



生物有机肥对菠萝心腐病及根际土壤细菌群落的影响

杨姝钰¹, 赵艳^{1*}, 张晓波^{2*}, 唐浩真¹, 任泽广¹

1 海南大学热带作物学院, 海南 海口 570228

2 海南大学旅游学院, 海南 海口 570228

杨姝钰, 赵艳, 张晓波, 唐浩真, 任泽广. 生物有机肥对菠萝心腐病及根际土壤细菌群落的影响[J]. 微生物学报, 2023, 63(7): 2699-2712.

YANG Shuyu, ZHAO Yan, ZHANG Xiaobo, TANG Haozhen, REN Zeguang. Effect of bio-organic fertilizer on heart rot and bacterial community in rhizosphere of pineapple[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(7): 2699-2712.

摘要:【目的】探明施用生物有机肥对菠萝心腐病的防控效果及对根际土壤微生物的影响。【方法】本研究采用高通量测序技术, 综合分析不同施肥措施根际土壤微生物细菌群落多样性及群落特征。【结果】相比常规施肥处理(CK)和普通有机肥处理(YJ), 生物有机肥处理 KN (羊粪有机肥+泥炭土+枯草芽孢杆菌)和生物有机肥处理 KY (羊粪有机肥+椰糠+枯草芽孢杆菌)均能显著降低菠萝心腐病的发病率, 且 KN 处理的防控效果最佳。生物有机肥(KN、KY)施入后土壤细菌 α 多样性指数高于 CK 和 YJ 处理, 并形成了明显不同的细菌群落结构。与 CK 相比, 生物有机肥 KN 处理显著提高了拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和厚壁菌门(*Firmicutes*)的丰度, KY 处理中的酸杆菌门(*Acidobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、芽单胞菌门(*Gemmatimonadetes*)、硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)丰度显著增加; 属水平上, 生物有机肥中的蔗糖伯克霍尔德菌属(*Paraburkholderia*)和黄杆菌属(*Flavobacterium*)丰度均显著提升。方差分区分析(variance partitioning analysis, VPA)表明, 土壤化学性质(36.29%)对细菌群落影响最大, 其中土壤速效钾和有机质是影响土壤细菌群落的关键因子, 此外发病率(22.53%)和肥料偏生产力(16.42%)也是影响土壤细菌群落的重要因子。【结论】施用生物有机肥(KN、KY)能改变根际土壤细菌群落结构, 降低发病率, 对菠萝根际土壤生态系统稳定与健康具有重要意义。

资助项目: 海南省自然科学基金(322MS021); 海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC475); 国家自然科学基金(31760605)

This work was supported by the Hainan Provincial Natural Science Foundation (322MS021), the Hainan Provincial Natural Science Foundation High-level Talent Project (320RC475), and the National Natural Science Foundation of China (31760605).

*Corresponding authors. E-mail: ZHAO Yan, 992660@hainanu.edu.cn; ZHANG Xiaobo, yanbo315@126.com

Received: 2022-10-17; Accepted: 2022-12-04; Published online: 2022-12-22

关键词：生物有机肥；菠萝心腐病；高通量测序；土壤细菌群落

Effect of bio-organic fertilizer on heart rot and bacterial community in rhizosphere of pineapple

YANG Shuyu¹, ZHAO Yan^{1*}, ZHANG Xiaobo^{2*}, TANG Haozhen¹, REN Zeguang¹

¹ College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China

² School of Tourism, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China

Abstract: [Objective] To investigate the effect of the bio-organic fertilizer on heart rot and rhizosphere bacteria of pineapple. **[Methods]** Through high-throughput sequencing, we explored the bacterial diversity and community in rhizosphere of pineapple applied with different fertilizers. **[Results]** Compared with conventional fertilizer treatment (CK) and common organic fertilizer treatment (YJ), bio-organic fertilizer treatments of KN (sheep manure+peat soil+*Bacillus subtilis*) and KY (sheep manure+coconut chaff+*B. subtilis*) significantly reduced the incidence of heart rot in pineapple, especially KN. The α diversity of soil in KN and KY was higher than that of CK and YJ and a significantly different bacterial community structure emerged in the two bio-organic fertilizer treatments. Compared with CK, KN significantly increased the abundance of *Bacteroidetes* and *Firmicutes*, while the abundance of *Acidobacteria*, *Chloroflexi*, *Gemmatimonadetes*, and *Nitrospirae* in KY was significantly raised. At the genus level, the abundance of both *Paraburkholderia* and *Flavobacterium* in the bio-organic fertilizer treatments was significantly elevated. Variance partitioning analysis suggested that soil chemical properties (36.29%) had the greatest influence on the bacterial community, particularly soil available potassium and organic matter. In addition, the incidence (22.53%) and partial productivity of fertilizer (16.42%) were also the key influencing factors. **[Conclusion]** The application of bio-organic fertilizers (KN, KY) can change bacterial community structure in rhizosphere of pineapple and decrease the incidence of heart rot, which are important for the rhizosphere ecosystem stability and health of pineapple.

Keywords: bio-organic fertilizer; pineapple heart rot; high-throughput sequencing; soil bacterial community

菠萝(*Ananas comosus*)又称凤梨, 是凤梨科凤梨属多年生草本植物, 是中国热带、亚热带地区最具特色和优势的热带水果品种之一^[1-2]。近年来, 随着菠萝心腐病的快速蔓延与发展, 菠萝产业受到了严重威胁。菠萝心腐病主要是由疫霉属(*Phytophthora*)真菌中多个种引起的一种土传病害^[3]。发病菠萝植株的基部发生糜烂, 有刺激

性气味, 植株发病率在 20%–30%左右, 甚至可以达到 50%以上的植株死亡^[4], 对菠萝产业带来巨大的影响。

对于菠萝心腐病的防治, 常用的防治土传病害的措施主要包括化学农药、土壤改良等。这些传统方法虽然可以在短时间内快速杀灭土传病原菌, 但同时也会降低土壤微生物群落多样性,

无法长期、有效面对土传病害的再次爆发^[5]。因此,绿色可持续的防控措施越来越受到人们重视,国内外关于生物有机肥防控土传病害在不同作物上已有较多报道^[6-10],并取得了较好的防控效果。施用生物有机肥可以增进土壤肥力,改善作物根系微生态环境,提高土壤中有益微生物的活性^[11],施河丽等^[12]对烟草青枯病的研究发现,生物有机肥显著影响了土壤细菌的群落结构,促进了土壤中有益菌[如鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、耐热芽孢杆菌属等]的增殖。前人研究发现,芽孢杆菌、假单胞菌、放线菌、木霉菌和链霉菌等^[13-18]对烟草疫霉病原菌有拮抗作用,其中芽孢杆菌是农业上常用的一种促生和生防菌种,可以有效促进农作物生长和发育,增加农作物的产量和品质,提高土壤抗病性,是生物防治中最常用也最有效的菌种之一^[19]。

针对菠萝心腐病土传病害的研究国内外学者主要集中在生防菌收集阶段和温室实验^[20],吕诗锦等^[21]的研究发现,枯草芽孢杆菌(HL2)和链霉菌(HL3)对烟草疫霉菌菌丝生长有较强的抑制作用;唐浩真等^[22]的盆栽试验表明,施用生物有机肥能够促进菠萝植株的生长,显著增加鲜重、干重和D叶长(菠萝植株叶片束起时最长的叶片长度),降低菠萝可培养病原菌数量。而生物有机肥直接应用于大田菠萝心腐病防治的探索报道较少,施入生物有机肥后在大田中是否可以降低菠萝心腐病发病情况以及对土壤中微生物群落多样性的影响有待进一步研究。因此,本研究利用课题组前期筛选出的生防菌(枯草芽孢杆菌)、载体(椰糠、泥炭土)与羊粪有机肥进行二次发酵制成生物有机肥,通过田间试验,研究生物有机肥对连作菠萝心腐病发生及土壤细菌群落结构变化,探究土壤各化学因子与土壤细菌及发病率的相关性,以期能为菠萝合理施肥及心腐病的防控提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 供试作物

供试菠萝品种为“金菠萝(MD-2)”,由海南万钟实业有限公司提供。

1.1.2 试验地概况

田间试验于2018年7月-2019年9月在海南省乐东黎族自治县尖峰镇进行,该地区处于热带季风气候区,气候温和,年平均温度21-31℃,年降水量1400-1800mm,光照充足,雨量充沛,旱季雨季分明。

试验地土壤为海相沉积物发育的燥红土,土壤化学性质为:pH 5.66,土壤有机质0.86%,有效磷181.6 mg/kg,碱解氮43.4 mg/kg,速效钾27.9 mg/kg。

1.1.3 供试菌株

枯草芽孢杆菌HL2(由海南省乐东黎族自治县香蕉枯萎病防控研究所提供),具体抑菌能力参见文献^[21]。

1.1.4 供试肥料

供试普通有机肥料为羊粪有机肥,由内蒙古锡林郭勒羊养殖专业合作社提供,化学性质为:有机质≥45%,养分(N+P₂O₅+K₂O)≥6%。

供试生物有机肥为自行堆制,将拮抗菌接种到腐熟普通有机肥与不同的载体(椰糠、泥炭土)经二次固体堆制而成。其中羊粪有机肥和不同的载体(椰糠、泥炭土)分别按照4:1的比例混合,将液体菌剂按50 L/t的量接种到堆肥进行固体发酵。其生物化学指标如下:枯草芽孢杆菌HL2有效活菌数≥10⁹ CFU/g;肥料有机质含量≥46.5%;养分(N+P₂O₅+K₂O)≥5.5%;水分<30%。

供试化肥:三元复合肥(N:P₂O₅:K₂O=16:16:16)、尿素、硫酸钾。

1.2 试验设计

试验为完全随机排列,共分为4个处理:

CK (常规化肥); YJ (羊粪有机肥); KY (羊粪有机肥+椰糠载体+枯草芽孢杆菌 HL2); KN (羊粪有机肥+泥炭土载体+枯草芽孢杆菌 HL2)。每个处理设 3 个小区, 每个小区约 30 m², 种植密度平均 42 000 株/hm²。起垄覆膜种植, 每垄 2 行, 株距为 33 cm。普通有机肥和生物有机肥施用量为 9 100 kg/hm², 全部以基肥的形式施入田间, 化肥施用量参考郭继阳^[23]的研究结果制定: N 600 kg/hm²、P₂O₅ 400 kg/hm²、K₂O 900 kg/hm², 各处理化肥施用量均一致。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 土壤样品采集

土壤样品取自收获期不同施肥处理的菠萝根际土壤, 每个处理 4 个重复, 共 16 个土壤样品, 采集时收集菠萝植株的全部根系, 抖落根系表面的土壤, 将根系剪成 3 cm 的左右的小段置于无菌水的瓶中, 170 r/min 振荡 30 min, 超声波清洗 5 min, 获得根际土悬浮液, 将根际土悬浮液 10 000 r/min 离心 10 min, 弃上清液获得根际土样品^[24], 部分样品风干后用于测定土壤化学性质, 部分样品保存于-80 °C 冰箱以备分子实验分析用。

1.3.2 土壤化学性质测定

参照鲍士旦《土壤农化分析》^[25]采用电位法测定土壤 pH 值, 碱解扩散法测定土壤碱解氮, 氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷, 乙酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤速效钾, 重铬酸钾容量法测定土壤有机质。

1.3.3 土壤病原菌数量测定

采用平板稀释涂布计数法, 对土壤烟草疫霉数量进行测定。病原菌培养采用胡萝卜培养基^[26], 将培养后计数平板上形成的菌落数转换成每克干土形成的菌落数(colony forming unit, CFU), 以 CFU/g 干土表示。

1.3.4 菠萝心腐病发病率测定

菠萝苗定植后, 每天观察记录发病的植株数

量。菠萝植株出现黄叶、矮小、叶片易脱落, 即统计为发病植株。发病率稳定后, 根据发病植株的数量和定植菠萝总株数计算发病率^[27]:

发病率=发病植株数/定植菠萝总株数×100%

生防效果=(CK 发病率-处理发病率)/CK 发病率

1.3.5 肥料偏生产力测定

肥料偏生产力(partial factor productivity of fertilizer, PFP)=施肥区菠萝产量/肥料施用量

1.3.6 土壤总 DNA 提取和 PCR 扩增

采用 MOBIO 公司生产的强力土壤 DNA 提取试剂盒(Power Soil DNA Isolation Kit), 提取土壤总 DNA, 土壤微生物高通量测序使用细菌 16S rRNA 基因(V4 区)通用引物 515F (5'-GTGYC AGCMGCCGCGGTAA-3')和 806R (5'-GGACTA CNVGGGTWTCTAAT-3'), 送至厦门承葛生物科技有限公司进行 16S rRNA 基因扩增子测序。所有细菌 PCR 扩增、文库构建、文库检验、上机测序过程均由该公司完成。

1.4 数据处理与分析

数据统计和方差分析(analysis of variance, ANOVA)分别采用 Excel 2010 和 SPSS Statistics 26 软件; 使用 MOTHUE 软件计算 α 多样性和 β 多样性, 在 Graph Pad Prism 进行 *t*-检验和 ANOVA 分析; 利用 R 软件绘制主坐标分析(principal coordinate analysis, PCoA)图并进行 Mantel 检验分析; 利用 Origin2021 绘制丰度图; 利用 Gephi 对分类操作单元(operational taxonomic unit, OTU)进行网络分析; 利用 R 中的“vegan”包对土壤化学性质、肥料偏生产力和发病率的相对贡献进行方差分配分析; 用 Canoco5 对相对丰度前 20 的微生物属和土壤环境因子进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施下菠萝发病率和化学性质

如表 1 所示, 与常规施肥(CK)相比, 施用

有机肥(YJ)和生物有机肥(KN、KY)均可显著降低菠萝心腐病的发病率。但不同有机肥对降低菠萝心腐病发病率的能力不同, KN 处理下心腐病发病率最低(7.67%), 生防效果最好(56.07%);

KY 处理下心腐病发病率为 11.67%, YJ 处理下菠萝心腐病发病率为 15%。

不同施肥处理下, 菠萝根际土的化学性质产生了明显的改变(表 2)。与常规施肥(CK)相比,

表 1 不同施肥措施对菠萝心腐病的防控效果

Table 1 Control effect of different fertilizing methods on pineapple heart rot

Treatments	Disease incidence (%)	Biocontrol effect (%)	Number of pathogenic bacteria (log CFU/g)
KN	7.67±4.04a	56.07	3.15±0.10a
KY	11.67±5.51ab	32.17	3.23±0.20a
YJ	15.00±3.00ab	12.79	3.71±0.09b
CK	17.33±2.08b	–	3.83±0.09b

Different letters indicate significant difference at the level of $P<0.05$, – represents a reference item.

表 2 不同施肥措施对土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of different fertilization practices on soil chemical property

Treatment	pH	Organic matter (%)	Available phosphorus (mg/kg)	Available potassium (mg/kg)	Hydrolyzed nitrogen (mg/kg)
KN	5.76±0.17c	0.52±0.19ab	150.06±40.14a	69.81±29.89a	88.05±5.57a
KY	6.10±0.76a	0.72±0.15a	151.52±23.74a	24.06±10.04b	87.87±3.25a
YJ	6.02±0.13b	0.31±0.11bc	145.32±16.17a	33.69±12.43ab	85.99±9.74a
CK	4.93±0.88d	0.12±0.03c	162.71±26.47a	68.88±11.01a	88.40±7.59a

Different letters indicate significant difference at the level of $P<0.05$.

施用有机肥(YJ)和生物有机肥(KN、KY)均可显著提高土壤 pH, 生物有机肥处理(KN、KY)显著增加了土壤有机质含量。

2.2 不同施肥措施下土壤细菌群落多样性

细菌群落 α 多样性使用 Chao1 指数衡量丰富度, Shannon 指数衡量多样性, 二者是衡量群落多样性的重要指标, 指数越大, 表明微生物群落的丰富度和多样性越高。由图 1 可以看出, 与 CK 处理相比, KN 和 KY 处理土壤细菌 Chao1 指数显著提高($P<0.05$), YJ 处理无显著变化($P>0.05$); KY 处理土壤细菌 Shannon 指数显著高于其他处理($P<0.05$), CK、KN 和 YJ 处理间无显著差异($P>0.05$)。

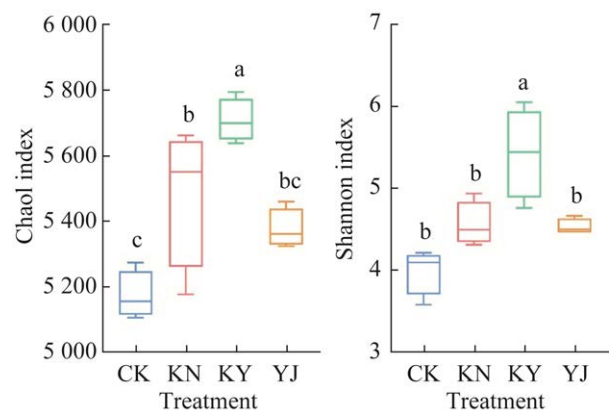


图 1 不同施肥处理菠萝根际土壤细菌 α 多样性指数变化

Figure 1 Changes in alpha diversity of bacteria in rhizosphere soil of pineapple under different fertilization treatments. Different letters indicate significant difference at the level of $P<0.05$.

2.3 不同施肥措施下土壤细菌群落结构

基于 Bray-Curits 距离的主坐标分析 (PCoA), 进一步阐明不同施肥措施对土壤细菌群落结构的影响。由图 2 可以看出, 不同处理间细菌群落组成和结构存在显著差异。第 1 和第 2 坐标轴表示第一主成分和第二主成分对样品差异的贡献值, 分别解释了细菌群落总体变化的 40.03% 和 27.59%, 总解释度达到 67.62%。各处理之间明显分开。

2.4 不同施肥措施下土壤细菌群落组成分析

在细菌群落组成方面, 所有样本细菌 16S rRNA 基因序列中检测到 12 个门丰度大于 0.1%, 分别为变形菌门 (*Proteobacteria*)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*)、酸杆菌门 (*Acidobacteria*)、浮霉菌门 (*Planctomycetes*)、放线菌门 (*Actinobacteria*)、绿弯菌门 (*Chloroflexi*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、芽单胞菌门 (*Gemmatimonadetes*)、疣微菌门 (*Verrucomicrobia*)、装甲菌门 (*Armatimonadetes*)、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*)、蓝菌门 (*Cyanobacteria*)

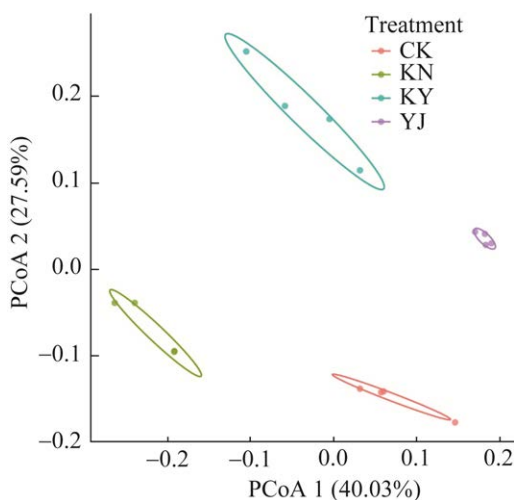


图 2 基于 Bray-Curtis 距离的土壤细菌群落主坐标分析

Figure 2 Principal coordinate analysis (PCoA) of soil microbial community based on Bray-Curtis distance of soil bacterial community.

(图 3)。不同处理的细菌门丰度不同, 与 CK 处理相比, KN 处理中的拟杆菌门、厚壁菌门相对丰度显著增加 ($P < 0.05$), KY 和 YJ 处理中的酸杆菌门、绿弯菌门、芽单胞菌门、硝化螺旋菌门平均相对丰度增加 ($P < 0.05$)。

基于平均相对丰度大于 0.1%, 所有处理中丰度最高的 10 个细菌属依次为劳尔氏菌属 (*Ralstonia*)、蔗糖伯克霍尔德菌属 (*Paraburkholderia*)、伯克霍尔德菌属 (*Burkholderia*)、*Trinickia*、戴氏菌属 (*Dyella*)、*Pseudoduganella*、根瘤菌属 (*Rhizobium*)、慢生根瘤菌属 (*Bradyrhizobium*)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、肠杆菌属 (*Enterobacter*) (图 4)。对相对丰度最高的 20 个细菌属分析发现, KN 处理中蔗糖伯克霍尔德菌属、黄杆菌属、*Caballeronia*、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 的相对丰度显著高于 CK、YJ 和 KY 处理 ($P < 0.05$), KY 处理中 *Pseudoduganella* 和鞘酯单胞菌属 (*Sphingomonas*) 的相对丰度显著高于 CK、YJ 和 KN 处理 ($P < 0.05$)。此外 CK 和 YJ 处理中蔗糖伯克霍尔德菌属和黄杆菌属的相对丰度显著低于 KY 和 KN 处理 ($P < 0.05$)。

2.5 不同施肥措施下土壤细菌群落的差异分析

通过 OTU 水平的共存网络分析不同处理土壤之间细菌群落的差异和相互作用, 由图 5 可知, 在所有处理中主要可识别的 OTU 分别属于变形菌门、拟杆菌门、酸杆菌门、放线菌门、浮霉菌门。不同处理间细菌群落共存网络显著不同, CK 处理细菌群落的节点和边数低于 KN、KY 和 YJ 处理, CK 处理土壤中正相关与负相关的比值最低, KY 处理土壤中正相关与负相关的比值最高, 此外 KY 处理下细菌网络与其他处理相比拥有更高的平均加权度 (average weighted degree), 表明 KY 处理下菠萝根际土壤细菌之间的相互作用要比 CK、KN 和 YJ 处理下复杂 (表 3)。

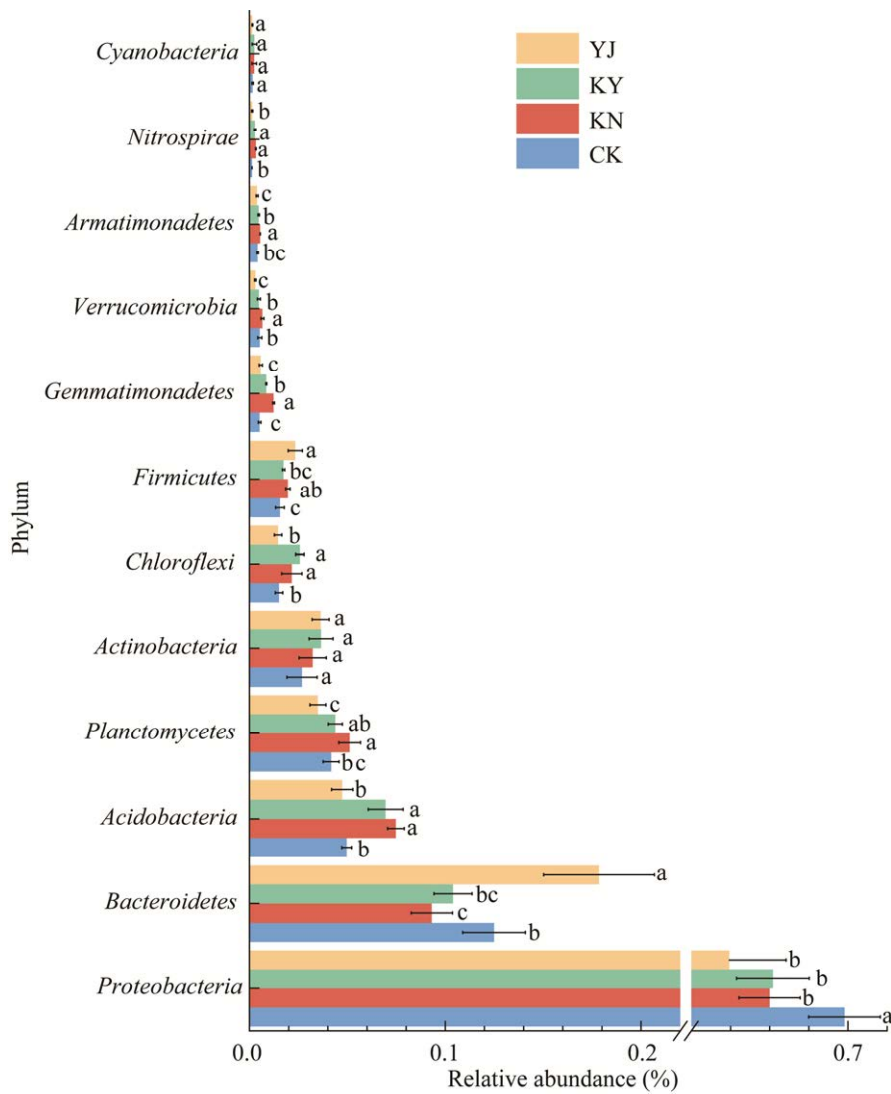


图 3 不同施肥处理下门水平菠萝根际土壤细菌相对丰度

Figure 3 Relative abundance of bacteria phylum in pineapple rhizosphere soil under different fertilization treatments. Different letters mean different difference limits at the level of $P < 0.05$.

2.6 不同施肥措施下土壤细菌群落与发病率和环境关联分析

进行方差分区分析 (variance partitioning analysis, VPA) 以量化土壤化学性质、肥料偏生产力 (PFP) 和发病率的相对贡献以及这些因素对土壤细菌群落的相互作用 (图 6)。这些变量解释了 58.14% 的贡献率, 在这些自变量中, 土壤化学性质对土壤微生物群落影响最大 (36.29%), 其次是发

病率 (22.53%)、肥料偏生产力 (16.42%)。为进一步探明土壤环境因子与细菌群落之间的关系, 通过冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 由图 7 可看出, RDA1 和 RDA2 解释率分别为 52.6% 和 19.76%, 两轴能解释 72.36% 的差异信息。AK 和 SOM 对细菌群落组成变异的解释度分别为 32.6% ($P < 0.05$)、15.0% ($P < 0.10$), 是影响不同施肥措施菠萝根际土壤细菌群落的 2 个主要环境因子 (表 4)。

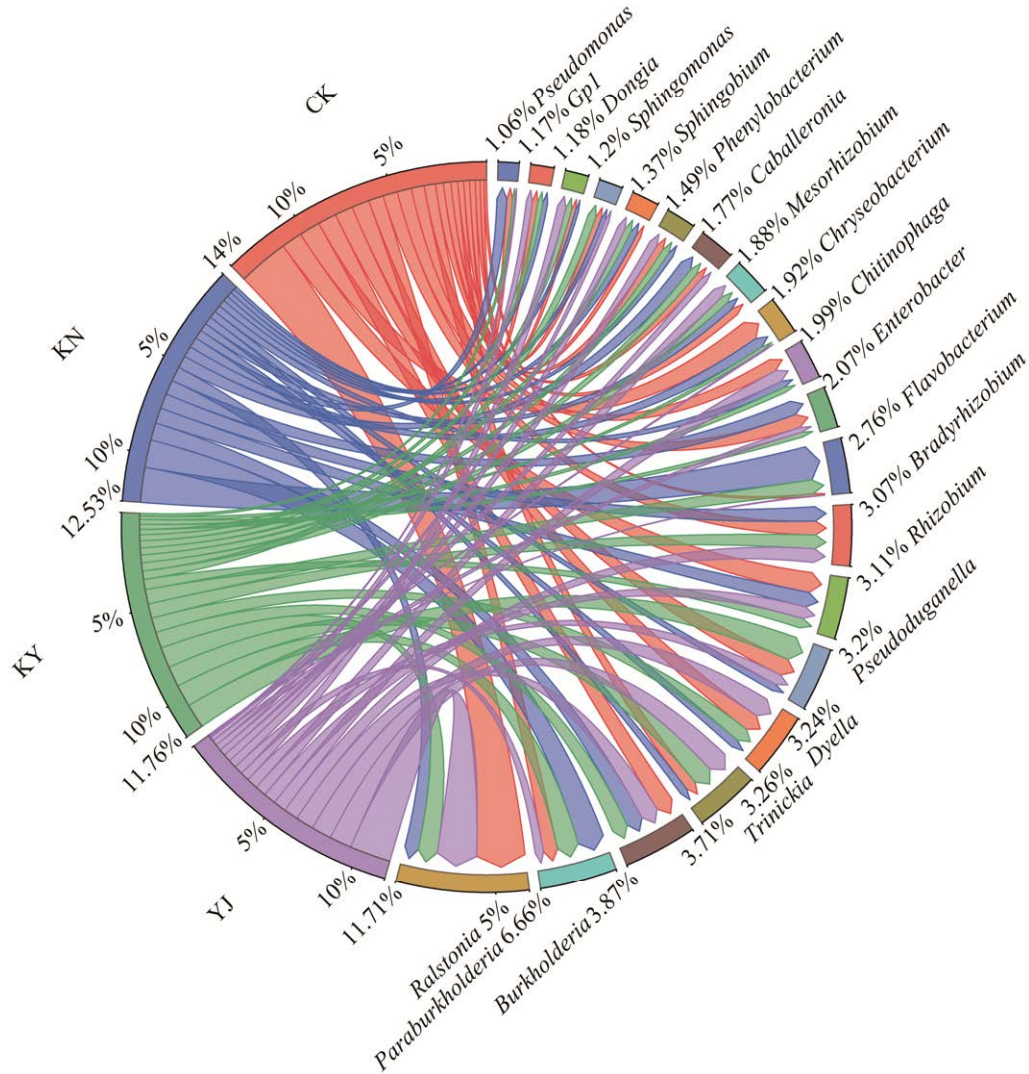


图 4 不同施肥处理下水平菠萝根际土壤细菌相对丰度

Figure 4 Relative abundance of bacteria genus in pineapple rhizosphere soil under different fertilization treatments. Different letters mean different difference limits at the level of $P < 0.05$.

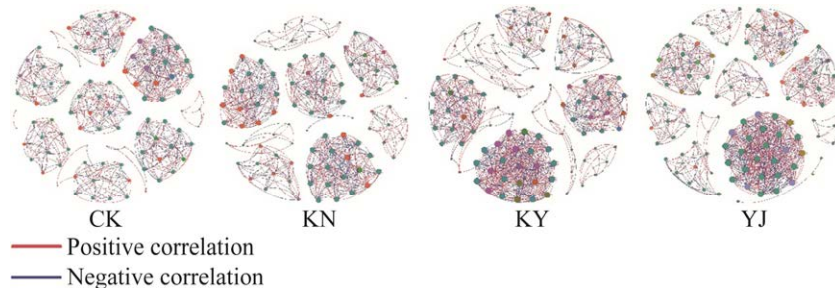


图 5 不同施肥处理下菠萝根际土壤细菌共生网络分析

Figure 5 Analysis of bacterial symbiosis network in pineapple rhizosphere soil under different fertilization treatments. Each node in the figure represents an OTU, the size of the point represents the degree of the node, and the color of the edge represents positive and negative correlation. Red: Positive correlation; Blue: Negative correlation. The node is colored according to its phylum.

表 3 不同施肥措施下菠萝根际土壤细菌群落拓扑特性

Table 3 Topological characteristics of bacterial community in pineapple soil under different fertilizing methods

Topological characteristics	CK	YJ	KY	KN
Number of nodes	607	830	811	631
Positive correlation/Negative correlation	1.35	1.36	1.45	1.40
Number of edges	100	112	113	97
Average weighted degree	1.640	2.571	3.274	2.330
Density	0.123	0.134	0.128	0.136
Modularity	-43.877	7.676	5.025	12.180
Average clustering coefficient	0.983	0.989	0.988	0.984

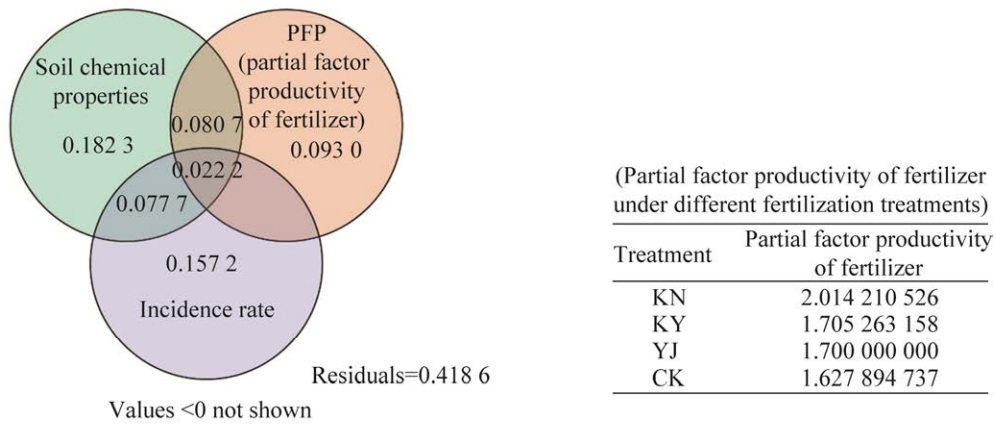


图 6 不同因子对菠萝根际土壤微生物群落的相互影响的方差配比分析(VPA)

Figure 6 Variance proportional analysis (VPA) of the interaction of different factors on soil microbial community in pineapple rhizosphere.

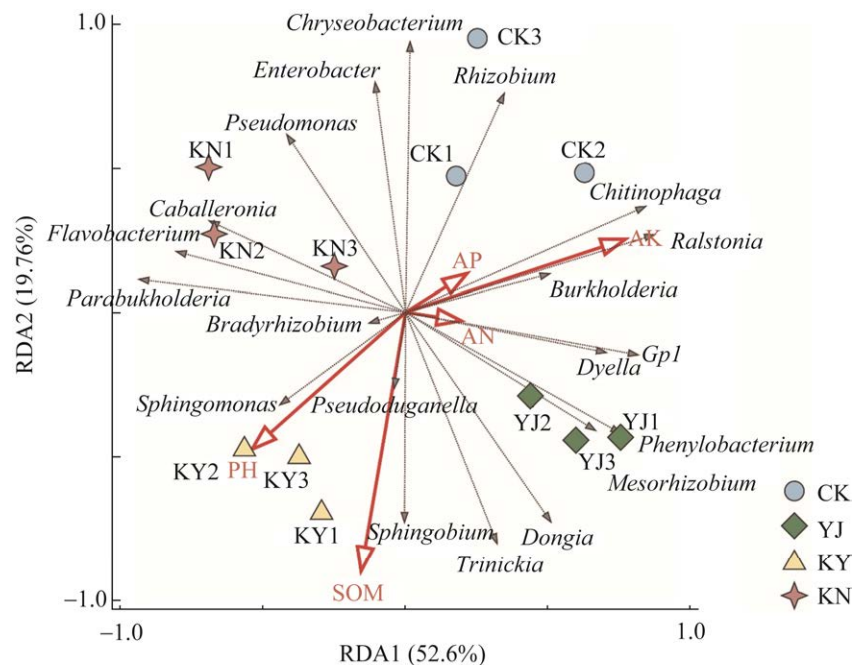


图 7 不同施肥处理菠萝根际土壤细菌群落与土壤化学性质的冗余分析

Figure 7 Redundancy analysis of bacterial community and soil chemical property in rhizosphere soil of pineapple under different fertilization treatments. AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; AN: Hydrolyzed nitrogen; OM: Organic matter.

表 4 环境因子对丰度前 20 细菌属的解释度

Table 4 Interpretations of environmental factors on the abundance of top 20 bacteria

Environmental factor	Explains (%)	Contribution (%)	Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i>
AK	32.6	43.3	4.8	0.012
SOM	15.0	19.9	2.6	0.072
pH	9.6	12.8	1.8	0.172
AP	13.3	17.7	3.2	0.074
AN	4.8	6.3	1.2	0.348

AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; AN: Hydrolyzed nitrogen; OM: Organic matter.

3 讨论

本研究结果表明,与常规处理相比,有机肥及生物有机肥处理可以显著降低菠萝心腐病发病率,其中 KN 处理生防效果更好。这可能是由于普通有机肥料与芽孢杆菌生防菌株相结合经过二次发酵后,芽孢杆菌生防菌在土壤中迅速繁殖优化了土壤微生物种群变化,土壤微生物以更高的微生物丰度和频繁的相互作用作出反应,从而产生更多可利用养分,进而降低了土壤病原菌数量,有效降低发病情况,影响植物的生长和健康^[28]。Wang 等^[29]和刘珊珊等^[30]的研究发现,施用生物有机肥可以显著降低病原菌数量,改变土壤细菌群落结构,激发土壤有益微生物,从而减少香蕉枯萎病的发生;朱菲莹等^[31]的研究表明,施用生物有机肥可帮助西瓜连作土壤的生态修复,对枯萎病防治起到一定的作用;唐浩真等^[22]研究得出,施用生物有机肥可促进菠萝植株生长、降低发病率,对菠萝心腐病有较好的防效。上述前人研究结果与本研究结果相符。因此,施用生物有机肥可作为防控菠萝心腐病的有效手段,特别是 KN 处理防控效果更明显。

土壤微生物多样性在支持多种生态系统功能中起着至关重要的作用^[32]。研究表明,施加有机肥能增加土壤有机质含量,为细菌提供大量生长所需养分,同时施加有机肥能通过改变土壤化学性质使细菌生长环境发生变化,不同细菌对环境要求不同,进而使细菌群落结构发生变化^[33]。

环境因子对土壤微生物的丰度、多样性和功能有显著影响,是土壤微生物群落组成的重要影响因素^[34-35]。在本研究中,土壤化学性质(36.29%)对土壤微生物的影响最大,在已知的土壤化学性质中,RDA 分析发现 AK 和 SOM 对细菌群落结构变化影响最大,有研究表明微生物肥料可以提高土壤有机质和速效养分含量^[36],为土壤细菌种群创造了良好的生活条件。PCoA 结果表明,CK 处理与 YJ 处理和 KY 处理在第二轴上分开,YJ 处理与 KY 处理及 KN 处理在第一轴上分开,推测是由于生物有机肥含有大量生防菌,施入土壤后导致细菌群落组成和结构区别于普通有机肥,生物有机肥中载体不同可能导致功能微生物枯草芽孢杆菌(HL2)定殖效果不同,从而影响土壤细菌群落组成结构。

不同施肥处理间土壤细菌群落组成在门水平上差异不显著,但相对丰度存在一定差异。其中,KN 处理显著增加了拟杆菌门和厚壁菌门的相对丰度,有研究表明,拟杆菌门在发病率低及抑病型土壤中相对丰度较高,该菌门也被证明可以促进植物生长且有抑制病原菌致病性的作用^[37-38],此结果与前人对番茄青枯病的研究一致^[39]。KY 和 YJ 处理中的酸杆菌门、绿弯菌门、芽单胞菌门、硝化螺旋菌门相对丰度显著提升,其中芽单胞菌门具有土壤污染物降解功能,是土壤中潜在的有益菌^[40],本研究中芽单胞菌门在生物有机肥处理(KY)中富集可能与防控菠

萝心腐病发生密切相关,这一结果在之前对香蕉枯萎病的研究中也有相似表述^[41]。

对不同处理土壤细菌优势属分析发现,在相对丰度最高的前 20 个属中,KN 处理中的蔗糖伯克霍尔德菌属、黄杆菌属、假单胞菌属相对丰度显著高于其他处理,其中蔗糖伯克霍尔德菌属和黄杆菌属在 KY 处理中的相对丰度也较 CK 处理和 YJ 处理显著提升。假单胞菌是一种可以促进植物生长的细菌^[42],且对烟草疫霉病原菌有拮抗作用^[43],而烟草疫霉是海南菠萝心腐病的主要致病菌^[44],由此推测假单胞菌在生物有机肥中富集与菠萝心腐病发病率降低有密切关系;蔗糖伯克霍尔德菌属能够促进植株对磷素的吸收与利用,继而提高作物的抗逆性,番华彩等^[45]在对香蕉枯萎病的研究中发现其在健康植株中的丰度比例高于枯萎病植株,猜测其丰度变化与菠萝心腐病发生有关,但对其防治菠萝心腐病的机理尚不清楚,需要进一步研究;黄杆菌属属于固氮的根瘤菌目,有固氮作用,安祥瑞等^[46]在对荔枝园的研究中发现黄杆菌属与荔枝产量呈显著正相关,此结果与本研究结果类似。以上结果表明,生物有机肥处理(KN、KY)通过增加土壤中生防菌能促进有益微生物作用的发挥,从而诱导土壤对菠萝心腐病的抑制作用。

共存网络可以研究微生物之间的相互作用,从而帮助我们了解微生物群落对外界扰动的响应^[47-48]。本研究中,共存网络分析表明,KY 处理下根际细菌网络的拓扑特性(节点数、正负边数比值、平均度)明显提高,表明 KY 处理下根际土壤细菌群落更复杂并且更稳定。此结果说明,配施生物有机肥有助于菠萝根际土壤细菌群落形成更稳定的网络结构以增强根际微生物对外界的抵抗力。

4 结论

与常规施肥相比,生物有机肥处理(KN、KY)

增加了根际细菌多样性,改变土壤细菌群落结构组成,显著降低菠萝心腐病发病率。本研究发现,蔗糖伯克霍尔德菌属和黄杆菌属等细菌在生物有机肥处理(KN、KY)中富集。综上所述,施用生物有机肥,可以促进土壤中有益微生物作用的发挥,重塑土壤细菌群落,从而降低土壤中病原菌的数量,达到防控菠萝心腐病的目的。

参考文献

- [1] 杨文秀, 赵维峰, 邓大华, 魏长宾, 孙光明. 云南省菠萝产业发展现状分析[J]. 农学学报, 2014, 4(1): 60-63. YANG WX, ZHAO WF, DENG DH, WEI CB, SUN GM. Current status of pineapple industry in Yunnan Province[J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(1): 60-63 (in Chinese).
- [2] 张江周, 严程明, 史庆林. 菠萝营养与施肥[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014. ZHANG JZ, YAN CM, SHI QL. Nutrition and Fertilization of Pineapple[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2014 (in Chinese).
- [3] RATTI MF, ASCUNCE MS, LANDIVAR JJ, GOSS EM. Pineapple heart rot isolates from Ecuador reveal a new genotype of *Phytophthora nicotianae*[J]. Plant Pathology, 2018, 67(8): 1803-1813.
- [4] 张妮, 陈泽坦, 张小冬, 任梅英. 我国菠萝病虫害及其防治[J]. 中国南方果树, 2009, 38(3): 52-55. ZHANG N, CHEN ZT, ZHANG XD, REN MY. Pests and diseases of pineapple in China and their control[J]. South China Fruits, 2009, 38(3): 52-55 (in Chinese).
- [5] MOWLICK S, INOUE T, TAKEHARA T, KAKU N, UEKI K, UEKI A. Changes and recovery of soil bacterial communities influenced by biological soil disinfection as compared with chloropicrin-treatment[J]. AMB Express, 2013, 3: 46.
- [6] 谷祖敏, 周飞, 毕卉, 李宝聚. 绿色木霉复配有机肥的筛选及对黄瓜枯萎病的防治作用[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 453-457. GU ZM, ZHOU F, BI H, LI BJ. Screening organic material mixed with *Trichoderma viride* and its efficiency control of cucumber *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 453-457 (in Chinese).
- [7] 朱佳芯, 张庚, 商美妮, 刘红军, 沈宗专, 李荣, 沈其荣. 耐热木霉菌株筛选及其对热作区香蕉促生效应的研究[J]. 微生物学报, 2021, 61(1): 206-218.

- ZHU JX, ZHANG G, SHANG MN, LIU HJ, SHEN ZZ, LI R, SHEN QR. Isolation and identification of a thermostable *Trichoderma* strain for banana growth promotion in tropic area[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(1): 206-218 (in Chinese).
- [8] CAO Y, ZHANG ZH, LING N, YUAN YJ, ZHENG XY, SHEN BA, SHEN QR. *Bacillus subtilis* SQR 9 can control *Fusarium* wilt in cucumber by colonizing plant roots[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(5): 495-506.
- [9] GIOTIS C, MARKELOU E, THEODOROPOULOU A, TOUFEXI E, HODSON R, SHOTTON P, SHIEL R, COOPER J, LEIFERT C. Effect of soil amendments and biological control agents (BCAs) on soil-borne root diseases caused by *Pyrenochaeta lycopersici* and *Verticillium albo-atrum* in organic greenhouse tomato production systems[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2009, 123(4): 387-400.
- [10] TAO R, LIANG YC, WAKELIN SA, CHU GX. Supplementing chemical fertilizer with an organic component increases soil biological function and quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 42-51.
- [11] LING N, DENG KY, SONG Y, WU YC, ZHAO J, RAZA W, HUANG QW, SHEN QR. Variation of rhizosphere bacterial community in watermelon continuous mono-cropping soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169 (7-8): 570-578.
- [12] 施河丽, 孙立广, 谭军, 赵秀云, 王瑞. 生物有机肥对烟草青枯病的防效及对土壤细菌群落的影响[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(2): 54-62.
- SHI HL, SUN LG, TAN J, ZHAO XY, WANG R. Control efficiency of bio-organic fertilizers on tobacco bacterial wilt and their effects on soil bacterial community[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2018, 39(2): 54-62 (in Chinese).
- [13] 何明川, 王志江, 谢永辉, 詹筱国, 柯昌磊, 李微杰, 张忠, 吴国星. 烟草黑胫病拮抗菌的筛选、鉴定及发酵条件优化[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(2): 428-439.
- HE MC, WANG ZJ, XIE YH, ZHAN YG, KE CL, LI WJ, ZHANG Z, WU GX. Screening, identification and fermentation conditions optimization of antagonistic bacterium against tobacco black shank[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(2): 428-439 (in Chinese).
- [14] 田艳艳, 赵世民, 李彰, 江凯, 康业斌. 洛阳地区烟田土壤木霉菌的分离鉴定及其拮抗作用测定[J]. *河南农业科学*, 2015, 44(11): 79-84.
- TIAN YY, ZHAO SM, LI Z, JIANG K, KANG YB. Isolation and identification of *Trichoderma* from tobacco growing soil of Luoyang and determination of their inhibition effects[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(11): 79-84 (in Chinese).
- [15] 邹朔飞, 董祥立, 李继业, 丁海霞, 李治模. 烟草黑胫病拮抗链霉菌筛选及田间防效试验[J]. *山地农业生物学报*, 2021, 40(2): 49-53.
- ZOU SF, DONG XL, LI JY, DING HX, LI ZM. Screening of antagonistic *Streptomyces* strain against tobacco black shank and control effect trial in field[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2021, 40(2): 49-53 (in Chinese).
- [16] 杨珍福, 吴毅歆, 陈映岚, 何月秋. 烟草拮抗内生细菌的筛选与防病促生长效果[J]. *中国烟草科学*, 2014, 35(6): 48-53.
- YANG ZF, WU YX, CHEN YL, HE YQ. Screening, growth promotion, and disease control of antagonistic and endophytic bacteria in tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(6): 48-53 (in Chinese).
- [17] 李小杰, 李成军, 刘红彦, 邱睿, 赵辉, 陈玉国, 胡亚静, 刘畅, 白静科, 李淑君. 烟草疫霉菌拮抗细菌的筛选鉴定及发酵条件优化[J]. *中国烟草科学*, 2019, 40(1): 68-74.
- LI XJ, LI CJ, LIU HY, QIU R, ZHAO H, CHEN YG, HU YJ, LIU C, BAI JK, LI SJ. Screening and fermentation condition optimization for antagonistic bacteria to *Phytophthora nicotianae*[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2019, 40(1): 68-74 (in Chinese).
- [18] 黄大跃. 烟草疫霉生防菌的筛选及鉴定[J]. *现代农业科技*, 2020(18): 104-106.
- HUANG DY. Screening and identification of biocontrol bacteria against *Phytophthora nicotianae*[J]. *XianDai NongYe KeJi*, 2020, 2020(18): 104-106 (in Chinese).
- [19] LUO J, RAN W, HU JA, YANG XM, XU YC, SHEN QR. Application of bio-organic fertilizer significantly affected fungal diversity of soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 2039-2048.
- [20] 胡英宏, 任泽广, 杨妹钰, 赵艳, 王蓓蓓, 张晓波, 阮云泽. 生物有机肥对菠萝心腐病发生和土壤细菌群落结构的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(6): 8.
- HU YH, REN ZG, YANG SY, ZHAO Y, WANG BB, ZHANG XB, RUAN YZ. Effects of bio-organic fertilizers on pineapple heart rot and bacterial community structure[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(6): 8 (in Chinese).
- [21] 吕诗锦, 黄华莲, 阮云泽, 赵艳, 王蓓蓓, 秦海利. 菠萝心腐病拮抗菌的分离、筛选及鉴定[J]. *中国南方*

- 果树, 2017, 46(3): 83-87.
- LÜ SJ, HUANG HL, RUAN YZ, ZHAO Y, WANG BB, QIN HL. Isolation, screening and identification of antagonistic bacteria against pineapple heart rot[J]. South China Fruits, 2017, 46(3): 83-87 (in Chinese).
- [22] 唐浩真, 胡英宏, 任泽广, 杨姝钰, 赵艳, 王蓓蓓, 张晓波, 阮云泽. 不同生物有机肥对连作菠萝生长及防控心腐病效果[J]. 微生物学通报, 2021, 48(11): 4156-4166.
- TANG HZ, HU YH, REN ZG, YANG SY, ZHAO Y, WANG BB, ZHANG XB, RUAN YZ. Effect of different biological organic fertilizers on the growth of pineapple under continuous cropping and the heart rot[J]. Microbiology China, 2021, 48(11): 4156-4166 (in Chinese).
- [23] 郭继阳. 菠萝施肥调研与金菠萝营养特性及减肥技术研究[D]. 海口: 海南大学硕士学位论文, 2019.
- GUO JY. Investigation on fertilization of pineapple and study on nutritional characteristics and weight loss technology of golden pineapple[D]. Haikou: Master's Thesis of Hainan University, 2019 (in Chinese).
- [24] BONILLA N, CAZORLA FM, MARTINEZ-ALONSO M, HERMOSO JM, GONZALEZ-FERNANDEZ JJ, GAJU N, LANDA BB, de VICENTE A. Organic amendments and land management affect bacterial community composition, diversity and biomass in avocado crop soils[J]. Plant and Soil, 2012, 357(1-2): 215-226.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO SD. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [26] 秦海利, 董存明, 张爱华, 赵艳, 汤华, 阮云泽. 海南香蕉根围土解磷菌的筛选鉴定及对香蕉幼苗生长的影响[J]. 中国南方果树, 2015, 44(2): 18-22.
- QIN HL, DONG CM, ZHANG AH, ZHAO Y, TANG H, RUAN YZ. Screening and identification of phosphate-solubilizing bacteria from rhizosphere soil in banana orchards in Hainan and its influence on growth of banana seedlings[J]. South China Fruits, 2015, 44(2): 18-22 (in Chinese).
- [27] OCULI J, BUA B, OCWA A. Reactions of pineapple cultivars to pineapple heart rot disease in central Uganda[J]. Crop Protection, 2020, 135: 105213.
- [28] YE L, ZHAO X, BAO EC, LI JS, ZOU ZR, CAO K. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 11.
- [29] WANG BB, YUAN J, ZHANG J, SHEN ZZ, ZHANG MX, LI R, RUAN YZ, SHEN QR. Effects of novel bioorganic fertilizer produced by *Bacillus amyloliquefaciens* W19 on antagonism of *Fusarium wilt* of banana[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(4): 435-446.
- [30] 刘珊珊, 夏萌, 胡夏茹, 王云舟, 李春雨, 陶成圆, 沈宗专, 张楠, 李荣, 沈其荣. 石灰碳铵熏蒸联合生物有机肥对香蕉枯萎病和细菌群落的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4189-4196.
- LIU SS, XIA M, HU XR, WANG YZ, LI CY, TAO CY, SHEN ZZ, ZHANG N, LI R, SHEN QR. Effects of lime and ammonium carbonate fumigation coupled with bio-organic fertilizer application on banana *Fusarium wilt* and bacterial community[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4189-4196 (in Chinese).
- [31] 朱菲莹, 张屹, 肖姬玲, 魏林, 梁志怀. 生物有机肥对土壤微生物群落结构变化及西瓜枯萎病的调控[J]. 微生物学报, 2019, 59(12): 2323-2333.
- ZHU FY, ZHANG Y, XIAO JL, WEI L, LIANG ZH. Regulation of soil microbial community structures and watermelon *Fusarium wilt* by using bio-organic fertilizer[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2019, 59(12): 2323-2333 (in Chinese).
- [32] CARDINALE BJ, MATULICH KL, HOOPER DU, BYRNES JE, DUFFY E, GAMFELDT L, BALVANERA P, O'CONNOR M, GONZALEZ A. The functional role of produce diversity in ecosystems[J]. American Journal of Botany, 2011, 98(3): 572-592.
- [33] 邓正昕, 高明, 王莹燕, 谢永红, 熊子怡, 王子芳. 化肥减量配施有机肥对柠檬根际/非根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2023, 2023(2): 1074-1084.
- DENG ZX, GAO M, WANG YY, XIE YH, XIONG ZY, WANG ZF. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer application on bacterial community structure in rhizosphere/non-rhizosphere soil of lemon[J]. Environmental Science, 2023(2): 1074-1084 (in Chinese).
- [34] BAHRAM M, HILDEBRAND F, FORSLUND SK, ANDERSON JL, SOUDZILOVSKAIA NA, BODEGOM PM, BENGTSSON-PALME J, ANSLAN S, COELHO LP, HAREND H, HUERTA-CEPAS J, MEDEMA MH, MALTZ MR, MUNDRA S, OLSSON PA, PENT M, POLME S, SUNAGAWA S, RYBERG M, TEDERSOO L, et al. Structure and function of the global topsoil microbiome[J]. Nature, 2018, 560(7717): 233.
- [35] 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清. 不同轮作休耕下潮土细菌群落结

- 构特征[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4977-4987.
- NAN ZW, LIU Z, DAI HC, ZHANG L, WANG N, XU J, LIU KC, MENG WW, WANG XQ. Characteristics of bacterial community structure in fluvo-aquic soil under different rotation fallow[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10): 4977-4987 (in Chinese).
- [36] 乌音嘎, 乌恩, 吴澜, 闫志蕊. 复合微生物肥对碱土生物学性状与土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, 2021(1): 197-203.
- WU YG, WU E, WU L, YAN ZR. Effects of compound microbial fertilizers on biological properties and available nutrients of alkaline soil[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021, 2021(1): 197-203 (in Chinese).
- [37] ALI A, GHANI MI, DING HY, IQBAL M, CHENG ZH, CAI ZC. Garlic substrate induces cucumber growth development and decreases *Fusarium* wilt through regulation of soil microbial community structure and diversity in replanted disturbed soil[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(17): 6008.
- [38] GAO Y, LU Y, LIN WP, TIAN JH, CAI KZ. Biochar suppresses bacterial wilt of tomato by improving soil chemical properties and shifting soil microbial community[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(12): 676.
- [39] 杨天杰, 王玉鑫, 王佳宁, 韦中, 董彩霞, 沈其荣, 徐阳春. 不同基质生物有机肥防控番茄土传青枯病及促生效果研究[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 961-968.
- YANG TJ, WANG YX, WANG JN, WEI Z, DONG CX, SHEN QR, XU YC. Effects of different bioorganic fertilizers on tomato bacterial wilt and plant growth promotion[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 961-968 (in Chinese).
- [40] 丁传雨, 郑远, 任学敏, 陈兆进. 能源植物修复土壤镉污染过程中细菌群落分析[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 3009-3016.
- DING CY, ZHENG Y, REN XM, CHEN ZJ. Changes in bacterial community composition during the remediation of Cd-contaminated soils of bioenergy crops[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8): 3009-3016 (in Chinese).
- [41] SHEN ZZ, WANG DS, RUAN YZ, XUE C, ZHANG J, LI R, SHEN QR. Deep 16S rRNA pyrosequencing reveals a bacterial community associated with banana *Fusarium* wilt disease suppression induced by bio-organic fertilizer application[J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): 10.
- [42] YANG L, TAN LL, ZHANG FH, GALE WJ, CHENG ZB, SANG W. Duration of continuous cropping with straw return affects the composition and structure of soil bacterial communities in cotton fields[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2018, 64(3): 167-181.
- [43] 董国菊, 马冠华, 肖崇刚. 荧光假单胞菌拮抗菌株对烟草疫霉的抑菌机制及控病效果[J]. *植物保护学报*, 2012, 39(2): 115-120.
- DONG GJ, MA GH, XIAO CG. Antagonistic mechanism of *Pseudomonas fluorescens* strains against *Phytophthora nicotianae* and biocontrol effect on tobacco black shank[J]. *Journal of Plant Protection*, 2012, 39(2): 115-120 (in Chinese).
- [44] SHEN HF, LIN BR, ZHAN JX, PU XM. First report of pineapple heart rot caused by *Phytophthora nicotianae* in Hainan Province, China[N]. *Plant Disease*, 2013, 97(4): 560-561.
- [45] 番华彩, 魏薇, 曾莉, 徐胜涛, 李舒, 郭志祥, 郑泗军. 香蕉枯萎病和健康植株根际土壤细菌群落结构差异对比分析[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(9): 1885-1891.
- FAN HC, WEI W, ZENG L, XU ST, LI S, GUO ZX, ZHENG SJ. Comparative analysis on difference of bacterial community structure in rhizosphere soil between banana *Fusarium* wilt and healthy plants[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(9): 1885-1891 (in Chinese).
- [46] 安祥瑞, 江尚焘, 谢昶琰, 徐阳春, 董彩霞, 沈其荣. 减施化肥配施有机肥对荔枝园土壤微生物区系的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 1099-1108.
- AN XR, JIANG ST, XIE CY, XU YC, DONG CX, SHEN QR. Effects of reducing chemical fertilizers combined with organic fertilizers on soil microbial community in litchi orchards[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 1099-1108 (in Chinese).
- [47] WEI Z, GU Y, FRIMAN VP, KOWALCHUK GA, XU YC, SHEN QR, JOUSSET A. Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health[J]. *Science Advances*, 2019, 9(5): 759.
- [48] de VRIES FT, GRIFFITHS RI, BAILEY M, CRAIG H, CIRLANDA M, GWEON HS, HALLIN S, KAISERMANN A, KEITH AM, KRETZSCHMAR M, LEMANCEAU P, LUMINI E, MASON KE, OLIVER A, OSTLE N, PROSSER JI, THION C, THOMSON B, BARDGETT RD. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3033.