

生物有机肥施用期对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响

丁文娟, 曹 群, 赵兰凤, 刘小峰, 柳 影, 杨盼盼, 李华兴*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘 要:在大田条件下,采用完全随机区组试验方法研究生物有机肥施用期对香蕉枯萎病和土壤微生物的影响。结果表明,在基肥期(BOF1)和营养生长期(BOF2)施用生物有机肥对香蕉生长表现出明显的促进作用,移栽后第 270 d,BOF1 和 BOF2 处理的茎围、叶宽和产量均高于其他处理,BOF2 处理小区平均产量高达 288 kg,显著高于其余各组处理。在香蕉营养生长期施用生物有机肥,可以延迟香蕉枯萎病的发病时间,显著降低香蕉植株的发病程度。移栽后第 270 d,BOF2 处理的病情指数比施化肥处理(CF)低 54%,将 CF 处理防效指定为 0,防病效果达到 52.5%。施用生物有机肥可以提高土壤中细菌和放线菌的数量,降低真菌数量,其中以 BOF2 处理效果最为明显。从移栽后第 90 d 开始,BOF2 处理的细菌数量为 $26.67 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,到第 270 d 时数量达到 $64 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,始终显著高于其他各处理;在移栽后第 180 d 时,BOF2 处理的放线菌数量比施有机肥处理(OF)增加了 95.6%,第 270 d 时 BOF2 放线菌数量最高,为 $23.15 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。施用生物有机肥可不同程度地提高土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性。病情指数与土壤中细菌、放线菌含量呈显著负相关,与真菌呈显著正相关。在香蕉营养生长期施用生物有机肥更有利于改善土壤微生物结构,提高土壤酶活性,延缓和降低香蕉枯萎病的发生,提高香蕉产量。

关键词:生物有机肥;香蕉枯萎病;土壤微生物;土壤酶

中图分类号:S144.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1575-08 doi:10.11654/jaes.2014.08.016

Effects of Biological Fertilizer Applications on Banana Wilt Disease and Soil Microorganisms

DING Wen-juan, CAO Qun, ZHAO Lan-feng, LIU Xiao-feng, LIU Ying, YANG Pan-pan, LI Hua-xing*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Banana *Fusarium* Wilt, a soil borne diseases caused by a fungus, has severely affected banana production. Under field conditions, the effects of biological fertilizer on Banana *Fusarium* Wilt and soil microorganisms were studied using a completely randomized block design. At basal and vegetative stages, applying biological fertilizer combined with chemical fertilizer obviously promoted banana growth, leading to greater stem diameter, blade width and yields of banana after 270 d of transplanting than at other growth stages. When processed in BOF2, the average output of banana per district was up to 288 kg, significantly higher than the rest treatments. Applying biological fertilizer during vegetative period significantly reduced the occurrence of banana wilt and delayed the onset of banana wilt. Compared with the chemical fertilizer control, the disease index was decreased by 54% by biological fertilizer applied at vegetative growth stage. Application of biological fertilizer at the basal stage improved the population of soil bacteria and actinomycetes, but reduced that of fungi. Soil catalase, invertase, urease and acid phosphatase activities were all improved by biological fertilizer. The disease index was significantly negatively correlated with the number of both bacteria and actinomycetes in soil, but significantly positively with the number of fungi in soil. The findings suggest that application of biological fertilizer at banana vegetative period could improve soil microorganism structure, promote soil enzyme activities, and reduce and/or delay banana wilt disease occurrence.

Keywords: biological fertilizer; banana wilt disease; soil microorganism; soil enzymes

香蕉(*Musa* spp.), 芭蕉科芭蕉属植物,是我国南

收稿日期:2014-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(40971155);广东省教育部产学研结合项目(2009B090300330)

作者简介:丁文娟(1988—),女,硕士生,从事生物有机肥和土传病害防治的研究。E-mail:850298528@qq.com

*通信作者:李华兴 E-mail:huaxli@scau.edu.cn

方亚热带地区重要经济作物。广东省是中国最大的香蕉产区,面积和产量都居全国首位^[1]。近年来,随着香蕉种植规模日益扩大,各类香蕉病虫害日益严重,其中香蕉枯萎病对香蕉产业的威胁最为严重^[2]。香蕉枯萎病(*Fusariumoxysporum* f. sp. *cubense*)又名巴拿马病、黄叶病,是由古巴尖孢镰刀菌侵染而引起的一种

致命性香蕉真菌病害,属国际检疫对象^[3]。香蕉枯萎病为典型土传病害,蔓延迅速,大部分蕉园因感染香蕉枯萎病而造成的减产可达20%~40%,严重者可高达90%以上^[4]。因此,控制香蕉枯萎病的发生迫在眉睫。目前,人们习惯大量施用化学农药来防治此种病害,但极易造成环境污染,降低香蕉的品质。生物防治作为综合防治香蕉枯萎病的措施之一,具有兼防兼治,无污染,利于环境保护和人畜安全,且符合发展有机农业要求,备受重视^[5-8]。生物有机肥集生物肥和有机肥的优点于一体,既有利于提高产品品质,增产增收,又可培肥土壤,改善土壤结构。尽管在平板对峙试验和室内盆栽试验均已表明生物有机肥对香蕉枯萎病有很好的抑制效果,但都基于室内特定条件下进行的^[9]。在实际的生产过程中,由于水分、气候、土壤等环境因素不稳定,使得生物有机肥很难在田间进行推广和应用^[10]。本实验自2001年起已经开始了生物肥的研制,并在室内条件下探索了它对多种植物枯萎病的防治效果,研究结果均表现出了生物有机肥的显著防治作用。大田条件下仅初步探索了普施生物有机肥对香蕉枯萎病具有一定防效,而在实际肥料施用中,田间普施生物有机肥成本较高,会限制产品在实际生产中的推广应用^[11]。生物有机肥中添加的生防菌的活性与繁殖速度与外界水气环境的密切相关^[12]。因此,本试验主要探索在大田条件下生物有机肥最佳施肥时期,以期发挥生物有机肥的最佳抗病能力和促生长作用,为生物有机肥在田间大面积推广和应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试菌种

尖孢镰刀菌古巴专化型4号生理小种(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Foc)以下简称FOC4,由华南农业大学资源环境学院姜子德教授提供,本试验室保存。

生防菌剂:利福平标记解淀粉芽孢杆菌(AF11b, *B. amyloliquefaciens*),由本试验室筛选、分离、鉴定并标记,对病原菌FOC Race4有较强的拮抗能力,该菌株抗利福平浓度为 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,由沸石吸附固定,菌株含量为 $2.1\times 10^8\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 沸石,沸石粒径 $\leq 0.25\text{ mm}$ 。

1.1.2 供试化肥

供试氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(N 45%)、磷酸一铵(P_2O_5 45%)、氯化钾(K_2O 50%)。

1.1.3 供试有机肥

有机肥由广州市番禺永雄有机肥有限公司生产,基本性质如下:全N $41.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全P $7.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全K $16.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $678.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为6.13。

1.1.4 供试生物有机肥

由本实验室自行研制,将有机肥(见1.1.3)和生防菌(见1.1.1)按一定比例混合而成,基本性质如下:全N 为 $41.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全P 为 $7.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全K 为 $16.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $678.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为5.13,使用前生物有机肥中生防菌株AF11b活菌数为 $3.0\times 10^7\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.1.5 试验地点

华南农业大学增城宁西基地,供试土壤为水稻土,其基本性质为pH值5.67,有机质含量 $13.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮(N) $72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷(P) $72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾(K) $43.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.1.6 供试作物

巴西香蕉(*Musa acuminata* AAA Cavendish cv. Brazil),购自广东省果树研究所,种植时6~7片叶。

1.2 试验设计

大田试验于2012年4月1日至2013年6月1日在华南农业大学增城宁西基地进行,2013年4月1日至6月1日进行收获。每个处理的小区面积是 $13\text{ m}\times 3\text{ m}$,每垄种植香蕉7株,株距3 m,行距1 m。每垄所种植的香蕉按Z字型布局,相邻两行香蕉植株的直线距离约为3.6 m。香蕉移植前接种病原菌FOC4,接种后土壤中病原菌数量约为 $10^3\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 。施肥量按一株香蕉全生育期共吸收纯氮110 g,磷(P_2O_5)35 g,钾(K_2O)400 g,氮磷钾比例为1:0.3:4,化肥利用率按30%计算,每株香蕉实际化肥用量为3260 g(尿素800 g,磷酸一铵260 g,氯化钾2200 g)。各处理肥料用量以化肥处理为基数按等成本换算。生物有机肥及有机肥各处理分别配施CF处理中化肥用量的30%。

根据香蕉的三个生长时期,即营养生长期(移栽后的第1~3个月)、孕蕾期(移栽后的第4~6个月)、果实发育期(移栽后的第7~9个月),将生物有机肥按不同时期分施,设置6个处理:①BOF1基肥施生物有机肥2038 g,配施化肥245 g,其余时期单施化肥815 g;②BOF2营养生长期施生物有机肥2038 g,配施化肥245 g,其余时期单施化肥815 g;③BOF3孕蕾期施生物有机肥2038 g,配施化肥245 g,其余时期单施化肥815 g;④BOF4果实发育期施生物有机肥2038 g,配施化肥245 g,其余时期单施化肥815 g;⑤CF为各时期均施化肥815 g;⑥OF为各时期均施有机肥673 g,

配施化肥 644 g。每个处理重复 3 次。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 病情调查

从移栽当天起,每隔 30 d 调查 1 次,连续调查 9 次,并进行病情统计^[13]。病情分级:0 级为植株无枯黄症状;1 级为植株 1~2 个叶片萎焉;2 级为全株中有 1/3~1/2 的叶片萎焉;3 级为全株 1/2~3/4 叶片萎焉;4 级为全株 3/4 以上叶片萎焉或死亡。

病情指数 = $\Sigma(\text{各级发病数} \times \text{该级代表数}) / (\text{总数} \times \text{最高级代表值}) \times 100$

防病效果 = $(\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数}) / \text{对照病情指数} \times 100\%$

1.3.2 土壤微生物数量测定

采用稀释涂平板法测定土壤中细菌、真菌、放线菌、香蕉枯萎病原菌数量^[14]。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌采用高氏一号培养基,真菌采用孟加拉红培养基,香蕉枯萎病原菌采用 PEA 培养基。香蕉生长期间每隔 30 d 采土样 1 次,采样深度为 5~15 cm。

1.3.3 香蕉生物量主要指标测定

从香蕉移栽当天开始,每隔 30 d 测定香蕉株高、茎围、叶长、叶宽,并最后统计产量。株高以从基部到生长点为准,叶长和叶宽以最新展开的叶片长和宽为准,用卷尺测量;茎围以基部茎围为准,用千分尺测量^[15]。当香蕉花蕾抽出后,先长出一梳称之为第一梳,以后依次类推,当花蕾完全抽出并定型后,保留前 6 梳,并砍去雄花,同一小区选择并标记长势均匀的香蕉 3 株,于果实成熟采收期(抽蕾后第 70 d)采收果实,称取每株香蕉果实鲜重^[16]。

1.3.4 土壤酶活性测定

本试验 4 种酶活性测定的土样均是过 1 mm 筛的风干土样。脲酶活性的测定采用靛酚蓝比色法,酸性磷酸酶活性的测定采用氯代二溴对苯醌亚胺比色法,蔗糖酶活性的测定采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法,过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法^[17]。

1.3.5 统计方法

利用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,采用 Duncan 分析对数据进行差异性分析。

2 结果与讨论

2.1 生物有机肥施用期对香蕉枯萎病的生防作用

从图 1 可以看出,化肥处理病情指数在各个时期

均达到最高,有机肥处理次之,生物有机肥各处理之间有较为明显的差异。香蕉苗移栽 30 d 后,不同处理的香蕉植株均已发病,随着香蕉的生长,各处理病情指数都在上升。从移栽后第 90 d 开始,BOF3 与 BOF4 处理的香蕉植株发病症状仅次于化肥处理,病情指数迅速提高,到移栽第 270 d,CF 处理病情指数则高达 65,将其防效指定为 0,BOF3 与 BOF4 处理的病情指数分别高达 49 和 57,防病效果仅为 25% 和 13%。而 BOF1 与 BOF2 处理病情指数增长缓慢,病情指数显著低于其他处理,到移栽后第 150~210 d 时,病情指数才有较为明显的上升,移栽后第 270 d 时,BOF1 和 BOF2 处理的病情指数分别为 36 和 29,比 OF 处理分别低 25 和 32,防病效果分别高达 45% 和 55%。

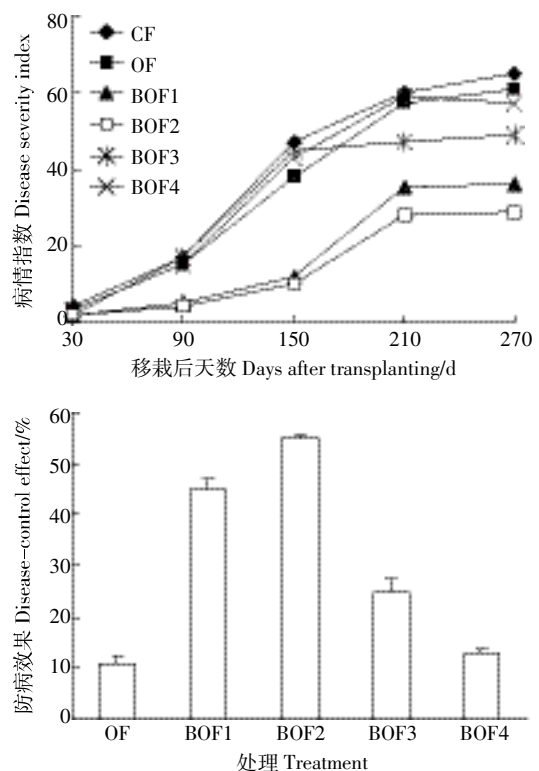


图 1 不同处理对香蕉枯萎病病情指数、防病效果(270 d)的影响

Figure 1 Effects of different treatments on banana wilt disease index and disease-control (270 days after transplanting)

2.2 生物有机肥施用期对土壤微生物数量的影响

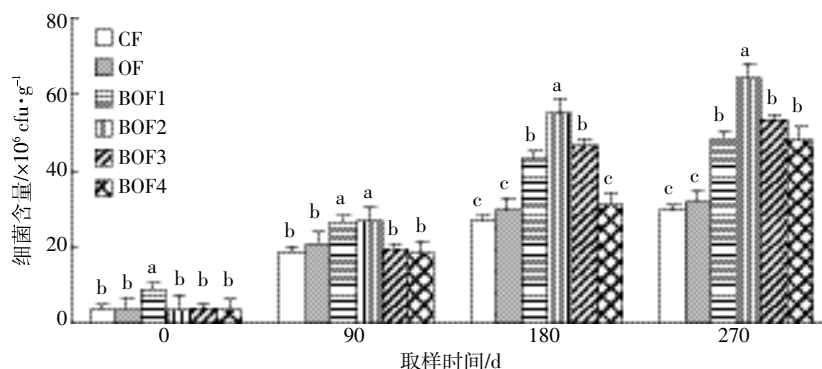
图 2 表明,香蕉移栽前,BOF1 处理细菌含量达 $8.4 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,高于其余各处理,从移栽后第 90 d 开始,BOF2 处理的细菌含量为 $26.67 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,也显著高于其他处理,到移栽后第 270 d 时,达到 $64 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。整个过程中 CF 与 OF 处理细菌含量差异不明显,始终低于 BOF 各处理的细菌含量,各处理细菌含

量为 $\text{BOF2} > \text{BOF3} > \text{BOF1} > \text{BOF4} > \text{OF} > \text{CF}$ 。

图3表明,在0 d时,BOF1放线菌含量为 $13.55 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,明显高于其他处理,随着生物有机肥的不同时期施用,各生物有机肥处理的放线菌含量均高于OF和CF处理。到移栽第180 d时,BOF1和BOF2处理的放线菌数量分别比OF增加了76.7%和95.6%。移栽后第270 d时,BOF2放线菌含量为 $23.15 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,明显高于其他处理,其他各处理放线菌含量

依次为 $\text{BOF1} > \text{BOF3} > \text{BOF4} > \text{OF} > \text{CF}$ 。

从图4看出,CF处理真菌含量在各个时期均显著高于施用生物有机肥的处理,从0 d到180 d,真菌含量整体呈上升趋势,以CF上升最为显著,从 $13.23 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到 $25.33 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。BOF2真菌数量从0 d时 $13.31 \times 10^3 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到第180 d时 $20.11 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,增长幅度仅为CF处理的70%,增长最为缓慢。从180 d到270 d,各施肥处理真菌数量



图中不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著, $P < 0.05$ 。下同

图2 不同处理对土壤中细菌含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on bacterium population in soil

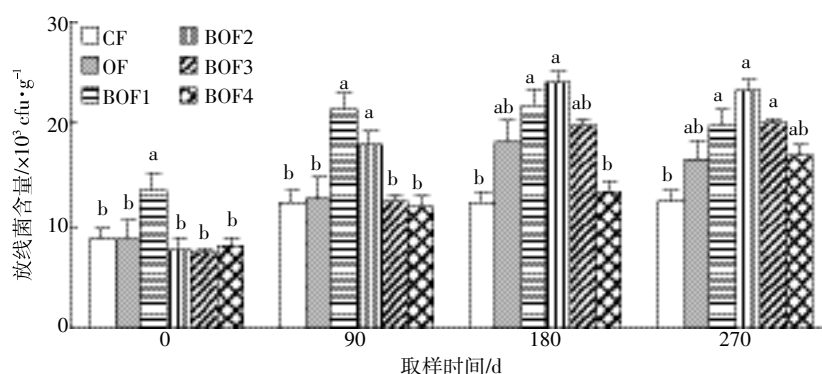


图3 不同处理对土壤中放线菌含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on actinomyce population in soil

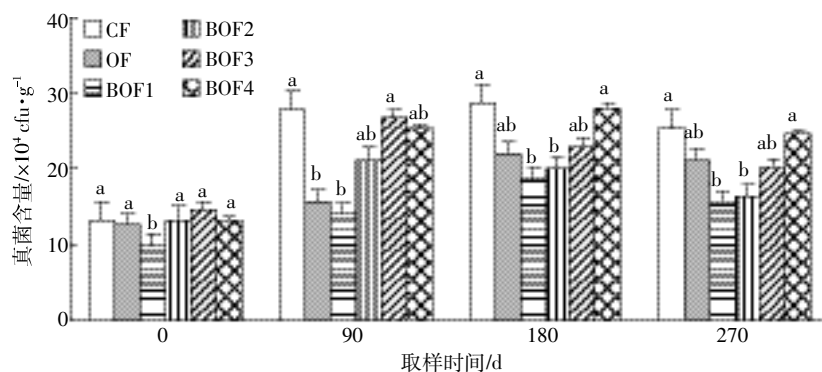


图4 不同处理对土壤中真菌含量的影响

Figure 4 Effects of different treatments on fungus population in soil

趋于平稳,真菌数量整体表现为下降趋势。

2.3 生物有机肥施用期对香蕉生物产量的影响

从表 1 可以看出,收获时,不同施肥处理的株高、叶长、茎围、叶宽、产量均有差异。第 270 d 调查时,OF 处理的茎围、株高、叶宽均低于其余各处理,施用生物有机肥的各处理基本高于施用化肥和有机肥处理,其中 BOF2 处理各性状均高于其余各组处理,BOF1 和 BOF2 处理的株高、茎围、叶宽均显著高于其他处理。OF 处理的产量最低,为 $128 \text{ kg} \cdot \text{小区}^{-1}$,BOF2 处理的产量最高,分别比 BOF1、BOF3、BOF4 处理提高了 67、73、114 kg,表现出显著的促生效果,此外生物有机肥处理的产量均显著高于化肥和有机肥处理。

2.4 生物有机肥施用期对土壤酶活性的影响

2.4.1 对土壤过氧化氢酶活性的影响

由表 2 可知,0 d 时,BOF1 的过氧化氢酶活性显著高于其他处理,到第 90 d 时,BOF2 处理施入生物有机肥后,过氧化氢酶活性增加了 3.86 倍,显著高于其他处理,180 d 时,BOF3 处理从第 90 d 的 $0.52 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $1.26 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。到第 270 d 调查时,BOF4 处理过氧化氢酶活性由 $0.77 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $0.93 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,其余各处理都有所下降。

2.4.2 对土壤脲酶活性的影响

由表 3 可知,0 d 时,BOF1 处理脲酶活性为 $14.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,高于其他各处理,到移栽后第 90 d 时,BOF1 和 BOF2 处理脲酶活性分别为 24.37、26.47 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于其他处理,而第 180 d 调查时,BOF1、BOF2、BOF3 脲酶活性均提高,而 CF、OF、BOF4 脲酶活性降低。到移栽后第 270 d 时,施用生物有机肥的各处理脲酶活性均高于 CF 和 OF 处理。

2.4.3 对土壤蔗糖酶活性的影响

由表 4 可知,香蕉整个生长期,蔗糖酶活性均上升,且其中施用生物有机肥处理的蔗糖酶活性均高

表 2 不同处理对土壤过氧化氢酶的影响($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 2 Effects of different treatments on activity of soil catalase

处理	0 d	90 d	180 d	270 d
CF	$0.31 \pm 0.01\text{b}$	$0.54 \pm 0.02\text{c}$	$0.73 \pm 0.01\text{c}$	$0.64 \pm 0.01\text{c}$
OF	$0.33 \pm 0.0\text{b}$	$0.56 \pm 0.03\text{c}$	$0.81 \pm 0.02\text{c}$	$0.67 \pm 0.02\text{c}$
BOF1	$0.57 \pm 0.02\text{a}$	$0.91 \pm 0.01\text{b}$	$0.83 \pm 0.01\text{c}$	$0.91 \pm 0.01\text{b}$
BOF2	$0.29 \pm 0.02\text{b}$	$1.12 \pm 0.02\text{a}$	$1.42 \pm 0.01\text{a}$	$1.12 \pm 0.01\text{a}$
BOF3	$0.34 \pm 0.01\text{b}$	$0.52 \pm 0.01\text{c}$	$1.26 \pm 0.02\text{b}$	$1.07 \pm 0.02\text{a}$
BOF4	$0.31 \pm 0.02\text{b}$	$0.56 \pm 0.01\text{c}$	$0.77 \pm 0.01\text{c}$	$0.93 \pm 0.01\text{b}$

表 3 不同处理对土壤脲酶的影响($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 3 Effects of different treatments on activity of soil urease

处理	0 d	90 d	180 d	270 d
CF	$8.21 \pm 0.63\text{b}$	$14.75 \pm 0.98\text{b}$	$12.73 \pm 1.52\text{c}$	$16.69 \pm 1.71\text{d}$
OF	$8.34 \pm 0.88\text{b}$	$15.51 \pm 0.13\text{b}$	$13.35 \pm 0.97\text{c}$	$19.54 \pm 1.12\text{d}$
BOF1	$14.61 \pm 0.97\text{a}$	$24.37 \pm 1.57\text{a}$	$28.32 \pm 1.13\text{a}$	$33.05 \pm 0.53\text{b}$
BOF2	$7.63 \pm 0.31\text{b}$	$26.47 \pm 0.78\text{a}$	$30.76 \pm 0.64\text{a}$	$36.14 \pm 0.49\text{b}$
BOF3	$8.42 \pm 0.33\text{b}$	$15.64 \pm 1.01\text{b}$	$24.22 \pm 1.87\text{b}$	$42.10 \pm 0.50\text{a}$
BOF4	$8.71 \pm 0.57\text{b}$	$16.03 \pm 0.37\text{b}$	$14.85 \pm 0.75\text{c}$	$28.52 \pm 0.45\text{c}$

表 4 不同处理对土壤蔗糖酶的影响($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 4 Effect of different treatments on activity of soil invertase

处理	0 d	90 d	180 d	270 d
CF	$2.65 \pm 0.18\text{b}$	$6.43 \pm 0.57\text{d}$	$10.72 \pm 0.42\text{c}$	$12.72 \pm 1.42\text{d}$
OF	$3.47 \pm 0.37\text{b}$	$7.22 \pm 0.12\text{bc}$	$11.01 \pm 0.21\text{c}$	$13.42 \pm 1.56\text{d}$
BOF1	$7.31 \pm 0.51\text{a}$	$12.33 \pm 0.84\text{a}$	$16.73 \pm 0.32\text{a}$	$18.39 \pm 0.67\text{c}$
BOF2	$2.86 \pm 0.62\text{b}$	$10.82 \pm 0.22\text{b}$	$14.31 \pm 0.46\text{b}$	$20.21 \pm 1.01\text{b}$
BOF3	$3.13 \pm 0.83\text{b}$	$8.18 \pm 1.47\text{c}$	$14.05 \pm 0.28\text{b}$	$24.49 \pm 0.86\text{a}$
BOF4	$2.96 \pm 0.71\text{b}$	$8.42 \pm 0.65\text{c}$	$10.60 \pm 0.29\text{c}$	$18.72 \pm 1.69\text{c}$

于 CF 和 OF 处理。0 d 时,BOF1 处理蔗糖酶活性为 $7.31 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,高于其他处理;到移栽后第 90 d,BOF2 处理蔗糖酶活性较 0 d 增加了 3.78 倍,此时 BOF1 与 BOF2 蔗糖酶活性仍高于其他处理。BOF3 处理蔗糖酶活性从移栽后第 180 d 的 $14.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 到 270 d 调查时增加到 $24.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,增长幅度

表 1 不同处理对香蕉植株生长和产量的影响

Table 1 Effects of different treatments on growth and yields of banana

处理	茎围/cm	株高/cm	叶长/cm	叶宽/cm	产量/ $\text{kg} \cdot \text{小区}^{-1}$
CF	$71.02 \pm 1.08\text{b}$	$202.29 \pm 4.65\text{b}$	$198.33 \pm 1.76\text{ab}$	$64.67 \pm 0.96\text{c}$	162b
OF	$66.71 \pm 3.10\text{c}$	$189.81 \pm 4.25\text{c}$	$191.33 \pm 0.33\text{b}$	$64.57 \pm 0.84\text{c}$	128c
BOF1	$75.33 \pm 1.34\text{ab}$	$217.71 \pm 3.74\text{a}$	$200.71 \pm 3.74\text{a}$	$78.55 \pm 1.50\text{a}$	221ab
BOF2	$81.07 \pm 1.60\text{a}$	$219.33 \pm 4.31\text{a}$	$209.67 \pm 5.84\text{a}$	$79.71 \pm 1.01\text{a}$	288a
BOF3	$71.52 \pm 1.12\text{b}$	$213.29 \pm 3.87\text{a}$	$198.67 \pm 5.81\text{ab}$	$80.19 \pm 1.38\text{a}$	205ab
BOF4	$71.90 \pm 0.94\text{b}$	$207.1 \pm 3.41\text{b}$	$198.33 \pm 3.84\text{ab}$	$72.00 \pm 1.13\text{b}$	174b

注:表中数值为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准误;同列数据后凡是有一个相同小写字母者,表示无显著差异($P>0.05$,Duncan's 法)。下同。

显著高于其他处理;到移栽后第 270 d 调查时,蔗糖酶活性从高到低依次为 BOF3>BOF2>BOF4>BOF1>OF>CF。

2.4.4 对土壤磷酸酶活性的影响

由表 5 可知,酸性磷酸酶活性变化规律与脲酶一致,0 d 时,BOF1 酸性磷酸酶活性为 $218.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于其他各处理;到移栽后第 90 d 时,BOF1 和 BOF2 酸性磷酸酶活性分别为 $247.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $239.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于其他处理,而移栽后第 180 d 时,BOF2 与 BOF3 处理酸性磷酸酶活性分别提高了 8.04 、 $8.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,而其他处理的脲酶活性均降低。到移栽后第 270 d 时,BOF3 处理酸性磷酸酶活性高达 $276.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于其他各处理,酸性磷酸酶活性从高到低依次为 BOF3>BOF2>BOF1>BOF4>OF>CF。

表 5 不同处理对土壤酸性磷酸酶的影响($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 5 Effect of different treatments on activity of soil acid phosphatase

处理	0 d	90 d	180 d	270 d
CF	$189.42 \pm 0.68\text{b}$	$209.36 \pm 0.85\text{b}$	$194.97 \pm 1.76\text{c}$	$207.42 \pm 0.97\text{d}$
OF	$195.64 \pm 1.01\text{b}$	$214.48 \pm 1.37\text{b}$	$200.59 \pm 1.53\text{c}$	$225.82 \pm 1.96\text{c}$
BOF1	$218.47 \pm 1.24\text{a}$	$247.81 \pm 2.13\text{a}$	$231.38 \pm 0.84\text{ab}$	$243.16 \pm 2.19\text{bc}$
BOF2	$193.77 \pm 1.08\text{b}$	$239.65 \pm 0.58\text{a}$	$247.69 \pm 2.01\text{a}$	$256.47 \pm 0.50\text{b}$
BOF3	$190.12 \pm 0.67\text{b}$	$212.74 \pm 1.64\text{b}$	$221.72 \pm 1.38\text{b}$	$276.56 \pm 2.85\text{a}$
BOF4	$187.37 \pm 0.94\text{b}$	$209.62 \pm 1.21\text{b}$	$201.47 \pm 1.93\text{c}$	$239.89 \pm 1.33\text{bc}$

2.5 土壤微生物量与病情指数、香蕉产量及土壤酶的相关分析

移栽后 270 d 时,进行了土壤微生物量与病情指数、香蕉产量及土壤酶的相关分析。从表 6 可以看出,病情指数与土壤中细菌、放线菌含量呈显著负相关,

表 6 土壤微生物量与病情指数、香蕉产量及土壤酶的相关分析

Table 6 Correlation between soil microbial flora amount and disease index, banana yields and soil enzymes

指标	细菌	放线菌	真菌
病情指数	-0.760^*	-0.817^*	0.809^*
产量	0.678^*	0.677^*	-0.568
蔗糖酶	0.544	0.365	-0.135
脲酶	0.587^{**}	0.556^{**}	-0.330
过氧化氢酶	0.443^*	0.254	-0.217
酸性磷酸酶	0.529^*	0.529^*	-0.248

注:**表示相关性达极显著水平($P<0.01$);*表示相关性达显著水平($P<0.05$)。

与真菌呈显著正相关。香蕉产量、酸性磷酸酶活性与细菌、放线菌含量呈显著正相关,脲酶则与细菌、放线菌含量呈极显著正相关,相关指数分别达到 0.587、0.556。过氧化氢酶活性则仅与细菌含量表现出显著的正相关,蔗糖酶则与细菌、放线菌之间不具有明显的相关关系,而真菌则与产量及土壤酶呈负相关。

3 讨论

3.1 生物有机肥施用期对香蕉生长及病情指数的影响

本研究表明,大田条件下施用生物有机肥对香蕉生长表现出显著的促进作用,其中以在香蕉营养生长期施用生物有机肥对香蕉生长和产量的提高效果最为明显。此外,在香蕉营养生长期施用生物有机肥,可以延迟香蕉植株的发病时间,显著降低香蕉植株的发病程度,与徐立功、何欣等、吴川德等的研究结果相似^[13,18-19]。这可能是由于在香蕉枯萎病发病前期施入生物有机肥,使它所含的拮抗菌能及时在香蕉根表或根内定植,成为土壤中的优势种群,并形成了有效的“生物防御层”,保护了香蕉根系免受病原菌的侵染^[20],推迟香蕉植株发病时间,同时显著降低了香蕉植株的病情指数。香蕉枯萎病病情得到控制后,香蕉可以更好地生长,产量也得到保证。因此,在香蕉营养生长期施用生物有机肥代替部分化肥,可以最大化发挥生物有机肥的抗病能力,减少化学农药和化学肥料的使用量,减少环境的污染,提高农产品品质和效益^[21],这为生物有机肥的合理施用提供了科学依据。

3.2 生物有机肥施用期对土壤微生物的影响

采用活菌稀释计数是分析土壤中可培养微生物的一个重要手段,可以直接反映各主要微生物类群的数量状况。相对于单纯施用化肥,施用生物有机肥可以提高土壤中细菌和放线菌的数量,降低真菌数量,与袁英英等^[9]、胡可等^[22]和高雪莲等^[23]研究的结果一致,其中以香蕉营养生长期施用生物有机肥效果最为明显。在大田生产中,生物肥中生防菌剂的实际效果受到土壤、水分及气候等外界因素的影响较大,而在香蕉营养生长期处于一年中水温最佳状态,土壤中固有微生物开始大量繁殖,生物有机肥本身含有益菌群,对土壤土著微生物有一定活化作用,且生物有机肥基料多为有机物,可丰富土壤中微生物可利用营养,此时施用生物有机肥后一方面直接带入了大量的有益微生物,另一方面这些有益微生物与土壤中的微生物相互作用,控制了病原微生物菌的生长,提高了有益微生物的数量。相关性分析得出,香蕉病情指数与土壤中细

菌、放线菌含量呈显著负相关,与真菌呈显著正相关,土壤中细菌、放线菌含量的增加有利于降低病害的发生,真菌含量的增加则有利于病害的发生。因此,在营养生长期施用生物有机肥更好地提高土壤有益微生物数量、改善土壤微生物群落结构,并进一步提高了香蕉对枯萎病的防御能力。

3.3 生物有机肥施用期对土壤酶的影响

土壤酶是土壤的重要组成部分,它直接影响着土壤的代谢性能,并能反应土壤对污染物质自净能力的大小,其活性大小在一定程度上代表了土壤肥力的高低^[24]。本试验结果表明,施用生物有机肥可不同程度地提高土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性,而且土壤酶活性与施肥处理密切相关。张静等^[25]和赵青云等^[26]研究也指出施用生物有机肥可活化土壤养分,土壤酸性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性明显增加,与本研究结果相似。在本研究中,香蕉孕蕾前,以BOF1、BOF2的酶活性高于其余各处理,而在香蕉孕蕾期之后,则以BOF2和BOF3表现出较高活性。这可能是由于在施用生物有机肥初期,土壤微生物群落受到外来添加物(功能菌)影响,细菌等菌群活性较强,它与土壤酶活性呈显著正相关关系,在良好的水温条件和土壤菌群的激活下,土壤酶活性也较高,而在孕蕾期后土温偏低,受外界环境的影响较大,此时微生物数量的变化对酶活性影响不大,所以相比之前,在施用生物有机肥后土壤酶活性无较高提升。

4 结论

大田条件下,在香蕉营养生长期施用生物有机肥可以显著降低香蕉枯萎病的发病率,提高植株的防病效果,促进香蕉的生长,明显提高香蕉的产量。生物有机肥还可以提高土壤酶的活性,增加土壤有益微生物数量,改善土壤微生物群落结构。适时施用生物有机肥,可以更好地防止香蕉枯萎病的发生。这一研究结果可为大面积推广利用生物有机肥防治香蕉枯萎病提供理论依据。

参考文献:

- [1] 吴雪珍,周灿芳,万忠,等. 2010年广东香蕉产业发展现状分析[J]. 广东农业科学, 2011(5): 18-20.
WU Xue-zhen, ZHOU Can-fang, WAN Zhong, et al. The banana industry development present situation analysis in 2010[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011(5): 18-20.
- [2] 李玉萍,方佳,董定超,等. 世界香蕉产业的发展现状与发展趋势分析[J]. 广东农业科学, 2008(2): 115-119.
- [3] 薛超,黄启为,凌宁,等. 连作土壤微生物区系分析、调控及高通量研究方法[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 612-618.
XUE Chao, HUANG Qi-wei, LING Ning, et al. Analysis, regulation and high-throughput sequencing of soil microflora in mono-cropping system[J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, 48(3): 612-618.
- [4] 匡石滋,李春雨,田世尧,等. 药肥两用生物有机肥对香蕉枯萎病的防治及其机理初探[J]. 中国生物防治学报, 2013, 29(3): 417-423.
KUANG Shi-zi, LI Chun-yu, TIAN Shi-yao, et al. Effects of bio-organic manure on *Fusarium* wilt of banana and its mechanisms[J]. *Chinese Journal of Biological*, 2013, 29(3): 417-423.
- [5] 张志红,冯宏,肖相政,等. 生物肥防治香蕉枯萎病及对土壤微生物多样性的影响[J]. 果树学报, 2010, 27(4): 575-579.
ZHANG Zhi-hong, FENG Hong, XIAO Xiang-zheng, et al. Influence of bio-fertilizers on control of banana wilt disease and soil microbial diversity[J]. *Fruit Sci*, 2010, 27(4): 575-579.
- [6] 宋尚成,李敏,刘润进. 种植模式与土壤管理制度对作物连作障碍的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 231-235.
SONG Shang-cheng, LI Min, LIU Run-jin. Effects of plant patterns and soil managements on crop replant diseases[J]. *China Agric Sci Bull*, 2009, 25(21): 231-235.
- [7] 蔡燕飞,廖宗文,章家恩,等. 生态有机肥对番茄青枯病及土壤微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 349-353.
CAI Yan-fei, LIAO Zong-wen, ZHANG Jia-en, et al. Effect of ecological organic fertilizer on tomato bacterial wilt and soil microbial diversity[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(3): 349-353.
- [8] 赵斌,何绍江. 微生物学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 255.
ZHAO Bin, HE Shao-jiang. Microbiology experiments[M]. Beijing: Science Press, 2002: 255.
- [9] 袁英英,李敏清,胡伟,等. 生物有机肥对番茄青枯病的防效及对土壤微生物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1344-1350.
YUAN Ying-ying, LI Min-qing, HU Wei, et al. Effect of biological organic fertilizer on tomato bacterial wilt and soil microorganism[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1344-1350.
- [10] 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.
HU Wei, ZHAO Lan-feng, ZHANG Liang, 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.
- [11] 张志红,李华兴,韦翔华,等. 生物肥料对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2421-2425.
ZHANG Zhi-hong, LI Hua-xing, WEI Xiang-hua, et al. Influence of biological fertilizers on banana wilt disease and microorganisms in soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2421-2425.
- [12] Kuppera K C, Bettiol W, Goes De A, et al. Biofertilizer for control of *Guignardia citricarpa*, the causal agent of citrus black spot[J]. *Crop Protection*, 2006(26): 569-573.

- [13] 徐立功, 徐 坤, 刘会诚. 生物有机肥对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2006(4):8-11.
XU Li-gong, XU Kun, LIU Hui-cheng. Effect of microbial organic fertilizer on the growth, yield and quality of tomato[J]. *China Vegetables*, 2006(4):8-11.
- [14] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 不同生物有机肥用量对土壤活性有机质和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1):26-32.
TIAN Xiao-ming, LI Jun-hua, WEI Chang-zhou, et al. Different dosage of biological organic fertilizer on soil active organic matter and the influence of the enzyme activity[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2012(1):26-32.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:274-323.
GUAN Song-yin. Study method of soil enzymes[M]. Beijing: Agriculture Publishing House, 1986:274-323.
- [16] 王艳霞, 冯 宏, 李华兴, 等. 生物复混肥对土壤微生物的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报 2008, 14(6):1206-1211.
WANG Yan-xia, FENG Hong, LI Hua-xing, et al. Effect of bio-compound fertilizer on soil microorganism[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2008, 14(6):1206-1211.
- [17] 刘芷宇. 植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性[J]. 土壤, 1992, 24(2):97-101.
LIU Zhi-yu. The biological effectiveness of phosphorus on plant nutrition and soil[J]. *Soils*, 1992, 24(2):97-101.
- [18] 何 欣, 黄启为, 杨兴明, 等. 香蕉枯萎病致病菌筛选及致病菌浓度对香蕉枯萎病的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18):3809-3816.
HE Xin, HUANG Qi-wei, YANG Xing-ming, et al. Screening and identification of pathogen causing banana *Fusarium* wilt and the relationship between spore suspension concentration and the incidence rate[J]. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(18):3809-3816.
- [19] 吴川德, 董存明, 傅友强, 等. 生物有机肥对香蕉长势及生物量的影响[J]. 广东农业科学, 2013(16):73-75.
WU Chuan-de, DONG Cun-ming, FU You-qiang, et al. Effects of bio-organic fertilizer application on the growth and biomass of banana[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013(16):73-75.
- [20] 凌 宁, 王秋君, 杨兴明, 等. 根际施用微生物有机肥防治连作西瓜枯萎病研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 45(5):1136-1141.
LING Ning, WANG Qiu-jun, YANG Xing-ming, et al. Control of *Fusarium* wilt of watermelon by nursery application of bio-organic fertilizer[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 45(5):1136-1141.
- [21] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力[J]. 土壤通报, 1980(6):41-44.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980(6):41-44.
- [22] 胡 可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):303-306.
HU Ke, LI Hua-xing, LU Wei-sheng, et al. Effect of microbial organic fertilizer application on soil microbial activity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2):303-306.
- [23] 高雪莲, 邓开英, 张 鹏, 等. 不同生物有机肥对甜瓜土传枯萎病防治效果及对根际土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(6):57-60.
GAO Xue-liang, DENG Kai-ying, ZHANG Peng, et al. Different biological organic fertilizer on the melon soil spread blight control effect and influence on rhizosphere microflora[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(6):57-60.
- [24] 区伟佳, 张新明, 李华兴, 等. 基于偏最小二乘回归同时测定阿莫西林和四环素含量[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(2):15-18.
OU Wei-jia, ZHANG Xin-ming, LI Hua-xing, et al. Simultaneous determination of amoxicillin and doxycycline with partial least-square regression [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31(2):15-18.
- [25] 张 静, 杨江舟, 胡 伟, 等. 生物有机肥对大豆红冠腐病及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):548-554.
ZHANG Jing, YANG Jiang-zhou, HU Wei, et al. Effect of biological organic fertilizer on soybean red crown rot and soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):548-554.
- [26] 赵青云, 王 华, 王 辉, 等. 施用生物有机肥对可可苗期生长及土壤酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(6):1024-1028.
ZHAO Qing-yun, WANG Hua, WANG Hui, et al. Effects of different bio-organic fertilizer application on cacao plant growth and soil enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(6):1024-1028.