

研究报告



不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤理化性质和可培养微生物数量的影响

杨劲明 范平珊 王禹童 郭继阳 赖朝圆 孙鹏 李炳韵 王蓓蓓* 阮云泽 赵艳

海南大学热带作物学院 海南 海口 570228

摘要:【背景】不同作物轮作是克服作物连作障碍的重要措施,香蕉与菠萝轮作能有效缓解香蕉土传枯萎病。【目的】以休耕(CK)、高病蕉园土壤中种植巴西香蕉苗(B)、高病蕉园土壤中种植“巴厘”菠萝苗(B_BP)、高病蕉园土壤中种植“金菠萝”菠萝苗(B_GP)和高病蕉园土壤中种植“台农 17 号”菠萝苗(B_PP)为对象,研究不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤理化性质和可培养尖孢镰刀菌、真菌、细菌和放线菌数量的影响,揭示不同菠萝品种种植在高病蕉园土壤中理化性质差异及微生物分布特征。

【方法】采用盆栽试验结合可培养微生物研究方法,探究在高病蕉园土壤种植不同菠萝品种后的土壤理化性质和可培养微生物数量的变化。【结果】与休耕(CK)处理相比,高病蕉园土壤中继续种植巴西香蕉苗(B)处理显著增加土壤中尖孢镰刀菌数量,而种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”(B_GP 和 B_PP)处理均能显著降低土壤中可培养尖孢镰刀菌数量,增加细菌和放线菌数量。土壤速效磷、细菌及放线菌数量均与可培养尖孢镰刀菌数量呈显著负相关关系;pH 和真菌数量与可培养尖孢镰刀菌数量呈显著正相关关系。主坐标分析(principal co-ordinates analysis, PCoA)和多元回归树(multivariate regression trees, MRT)分析结果表明,种植“金菠萝”和“台农 17 号”菠萝(B_GP 和 B_PP)处理间的土壤肥力质量相近,并显著区别于其他 3 个处理。【结论】在高发病香蕉园地,种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”(B_GP 和 B_PP)可以显著改善其土壤理化性质和土壤可培养微生物状况,对香蕉连作障碍有较好的缓解作用。

关键词: 香蕉连作, 菠萝品种, 尖孢镰刀菌, 土壤肥力指标, 主坐标分析, 多元回归树分析

Effects of different pineapple varieties on soil properties and culturable microflora in continuous cropping banana orchard

YANG Jin-Ming FAN Ping-Shan WANG Yu-Tong GUO Ji-Yang LAI Chao-Yuan
SUN Peng LI Bing-Yun WANG Bei-Bei* RUAN Yun-Ze ZHAO Yan

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

Abstract: [Background] Rotation was known as one of the effective methods in continuous cropping obstacle prevention. Banana-pineapple rotation has been confirmed to be a very effective method in

Foundation items: Natural Science Foundation of Hainan Province (317040); National Key Research and Development Program of China (2017YFD0202101); National Natural Science Foundation of China (41867006)

*Corresponding author: E-mail: wangbbhaida@163.com

Received: 12-11-2019; Accepted: 13-01-2020; Published online: 21-02-2020

基金项目: 海南省自然科学基金(317040); 国家重点研发计划(2017YFD0202101); 国家自然科学基金(41867006)

*通信作者: E-mail: wangbbhaida@163.com

收稿日期: 2019-11-12; 接受日期: 2020-01-13; 网络首发日期: 2020-02-21

banana *Fusarium* wilt disease control. **[Objective]** In order to evaluate the effectiveness of prevention to banana *Fusarium* wilt disease induced by different pineapple varieties, five treatments in banana orchard soil with high incidence of disease were set as follows: fallow (CK), banana planted (B), “bali pineapple” planted (B_BP), “gold pineapple” planted (B_GP) and “tai nong 17 pineapple” planted (B_PP). The amount of cultivated *Fusarium oxysporum*, total fungi, bacteria, actinobacteria and soil properties were investigated to analyze the characteristics of chemical properties and microbial distribution in different treatments. **[Methods]** Pot experiment and culturable microorganisms’ analysis were used to study the changes of soil properties and culturable microorganisms of different pineapple varieties planted in banana orchard with high disease. **[Results]** Compared with fallow (CK), amount of *Fusarium oxysporum* in treatment B was significantly increased, while in B_GP and B_PP treatments, it was significantly reduced. Besides, the number of culturable bacteria and actinobacteria were significantly increased in B_GP and B_PP treatments. Content of available phosphorus, numbers of bacteria and actinobacteria were negatively correlated with culturable *Fusarium oxysporum*, respectively. While soil pH and the number of culturable fungi were positively correlated with culturable *Fusarium oxysporum*. Results of principal co-ordinate analysis (PCoA) and multiple regression tree (MRT) showed that soil fertility quality of B_GP and B_PP treatments were similar, while, they were far different from the other three treatments. **[Conclusion]** Our finding provides evidence that planting “tai nong 17” and “gold pineapple” were more effective than “bali pineapple” in control of banana *Fusarium* wilt for their high-efficiency ability to improve the soil properties and the culturable microorganisms.

Keywords: Banana continuous cropping, Pineapple variety, *Fusarium oxysporum*, Soil fertility quality, Principal co-ordinate analysis, Multiple regression tree analysis

香蕉(*Musa nana* Lour.)是我国南方地区主要的经济作物^[1]。由于人们过度追求香蕉产量及其经济效益,长期香蕉单一连作导致严重的连作障碍^[2-3]。目前,土传枯萎病是香蕉生产中最主要的连作障碍^[4],研究表明,土传枯萎病的发生与土壤理化性质恶化和微生物群落失衡有关^[5-7]。长期连作的蕉园土壤微生物多样性下降,细菌和放线菌数量减少,病原微生物大量繁殖^[8-12]。土壤理化性质和微生物是农田生态系统的重要组成成分,对土壤功能、生态系统的稳定以及自然界养分循环等具有重要的作用^[13]。因此,改善土壤理化性质和土壤微生物群落结构的多样性对于土壤质量和安全及提高作物产量和经济效益都具有重要意义^[14-15]。

研究表明,防控香蕉枯萎病各种措施中,轮作是缓解连作障碍发生的有效防治方法之一^[16]。通过与另一种作物轮作能够有效改良连作土壤养分状况,从而改善土壤微生物群落结构及活性^[17],抑制病原真菌的暴发式生长。前期报道中,香蕉与辣椒、甘蔗、韭菜、水稻、茄子、菠萝等作物轮作均能有效降低香蕉枯萎病的发病率,从而有效

地改善蕉园土壤的连作障碍^[17-8,16]。

另外,研究表明不同番茄品种与黄瓜轮作有助于减缓黄瓜枯萎病的发生,其中不同番茄品种之间减少黄瓜尖孢镰刀菌数量存在差异^[18-20];通过选择不同玉米品种与粮棉轮作,以求在“粮棉-玉米”轮作模式下选择最优的降低粮棉连作障碍的玉米品种^[21];不同辣椒品种抗连作障碍效果也有所差异^[22]。因此,在高发病蕉园地块中,为了恢复健康的香蕉生产,在现有的有效轮作方式中选出最优品种来进行轮作,改善土壤生态环境,逐渐恢复健康的香蕉土壤微生物区系是一种可行的方案。研究发现“香蕉-菠萝”轮作能够显著缓解香蕉连作障碍^[9,23-24]。香蕉枯萎病在苗期即开始发生,很多学者采用香蕉苗期室内培养的方法研究各种措施在枯萎病上的防效及其作用机理^[6,25-27]。因此,本研究采用室内培养的方法,以高病土壤继续种植香蕉苗为对照,至香蕉苗发病率大于60%为结束试验的时间,探究不同菠萝品种种植对高病蕉园土壤肥力和微生物的影响。以期在有效的“香蕉-菠萝”轮作模式中探究不同菠萝品种种植缓解香蕉连

作障碍的部分机理, 以求进一步找到“香蕉-菠萝”轮作模式中最合适的菠萝品种, 为轮作降低高发病蕉园地块中土传病害的发生提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤与材料

供试土壤为海南省临高县新盈农场海相沉积物发育的燥红壤, 连续种植香蕉 11 年, 香蕉枯萎病发病率>65%。土壤基本理化性质: pH 5.31, 土壤速效磷 15.64 mg/kg, 速效钾 411.67 mg/kg, 碱解氮 91.23 mg/kg, 有机质 3.64 g/kg。

供试香蕉品种为“巴西蕉”, 苗龄 2 个月, 由海南大学儋州校区热科院试验研究基地提供。供试菠萝品种“金菠萝”“台农 17 号”由海南省万钟实业有限公司提供, 苗龄 2 个月; 供试菠萝品种“巴厘”由海南省琼海中原镇土肥总站提供, 苗龄 2 个月。

1.1.2 主要仪器

可见分光光度计、火焰光度计, 上海仪电分析仪器有限公司制造; 立式自动压力蒸汽灭菌器, 致微(厦门)仪器有限公司; 单人净化工作台, 苏州净化设备有限公司; 生化培养箱, 天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 试验设计

采用室内培养的方法, 模拟田间环境, 在高病蕉园土壤中开展香蕉和各品种菠萝为期 3 个月的苗期试验。盆栽试验于 2018 年 5-8 月在海南大学农学院试验基地大棚中进行(平均相对湿度为 45%, 平均温度为 36 °C)。试验共设 5 个处理: 高病蕉园土设置休耕(CK)、高病蕉园土壤中种植巴西香蕉苗(B)、高病蕉园土壤中种植“巴厘”菠萝苗(B_BP)、高病蕉园土壤中种植“金菠萝”菠萝苗(B_GP)和高病蕉园土壤中种植“台农 17 号”菠萝苗(B_PP)。盆子规格为 35×25 cm 型号, 每盆装土 5 kg, 装盆之前, 将 2% 的商品有机肥一次性拌入土壤, 作为底肥, 装盆 5 d 后种苗。每盆种植一棵苗。不同处理设置 3 个重复, 每个重复种植 10 盆(采取随机区组排列)。

1.3 研究方法

1.3.1 香蕉枯萎病的测定

自种苗开始监测香蕉处理 B 中香蕉枯萎病的发生状况。当香蕉植株出现黄叶、假茎开裂并呈褐色、新叶较小等典型症状^[16,24], 即统计为发病植株, 并计算香蕉枯萎病发病率, 发病率=(发病香蕉植株/定植香蕉总株数)×100%。香蕉处理 B 发病率大于 60%时结束本季试验, 然后开展下茬香蕉试验, 所有处理均种植香蕉苗, 至处理中最高发病率大于 80%, 统计所有处理发病率。

1.3.2 土体土壤样品采集

香蕉及菠萝种植后每 20 d 取一次动态土样, 不同处理随机选取 10 株作为一个土壤样品, 不同处理共收集 3 个土壤样品, 土样收集于盆栽 5-10 cm 的表层土壤, 用四分法保留 1 kg 左右的土壤。一部分土样过 2 mm 筛, 4 °C 下保存以供土壤可培养微生物试验。剩下的土样自然晾干用于土壤养分分析。

1.3.3 土壤性质的测定

土壤性质的测定方法均参照鲍士旦《土壤农化分析》^[28]。

1.3.4 土壤可培养微生物数量的测定

土壤可培养尖孢镰刀菌、细菌、真菌和放线菌的数量均通过平板稀释涂布法测定^[29]。可培养尖孢镰刀菌计数使用改良后 K₂ 培养基, 在倒平板前温度为 50 °C 左右的培养基中添加五氯硝苯基溶液 10.0 mL/L、10%磷酸溶液 5.0 mL/L、牛胆汁溶液 5.0 mL/L、十水四硼酸钠溶液 10.0 mL/L、硫酸链霉素溶液 1.0 mL/L 和氯霉素溶液 1.0 mL/L, 28 °C 培养 96 h^[30]; 细菌采用 LB 培养基, 30 °C 培养 24 h; 真菌采用马丁氏培养基, 28 °C 培养 72 h^[29]; 放线菌采用改良的高氏 1 号培养基, 在倒平板前温度为 55 °C 左右的培养基中添加 3% 的重铬酸钾 10.0 mL/L, 30 °C 培养 96 h^[29]。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。

1.3.5 多元回归树(multiple regression tree, MRT)分析

多元回归树分析是单元回归树的拓展, 在植物

群落研究中用来解释、描述和预测多物种数据和多个环境因子之间的关系,是一种较新且可靠的研究物种分布与环境因子之间关系的数量分类方法^[31-32]。本实验借鉴该方法研究不同种植方式和不同菠萝品种处理后土壤的差异,自变量为不同的耕作方式(休耕处理 CK 为 farming=0,高病蕉园土种植香蕉 B 为 farming=1,高病蕉园土种植 3 种菠萝品种 B_BP、B_GP 和 B_PP 为 farming=2)及不同品种(CK 为 variety=0, B 为 variety=1, B_BP 为 variety=2, B_GP 为 variety=3, B_PP 为 variety=4),因变量为土壤理化性质和土壤可培养微生物 9 个指标^[16]。

1.3.6 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件对试验数据进行处理和绘图。采用 SPSS 20.0 软件进行数据分析,通过单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)进行数据比较, Duncan's 新复极差法检验不同处理间的差异显著性。采用 R 3.6.0 语言(vegan、mvpart、ggplot2 和 graphics 包)进行主坐标分析(PCoA)、多元回归树分析(MRT)和皮尔逊(Pearson)相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同菠萝品种种植后对再植香蕉土传枯萎病的影响

不同处理再植香蕉土传枯萎病发病率如图 1 所示。与休耕(香蕉枯萎病发病率为 66.67%)和香蕉种

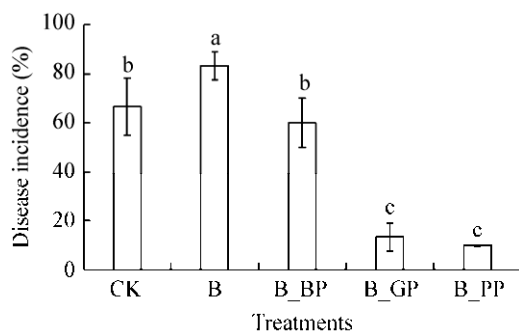


图 1 不同处理中香蕉土传枯萎病的发病率

Figure 1 Disease incidence of banana *Fusarium* with disease in different treatments

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$).

植处理(发病率为 83.33%)相比,在高发病蕉园土壤中种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”后显著降低了再植香蕉土传枯萎病的发病率,分别降低了 13.33% 和 10.00%。

2.2 不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤理化性质的影响

如表 1 所示,在高病蕉园土壤中种植香蕉和不同菠萝品种 20、40、60 及 80 d 后,土壤理化性质变化明显。与 CK 相比, B、B_BP、B_GP 和 B_PP 处理均显著增加了土壤有机质及速效磷含量,显著降低了速效钾和碱解氮的含量。其中, B_GP 和 B_PP 处理总体在增加土壤有机质和速效磷含量,以及在降低速效钾和碱解氮含量变化上都显著区别于其他处理。与 CK 和 B 处理相比, B_GP 和 B_PP 处理土壤 pH 值显著降低, 80 d 时 B_PP 处理土壤 pH 值最低,为 4.63,比 0 d (pH 为 5.31)时下降了 0.68。其次是 B_GP 处理(5.05), B_GP 和 B_PP 处理两者间差异不显著,但均显著低于 B 处理, B_BP 与 CK 间差异不显著。

2.3 不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤可培养微生物的影响

2.3.1 不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤可培养尖孢镰刀菌的影响

如图 2A 所示,种植 80 d 后,各处理土壤可培养微生物数量有明显差异。香蕉处理 B 土壤中尖孢镰刀菌的数量逐渐增加, 60 d 和 80 d 时,香蕉处理 B 显著高于休耕(CK)处理和不同菠萝品种种植处理(B_BP、B_GP 和 B_PP);“台农 17 号”处理 B_PP 土壤中尖孢镰刀菌数量逐渐降低。其中 80 d 时,与种植初(0 d)尖孢镰刀菌数量 38.06×10^3 CFU/g 干土相比,休耕(CK)处理、香蕉处理 B 和菠萝品种处理“巴厘”和“金菠萝”(B_BP 和 B_GP)种植分别增加到 48.89×10^3 、 128.73×10^3 、 46.40×10^3 和 47.91×10^3 CFU/g 干土,而“台农 17 号”处理 B_PP 却下降到 31.52×10^3 CFU/g 干土。

2.3.2 不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤可培养真菌的影响

如图 2C 所示,香蕉 B 种植真菌数量逐渐增加,

表 1 不同处理在不同时间内对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments in different time on soil physical and chemical properties

采样时间 Sampling time	处理 Treatments	有机质 Organic matter (g/kg)	速效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	碱解氮 Available nitrogen (mg/kg)	pH
0 d	初始值 Initial value	3.64±0.10	15.64±1.17	411.67±1.26	91.23±0.81	5.31±0.04
20 d	CK	3.38±0.20d	16.46±1.32bc	397.97±0.55ab	89.83±1.46ab	5.27±0.01b
	B	3.78±0.05c	18.37±0.89a	375.96±11.45b	88.90±1.21ab	5.49±0.02a
	B_BP	4.06±0.01b	14.47±0.85d	376.06±22.50b	90.53±0.81a	5.32±0.06b
	B_GP	4.34±0.08a	17.16±1.13ab	418.65±0.67a	88.27±0.80b	5.05±0.01d
	B_PP	4.26±0.02a	15.05±0.14cd	390.79±13.28b	88.90±0.70ab	5.17±0.02c
40 d	CK	3.75±0.14c	14.13±0.15b	398.87±0.54a	91.23±1.21a	5.34±0.02b
	B	5.71±0.59b	18.07±0.80ab	371.62±32.06a	84.70±7.18a	5.58±0.06a
	B_BP	6.99±0.48a	14.32±2.05b	379.29±31.38a	75.65±1.91b	5.15±0.02c
	B_GP	7.34±0.21a	21.17±3.77a	381.11±3.70a	87.52±0.34a	4.88±0.04d
	B_PP	7.50±0.48a	20.66±4.21a	328.04±3.15b	87.19±0.97a	5.08±0.04c
60 d	CK	3.44±0.25b	11.43±1.14b	404.69±1.33a	91.72±1.32a	5.34±0.03b
	B	6.74±1.13a	20.41±5.47ab	358.30±14.65b	83.76±0.67bc	5.66±0.09a
	B_BP	7.03±0.46a	18.81±3.88ab	337.82±17.21bc	85.27±2.07b	5.26±0.09bc
	B_GP	7.49±0.33a	24.05±9.45a	363.55±1.22b	81.63±1.99cd	5.02±0.03d
	B_PP	7.61±0.08a	25.97±1.57a	315.52±24.52c	80.47±1.20d	5.14±0.17cd
80 d	CK	3.68±0.02d	16.23±1.33b	403.58±3.28a	91.92±0.04a	5.44±0.24b
	B	6.26±0.10c	16.25±1.35b	345.89±2.12ab	85.49±0.90b	6.04±0.09a
	B_BP	7.88±0.28b	17.91±0.38b	320.27±41.09bc	82.93±0.88c	5.31±0.30b
	B_GP	8.38±0.12a	28.68±1.14a	264.17±7.59c	74.32±0.51d	5.05±0.21bc
	B_PP	7.75±0.05b	30.16±1.33a	304.73±58.2bc	71.54±0.19e	4.63±0.28c

注: CK: 休耕; B: 高病蕉园土壤中种植香蕉; B_BP: 高病蕉园土壤中种植“巴厘”菠萝苗; B_GP: 高病蕉园土壤中种植“金菠萝”菠萝苗; B_PP: 高病蕉园土壤中种植“台农 17 号”菠萝苗. 不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著. 下同.

Note: CK: Fallow; B: Planted banana in high incidence of disease of banana orchard soil; B_BP: Planted “bali” pineapple in high incidence of disease of banana orchard soil; B_GP: Planted “gold” pineapple in high incidence of disease of banana orchard soil; B_PP: Planted “tainong 17” pineapple in high incidence of disease of banana orchard soil. Different small letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

其中 40、60 和 80 d 显著高于休耕(CK)和不同菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”(B_BP、B_GP 和 B_PP)处理, 菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”(B_GP 和 B_PP)逐渐降低, 其结果与图 1A 结果类似。

2.3.3 不同菠萝品种轮作对连作蕉园土壤可培养细菌的影响

如图 2B 所示, 休耕(CK)处理和香蕉处理 B 土壤细菌数量逐渐下降, 菠萝品种“巴厘”处理(B_BP)土壤细菌数量变化不大, 而“金菠萝”和“台农 17 号”(B_GP 和 B_PP)处理细菌数量逐渐增加, 其中 80 d 时的显著性为 B_GP>B_PP>B_BP=CK=B, 与种植初(0 d)细菌数量 29.57×10^6 CFU/g 干土相比, 休耕(CK)处理和香蕉处理 B 细菌数量分别下降为 23.57×10^6 和 15.26×10^6 CFU/g 干土, 不同菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”处理分别增加到 31.96×10^6 、 91.14×10^6 和 58.17×10^6 CFU/g 干土。

2.3.4 不同菠萝品种种植对连作蕉园土壤可培养放线菌的影响

如图 2D 所示, 休耕(CK)处理及香蕉处理 B 土壤放线菌数量逐渐降低, 不同菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”(B_BP、B_GP 和 B_PP)处理逐渐增加, 与种植初(0 d)放线菌数量 58.12×10^4 CFU/g 干土相比, 休耕(CK)处理和香蕉处理 B 放线菌数量分别下降为 55.05×10^4 和 55.69×10^4 CFU/g 干土, 不同菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”处理分别增加到 146.52×10^4 、 184.65×10^4 和 210.43×10^4 CFU/g 干土。

2.3.5 不同菠萝品种种植对连作蕉园 A/F 和 B/F 的影响

每克干土形成的放线菌与真菌菌落数的比值为放线菌真菌比(A/F), 细菌与真菌菌落数的比值为细菌真菌比(B/F)^[29], A/F 和 B/F 值是土壤微生物

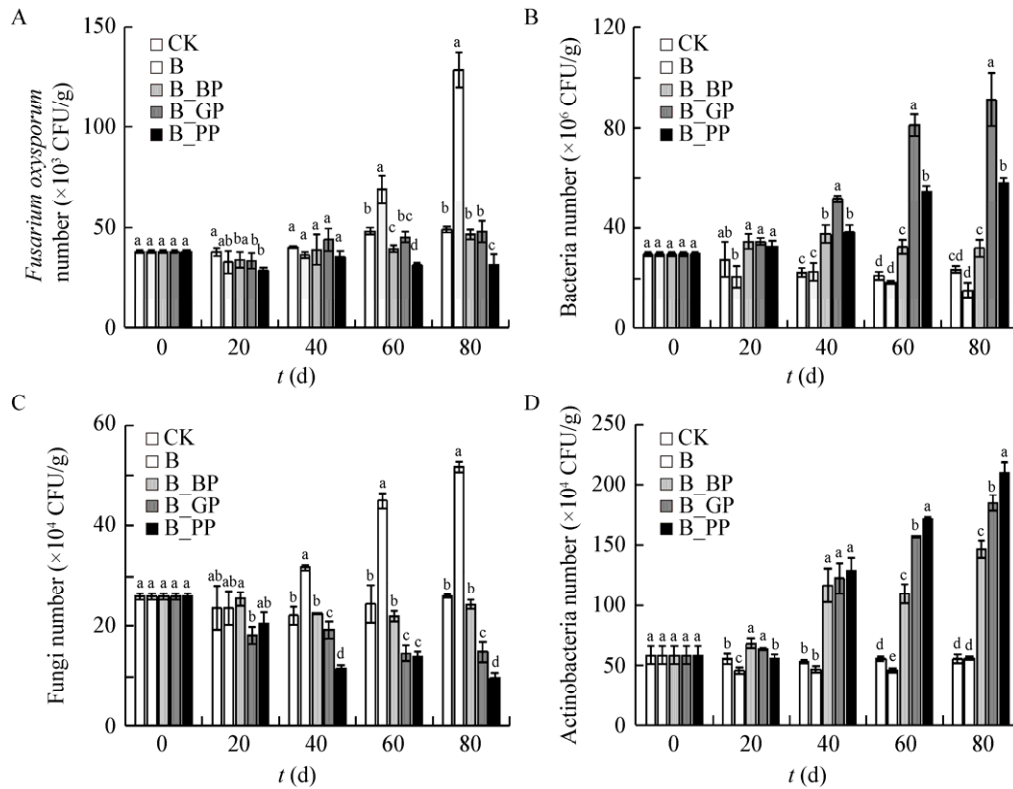


图 2 不同处理种植对土壤尖孢镰刀菌(A)、细菌(B)、真菌(C)和放线菌(D)数量的影响

Figure 2 Effect of different treatments on the number of *Fusarium oxysporum* (A), bacteria (B), fungi (C) and actinobacteria (D)

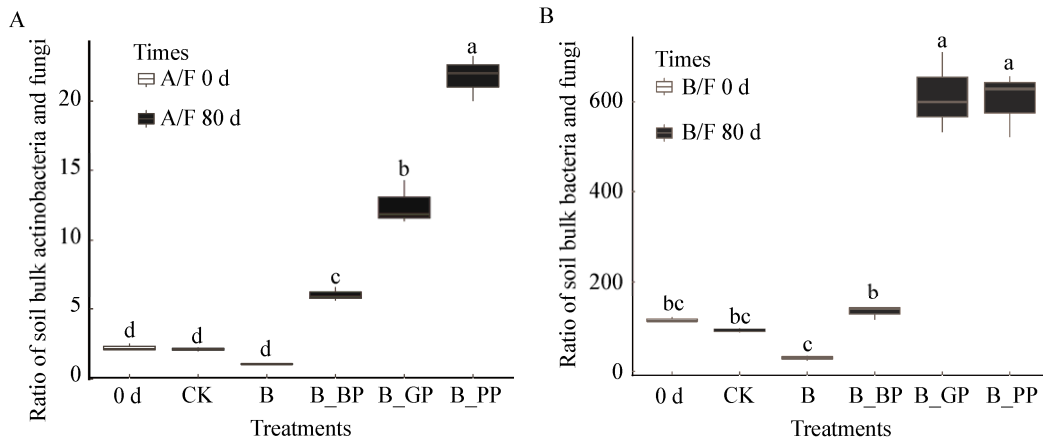


图 3 不同处理种植 80 d 后土体土壤中 A/F (A)和 B/F (B)值的变化

Figure 3 Changes of A/F (A) and B/F (B) values in soil of different treatments after 80 days

生态的重要指标，常被用来判断微生物群落结构的变化^[33]。由图 3 可知，与种植前的初始值(0 d)相比，休耕(CK)处理和香蕉处理 B 的放线菌真菌比 A/F 在 80 d 时降低，而不同菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”种植(B_BP、B_GP 和 B_PP)处理

显著增加。其中，与初始值 A/F (2.24)相比，休耕 (CK)处理和香蕉处理 B 分别减少了 0.12 和 1.16，“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号” (B_BP、B_GP 和 B_PP)处理分别增加了 3.80、10.24 和 19.49；与初始值 B/F (90.61)相比，休耕(CK)处理和香蕉处理 B

分别减少了 23.43 和 84.57, “巴厘” “金菠萝”和“台农 17 号” (B_BP、B_GP 和 B_PP)处理分别增加了 17.53、500.40 和 488.60。

2.4 不同菠萝品种种植后可培养微生物与土壤理化性质的关系

将土壤理化性质和土壤可培养微生物结合为土壤肥力质量指标^[16], 通过运用 Bray_curtis 距离来构建主坐标分析(PCoA)即展示 15 个土壤样品间在种植 20、40、60 和 80 d 后土壤肥力质量多样性的差异大小(图 4)。随着香蕉和不同菠萝种植时间的增加, PCoA 结果变化明显。不同处理种植 20 d 后结果显示(图 4A), 不同处理之间没有显著分开, 土壤肥力质量没有差异。种植 40 d 后结果显示(图 4B), 不同处理间慢慢区分开, 存在一定的差异, 休耕(CK)处理和香蕉处理 B 部分重合, 而“巴厘” “金菠萝”和“台农 17 号” (B_BP、B_GP 和 B_PP)处理部分重合, 但显著区别于休耕

(CK)及香蕉 B 处理, 表明菠萝种植改变了连作蕉园土壤肥力质量。种植 60 d 后结果显示(图 4C), PCoA1 和 PCoA2 两个轴分别解释了 93.43%和 6.21%的土壤肥力质量变化。各处理土壤肥力质量在分布上存在着不同, 2 个菠萝品种处理(B_GP 和 B_PP)分别在 PCoA1 轴的右上方和右下方, 休耕(CK)处理和香蕉处理 B 位于 PCoA2 的左上方, 而“巴厘” (B_BP)处理位于 PCoA2 的左下方, 说明不同菠萝种植是影响土壤肥力质量变化的主要因素, 并且不同菠萝品种之间存在异同; 80 d (图 4D)整体来看, 菠萝品种“台农 17 号” (B_PP)处理和“金菠萝” (B_GP)处理分别分布在右上方和右下方, 而与左上方的香蕉处理 B 和左下方的休耕(CK)处理及菠萝品种“巴厘” (B_BP)处理是显著分开的, 说明“巴厘” (B_BP)处理和休耕(CK)处理的土壤肥力指标结构聚在了一起, 是十分接近的。

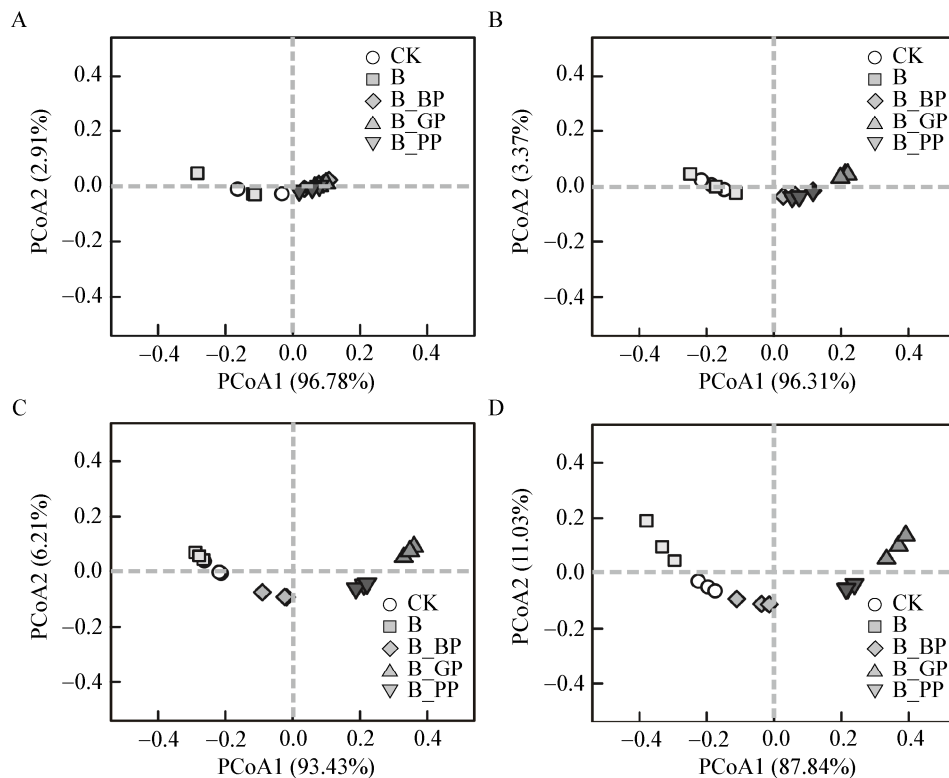


图 4 不同处理种植 20 (A)、40 (B)、60 (C)及 80 d (D)后土壤肥力质量指标 PCoA 分析

Figure 4 PCoA analysis of soil fertility quality indices after different treatments after planted at 20 (A), 40 (B), 60 (C) and 80 days (D)

基于交叉验证误差(cross-validated relative error, CVRE)值最小代表预测能力最佳的原则(图 5A)^[34], 多元回归树 MRT 分析结果如图 5B 所示, 不同处理的土壤肥力质量差异第一次分割是以品种 (variety=2.5)为节点分裂成 2 个分支(休耕、高病蕉园土壤中种植香蕉和菠萝品种“巴厘”; 菠萝品种“金菠萝”和菠萝品种“台农 17 号”), 随后在休耕、高病蕉园土壤中种植香蕉和菠萝品种“巴厘”下根据不同耕作模式分成两个分支(farming=1.5); 种植菠萝品

种“金菠萝”和“台农 17 号”按(variety=3.5)分开。表明在高发病蕉园土壤中种植不同菠萝品种, 其差异显著。分支的差异说明不同菠萝品种种植对土壤肥力的影响大于单纯的种植方式。

通过对土壤理化和可培养微生物指标之间进行皮尔逊(Pearson)相关性分析, 发现各指标间相关性较高(图 6), 其中尖孢镰刀菌与速效磷($r=-0.603$, $P=0.017$)、细菌($r=-0.690$, $P=0.004$)和放线菌($r=-0.704$, $P=0.003$)数量呈显著负相关关系, 与 pH 值($r=0.842$, $P<0.001$)和真菌($r=0.877$, $P<0.001$)呈显著正相关关系。有机质、速效钾和碱解氮与尖孢镰刀菌数量之间没有显著相关关系。表明不同品种菠萝种植处理制约土壤尖孢镰刀菌数量的关键因子为速效磷含量、细菌和放线菌数量。

3 讨论

长期以来, 连续种植和不合理施肥方式导致蕉园地发生严重的连作障碍, 土壤板结、土壤容重下降、生物多样性匮乏和生物群落结构改变, 并加快土传病害病原菌的繁殖^[35-37]。袁先福等^[9]和王蓓蓓等^[23-24]田间研究结果表明在高发病香蕉地轮作“金菠萝”能够显著降低香蕉枯萎病发病率, 降低枯萎病蕉园土壤中尖孢镰刀菌和真菌的数量, 增加土壤中可培养的细菌数量, 改善土壤微生物区系失衡的现象, 提高香蕉产量和品质。

研究发现, 在香蕉与不同作物轮作中, “香蕉-菠萝”轮作模式能显著降低蕉园枯萎病发病率^[24]。本文以休耕和香蕉种植处理设为对照, 选择海南地区主栽菠萝品种“巴厘”“金菠萝”和“台农 17 号”开展研究, 发现种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”均显著降低高病蕉园土壤中可培养尖孢镰刀菌和真菌的数量, 显著增加了细菌和放线菌的数量, 与休耕对照比, 种植“巴厘”的土壤中并没有显著变化, 这与袁先福等和王蓓蓓等^[9,24]研究报道结果一致。其中, 3 个菠萝品种之间也存在显著差异, 在尖孢镰刀菌及真菌数量上, “台农 17 号”处理显著低于“巴厘”和“金菠萝”处理, 但是在细菌数

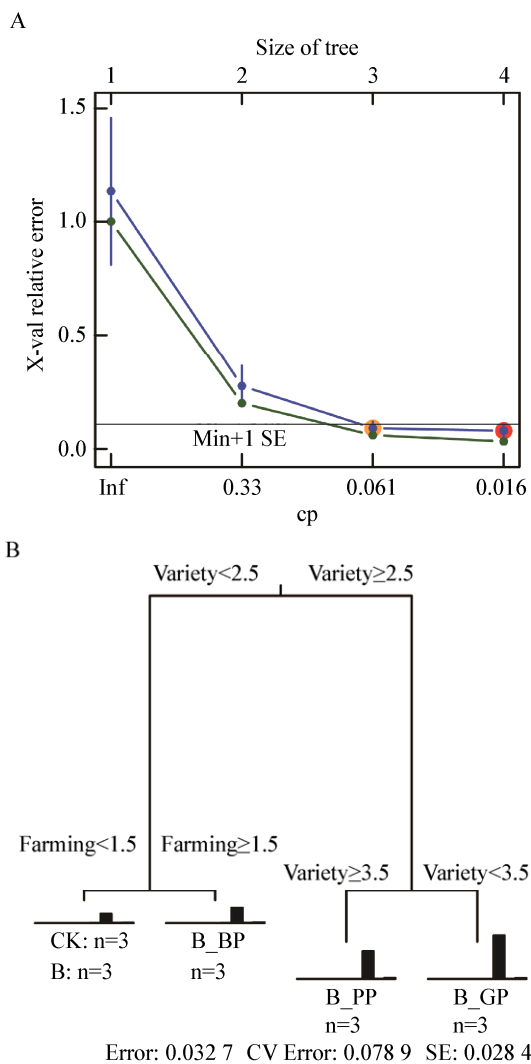


图 5 不同处理之间土壤肥力质量指标交叉验证误差(A)及 MRT (B)分析

Figure 5 Cross-validated relative error (A) and MRT (B) analysis of soil fertility quality indices after different treatments

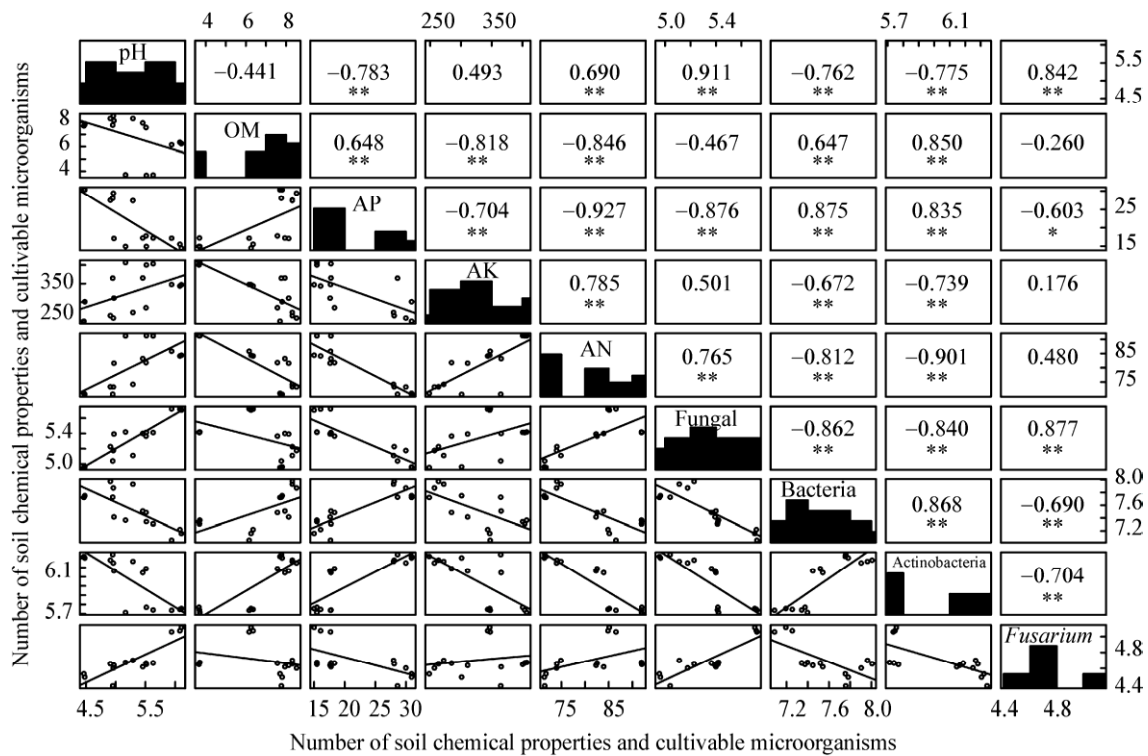


图 6 尖孢镰刀菌与土壤微生物及土壤化学性质间皮尔逊相关性分析

Figure 6 Pearson's correlation analysis of *Fusarium oxysporum* with soil microorganisms and soil chemical properties

注: pH: 土壤酸碱度; OM: 有机质含量(g/kg); AP: 速效磷含量(mg/kg); AK: 速效钾含量(mg/kg); AN: 碱解氮含量(mg/kg); Fungi: 真菌数量(CFU/g); Bacteria: 细菌数量(CFU/g); Actinobacteria: 放线菌数量(CFU/g); *Fusarium*: 尖孢镰刀菌数量(CFU/g). *: $P < 0.05$ 水平显著相关; **: $P < 0.01$ 水平极显著相关.

Note: pH: Soil pH; OM: Organic matter content (g/kg); AP: Available phosphorus (mg/kg); AK: Available potassium (mg/kg); AN: Available nitrogen (mg/kg); Fungi: Fungi number (CFU/g); Bacteria: Bacteria number (CFU/g); Actinobacteria: Actinobacteria number (CFU/g); *Fusarium*: *Fusarium* number (CFU/g). *: Significant correlation at 0.05 level; **: Significant correlation at 0.01 level.

量上,“金菠萝”处理显著高于“台农 17 号”及“巴厘”处理。再植香蕉试验发现,与休耕和种植香蕉处理相比,高发蕉园土种植“金菠萝”和“台农 17 号”处理后再植香蕉,显著降低了香蕉幼苗时期的香蕉枯萎病发病率,虽然高发蕉园土种植“巴厘”后再植香蕉,其香蕉枯萎病发病率显著低于香蕉种植处理,但与休耕处理没有显著差异。因此,本研究表明从改善高发蕉园土壤中的微生物群落结构的角上,种植菠萝品种“台农 17 号”和“金菠萝”是较好的选择。

种植不同菠萝品种降低了高发蕉园土壤 pH 值、速效钾和碱解氮的含量,这可能是由于菠萝和香蕉的根系分泌物和养分需求规律不同引起的^[23]。

pH 的降低可能与菠萝根系产生次生化学物质,然后通过化感作用调节土壤 pH 值,进一步促进土壤中细菌生长,抑制真菌生长有关^[38-39]。研究表明,菠萝植株对 K 的需要量最大, N 次之, P 最少^[40],所以速效钾和碱解氮的降低与菠萝苗期植株生长需要大量 K 和 N 养分有关,这与王蓓蓓等^[23-24]研究结果一致。赖朝圆等^[16]研究表明,轮作处理可提高连作土壤速效磷含量;肖新等^[41]报道,菊麦轮作可以提高连作土壤速效磷和有机质含量;郑超等^[42]研究也表明,轮作可以增加土壤有机质和土壤养分含量,加速速效养分的释放;王一鸣等^[43]研究发现,提高土壤中速效磷含量可降低香蕉连作的病原菌数量;曹艳花和 Wiggins 等^[44-45]研究发

现, 豆科绿肥轮作可以使土壤中细菌和放线菌的密度增加, 进而加强了土壤对病原菌暴发的抑制效果。在本试验中, 在高发病蕉园土壤中通过不同菠萝品种种植, 休耕和香蕉处理显著增加了土壤有机质和速效磷含量的结果, 与前人研究结果一致, 表明菠萝种植在高发病蕉园土壤中能显著提高有机质和速效磷含量, 从而改善蕉园土壤继续恶化的状况。其中, 速效磷与尖孢镰刀菌数量呈显著负相关, 其中“金菠萝”和“台农 17 号”显著高于其他处理, 因此, 改善高发病蕉园土壤理化性质上, 应选择“金菠萝”和“台农 17 号”。

放线菌/真菌比值(A/F)及细菌/真菌比值(B/F)是土壤微生物生态的重要指标, 常被用来判断微生物群落结构的变化^[33]。Liu 等^[46]研究表明, B/F 随着土壤肥力增高而增大; Yao 等^[47]研究表明, B/F 值越高其土壤的抑病能力强。本研究中, 种植不同菠萝品种后, 可培养细菌数量增加, 真菌和尖孢镰刀菌数量下降, 菠萝种植处理 A/F 和 B/F 值显著高于休耕和香蕉连作处理, 表明种植不同菠萝品种可增加土壤肥力。其中, “台农 17 号”较其他处理均显著增加了 A/F 及 B/F 值。因此, 在高发病蕉园土壤中种植菠萝品种“台农 17 号”是“香蕉-菠萝”轮作体系一个较为理想的种植品种, 种植“台农 17 号”具有缓解香蕉连作障碍的巨大潜力。

本文借鉴生态学中用于检验多物种和多环境因子的主坐标分析(PCoA)和多元回归树分析(MRT)^[16,48-49], 检验 3 个菠萝品种种植在高发病蕉园土壤后的土壤肥力质量的差异。PCoA 结果表明, 与休耕和继续种植香蕉处理相比, 在高发病蕉园土壤中种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”能与其他 3 个处理明显区分。然而菠萝品种“巴厘”处理与休耕对照无法区别, 这与菠萝品种间存在差异有关。MRT 结果表明, 不同菠萝品种(variety)种植出现了两次分割, 而种植模式只有一次, 表明在同样的轮作模式下, 不同菠萝品种是造成土壤肥力质量出现差异的主要驱动因子。

平板稀释涂布法已经证实了种植不同品种菠

萝能够降低可培养尖孢镰刀菌数量, 而且提高细菌数量, 但其对土壤微生物群落结构的影响仍然未知^[29,36]。接下来会进一步利用高通量测序及功能性微生物研究方法, 系统研究不同菠萝品种种植后土壤微生物区系的变化以及种植菠萝后再植香蕉前后土壤真菌和细菌的主要类群以及优势种群, 以期能对“香蕉-菠萝”轮作体系进行更深的挖掘。

4 结论

综上所述, 与蕉园休耕和继续种植香蕉处理相比, 在高发病蕉园种植菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”可显著降低土壤中尖孢镰刀菌的数量, 显著增加细菌和放线菌数量, 提高土壤 B/F 和 A/F 值, 形成一种有效的“香蕉-菠萝”轮作模式。研究发现, 种植的 3 个菠萝品种之间存在一定的差异, 其中, 种植“金菠萝”和“台农 17 号”可以显著提高有机质和速效磷含量, 改善土壤养分状况。同时, 主坐标分析 PCoA 和多元回归树 MRT 表明菠萝品种“金菠萝”和“台农 17 号”种植显著改变了土壤肥力质量, 而菠萝品种“巴厘”与香蕉种植处理存在一定的重合, 其原因有待进一步研究。

REFERENCES

- [1] Lin WP, Zeng LS, Lyu S, et al. Continual effect and mechanism of banana-sugarcane plantation on control of *Fusarium* wilt (II)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 348-357 (in Chinese)
林威鹏, 曾莉莎, 吕顺, 等. 香蕉-甘蔗轮作模式防控香蕉枯萎病的持续效果与土壤微生态机理(II)[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(3): 348-357
- [2] Liu X, Qiu HZ, Zhang WM, et al. Sink-source relationship of potato plants and its role involved in the reduction of tuber yield in continuous cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1571-1582 (in Chinese)
刘星, 邱慧珍, 张文明, 等. 连作马铃薯植株库源关系及其对块茎产量的调节机理[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1571-1582
- [3] Wang C, Li ZG, Yang JF, et al. Effects of consecutive monoculture of *Piper nigrum* L. on soil microbial functional diversity and community structure[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(7): 1235-1242 (in Chinese)
王灿, 李志刚, 杨建峰, 等. 胡椒连作对土壤微生物群落

- 功能多样性与群落结构的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(7): 1235-1242
- [4] Wei XY, Lin Y, Chen T, et al. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on alleviating consecutive monoculture problem of *Pseudostellaria heterophylla* under field conditions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 399-408 (in Chinese)
位小丫, 林煜, 陈婷, 等. 田间条件下植物促生细菌缓解太子参连作障碍的效果评价[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 399-408
- [5] Zhong ST, Shen ZZ, Sun YF, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer on banana production and cultural microflora of bulk soil in orchard with serious disease incidence[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 481-489 (in Chinese)
钟书堂, 沈宗专, 孙逸飞, 等. 生物有机肥对连作蕉园香蕉生产和土壤可培养微生物区系的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 481-489
- [6] He X. Preparation and biological effects of a bio-organic fertilizer against banana *Fusarium*-wilt disease[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing Agricultural University, 2010 (in Chinese)
何欣. 防治土传香蕉枯萎病微生物有机肥研制与生物效应研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2010
- [7] Geng JJ, Zhao Y, Wang BB, et al. Effects of rice straw waterlogging treatment on soil physical and chemical properties and pathogenic bacteria in high incidence banana plantation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 87-90 (in Chinese)
耿建建, 赵艳, 王蓓蓓, 等. 稻秆淹水处理对高发病香蕉园土壤理化性状及病原菌的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 87-90
- [8] Hong S, Ju HL, Ruan YZ, et al. Effect of eggplant-banana rotation with bioorganic fertilizer treatment on soil microflora in banana continuous cropping orchard[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 78-85 (in Chinese)
洪珊, 尉虹伶, 阮云泽, 等. 茄子与香蕉轮作配施生物有机肥对连作蕉园土壤微生物区系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 78-85
- [9] Yuan XF, Sun YH, Zhu CZ, et al. Rotation combined with bio-organic fertilizer application to promote banana growth[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(1): 60-67 (in Chinese)
袁先福, 孙玉菡, 朱成之, 等. 轮作联用生物有机肥促进香蕉生长[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(1): 60-67
- [10] Na XF, Zheng GQ, Xing ZC, et al. Effects of monocropping on diversity and structure of the bacterial community in rhizosphere of replanted *Lycium barbarum* L.[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1280-1292 (in Chinese)
纳小凡, 郑国旗, 邢正操, 等. 连作对再植枸杞根际细菌群落多样性和群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1280-1292
- [11] Huang CY, Bu YQ, Shan ZJ, et al. Research advances in mechanisms of watermelon continuous cropping diseases and its biological control[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1670-1676 (in Chinese)
黄春艳, 卜元卿, 单正军, 等. 西瓜连作病害机理及生物防治研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1670-1676
- [12] Han CL, Huo YZ, Tian ZQ. Effects of different continuous cropping years on potato soil environment and yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 83-85 (in Chinese)
韩翠莲, 霍轶珍, 田志强. 不同连作年限对马铃薯土壤环境及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 83-85
- [13] Shen RF, Zhao XQ. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6584-6591 (in Chinese)
沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6584-6591
- [14] Jiang J, Song MH. Review of the roles of plants and soil microorganisms in regulating ecosystem nutrient cycling[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(8): 979-988 (in Chinese)
蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979-988
- [15] Zhao J, Li Y, Ran W, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil microbiome in a rice-wheat cropping system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(4): 594-602 (in Chinese)
赵军, 李勇, 冉炜, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 594-602
- [16] Lai CY, Yang Y, Tao CY, et al. Effects of replanted banana after rotation of different crops on banana production and soil fertility quality[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(2): 299-306 (in Chinese)
赖朝圆, 杨越, 陶成圆, 等. 不同作物-香蕉轮作对香蕉生产及土壤肥力质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(2): 299-306
- [17] Larkin RP, Halloran JM. Management effects of disease-suppressive rotation crops on potato yield and soilborne disease and their economic implications in potato production[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(5): 429-439
- [18] Dong DF, Han LF, Wang XH, et al. Rotation of resistant tomato and susceptible cucumber for control of root-knot

- nematode disease in greenhouses[J]. *Plant Protection*, 2007, 33(1): 51-54 (in Chinese)
董道峰, 韩利芳, 王秀徽, 等. 番茄抗性品种与黄瓜轮作对根结线虫的防治作用[J]. *植物保护*, 2007, 33(1): 51-54
- [19] Dong DF. Application of resistant tomato rootstock to control root-knot nematode disease and their effect on soil ecosystem[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of China Agricultural University, 2007 (in Chinese)
董道峰. 番茄抗性砧木抗根结线虫病的应用及生态效应[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2007
- [20] Yang SD, Li RT, Wu J, et al. Comparison of soil microbial properties and bacterial community structure in continuous cropping and rotation fields of tomatoes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 76-83 (in Chinese)
杨尚东, 李荣坦, 吴俊, 等. 番茄连作与轮作土壤生物学特性及细菌群落结构的比较[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 76-83
- [21] Wang SL, Qi H, Wang Y, et al. Selection of maize variety suitable for cotton-wheat-maize rotation system[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(7): 56-58 (in Chinese)
王树林, 祁虹, 王燕, 等. 适宜粮棉轮作种植模式的玉米品种筛选[J]. *山东农业科学*, 2015, 47(7): 56-58
- [22] Hou YX, Zhou BL, Wu XL. Effects of different pepper varieties on preventing continuous cropping obstacle[J]. *China Vegetables*, 2009(18): 41-45 (in Chinese)
侯永侠, 周宝利, 吴晓玲. 不同辣椒品种抗连作障碍的效果[J]. *中国蔬菜*, 2009(18): 41-45
- [23] Wang BB. Combined control on *Fusarium* wilt of banana by rotation together with application of bio-organic fertilizer and its action mechanism[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese)
王蓓蓓. 轮作及生物有机肥防控香蕉土传枯萎病的土壤微生物机制研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2015
- [24] Wang BB, Li R, Ruan YZ, et al. Pineapple-banana rotation reduced the amount of *Fusarium oxysporum* more than maize-banana rotation mainly through modulating fungal communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 86: 77-86
- [25] Wu XY, Miao WG, Zheng FC. Effects of banana *Fusarium* wilt on banana seedling growth[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(18): 55-57 (in Chinese)
吴小燕, 缪卫国, 郑服丛. 香蕉枯萎病对香蕉苗期生长的影响[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(18): 55-57
- [26] Li WY, Peng ZP, Yang SH, et al. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and controlling *Fusarium*-wilt disease of banana seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(2): 234-242 (in Chinese)
李文英, 彭智平, 杨少海, 等. 植物根际促生菌对香蕉幼苗生长及抗枯萎病效应研究[J]. *园艺学报*, 2012, 39(2): 234-242
- [27] Liu WB, Sun L, Wan SL, et al. Polymorphism analysis of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and its pathogenicity differentiation in China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(17): 71-78 (in Chinese)
刘文波, 孙亮, 万三连, 等. 香蕉枯萎病菌遗传多态性及其致病力分化[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(17): 71-78
- [28] Bao SD. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [29] Shen ZZ. Characterization and management of microbial community in banana suppressive soils to soil-borne *Fusarium* wilt disease[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese)
沈宗专. 抑制香蕉土传枯萎病土壤的微生物区系特征及调控[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2015
- [30] Hu W, Zhao LF, Zhang L, et al. Effects of combining bioorganic fertilizer with different cropping systems on controlling *Fusarium* wilt disease of banana[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 742-748 (in Chinese)
胡伟, 赵兰凤, 张亮, 等. 不同种植模式配施生物有机肥对香蕉枯萎病的防治效果研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 742-748
- [31] Jiang XT, Peng X, Deng GH, et al. Illumina sequencing of 16S rRNA tag revealed spatial variations of bacterial communities in a mangrove wetland[J]. *Microbial Ecology*, 2013, 66(1): 96-104
- [32] Li TT, Ji LZ, Yu DP, et al. Forest community classification, ordination, and comparison of species diversity in broadleaved-Korean pine mixed forests of northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 620-628 (in Chinese)
李婷婷, 姬兰柱, 于大炮, 等. 东北阔叶红松林群落分类、排序及物种多样性比较[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 620-628
- [33] Frey SD, Elliott ET, Paustian K. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(4): 573-585
- [34] Zhong JJ, Chen J, Chen Q, et al. Quantitative classification of MRT, CCA ordination, and species diversity along elevation gradients of a natural secondary forest in the Qinling mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 277-285 (in Chinese)
钟娇娇, 陈杰, 陈倩, 等. 秦岭山地天然次生林群落 MRT 数量分类、CCA 排序及多样性垂直格局[J]. *生态学报*,

- 2019, 39(1): 277-285
- [35] Zhao N. Effecting of crop rotation with three solanaceae on the soil microbial in banana orchard with serious *Fusarium* wilt disease[D]. Haikou: Master's Thesis of Hainan University, 2014 (in Chinese)
赵娜. 三种茄科蔬菜轮作对高发枯萎病蕉园土壤微生物的调控效应[D]. 海口: 海南大学硕士学位论文, 2014
- [36] Zhao N, Li R, Xin K, et al. Effects of different solanaceae crop rotations on the soil culturable microbes in an orchard with serious *Fusarium* wilt disease[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(8): 1469-1474 (in Chinese)
赵娜, 李荣, 辛侃, 等. 茄科蔬菜轮作对高发枯萎病蕉园土壤可培养微生物的影响[J]. 热带作物学报, 2014, 35(8): 1469-1474
- [37] Hou H, Dong K, Yang ZX, et al. Advance in mechanism of continuous cropping obstacle[J]. Soils, 2016, 48(6): 1068-1076 (in Chinese)
侯慧, 董坤, 杨智仙, 等. 连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1068-1076
- [38] Wang LN, Jing CM, Zhang L, et al. Effects of different cultivation years alfalfa and rotation cotton on soil physical & chemical properties[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(8): 1523-1530 (in Chinese)
王林娜, 景春梅, 张玲, 等. 不同种植年限紫花苜蓿和棉花轮作对土壤理化性质的影响[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(8): 1523-1530
- [39] Li J, Ma SP, Pang ZC, et al. Effect of oil palm-pineapple intercropping on soil nutrition and related enzyme activities[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(31): 36-41 (in Chinese)
李静, 马帅鹏, 庞振才, 等. 油棕园间套种菠萝对土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 36-41
- [40] Yan CM, Zhang JZ, Shi WQ, et al. Nutritional characteristics of NPK of pineapple under drip fertigation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(9): 1688-1694 (in Chinese)
严程明, 张江周, 石伟琦, 等. 滴灌施肥下菠萝氮磷钾的营养特性[J]. 热带作物学报, 2014, 35(9): 1688-1694
- [41] Xiao X, Zhu W, Du C, et al. Effects of crop rotation and bio-organic manure on soil microbial characteristics of *Chrysanthemum* cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1779-1784 (in Chinese)
肖新, 朱伟, 杜超, 等. 轮作与施肥对滁菊连作土壤微生物特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1779-1784
- [42] Zheng C, Liao ZW, Tan ZW, et al. Effects of the crop rotation of pineapples-sugarcane on soil ecology[J]. Ecologic Science, 2003, 22(3): 248-249,274 (in Chinese)
郑超, 廖宗文, 谭中文, 等. 菠萝-甘蔗轮作的土壤生态效应[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 248-249,274
- [43] Wang YM, Lai CY, Ruan YZ, et al. Effects of lime-ammonium bicarbonate fumigation on banana growth and structure of rhizosphere microbial community in a continuous cropping system[J]. South China Fruits, 2018, 47(3): 5-13 (in Chinese)
王一鸣, 赖朝圆, 阮云泽, 等. 石灰联合碳铵熏蒸对连作香蕉生长和根际微生物群落结构的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(3): 5-13
- [44] Cao YH. Study on long-term leguminous green manure rotation on microbial diversity and promoting function in the endophytic bacteria of rice root[D]. Harbin: Master's Thesis of Northeast Agricultural University, 2012 (in Chinese)
曹艳花. 长期豆科绿肥轮作水稻根内生细菌多样性及促生功能研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2012
- [45] Wiggins BE, Kinkel LL. Green manures and crop sequences influence potato diseases and pathogen inhibitory activity of indigenous streptomycetes[J]. Phytopathology, 2005, 95(2): 178-185
- [46] Liu XB, Herbert SJ. Fifteen years of research examining cultivation of continuous soybean in northeast china: a review[J]. Field Crops Research, 2002, 79(1): 1-7
- [47] Yao HY, Wu FZ. Soil microbial community structure in cucumber rhizosphere of different resistance cultivars to *Fusarium* wilt[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2010, 72(3): 456-463
- [48] Zhang WJ, Zhang QD, Wang J, et al. A comparison of multivariate regression tree and two-way indicator species analysis in plant community classification[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(6): 586-592 (in Chinese)
张文静, 张钦弟, 王晶, 等. 多元回归树与双向指示种分析在群落分类中的应用比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(6): 586-592
- [49] Liu L, Xu MK, Wang SL, et al. Effect of different *Cunninghamia lanceolata* plantation soil qualities on soil microbial community structure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4692-4706 (in Chinese)
刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4692-4706