

DOI: 10.5846/stxb201212261872

黄新琦, 温腾, 孟磊, 张金波, 朱同彬, 蔡祖聪. 土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用. 生态学报, 2014, 34(16): 4526-4534.

Huang X Q, Wen T, Meng L, Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C. The inhibitory effect of quickly and intensively reductive soil on *Fusarium oxysporum*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4526-4534.

土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用

黄新琦¹, 温 腾¹, 孟 磊², 张金波¹, 朱同彬¹, 蔡祖聪^{1,3,*}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 海南大学农学院, 海口 570228;

3. 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210023)

摘要: 香蕉枯萎病是由尖孢镰刀菌古巴专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, FOC)引起的一种世界性的土传病害, 每年造成大量的经济损失, 目前尚未找到有效的防治办法。实验采取土壤淹水及添加有机物料的方法, 抑制土壤中 FOC 的数量。结果表明: 土壤淹水处理在第 5 天显著增加了土壤的 pH 值, 但随着处理时间的增加, 淹水的处理中土壤 pH 值逐渐下降; 土壤淹水及添加有机物料显著降低了土壤中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度; 土壤中添加秸秆、猪粪和石灰的处理显著增加了土壤中 NH_4^+ 的浓度。土壤淹水及添加有机物料对于土壤中可培养细菌数量无显著影响; 但显著降低了土壤中可培养放线菌和真菌的数量; 土壤淹水及添加秸秆、甘蔗渣和石灰的处理显著降低了土壤中 FOC 的数量, 其中添加高量秸秆处理中 FOC 的数量下降最多, 仅为处理前土壤中 FOC 数量的 2.88%。添加有机物料但未加石灰的处理土壤中总微生物量较处理前相比显著增加。研究表明土壤淹水及添加有机物料是一种可以防控香蕉枯萎病的高效和环保的方法。

关键词: 土壤还原; 尖孢镰刀菌; 香蕉枯萎病

The inhibitory effect of quickly and intensively reductive soil on *Fusarium oxysporum*

HUANG Xinqi¹, WEN Teng¹, MENG Lei², ZHANG Jinbo¹, ZHU Tongbin¹, CAI Zucong^{1,3,*}

1 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 College of Agriculture, Hainan University, Haikou 570228, China

3 Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change & Ecological Construction, Nanjing 210023, China

Abstract: Soil-borne diseases mainly caused by continuous cropping of monocultures are world-wide problems and seriously restrain the development of contemporary agriculture. Traditionally, farmers use chemical pesticides as a relatively dependable method of protecting plants from soil-borne pathogens. However, increased use of chemical pesticides have several negative effects on the environment and human health and restrictions have increased on use of a variety of chemical pesticides. Therefore, there is an urgent need for effective and environmentally friendly ways to prevent and control soil-borne diseases. Banana fusarium wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* (FOC) is a kind of world-wide soil-borne diseases and causes serious economic loss every year. The effective ways to prevent the disease are still not available. The experiment was carried out in October 2012. The study site was located in Ledong, Hainan province, China (18°65' N, 107°79' E). The field used in the experiment was planted with banana for many years, and had a high *Fusarium* wilt disease incidence of more than 50%. The experiment contained ten treatments, i.e. (1) untreated soil, (2) disturbed soil, (3) flooding disturbed soil, (4) flooding soil incorporated with rice straw at low rate, (5) flooding soil incorporated with

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301335, 41222005); 高等学校博士学科点专项科研基金(20133207120018); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期: 2012-12-26; 网络出版日期: 2014-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zccai@njnu.edu.cn

rice straw at high rate, (6) flooding soil incorporated with rice straw at high rate plus lime, (7) flooding soil incorporated with pig manure, (8) flooding soil with bagasse, (9) flooding soil with bagasse plus lime, and (10) flooding soil with lime. The soil pH, contents of SO_4^{2-} , NO_3^- and NH_4^+ , and the populations of bacteria, actinomyces, fungi and FOC of the soils were analyzed at 5, 10, and 15 days after flooding and drained. The results showed that the soil pH in the flooding treatments were raised in the fifth day significantly compared with untreated soils and then became gradually declined over treated time. The contents of SO_4^{2-} and NO_3^- were decreased significantly, while the content of NH_4^+ were increased in the soils with straw, pig manure and lime, respectively, under flooding conditions. Flooding the soil incorporated with organic matters significantly reduced the populations of cultivable actinomyces and fungi but not influenced the populations of cultivable bacteria. The populations of FOC were significantly declined in the soils with increasing the rate of incorporated rice straw under flooding condition to 2.88% of untreated soil. Incorporation of bagasse and lime decreased the population of FOC significantly as well, but less effectively than with rice straw did under flooding conditions. Pig manure was not effective to reduce the FOC population. The total amounts of microbe in the treatments applied with organic matters were raised compared with untreated soil. These results indicated that anaerobic conditions created by flooding soil incorporated with organic matters not only reduced the FOC population in the soil, but also improved the soil physicochemical properties and microbial communities. It is the first report in China that quickly and intensively anaerobic conditions created by flooding soil incorporated with organic matters effectively reduce the population of plant pathogens within 15 days. Therefore, anaerobic soil disinfection would provide a feasible measure for the control of banana fusarium wilt in agricultural production. Furthermore, the method provides a way to recycling use of crop residues.

Key Words: soil reduction; *Fusarium oxysporum*; banana fusarium wilt

香蕉是世界上最主要的作物之一,在许多发展中国家作为一种主要的食物和经济来源^[1]。香蕉在拉丁美洲、非洲和亚洲的农业基础经济中是一种稳定的出口商品,是世界贸易中的第五大重要农产品^[2]。同时,香蕉是我国南方的五大名优果品之一,是国内市场和出口创汇的重要资源^[3]。在全球香蕉产业快速发展的同时,一种对香蕉具有毁灭性危害的病害——香蕉枯萎病也正不断地在香蕉种植区蔓延,个别香蕉园区甚至无法再种植香蕉,出现丢荒现象,导致香蕉种植面积逐渐减少,香蕉产业受到了严重的打击^[4]。

香蕉枯萎病又名香蕉巴拿马病、黄叶病,是由尖孢镰刀菌古巴专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, FOC) 侵染而引起维管束坏死的一种毁灭性真菌病害。香蕉枯萎病的致病菌—FOC 属于半知菌类、从梗孢目、瘤座孢科、镰刀菌属。目前,FOC 属国际检疫对象^[3]。大量的研究表明,在环境条件相对不变条件下,随着土壤病原菌数量的增加,作物土传病害的发生呈上升趋势^[4-5]。因此能否有效的降低土壤中病原菌的数量是防控土传病害取得成功的关键因素。

在没有寄主存在的情况下,FOC 产生厚垣孢子,可以在土壤里存活数年至数十年之久^[6-7],该病菌可通过土壤、水、农具和人等媒介传播,致病力强,感染率高,死亡率也高,防治难度极大^[8-9]。目前生产上主要通过化学防治、生物防治、培育抗病品种和一些农业防治措施来减缓香蕉枯萎病的发生。根据香蕉生产者多年的实践,应用农药和对种植土壤的处理都没能有效地防止香蕉枯萎病的发生和扩展^[3, 6, 10]。使用无病组培苗和抗病品种也不能达到理想的防治效果^[11]。近年来,生物防治由于具有环保、无污染等特点日益受到人们的重视,但是单纯生防菌防病速度慢,且效果不稳定,原因可能是生防菌作为外来菌受土壤条件影响大,不易在土壤中繁殖和发挥效果^[12],所有对于香蕉枯萎病的防治目前尚未找到理想的防治方法^[13-16]。本试验采用一种土壤快速强烈还原的方法,使得短时间内土壤中的 FOC 数量下降从而达到防治香蕉枯萎病的目的。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤 试验地块位于海南省乐东县万钟公

司香蕉种植园内,此地块前几年所种植的香蕉发病严重,枯萎病发病率高达 40%—50%,因为较高的发病率,此地块已被撂荒 1a。供试有机物料:秸秆、新鲜猪粪和甘蔗渣分别在当地水稻田、养殖场和糖厂所获得,充分晾干。供试培养基:牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏培养基和高氏一号培养基配方参考文献^[17]。FOC 选择性培养基(K2 培养基)^[18]: K_2HPO_4 1 g、 KCl 0.5 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g、 Fe-Na-EDTA 0.01 g、L-天门冬酰胺 2 g、半乳糖 10 g、琼脂 16 g,去离子水定容至 900 mL,高压灭菌后冷却至 60 °C,加入 100 mL 盐溶液(五氯硝基苯 75% WP, 0.9 g、Oxgall 0.45 g、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g、硫酸链霉素 0.3 g,用 10%磷酸调 pH 值至 3.8 ± 0.2)。

1.2 试验处理

在上述地块里挖出直径 0.65 m、深 0.5 m 的坑,坑内土壤重量为 209 kg,在坑内垫上塑料薄膜,然后将土壤与有机物料混匀后加入坑中,处理期间保持土壤淹水状态。试验分为 10 个处理:原位土壤(CK1)、扰动不淹水(CK2)、扰动淹水(CK3)、低量秸秆(LS)、高量秸秆(HS)、高量秸秆+石灰(HSL)、猪粪(PM)、甘蔗渣(BA)、甘蔗渣+石灰(BAL)和石灰(LI)。低量秸秆用量(质量分数)为 0.6%;高量秸秆和甘蔗渣用量为 1.2%;猪粪用量为 1.6%;石灰用量为 0.3%。秸秆、甘蔗渣和猪粪的 C/N 分别为 46.0、129.6 和 12.83。每个处理 3 个重复。处理周期为 15 d 天,处理完成后排水,土壤自然落干。分别于处理前、处理第 5 天、第 10 天和第 15 天采集 5—20 cm 土层的土样;土壤落干后采集 5—20 cm 和 20—40 cm 土层的土样。处理期间土壤温度为 25—40 °C。

1.3 土壤 pH、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的测定

将土壤分别与水和 2 mol/L KCl 溶液(质量分数)以 1:5 的比例混匀,200 r/min 振荡 1 h 后过滤。水溶液分别用 pH 计(Mettler S220K, Switzerland)和离子色谱(Thermo Dionex ICS 1100, USA)测定土壤的 pH 值和硫酸根的浓度; KCl 溶液用流动分析仪(Skalar San++, Holland)测定土壤中的铵态氮和硝态氮的浓度。

1.4 土壤中可培养微生物计数

称取土壤样品 10 g,加入到 90 mL 无菌水中,170 r/min 振荡 20 min,进行系列梯度稀释后分别于

牛肉膏蛋白胨培养基、高氏一号培养基、马丁氏培养基和 K2 培养基上涂布,30 °C 培养 2 d 后计取土壤样品中可培养细菌数量,4 d 后计取放线菌、真菌和 FOC 的数量。

1.5 土壤 DNA 的提取与测定

土壤 DNA 的提取使用 Power Soil™ DNA Isolation Kit (MO BIO Laboratories Inc., USA),具体方法参考文献^[19]。土壤 DNA 的浓度测定使用 NanoDrop 2000 微量紫外分光光度计(Thermo Scientific Inc., USA)。

1.6 数据处理

试验数据处理使用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 (SPSS Inc., Chicago, USA)统计分析软件。并采用 Duncan 氏新复极差法检验差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 的变化

在所有淹水的处理中(处理 3—10),土壤的 pH 值在第 5 天都有增高的趋势,其中除了 BA 处理以外,与处理前 pH 值相比差异均显著,其中第 5 天 LI 处理的 pH 值与处理前相比增加了 3.39。随着处理时间的增加,淹水的处理中土壤 pH 值逐渐下降,土壤落干后,淹水但未加石灰的处理(CK3、LS、HS、PM 和 BA)中土壤的 pH 值下降至处理前的水平,而添加石灰的处理(HSL、BAL 和 LI)中土壤的 pH 值还显著大于处理前土壤中的 pH 值。CK1 和 CK2 处理中不同时期的土壤 pH 值差异并不显著(图 1)。

2.2 土壤中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度

在所有淹水的处理中(处理 3—10),随着处理时间的增加,土壤中的 SO_4^{2-} 的浓度均有下降的趋势,土壤落干后添加有机物料的处理(LS、HS、HSL、PM、BA 和 BAL)土壤 SO_4^{2-} 的浓度显著低于处理前的水平,CK1 和 CK2 处理土壤中 SO_4^{2-} 的浓度随着处理时间的增加并无显著差异(图 2)。与 SO_4^{2-} 的浓度变化趋势相似,所有淹水处理土壤中的 NO_3^- 的浓度在处理第 5 天均有下降,差异显著;处理第 10 天时, NO_3^- 的浓度接近零;土壤落干后,所有淹水处理土壤中的 NO_3^- 的浓度有较小的增加,但与处理前相比差异仍显著(图 3)。处理 LS、HS、HSL、PM 和 LI 的土壤中 NH_4^+ 的浓度,随着处理时间的增加,均有上升趋势;土壤落干后,上述处理的土壤中 NH_4^+ 的

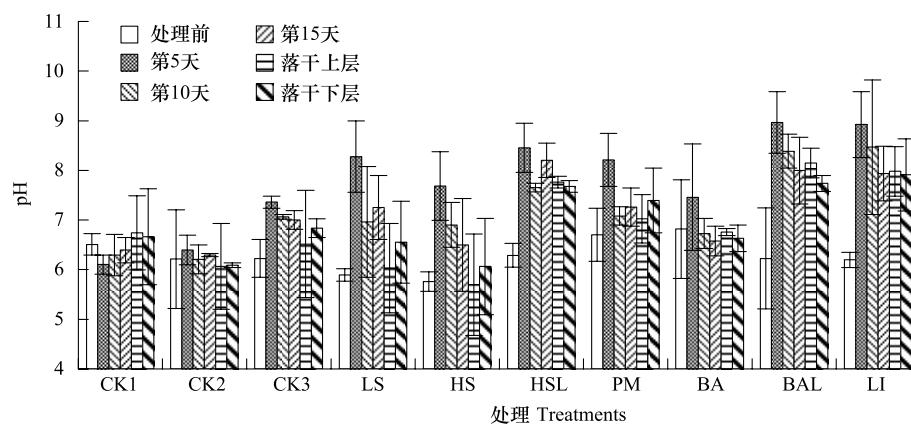
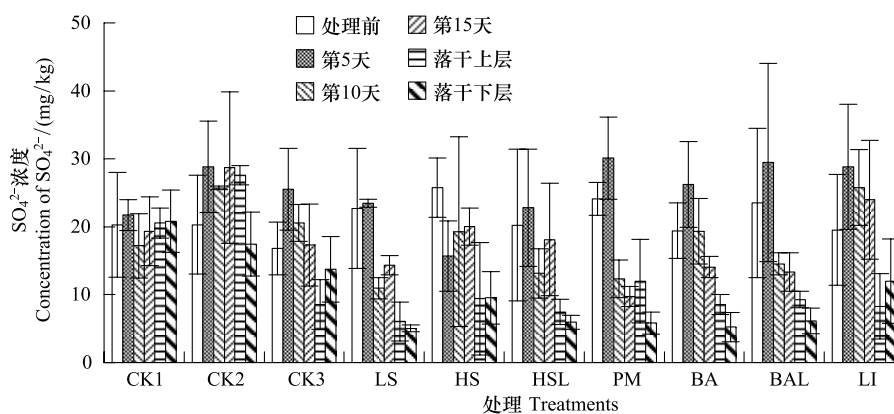
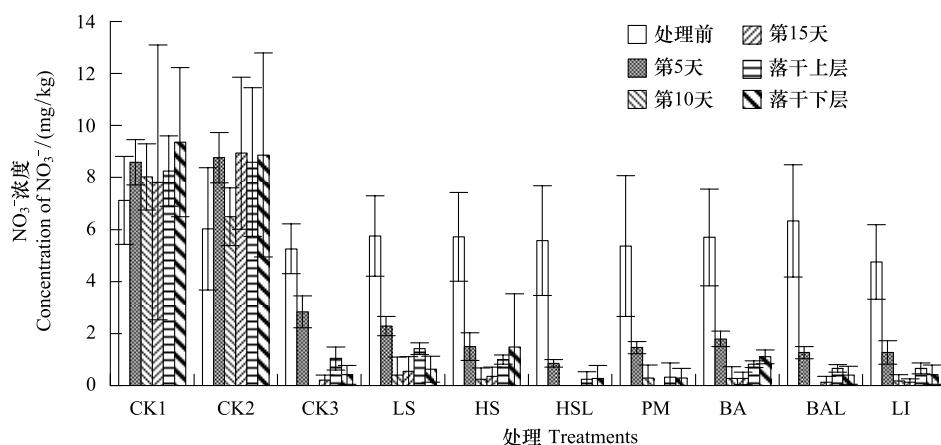


图1 不同处理中 pH 值的变化

Fig.1 The range of pH values in soils of different treatments

CK1:原位土壤 Untreated soil;CK2:扰动不淹水 Disturbed soil without flooding;CK3:扰动淹水 Flooding disturbed soil;LS:低量秸秆 Flooding soil incorporated with rice straw at low rate;HS:高量秸秆 Flooding soil incorporated with rice straw at high rate;HSL:高量秸秆+石灰 HS plus lime;PM:猪粪 Flooding soil incorporated with pig manure;BA:甘蔗渣 Flooding soil incorporated with bagasse;BAL:甘蔗渣+石灰 BA plus lime;LI:石灰 Flooding soil incorporated with lime;低量秸秆用量为 0.6%质量分数;高量秸秆和甘蔗渣用量为 1.2%;猪粪用量为 1.6%;石灰用量为 0.3%

图2 不同处理中 SO_4^{2-} 的浓度Fig.2 The concentrations of SO_4^{2-} in soils of different treatments图3 不同处理土壤中 NO_3^- 的浓度Fig.3 The concentrations of NO_3^- in soils of different treatments

浓度较处理前相比差异均显著,其中,PM 处理土壤中 NH_4^+ 的浓度增加最大,是处理前 NH_4^+ 浓度的 21.4

倍;CK1、CK2、CK3、BA 和 BAL 处理的土壤 NH_4^+ 的浓度随着处理时间的增加并无显著差异(图 4)。

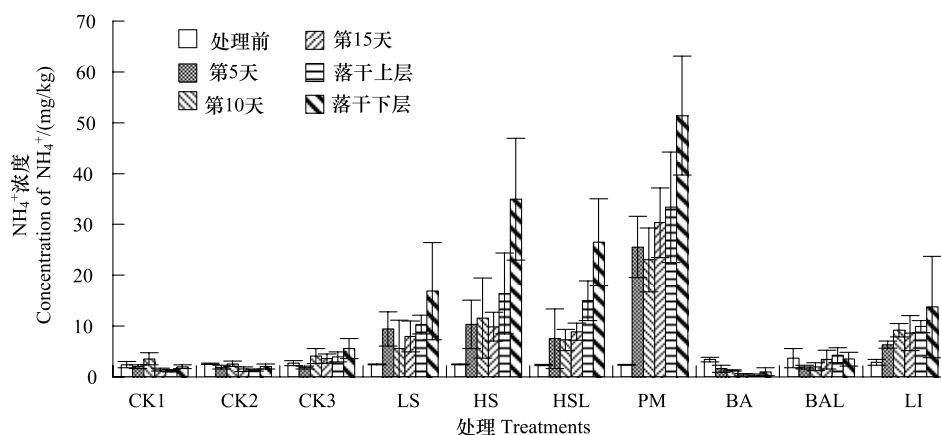


图 4 不同处理土壤中 NH_4^+ 的浓度

Fig.4 The concentrations of NH_4^+ in soils of different treatments

2.3 土壤中可培养微生物数量

所有处理土壤中的可培养细菌数量在处理的不同时期,并无明显的变化趋势,细菌的数量均在每克土 10^7 — 10^8 CFU 之间(图 5)。随着处理时间的增加,除了 PM 处理之外,所有淹水处理土壤中的可培

养放线菌呈下降趋势;土壤落干后,CK3、LS、HS、HSL、BA、BAL 和 LI 处理土壤中放线菌的数量较处理前相比差异显著,由处理前的每克土 10^6 CFU 下降到 10^5 CFU;CK1、CK2 和 PM 处理放线菌数量并无较大变化(图 6)。

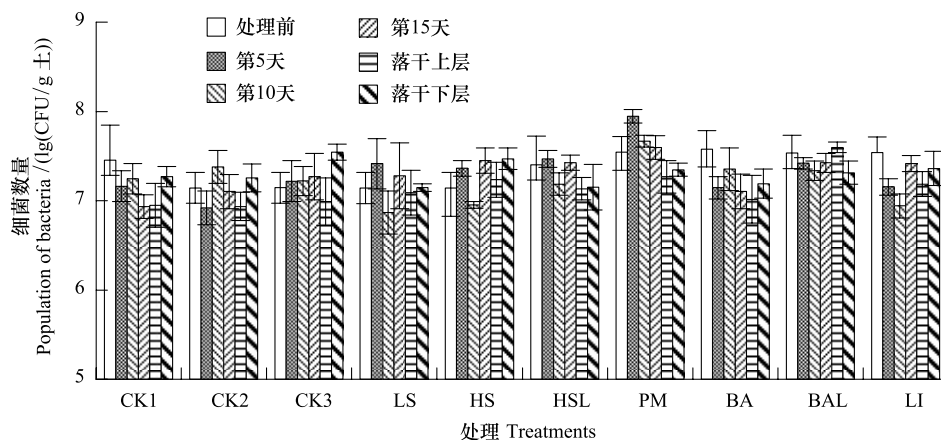


图 5 不同处理土壤中细菌的数量

Fig.5 The populations of bacteria in soils of different treatments

在处理第 5 天,PM、BA 和 BAL 处理土壤中的可培养真菌数量有明显的增加,这是由于猪粪和甘蔗渣中本身含有较多的真菌;随着处理时间的增加,LS、HS、HSL、BA、BAL 和 LI 处理土壤中真菌数量呈下降趋势;土壤落干后,LS、HS、HSL 和 LI 处理土壤中真菌数量较处理前相比显著下降,由处理前的每克土 10^4 CFU 下降到 10^3 CFU;PM 处理土壤中真菌数量增加到每克土 10^5 CFU,CK1、CK2 和 CK3 处理

土壤中真菌数量无显著变化(图 7)。与真菌数量变化趋势相似,随着处理时间的增加,LS、HS、HSL、PM、BA、BAL 和 LI 处理土壤中 FOC 的数量呈下降趋势;土壤落干后,除 PM 之外的上述处理土壤中 FOC 的数量较处理前相比均显著下降,其中 HS 处理中 FOC 的数量下降最多,仅为处理前土壤中 FOC 数量的 2.88%;PM 处理土壤中 FOC 数量在第 5 天有较小的增加,因为新鲜猪粪中含有 FOC;CK1、CK2 和

CK3 处理中 FOC 的数量并无显著变化(图 8)。

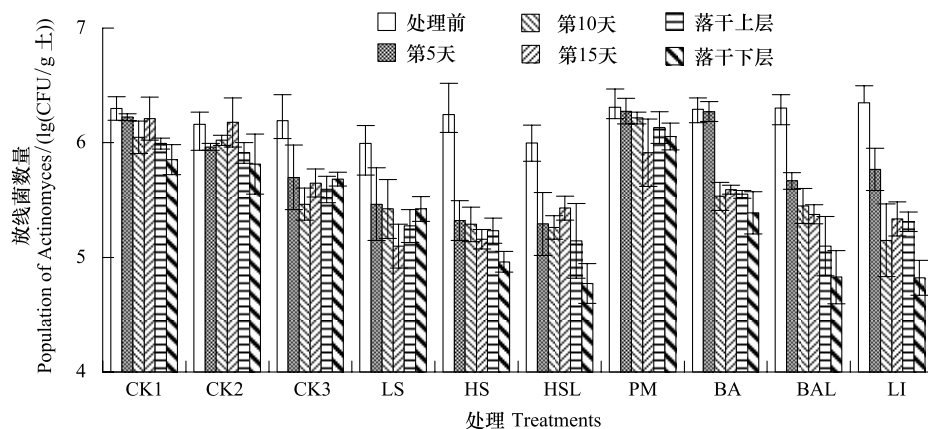


图 6 不同处理土壤中放线菌的数量

Fig.6 The populations of actinomycetes in soils of different treatments

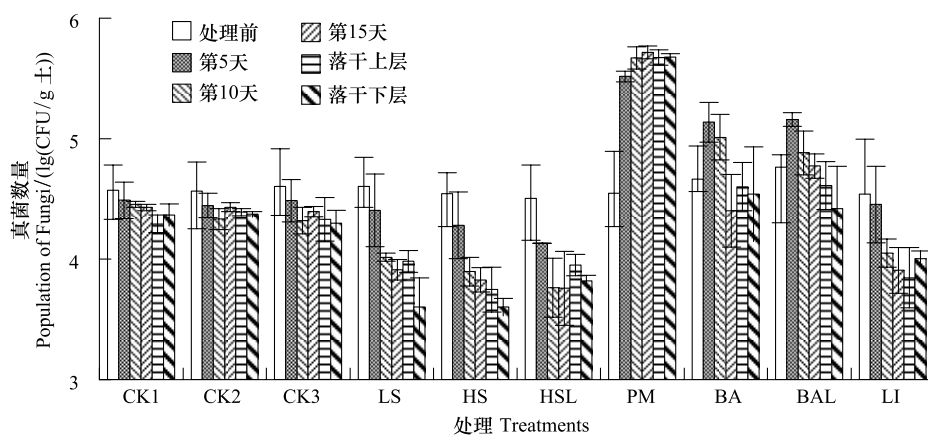


图 7 不同处理土壤中真菌的数量

Fig.7 The populations of fungi in soils of different treatments

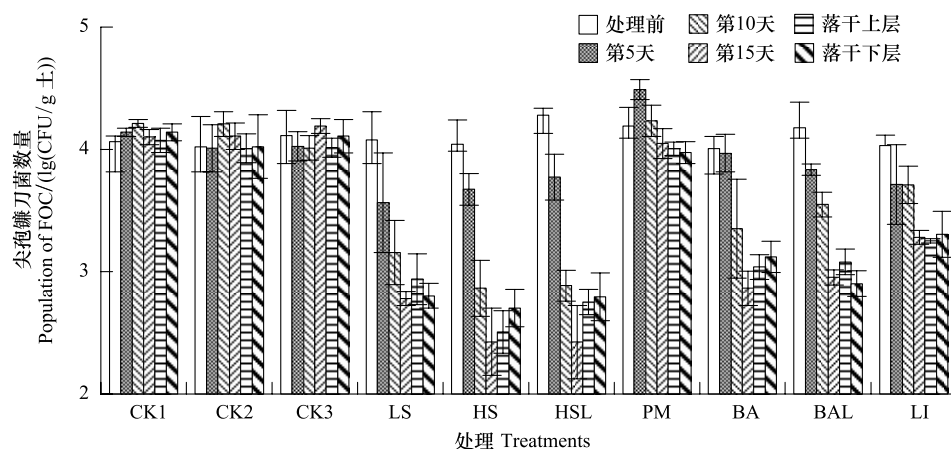


图 8 不同处理土壤中尖孢镰刀菌古巴专化型的数量

Fig.8 The populations of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (FOC) in soils of different treatments

2.4 土壤微生物总量

多种指标可反映土壤微生物总量,本试验采用

测定土壤总 DNA 的方法(图 9)。随着处理时间的增加,除 LI 处理之外所有淹水处理土壤 DNA 的含量

呈上升趋势;土壤落干后,LS、HS、PM 和 BA 处理上层土壤 DNA 的含量显著高于处理前土壤 DNA 含量,其中 PM 处理土壤 DNA 含量增加最大,是处理前的 2.6 倍,其余处理土壤 DNA 变化差异不显著,主要

原因可能是猪粪里含有大量的微生物。结果表明:土壤淹水及添加有机物料所造成的强烈还原条件并没有降低土壤中总的微生物含量,有些处理中总的土壤微生物含量反而增高。

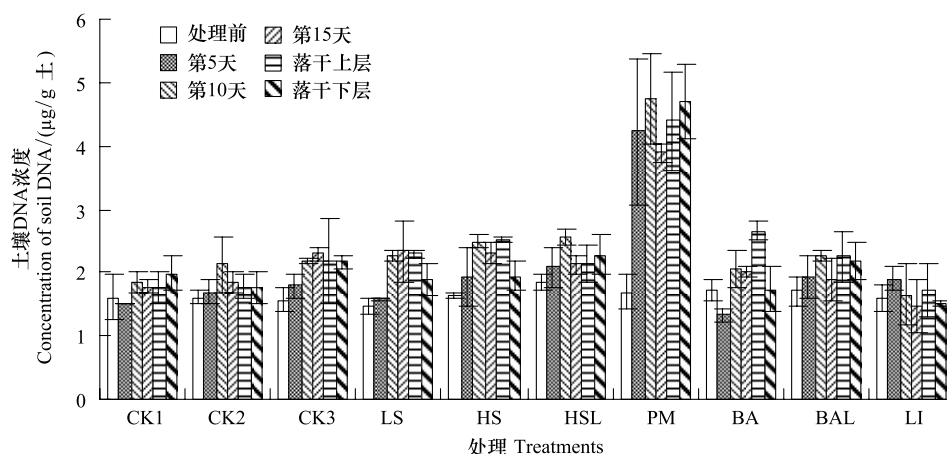


图9 不同处理土壤中 DNA 的含量

Fig.9 The amounts of soil DNA in different treatments

3 讨论

目前已有一些通过物理方法和改进栽培措施来防控土壤病原微生物的报道,具体方法主要有:土壤加热、微波法、作物轮作、合理灌溉、调整种植日期和种植密度、土壤淹水、焚烧植物残体、土壤深翻、暴晒以及一些种植设备,如温室大棚等^[20]。土壤淹水的方法很早就被人们提出,土壤淹水对土传病原菌具有不利影响的原因可能有:形成土壤的厌氧环境^[21]、CO₂浓度增高^[22]和许多微生物在厌氧环境中产生的对病原菌具有毒害作用的代谢产物,如氨、甲烷、有机酸和硫化氢等^[23]。

Stover 利用土壤淹水的方法在大尺度范围内控制 FOC 引起香蕉巴拿马枯萎病,土壤淹水 3—4 个月甚至更长时间,结果表明:当土壤中病原菌浓度较高或者存在对病原菌有利的未知因素时,淹水处理时不能够有效抑制病原菌的数量^[7]。本试验结果表明,单纯淹水在短期内对于 FOC 并无明显的抑制作用,而采用土壤淹水和添加有机物料产生强烈还原条件的方法能在短期内迅速杀灭土壤中的 FOC,HS 处理中 FOC 的数量由每克土 1.18×10^4 CFU 下降到 3.40×10^2 CFU。何欣等报道指出每克土 10^3 CFU 的 FOC 就是香蕉枯萎病的致病浓度^[4]。因此,预计土壤淹水及添加秸秆对于香蕉枯萎病的防治将具有很

好的效果。此外,夏季土壤长时间淹水处理对于防控棉花黄萎病具有较好的效果,而在冬天处理效果则不理想^[24]。本试验在亚热带地区进行,处理期间土壤温度为 25—40 °C,这可能是取得对 FOC 较好的抑制效果的原因。

还有报道指出,土壤中添加有机物、粪便和堆肥可以抑制植物病原菌和线虫,其机理主要有以下几个方面^[25-26]:(1)有机物料储存阶段产生了对病原微生物具有毒害作用的异种化合物;(2)有机物料加入到土壤中后被土壤中的微生物分解而形成的化合物,如氨和脂肪酸等;(3)有机物料增加了土壤中病原微生物拮抗菌的活性;(4)增强了植物的抗性;(5)改变了土壤的性质,使其不适合病原微生物的生存。同时,这种抑制作用还与有机物料的种类有关^[23, 25]。本试验结果表明,添加秸秆与添加甘蔗渣和新鲜猪粪相比,对于 FOC 的抑制效果更好。此外,当地农民常采用石灰来进行土壤的消毒,本试验结果在表明淹水条件下石灰对于 FOC 的杀灭作用要低于添加秸秆。

土壤淹水和添加有机物料可以降低土壤的氧化还原电位^[27],而有报道指出氧化还原电位与 pH 值呈负相关^[28],本试验结果表明所有淹水处理的 pH 值在第 5 天都有不同程度的提高,但随着处理时间的增加,未添加石灰的处理 pH 值逐渐下降至初始水

平。出现此种结果的可能原因是,土壤淹水并添加有机物料导致土壤的强烈还原状态,使得土壤 pH 值在短期内增高,同时厌氧条件下厌氧菌分解有机物不彻底,产生大量有机酸,这可能是随着处理时间的增加,土壤 pH 值逐渐下降的原因。大量的有机酸可能是本实验中病原菌被杀灭的重要原因。此外,在强烈还原条件下,土壤中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 被逐渐还原,可能产生 H_2S 等气体产物;同时土壤和有机物料里的氮素被还原成 NH_4^+ ,从而使得土壤中的 NH_4^+ 大量增加,挥发出来的氨也会相应增加,这可能也是抑制植物病原菌原因。对于强还原方法抑制植物病原菌的机理还需要进一步研究。

有报道指出有些细菌和放线菌可以引起植物的病害,但更多的细菌,如芽孢杆菌和假单胞菌,可以促进植物的生长^[29-30],土壤中还有一些细菌对病原菌具有潜在的抑制能力^[31]。由于植物的高 C/N 比的特性,更多的植物病害是由于真菌引起的^[32]。本试验结果表明,土壤淹水及添加有机物料对于土壤细菌的数量无明显影响,但可以减少土壤中的可培养真菌和放线菌的数量,然而这些处理并没有降低土壤总的微生物量,由此可以推断这些处理土壤中不可培养微生物,例如一些严格厌氧菌的数量可能增加了。

农田秸秆及其他有机废弃物的处理一直是我国农业面临的一个重大的问题^[33],目前对于秸秆的处理主要的焚烧,不仅造成了严重的环境污染,还造成了能源的浪费^[34]。本试验在国内首次提出采用土壤淹水同时添加有机物料快速创造土壤强烈还原条件的方法,不仅在短期内有效的抑制了土壤中的病原菌 FOC,而且还能解决农田废弃物污染问题,由于具有高效和环保的优点,本方法在生产上具有广阔的应用前景。

References:

- [1] Li W M, Qian C M, Mo Y W, Hu Y L, Xie J H. Tolerance of banana for fusarium wilt is associated with early H_2O_2 accumulation in the roots. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(55): 11378-11387.
- [2] Aurore G, Parfait B, Fahrasmene L. Bananas, raw materials for making processed food products. *Trends in Food Science and Technology*, 2009, 20(2): 78-91.
- [3] Xiao A P, You C P. Advances on control of banana vascular wilt. *Jiangxi Plant Protection*, 2005, 28(2): 67-69.
- [4] He X, Huang Q W, Yang X M, Ran W, Xu Y C, Shen B, Shen Q R. Screening and identification of pathogen causing banana fusarium wilt and the relationship between spore suspension concentration and the incidence rate. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(18): 3809-3816.
- [5] Liu C H, Wang Z H. Study on relationship between the content and incidence in field of head smut in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(1): 119-121.
- [6] Dita M A, Waalwijk C, Buddenhagen I W, Jr M T S, Kema G H J. A molecular diagnostic for tropical race 4 of the banana fusarium wilt pathogen. *Plant Pathology*, 2010, 59(2): 348-357.
- [7] Stover R H. Fusarial wilt (Panama disease) of Bananas and Other Musa Species. Kew, UK: Commonwealth Mycological Institute, 1962.
- [8] Van Den Berg N, Berger D K, Hein I, Birch P R J, Wingfield M J, Viljoen A. Tolerance in banana to Fusarium wilt is associated with early up-regulation of cell wall-strengthening genes in the roots. *Molecular Plant Pathology*, 2007, 8(3): 333-341.
- [9] Xiao T B, Xie S H, Rui K, Wu F Z. Occurrence and control methods of banana vascular wilt. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2006, 26(6): 53-54.
- [10] Zhong Q Y, Zhen Z H, Peng Z M, Lu D Q. The summary of research into biological control of banana fusarium wilt. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2007, (7): 64-65.
- [11] Hwang S C, Ko W H. Cavendish banana cultivars resistant to fusarium wilt acquired through somaclonal variation in Taiwan. *Plant Disease*, 2004, 88(6): 580-588.
- [12] Getha K, Vikineswary S, Wong W H, Seki T, Ward A, Goodfellow M. Evaluation of *Streptomyces* spp. strain g10 for suppression of Fusarium wilt and rhizosphere colonization in pot-grown banana plantlets. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2005, 32(1): 24-32.
- [13] Moore N Y, Pegg K G, Bentley S, Smith L J. Fusarium wilt of banana: Global problems and perspectives// Molina A B, Masdek N H, Liew K W, eds. *Banana fusarium wilt management: towards sustainable cultivation*. Los Baños: Inibap-Aspnet, 2001: 11-30.
- [14] Deng X, Li Q F, Hou X W, Wu C Y, Li G Y. Study on the microbial species diversity of rhizosphere and non-rhizosphere soils from different grades infected by banana fusarium wilt. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(30): 239-248.
- [15] Deng X, Li Q F, Hou X W, Wu C Y, Li G Y, Hong K. The correlation between soil factors and the occurrence of banana fusarium wilt. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(3): 446-454.
- [16] Ren X P. Diagnostic technique and control measures of fusarium oxysporum f. sp. cubense snyder and hansen race 4 in the banana. *Guangxi Plant Protection*, 2005, 18(1): 8-9.
- [17] Fang Z D. *Methods of Plant Pathology Research*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1998.

- [18] Sun E J, Su H J, Ko W H. Identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 4 from soil or host tissue by cultural characters. *Phytopathology*, 1978, 68: 1672-1673.
- [19] Dineen S M, Aranda R, Anders D L, Robertson J M. An evaluation of commercial DNA extraction kits for the isolation of bacterial spore DNA from soil. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 109(6): 1886-1896.
- [20] Katan J. Physical and cultural methods for the management of soil-borne pathogens. *Crop Protection*, 2000, 19(8/10): 725-731.
- [21] Blok W J, Lamers J G, Termorshuizen A J, Bollen G J. Control of soilborne plant pathogens by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. *Phytopathology*, 2000, 90(3): 253-259.
- [22] Bruehl G W. *Soil-Borne Plant Pathogens*. New York: MacMillan Publishing Company, 1987.
- [23] Runia W T, Molendijk L P G. Physical methods for soil disinfection in intensive agriculture: Old methods and new approaches. *Acta Horticulturae*, 2010, 883: 249-258.
- [24] Pullman G S, Devay J E. Effect of soil flooding and paddy rice culture, on the survival of *Verticillium dahliae* and incidence of *Verticillium* wilt in cotton. *Phytopathology*, 1981, 71(12): 1285-1289.
- [25] Bailey K L, Lazarovits G. Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil and Tillage Research*, 2003, 72(2): 169-180.
- [26] Oka Y. Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments-A review. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(2): 101-115.
- [27] Liu Z G. Research and application of soil oxidation-reduction potential. *Progress in Soil Science*, 1983, (4): 1-10.
- [28] Yu T R, Li S H. Research on the process of oxidation-reduction in paddy soil-the factors influenced oxidation-reduction potential. *Acta Pedologica Sinica*, 1957, 5(1): 97-110.
- [29] Mayak S, Tirosh T, Glick B R. Effect of wild-type and mutant plant growth-promoting rhizobacteria on the rooting of mung bean cuttings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1999, 18(2): 49-53.
- [30] Ramos B, García J A L, Probanza A, Barrientos M L, Mañero F J G. Alterations in the rhizobacterial community associated with European alder growth when inoculated with PGPR strain *Bacillus licheniformis*. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(1): 61-68.
- [31] Boulter J I, Trevors J T, Boland G J. Microbial studies of compost: bacterial identification, and their potential for turfgrass pathogen suppression. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2002, 18(7): 661-671.
- [32] Brussaard L, Ruiters P C, Brown G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(3): 233-244.
- [33] Ju C H. The difficulties and countermeasures of straw treatment in China. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(6): 221-224.
- [34] Zhu J L, Wang T J, Deng J J, Jiang A J, Liu D Q. An emission inventory of air pollutants from crop residue burning in Yangtze river Delta region and its application in simulation of a heavy haze weather process. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 3045-3055.

参考文献:

- [3] 肖爱萍, 游春平. 香蕉枯萎病防治进展. *江西植保*, 2005, 28(2): 67-69.
- [4] 何欣, 黄启为, 杨兴明, 冉炜, 徐阳春, 沈标, 沈其荣. 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. *中国农业科学*, 2010, 43(18): 3809-3816.
- [5] 刘长华, 王振华. 玉米丝黑穗病田间接种浓度与发病率关系的研究. *玉米科学*, 2008, 16(1): 119-121.
- [9] 肖彤斌, 谢圣华, 芮凯, 吴凤芝. 香蕉枯萎病的发生及防控对策. *热带农业科学*, 2006, 26(6): 53-54.
- [10] 钟群有, 郑卓辉, 彭增明, 陆德泉. 香蕉枯萎病生物防治研究概述. *广东农业科学*, 2007, (7): 64-65.
- [14] 邓晓, 李勤奋, 侯宪文, 武春媛, 李光义. 香蕉枯萎病不同感病级别植株根际与非根际土壤微生物物种多样性研究. *中国农学通报*, 2012, 28(30): 239-248.
- [15] 邓晓, 李勤奋, 侯宪文, 武春媛, 李光义, 洪葵. 蕉园土壤因子与香蕉枯萎病发病的相关性研究. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 446-454.
- [16] 任小平. 香蕉枯萎病检测技术和防治措施. *广西植保*, 2005, 18(1): 8-9.
- [17] 方中达. *植病研究方法* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [27] 刘志光. 土壤氧化还原电位的研究及其应用. *土壤学研究进展*, 1983, (4): 1-10.
- [28] 于天仁, 李松华. 水稻土中氧化还原过程的研究(I) 影响氧化还原电位的条件. *土壤学报*, 1957, 5(1): 97-110.
- [33] 鞠昌华. 我国农作物秸秆处理的困境与对策. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 221-224.
- [34] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 姜爱军, 刘冬晴. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 3045-3055.