样性指数的变化趋势为, DF>JF>CK>NF>YF>CF。辛普森 (Simpson) 指数的变化趋势表现为, CF>NF>YF>JF>CK>DF。麦金托什 (McIntosh) 指数在各处理中的变化趋势表现为, DF>CK>JF>YF>NF>CF。均匀度指数则表现为: DF>JF>CK、NF>YF>CF。



注: Tr, 肥料处理; Ti, 培养时间; Tr×Ti, 肥料处理与培养时间的交互作用;  $P < 0.001$  表示差异达极显著水平。Note: Tr, fertilizer treatment; Ti, incubation time; Tr×Ti, the interaction between fertilizer treatment and cultivation time;  $P < 0.001$  indicates a highly significant level of difference.

图 2 不同肥料类型下土壤微生物群落碳源利用强度 (a)、碳源相对利用率变化 (b) 和功能多样性指数 (c)

Fig. 2 The variation in the carbon source utilization intensity (a), relative utilization of carbon sources (b) and functional diversity (c) for soil microbial communities under different fertilizer types

#### 2.5 不同肥料处理的植物-土壤-微生物相关性

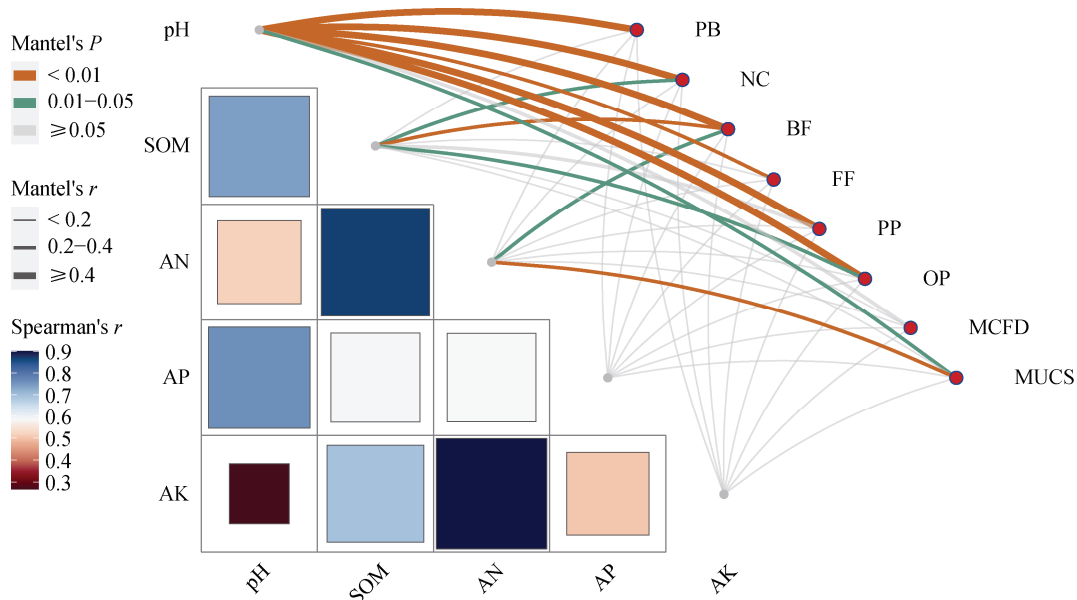
利用曼特尔 (Mantel) 检验分析波罗蜜生物量、线虫群落、线虫营养类群、微生物群落功能多样性和微生物碳源利用与土壤理化性质的关系 (图 3)。植株生物量、线虫群落、线虫营养类群、微生物碳

源利用与土壤 pH 显著相关 ( $P < 0.05$ ), 线虫群落、食细菌线虫和杂食/捕食性线虫与有机质也显著相关 ( $P < 0.05$ )。食细菌线虫和微生物碳源利用与土壤碱解氮呈显著相关 ( $P < 0.05$ )。

基于本研究结果, 初步建立了不同肥料种类对

土壤微生态和作物生长的作用模式，施用有机肥能激发有益微生物和线虫的繁殖，丰富土壤微生物和线虫的群落结构和功能，进而促进土壤养分循环，提高波罗蜜根、茎、叶生物量的积累，有机肥模式有利于形成作物与土壤微生物间的正反馈关系，且

有机肥种类对土壤微生物和线虫群落结构的调控具有选择性差异。而单施化肥导致土壤微生物和线虫数量减少、种类单一，破坏作物与土壤微生物之间的平衡关系，造成土壤养分比例失调，进而影响作物的正常生长。



注：PB，植物生物量；NC，线虫群落；BF，食细菌线虫；FF，食真菌线虫；PP，植食性线虫；OP，杂食/捕食性线虫；MCFD，微生物群落功能多样性；MUCS，微生物碳源利用；pH，土壤 pH；SOM，土壤有机质；AN，土壤碱解氮；AP，土壤有效磷；AK，土壤速效钾。Mantel's  $P$  值代表矩阵之间的相关显著性；Mantel's  $r$  值代表矩阵间的相关程度；Spearman's  $r$  代表相关性大小。Note: PB, plant biomass; NC, nematode community; BF, bacterial-feeding nematode; FF, fungal-feeding nematode; PP, plant-parasitic nematode; OP, omnivorous/predacious nematode; MCFD, microbial community functional diversity; MUCS, microbial utilization of carbon sources; pH, soil pH; SOM, soil organic matter; AN, alkalizable nitrogen; AP, available phosphorus; AK, readily available potassium. Mantel's  $P$  indicates the correlation significance between the matrices; Mantel's  $r$  indicates the correlation degree between the matrices; Spearman's  $r$  indicates the magnitude of the correlation.

图 3 基于曼特尔 (Mantel) 分析的不同施肥处理的植株生物量、微生物群落、线虫群落与土壤理化性质间的相关性  
Fig. 3 Correlation between plant biomass, microbial community, and nematode community with soil physicochemical properties under different fertilizer types based on Mantel analysis

### 3 讨论

#### 3.1 波罗蜜生物量积累和养分吸收对肥料种类的响应

不同肥料类型对波罗蜜生物量积累和养分吸收的影响不同。与其他有机肥相比，牛粪肥更有利于波罗蜜根、茎、叶干物质的积累 (表 3)，可能由于牛粪是冷性肥料，肥效稳定持久，可持续提供养分<sup>[21]</sup>。本研究结果显示，与化肥和不施肥相比，施用有机肥有利于增加根部的氮含量，而化肥处理的叶部氮含量最高 (表 3)，可见化肥中的无机氮能更

快速地被植物吸收利用。本研究中，牛粪、羊粪和鸡粪有机肥处理在根、茎、叶部的磷含量显著高于化肥处理，其中羊粪处理的植株磷含量最多 (表 3)。研究表明，有机肥分解产生的大量有机酸可活化土壤中的磷，导致施用粪肥后土壤剖面中有效磷的含量增加，并促进了磷的迁移，从而促进作物根部吸收<sup>[22]</sup>。黄豆粉、鸡粪、牛粪和化肥处理的根、茎、叶部钾含量普遍高于羊粪和不施肥处理 (表 3)，主要与土壤本身的矿物特征、养分状况以及作物养分吸收的交互作用有关<sup>[4]</sup>。与朱利霞等<sup>[23]</sup>研究结果相似，与不施肥相比，施用有机肥可显著增加土壤 pH、

有机质和速效氮磷钾含量,其中,牛粪处理的土壤碱解氮和速效钾含量最高,鸡粪对土壤有效磷和速效钾含量的提升效果最明显,黄豆粉次之,而羊粪的提升效果不明显且速效钾含量低于化肥处理(表4)。原因可能是牛粪、鸡粪和黄豆粉的pH趋于中性(表1),有利于提高土壤微生物的活性,加快微生物对速效养分的转化和积累<sup>[24]</sup>。

### 3.2 土壤线虫群落结构对肥料种类的响应

线虫作为土壤健康的指示生物,被广泛应用于各大生态系统和环境干扰评价,能够快速响应土壤环境变化<sup>[25]</sup>。大量研究发现,施用有机肥可提升线虫的总数,对食微线虫和杂食/捕食性线虫的生长繁殖有促进作用,同时在一定程度上抑制植食性线虫的数量<sup>[26-27]</sup>。本研究中,羊粪处理的土壤总线虫和不同食性线虫的数量最多,牛粪处理次之(图1a)。试验中使用的羊粪和牛粪碳氮比均在0.35左右(表1),可能增加了偏好有机物分解的微生物数量,进而影响食微线虫及其捕食者杂食/捕食性线虫的群落结构。线虫生态指数可反映不同肥料对土壤线虫群落结构的影响<sup>[28]</sup>。羊粪、牛粪和不施肥处理的土壤自由生活线虫成熟度指数(MI)较高(图1b),表明土壤食物网更成熟稳定,受干扰小<sup>[29]</sup>。本研究结果显示,与化肥和不施肥处理相比,有机肥显著提高了土壤线虫的多样性及分布均匀性(图1b)。线虫通道指数(NCR)常用于表征土壤有机质分解的主要途径<sup>[28]</sup>,黄豆粉、羊粪及化肥处理的NCR值较高(图1b),表明土壤食物网主要依赖细菌主导的分解途径,更利于土壤养分的循环与转化。

### 3.3 土壤微生物群落结构对肥料种类的响应

不同类型肥料处理的土壤微生物群落对各类碳源的利用能力不同。AWCD可反映土壤微生物对碳源的代谢活性及利用程度<sup>[30]</sup>。在本研究中,有机肥处理下的土壤微生物群落代谢活性(以AWCD值为指标)显著优于化肥处理(图2a),这证实了有机肥在增强土壤微生物代谢功能多样性方面的积极作用,提高对碳源的利用能力。牛粪和羊粪处理的AWCD值低于对照(图2a),可能是由于这两种粪肥产生了影响微生物活性的物质,从而影响微生物的代谢作用,且其养分多为缓效的,导致微生物分解缓慢<sup>[31]</sup>。本研究中,施用不同类型肥料的土壤微生物对碳源的利用均表现出相似的偏好,其中碳水

化合物类的利用率最高,其次是氨基酸类和羧酸类(图2b),一方面原因可能是长期施用有机肥有助于维持土壤微生物可代谢碳源类型的相对稳定性,并选择性地优先富集利用氨基酸类和碳水化合物类碳源的微生物类群<sup>[32]</sup>;另一方面,波罗蜜生长期间会持续性分泌大量根系分泌物,其中碳水化合物类、氨基酸类和羧酸类为主要物质,这些有机碳组分直接输入土壤,成为塑造特定土壤微生物群落结构的关键调控因子,以此对土壤微生物进行调控<sup>[18, 33]</sup>。施用有机肥(羊粪、鸡粪、牛粪)后土壤微生物对碳水化合物类和氨基酸类碳源的利用效率得到显著提升,与之前的研究结论<sup>[34]</sup>一致,而施用化肥的土壤微生物对羧酸类碳源的利用能力则表现出明显优势(图2b)。微生物Simpson指数表明,施用化肥、牛粪和羊粪的土壤微生物中优势物种更为突出,少数微生物占较大比重(图2c)。Shannon-Wiener多样性指数、McIntosh指数和均匀度指数的大致趋势与AWCD值相似,其中黄豆粉可显著增加土壤微生物物种丰富度、各物种的多维度数量以及群落的均匀度(图2c)。可能是因为黄豆粉施用后土壤养分均衡且C/N比更适宜土壤微生物的生长,结合AWCD值(图2a)可看出DF处理的土壤微生物代谢活性最高。

### 3.4 不同肥料种类的植物-土壤-微生物相关性

植物-土壤-微生物之间联系紧密,土壤养分充足能够促进土壤微生物的生长和繁殖,进而加速土壤养分分解转化,改善土壤的理化性质,维持土壤健康,由此也会提高作物长势和果实品质。研究表明,良好的土壤环境可提供较好的酸碱缓冲能力,增加微生物数量和代谢活性,促进植物的生长<sup>[35-36]</sup>,这也许是解释植株生物量、线虫群落、线虫营养类群、微生物碳源利用与土壤pH呈显著相关(图3)的主要原因之一。而线虫群落、食细菌线虫和杂食/捕食性线虫与有机质也显著相关(图3),可能是肥料的施用增加了土壤中的碳源,激活了微生物的代谢和繁殖,进而增加了食微线虫的群落结构,同样也会影响以土壤微小型动物为食的杂食/捕食性线虫的群落结构<sup>[37]</sup>。研究表明,土壤微生物对碳源的利用较敏感,易受到环境因子的影响<sup>[38]</sup>。本研究结果表明,食细菌线虫和微生物碳源利用与土壤碱解氮呈显著相关(图3),土壤氮含量的不同可能会影

响土壤的理化性质, 改变微生物生存的环境, 从而影响微生物的群落结构<sup>[39]</sup>, 使其对碳源的利用产生不同的响应。

## 4 结 论

施用黄豆粉、羊粪、鸡粪、牛粪四种有机肥通过影响土壤微生物和线虫的群落结构和功能, 从而增加土壤中氮磷钾的含量, 提高土壤肥力(有机质), 进而促进波罗蜜根、茎、叶生物量的积累。施用羊粪可增加线虫的总数, 使各营养类群线虫之间达到平衡, 增加线虫的多样性, 从而稳定线虫群落结构。施用黄豆粉可提高土壤中微生物的活性, 提高其对碳源的利用能力。分析不同类型有机肥与波罗蜜根际微生态环境的密切联系, 可根据土壤的基础条件调整有机肥的类型, 从而促进波罗蜜的生长。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Ma X X, Zhang X H, Lin Q H, et al. Effects of returning organic materials to fields on soil physicochemical properties and microbial community in rubber plantations[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52 ( 21 ): 245—252. [马晓晓, 张祥会, 林清火, 等. 有机物料还田对胶园土壤理化及微生物群落的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52 ( 21 ): 245—252.]
- [ 2 ] Zhu M Y, Xu D B, Lv G H, et al. Effects of different organic manures on microbial functional diversity in tobacco-planting soils[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2022, 43 ( 2 ): 12—18. [朱梦遥, 徐大兵, 倡国涵, 等. 不同种类有机肥对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2022, 43 ( 2 ): 12—18.]
- [ 3 ] Yang L, Wang M, Yu J J, et al. Organic fertilizers promote accumulation of mineral nutrients in citrus leaves by affecting soil biochemical properties and bacteria[J]. *Plants*, 2025, 14 ( 18 ): 2826.
- [ 4 ] Du S P, Ma Z M, Xue L. Effects of different kinds of organic fertilizer on fruit yield, quality and nutrient uptake of watermelon in gravel-mulched field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 ( 4 ): 1269—1277. [杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 ( 4 ): 1269—1277.]
- [ 5 ] Ali A, Liu X L, Yang W P, et al. Impact of bio-organic fertilizer incorporation on soil nutrients, enzymatic activity, and microbial community in wheat-maize rotation system[J]. *Agronomy*, 2024, 14 ( 9 ): 1942.
- [ 6 ] Sant'Anna G S L, de Carvalho L A L, da Silva M S R d A, et al. Short-term effects of poultry litter and cattle manure on soil's chemical properties and bacterial community[J]. *Agronomy*, 2024, 14 ( 7 ): 1382.
- [ 7 ] Fu S L, Ferris H, Brown D, et al. Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37 ( 11 ): 1979—1987.
- [ 8 ] Zhang T, Kong Y, Xiu W M, et al. Effects of coupled bio-organic and chemical fertilizers on soil nematode communities in winter wheat field in the fluvo-aquic soil region of Northern China[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2020, 38 ( 1 ): 223—229, 236. [张婷, 孔云, 修伟明, 等. 生物有机肥与化肥配施对华北潮土区冬小麦田土壤线虫群落的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38 ( 1 ): 223—229, 236.]
- [ 9 ] Haris M, Laasli S E, Taoussi M, et al. Valorization of animal and plant-derived organic wastes for sustainable management of plant-parasitic nematodes[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2025, 138: 102661.
- [ 10 ] Su L X, Zhang F, Bai T Y, et al. Growth and nutrient absorption of jackfruit seedlings under different potassium levels[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43 ( 3 ): 520—528. [苏兰茜, 张峰, 白亭玉, 等. 不同钾素处理下菠萝蜜幼苗生长及养分吸收特征[J]. *热带作物学报*, 2022, 43 ( 3 ): 520—528.]
- [ 11 ] Qin J F, Luo L F, Yang Y H. High-quality and high-yield cultivation techniques of jackfruit[J]. *Southern Horticulture*, 2012, 23 ( 2 ): 21—22. [覃杰凤, 罗莲凤, 阳艳华. 菠萝蜜优质丰产栽培技术[J]. *南方园艺*, 2012, 23 ( 2 ): 21—22.]
- [ 12 ] Su L X, Bai T Y, Yu H, et al. Effects of inorganic fertilizer combined with organic manure on soil nematode community under jackfruit trees[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 ( 6 ): 1504—1513. [苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 等. 有机无机肥配施对菠萝蜜种植土壤线虫群落的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57 ( 6 ): 1504—1513.]
- [ 13 ] de Goede R G M, Verschuur B. The nematode extraction efficiency of the Oostenbrink elutriator-cottonwool filter method with special reference to nematode body size and life strategy[J]. *Nematology*, 2000, 2 ( 3 ): 325—342.
- [ 14 ] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10 ( 3 ): 239—251.
- [ 15 ] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera—An outline for soil ecologists[J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25 ( 3 ): 315—331.
- [ 16 ] Su L X, Bai T Y, Qin X W, et al. Organic manure induced soil food web of microbes and nematodes drive soil organic matter under jackfruit planting[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 166: 103994.

- [ 17 ] Huang J, Sheng X F, He L Y, et al. Characterization of depth-related changes in bacterial community compositions and functions of a paddy soil profile[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2013, 347 ( 1 ): 33—42.
- [ 18 ] Su L X, Pu Q J, Bai T Y, et al. Effects of soil texture on rhizosphere microbial carbon source utilization, nematode community and fruit sugar of jackfruit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57 ( 2 ): 349—362. [苏兰茜, 濮秋婕, 白亭玉, 等. 土壤质地对菠萝蜜根际微生物碳源利用、线虫群落及果实糖分的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57 ( 2 ): 349—362.]
- [ 19 ] Schipper L A, Degens B P, Sparling G P, et al. Changes in microbial heterotrophic diversity along five plant successional sequences[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33 ( 15 ): 2093—2103.
- [ 20 ] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [ 21 ] Wang D M, Mai L W, Yang X, et al. Effect of animal manures on the conversion of carbon and nitrogen in edible fungi residue compost[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, 42 ( 11 ): 1368—1374. [王定美, 麦力文, 杨霞, 等. 粪便对食用菌渣堆肥中碳氮转化的影响[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42 ( 11 ): 1368—1374.]
- [ 22 ] Lourenzi C R, Ceretta C A, Cerini J B, et al. Available content, surface runoff and leaching of phosphorus forms in a typic hapludalf treated with organic and mineral nutrient sources[J]. *Revista Brasileira de Ciéncia Do Solo*, 2014, 38 ( 2 ): 544—556.
- [ 23 ] Zhu L X, Cao M M, Sang C C, et al. Effects of bio-fertilizer partially substituting chemical fertilizer on soil fertility and enzyme activity in maize field[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40 ( 1 ): 67—72. [朱利霞, 曹萌萌, 桑成琛, 等. 生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响[J]. *四川大学学报*, 2022, 40 ( 1 ): 67—72.]
- [ 24 ] Ren L J, Li J, Zou H T, et al. Effect of bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrient contents and soil aggregate distribution in greenhouse soil[J]. *Soils*, 2023, 55 ( 4 ): 756—763. [任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. *土壤*, 2023, 55 ( 4 ): 756—763.]
- [ 25 ] Liu Y F, Liu P, Wang W Y, et al. The research progress of soil nematodes as ecological indicator organisms [J]. *Ecological Science*, 2020, 39 ( 2 ): 207—214. [刘艳方, 刘攀, 王文颖, 等. 土壤线虫作为生态指示生物的研究进展[J]. *生态科学*, 2020, 39 ( 2 ): 207—214.]
- [ 26 ] Ren H F, Gao W, Huang S W, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with manure and/or straw on soil nematode community in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 ( 7 ): 1303—1317. [任宏飞, 高伟, 黄绍文, 等. 设施蔬菜有机肥/秸秆替代化肥模式对土壤线虫群落的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 ( 7 ): 1303—1317.]
- [ 27 ] Zhao Y, Yang B B, Zhu X P, et al. Effects of reduction of nitrogen fertilizer application and combined organic fertilizer on soil nematode community in winter wheat field[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 ( 4 ): 1433—1440.
- [ 28 ] Mao M, Wang L, Xi Y G, et al. Investigation on the characteristics of soil nematode communities in organic farming[J]. *Soils*, 2016, 48 ( 3 ): 492—502. [毛妙, 王磊, 席运官, 等. 有机种植业土壤线虫群落特征的调查研究[J]. *土壤*, 2016, 48 ( 3 ): 492—502.]
- [ 29 ] Wang Y, Mu Y F, Sun X H, et al. Stability evaluation of soil ecosystem assessment based on maturity index of soil nematodes and feasibility study in Lasha Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 ( 12 ): 5280—5293. [王杨, 穆云飞, 孙旭辉, 等. 基于土壤线虫群落成熟度指数的拉沙山土壤生态系统稳定性评价及可行性研究[J]. *生态学报*, 2024, 44 ( 12 ): 5280—5293.]
- [ 30 ] Qian Y P, Su B B, Gao J X, et al. Effects of maize and soybean intercropping on soil physicochemical properties and microbial carbon metabolism in Karst region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51 ( 1 ): 273—284. [钱玉平, 宿兵兵, 高吉星, 等. 玉米大豆间作对喀斯特区土壤理化性质及微生物碳代谢特征的影响[J]. *作物学报*, 2025, 51 ( 1 ): 273—284.]
- [ 31 ] Kong W D, Liu K X, Liao Z W. Effects of different organic materials and their composting levels on soil microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 ( 3 ): 487—492. [孔维栋, 刘可星, 廖宗文. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15 ( 3 ): 487—492.]
- [ 32 ] Luo X X, Hao X H, Chen T, et al. Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 ( 2 ): 740—748. [罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29 ( 2 ): 740—748.]
- [ 33 ] Feng P Y, Zhao Y N, Chen W F, et al. Research progress on interaction between root exudates of medicinal plants and rhizosphere microorganisms[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024 ( 17 ): 2128—2137. [冯璞阳, 赵艳妮, 陈卫锋, 等. 药用植物根系分泌物与根际微生物互作研究进展[J]. *现代农业科技*, 2024 ( 17 ): 2128—2137.]
- [ 34 ] Zhu Z L, Bai Y, Lv M L, et al. Soil fertility, microbial biomass, and microbial functional diversity responses to four years fertilization in an apple orchard in North China[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2020, 6 ( 4 ): 223—230.

- [ 35 ] Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 ( 5 ): 1248—1263. [赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. *土壤学报*, 2023, 60 ( 5 ): 1248—1263.]
- [ 36 ] Han T F, Liu K L, Zhao Y F, et al. Variation of soil pH in acidic farmland soil response to inorganic amendments: A meta-analysis[J]. *Soils and Crops*, 2025, 14 ( 1 ): 25—33. [韩天富, 柳开楼, 赵彦锋, 等. Meta分析评估无机改良剂对酸性农田土壤pH的影响[J]. *土壤与作物*, 2025, 14 ( 1 ): 25—33.]
- [ 37 ] Rao J X, Chen H, Wu X G, et al. Effects of different straw returning methods on soil nematode community characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39 ( 10 ): 2473—2480. [饶继翔, 陈昊, 吴兴国, 等. 不同秸秆还田方式对土壤线虫群落特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 ( 10 ): 2473—2480.]
- [ 38 ] Zhao C M, Wang W B, Xue X X, et al. Effects of different intercropping patterns on soil microbial functional diversity in rubber plantations[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37 ( 2 ): 286—293. [赵春梅, 王文斌, 薛欣欣, 等. 不同间作模式对胶园土壤微生物功能多样性的影响[J]. *西南农业学报*, 2024, 37 ( 2 ): 286—293.]
- [ 39 ] Diao C, Lu X K, Tian J, et al. Effects of long-term nitrogen addition on the metabolic diversity of microbial carbon sources in subtropical forest soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 ( 18 ): 6622—6630. [刁婵, 鲁显楷, 田静, 等. 长期氮添加对亚热带森林土壤微生物碳源代谢多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39 ( 18 ): 6622—6630.]

(责任编辑：陈荣府)