钾肥与生物有机肥配施防治香蕉枯萎病效果初探

秦艳梅[1]， 张志红[2*]， 刘春卯[1]

(1. 河北省微生物研究所，保定 071051；2. 江西省科学院生物资源研究所，南昌 330096)

摘要 通过盆栽试验研究了生物有机肥与氯化钾和硫酸钾配施防治香蕉枯萎病的效果。试验结果表明，两种肥料配施促进了香蕉苗生长，降低了香蕉枯萎病病情指数，提高了防病效果，生物有机肥与 KCl 和 K_2SO_4 配施防病效果比单施生物有机肥分别高 60%和 90%。利用 T-RFLP 分析土壤细菌 DNA 多样性，生物有机肥与钾肥配施提高了细菌三个遗传多样性指数，增加了土壤中芽胞杆菌种类。FAME 分析也发现生物有机肥以及与钾肥配施促进革兰氏阳性细菌和放线菌繁殖，抑制革兰氏阴性细菌和真菌生长。生物有机肥与钾肥配施，优势互补，改善了土壤微生物群落结构，有利于提高防病效果。

关键词 生物有机肥； 香蕉枯萎病； 钾肥； 微生物群落结构

中图分类号： S 144.1 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3969/j.issn.0529 - 1542.2017.03.011

Effects of the combination of bio-fertilizer and potassium fertilizer on control of banana *Fusarium* wilt

Qin Yanmei[1]， Zhang Zhihong[2]， Liu Chunmao[1]

(1. *Hebei Research Institute of Microbiology*, *Baoding* 071051, *China*; 2. *Biological Resources Institute*, *Jiangxi Academy of Sciences*, *Nanchang* 330096, *China*)

Abstract The control effects of banana *Fusarium* wilt (*Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense*, Foc) by bio-fertilizer (F), and its combination with potassium fertilizers of KCl and K_2SO_4 were studied. The soil microbial community diversity was investigated by FAME and T-RFLP methods under greenhouse conditions. The results showed that bio-fertilizer and the combinations both promoted plant growth, reduced *Fusarium* wilt compared to the sterilized bio-fertilizer (control). The combinations of bio-fertilizer with KCl and K_2SO_4 increased control effect against wilt by 60% and 90% compared to bio-fertilizer treatment alone. The combinations improved soil *Bacillus* species and bacterial diversity indexes including richness, Shannon diversity and Shannon evenness. FAME results demonstrated that the combinations promoted Gram-positive bacteria and actinomycetes, inhibited Gram-negative bacteria and fungi compared to control and bio-fertilizer treatment alone. The results suggested that the combinations of bio-fertilizer with potassium fertilizer could effectively control banana *Fusarium* wilt by enhancing the soil bacterial diversity and improving microbial community structure.

Key words bio-fertilizer; banana *Fusarium* wilt; potassium fertilizer; microbial community structure

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* 引起的香蕉土传病害，是世界范围内分布广、毁灭性最强的植物病害之一[1]。香蕉枯萎病具有很强的传染性，一旦扩散蔓延则难以控制，发生严重时可使整个香蕉园遭到毁灭性打击。目前还没有发现有效防治香蕉枯萎病的化学药剂，而种植抗病品种、与水生作物轮作和施用生防微生物是比较有效的途径[2]。生防微生物应用较多的有荧光假单孢菌 *Pseudomonas fluorescens*、链霉菌 *Streptomyces violaceusniger*、枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis*、哈茨木霉 *Trichoderma harzianum* 等[3]。但是单纯生防微生物防治香蕉枯萎病速度慢且效果不稳定，可能是这些微生物作为外来物种受土壤条件影响大、不易在土壤中定殖和发挥效果[4]。国内外研究者将生防微生物与有机物质结合使用，期望实现作用持

收稿日期： 2016 - 06 - 26 **修订日期：** 2016 - 08 - 02
基金项目： 国家自然科学基金(41001150)
* 通信作者 E-mail:312665645@qq.com

久的防病效果[5-6]。

香蕉是典型的喜钾作物，在整个生长周期吸钾量是一般作物的数倍。有学者研究了香蕉对氮、磷和钾养分需求情况：根系每吸收一份氮，平均吸收磷0.14份，钾4.14份[7]。钾不仅是植物生长必需元素，同时与植物的健康关系密切。美国农业部把含钾较高的化合物硅酸钾作为生防制剂在有机农业上应用，免除其在食品内/表的限量要求，只要在水解状态中不超过1%、并按农业规范使用即可[8]。研究者对钾与植物健康的关系进行了全面的研究和描述，涉及2 400多个试验，包括400多种病害，钾肥可提高小麦、油菜、番茄等作物的产量和品质，同时还能明显控制其病害的发生[9-11]。本研究分析两种钾肥配合生物有机肥对香蕉枯萎病的控制效果和对土壤微生态环境的影响，从土壤微生物群落结构变化揭示生物防治香蕉枯萎病的机理，为提高土传病害控制效果提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试肥料和土壤

生物有机肥：自然风干后的堆肥作为液体菌剂吸附载体(堆肥由鸡粪和稻秆厌氧发酵55 d制得)，添加本研究所筛选并培养的胶质芽胞杆菌 *Bacillus mucilaginosus* 和巨大芽胞杆菌 *B. megaterium* 等制成生物有机肥。该生物有机肥中芽胞杆菌含量为0.4×10^8 cfu/g(两种芽胞杆菌含量分别为0.15×10^8 cfu/g和0.25×10^8 cfu/g)，全氮21.30 g/kg，全磷15.30 g/kg，全钾21.40 g/kg，有机质42.3%，含水量26%左右。

钾肥：氯化钾和硫酸钾，均为普通化学试剂。

土壤：采自广东省广州市周边农场蔬菜地，为砂壤土，有机质含量19.00 g/kg，pH 7.25，全N、P、K分别为1.26、0.51和23.88 g/kg。

1.1.2 供试病原菌和香蕉

尖孢镰刀菌古巴专化型 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4(FocR4)由华南农业大学资源环境学院姜子德教授提供；巴西蕉 *Musa acuminata* AAA Cavendish cv. Brazil 营养杯组培苗由广东省农业科学院果树研究所提供。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验采用盆栽方式在温室内进行。塑料盆大小为高14 cm，直径18 cm，每盆装风干土2.5 kg。试验设置4个处理：①灭菌堆肥(CK)，每千克土用量8 g；②生物有机肥(F)，每千克土用量8 g；③氯化钾＋生物有机肥(F＋KCl)；④硫酸钾＋生物有机肥(F＋K_2SO_4)。③与④的钾肥用量为每千克土施用K_2O 0.2 g，生物有机肥用量均为每千克土用量8 g。堆肥灭菌条件：121℃蒸汽灭菌30 min，间隔1 d再灭菌1次。在处理中灭菌堆肥与生物有机肥的干重相同，所有肥料全部作为底肥与土混匀，土壤浇水平衡5 d后移栽香蕉，选择生长大小一致蕉苗移植。每盆种植2株蕉苗，每个处理12盆，每4盆为一组。香蕉移栽5 d后采用伤根浇灌法接种病原菌，病原菌菌液中孢子浓度为10^5个/mL，每盆10 mL。香蕉苗栽培60 d后收获蕉苗，观察地上部茎、叶黄化和枯萎情况，切开根部记录褐变程度。香蕉枯萎病分为以下5个标准：0级，植株无枯黄症状；1级，植株下部叶片出现轻微的枯黄症状，嫩叶完好，少部分根系轻微褐变，茎部出现水渍状褐变；2级，植株下部叶片出现明显的枯黄症状，但嫩叶完好，根系出现褐变，茎部和假茎部出现水渍状褐变；3级，整个植株出现枯黄症状，根系褐变腐烂，茎部和假茎部褐变连片，少数叶柄出现红褐；4级，植株出现枯萎死亡症状，根系严重褐变腐烂[12]。取0～25 cm土壤层中的香蕉根系，不同处理分别取4株蕉苗，将根系连根带土采集，混合后放入无菌自封袋带回实验室4℃保存，分析微生物多样性[6]。

$$\text{病情指数}=\sum\frac{(\text{各级发病数}\times\text{该级代表数})}{\text{调查总数}\times\text{最高级代表值}}\times100;$$

$$\text{防病效果}(\%)=\frac{\text{对照病情指数}-\text{处理病情指数}}{\text{对照病情指数}}\times100。$$

1.2.2 利用末端限制性片段长度多样性(T-RFLP)分析土壤细菌DNA

末端限制性片段长度多样性(terminal restriction fragment length polymorphism，T-RFLP)操作过程：用美国MO-BIO公司土壤DNA提取试剂盒提取DNA，扩增引物为细菌16S rDNA通用引物，其中正向引物(8～27F)：5′-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3′，反向引物(1 378～1 401R)：5′-CGGTGTGTACAAGGCCCGGGAAC-3′，正向引物5′端用6-羧基二乙酸荧光素(FAM)标记。PCR反应体系为50 μL：正向/反向引物各1 μL，模板DNA 4 μL，dNTPs混合液4 μL，Mg^{2+}溶液4 μL，10×Buff-

er 5 μL,*Taq* DNA 聚合酶(TaKaRa 公司) 1 μL,用灭菌超纯水补足至 50 μL。PCR 反应条件为:95℃ 3 min;95℃ 1 min,60℃ 30 s, 72℃ 1.5 min,共 35 个循环;72℃ 10 min。PCR 产物用 Tiangen 公司 DNA 回收试剂盒纯化。纯化后的 PCR 产物用 *Hha*Ⅰ(TaKaRa 公司) 消化,50 μL 反应体系中: *Hha* Ⅰ酶 2 μL,DNA 43 μL,10×buffer 5 μL,37℃下酶切 4 h,然后升温至 65℃将酶灭活[13]。酶切产物由上海基康生物技术有限公司测序分析,把检测结果上传至 http://trflp.limnology.wisc.edu/assignment.jsp 进行微生物多样性分析。根据结果,计算丰富度(richness)、Shannon 多样性(Shannon diversity)和 Shannon 均匀度(Shannon evenness)。

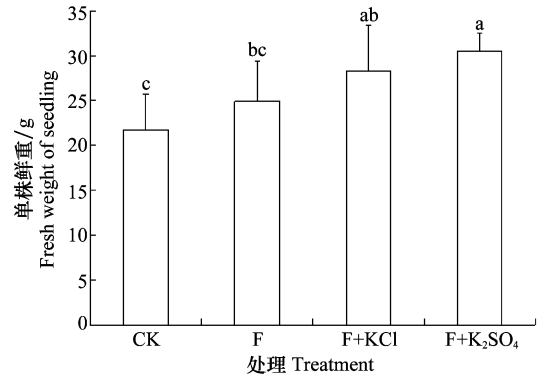
1.2.3 *脂肪酸甲酯法(FAME)分析土壤微生物群落结构*

将 15 mL 0.2 mol/L KOH-甲醇溶液和相当于烘干重 3 g 的新鲜土壤加到 35 mL 离心试管中。混合均匀,在 37℃下温育 1 h,加 3 mL 1.0 mol/L 醋酸于离心管中,混匀。加入 10 mL 正己烷,使 FAME 转到有机相中,480 g 离心 10 min。将正己烷相转到干净试管中,在 N_2 气流下使溶剂挥发。将 FAMEs 溶解在 0.5 mL 1∶1(*V*/*V*)正己烷∶甲基叔丁基醚中,进行 GC-MS 分析。测试采用日本岛津 QP-2010GC-MS 仪,色谱柱为 DB-5(30 m×0.25 mm)石英弹性毛细管柱。采用程序升温 100～260℃,4℃/min。界面温度为 250℃,汽化室温度 250℃,离子源温度 200℃,电子能量 70 eV[14]。质谱图的确认采用 NIST62LIB 及 NIST12LIB 谱库检索及 EPA/NIH 质谱标准图相结合。试验数据用 Excel 2003 和 SAS V8 统计软件分析。

2　结果与分析

2.1　钾肥与生物有机肥配施对香蕉植株生长和枯萎病发生的影响

在含有钾肥和生物有机肥的土壤中培育香蕉苗 60 d 后测定各处理的单株鲜重,结果表明,施用灭菌堆肥(CK)的香蕉苗单株鲜重显著低于其他处理;生物有机肥(F)在钾肥协助下可促进蕉苗的生长(图 1)。硫酸钾与生物有机肥配施,单株蕉苗鲜重分别比施用灭菌堆肥(CK)和生物有机肥(F)显著增加 40.7%和 22.5%,氯化钾与生物有机肥配施单株蕉苗鲜重分别比 CK 和 F 高 30.3%和 13.5%。单独或配合钾肥施用生物有机肥可显著降低香蕉枯萎病的病情指数,提高预防效果(图 2),硫酸钾或氯化钾与生物有机肥配施的防病效果是单独施用生物有机肥 2 倍以上。因此,钾肥不仅可以促进香蕉生长,更可以协助生物有机肥抵抗枯萎病侵害,提高防病效果,并且硫酸钾效果好于氯化钾。比较香蕉枯萎病病情指数,CK 处理香蕉的病情指数显著高于其他处理,钾肥与生物有机肥配施明显减轻了香蕉发病程度,提高了防病效果(图 2)。



CK: 灭菌堆肥; F: 生物有机肥; F+KCl: 生物有机肥加氯化钾肥料; F+K_2SO_4: 生物有机肥加硫酸钾肥料, 不同小写字母表示处理间在0.05水平达到显著性差异。下同

CK: Sterilized compost; F: Bio-organic fertilizer; F+KCl: Bio-organic fertilizer and KCl; F+K_2SO_4: Bio-organic fertilizer and K_2SO_4: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below

图 1　不同施肥处理对香蕉苗鲜重的影响

Fig. 1　Effects of different fertilizers on seedling fresh weight

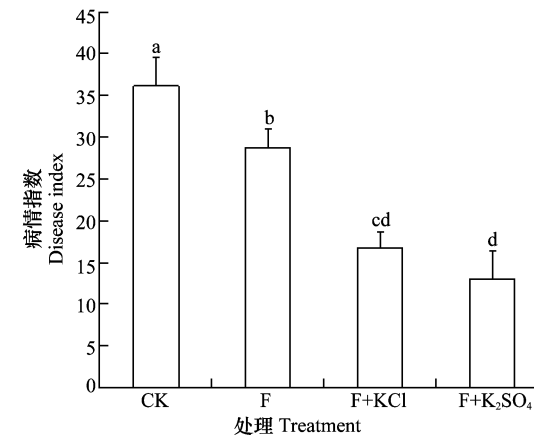


图 2　不同施肥处理对香蕉枯萎病病情指数的影响

Fig. 2　Effects of different fertilizers on banana wilt disease index

2.2　不同施肥处理对土壤细菌遗传多样性的影响

不同施肥处理下土壤细菌的遗传多样性指数不同(图 3),施用灭菌堆肥(CK)的土壤丰富度、多样性和均一度均低于其他施肥处理。土壤细菌遗传多样性指数高,代表细菌种类多,因而土壤生态系统的稳

定性、和谐性和缓冲能力也较好。采用 T-RFLP 分析土壤细菌 DNA，结果表明，不同施肥处理下芽胞杆菌的种类差异最显著，施用灭菌堆肥(CK)的土壤仅有 3 种芽胞杆菌，而单独或与钾肥配施生物有机肥后，土壤中芽胞杆菌的种类明显增加(表 1)。土壤中芽胞杆菌种类的增加与生物有机肥中众多活的芽胞杆菌有关，CK 中的堆肥进行了灭菌处理，施入土壤时没有添加外来细菌，也没有添加任何可刺激土壤中芽胞杆菌繁殖的物质，CK 中芽胞杆菌种类较少，是土壤自身含有；钾肥与生物有机肥配施后，提高了土壤中芽胞杆菌数量并促进了该属细菌的繁殖。

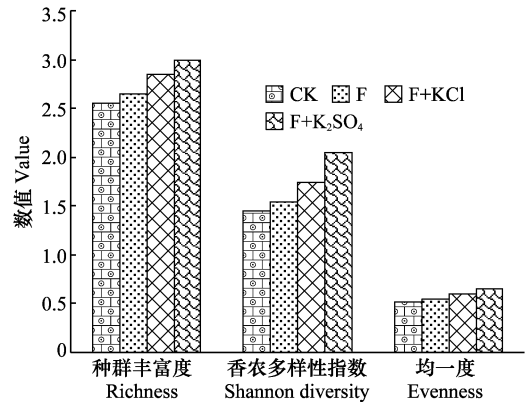


图 3 不同施肥处理对土壤细菌遗传多样性指数的影响

Fig. 3 Genetic diversity index of soil bacteria under different fertilizer treatments

表 1 T-RFLP 分析不同处理土壤中可能存在的芽胞杆菌

Table 1 Possible existing *Bacillus* spp. in soils of different treatments by using T-RFLP method

处理 Treatment	可能芽胞杆菌名称 Name of *Bacillus*	种类数量/种 Number
CK	*B. arsenicoselenatis*, *B. sphaericus*, *B. marismortui*	3
F	*B. vortex*, *B. tipchiralis*, *B. thermoleovorans*, *B. thermodenitrificans*, *B. thermoamylovorans*, *B. sphaericus* *B. pasteurii*, *B. arsenicoselenatis*, *B. caldolyticus*, *B. caldovelox*, *B. firmus*, *B. fusiformis*	12
F+KCl	*B. thermodenitrificans*, *B. thermoamylovorans*, *B. subtilis B. sphaericus*, *B. pumilus*, *B. pasteurii*, *B. methanolicus*, *B. marismortui*, *B. macroides*, *B. licheniformis*, *B. fusiformis*, *B. firmus*, *B. fastidiosus*, *B. benzoevorans*, *B. caldolyticus*, *B. caldovelox*	16
F+K_2SO_4	*B. caldovelox*, *B. caldolyticus*, *B. fastidiosus*, *B. sphaericus*, *B. thermodenitrificans*, *B. thermoamylovorans*, *B. thermoleovorans*, *B. subtilis*, *B. pumilus*, *B. pasteurii*, *B. methanolicus*, *B. macroides*, *B. licheniformis*, *B. alcalophilus*, *B. fusiformis*, *B. firmus*, *B. amylolique faciens*, *B. badius*, *B. benzoevorans*	19

2.3 不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响

土壤中不同类型的微生物均有其特征脂肪酸，表 2 列出了几种类型的微生物特征脂肪酸峰值百分数之和。不同施肥处理对革兰氏阳性细菌的影响比较明显，单独生物有机肥或与钾肥配施处理革兰氏阳性细菌(GP)均高于施用灭菌堆肥(CK)，这可能与生物有机肥本身含有多种芽胞杆菌有密切关系，该结果在一定程度上也反映了这些细菌的定殖效果，因为芽胞杆菌属于革兰氏阳性细菌。革兰氏阴性细菌(GN)变化规律与 GP 相反，单独生物有机肥或与钾肥配施处理其革兰氏阴性细菌的脂肪酸甲脂峰值(FAMEs)均低于施用灭菌堆肥(CK)。放线菌 FAMEs 峰值变化与 GP 细菌相同，单独生物有机肥或与钾肥配施可以提高 FAMEs 峰值百分比；真菌 FAMEs 峰值变化趋势与 GN 变化规律一致，但是处理之间的差异均没有达到显著水平。同时施用生物有机肥和钾肥，改变了微生物群落结构，特别是提高了 GP 比例。

表 2 不同施肥处理下土壤微生物群落中特征 FAMEs 峰值百分数[1)]

Table 2 Comparison of fatty acid peak area percentage under different fertilizations

处理 Treatment	FAMEs 峰值/% FAMEs peak			
	革兰氏阳性细菌(GP) Gram-positive bacterium	革兰氏阴性细菌(GN) Gram-negative bacterium	放线菌 Actinomycete	真菌 Fungus
CK	(15.73±1.23)b	(21.37±0.25)a	(0.66±0.64)c	(21.77±0.45)a
F	(15.96±1.21)b	(19.92±0.89)b	(1.11±0.12)b	(20.42±0.44)a
F+KCl	(16.34±0.21)b	(21.22±0.78)a	(1.43±0.11)b	(20.59±1.23)a
F+K_2SO_4	(18.67±1.02)a	(18.77±0.54)b	(1.80±0.23)a	(21.29±0.56)a

1) 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

3　讨论

生物有机肥对土传病害具有一定防治效果,但是防病效果不理想,主要表现为效果较慢,随着发病时间延长,渐渐失去对病原菌的控制。因此,生物有机肥防治土传病害常出现“一茬有效,二茬无效;本地有效,外地无效;此作物有效,彼作物无效”的现象。要提高生物有机肥预防病害的效果,还需要同时提高植物本身抵抗病原菌能力,而钾肥具有这种作用。钾肥提高植物抗病能力主要有两个原因:①调控植物代谢过程,通过改变植株体内酶、酚和类黄酮等含量提高植物抗病能力[15-17]。②改变植物形态结构,促进植物组织形成坚韧的角质层、表皮层和厚实的细胞壁,促进木质化和硅质化等抵抗病原菌入侵[18]。也有学者从根际微生物角度研究钾肥提高植物抗病效果,如小麦施用钾肥后可有效提高根际纹枯病菌拮抗细菌指数,从而控制纹枯病的发生[9]。刘晓燕等研究认为施用氯化钾引起玉米根际土壤微生物区系(尤其是真菌数目)的变化是抑制玉米茎腐病发生的机制之一[19]。本研究中,生物有机肥与钾肥配施,不仅促进香蕉生长,还明显提高防治枯萎病的能力。通过 T-RFLP 和 FAME 技术分析发现,单独生物有机肥以及与钾肥配施,均提高了土壤细菌多样性和均度,特别是改变了细菌结构组成,芽胞杆菌种类更丰富,革兰氏阳性细菌增加显著,这些指标变化与防病效果趋势相同。因此,可以初步判断,生物有机肥(含有 10 种以上具有拮抗作用的芽胞杆菌)进入土壤后建立了稳定的优势细菌群落,提高了土壤抑制病原菌繁殖效果。在此基础上施用钾肥,可通过调节植物根系分泌物含量和种类,进一步加强和优化了土壤细菌群落结构,效果更好。研究中施用硫酸钾比氯化钾效果好,可能与硫酸钾肥料还能提供一定的硫营养有关。土传病害的防治一方面与土壤微生物数量和多样性有关,另外还与微生物组成、优势种关系密切。应用 PCR-DGGE 研究发现,土壤抑病机理不是改变根际细菌多样性,而是改变细菌群落组成[20]。FAME 可作为革兰氏阴性细菌(GN)、革兰氏阳性细菌(GP)、放线菌以及真菌的生物标记物,用各自特征脂肪酸峰面积与总脂肪酸面积的百分比值来表征各微生物类群在土壤微生物群落中的比例[21-22]。Park 等研究芽胞杆菌 *B. subtilis* 和 *B. licheniformis* 防治辣椒疫病时发现,两种生防细菌改变了土壤微生物群落结构,提高了土壤 GP 含量,降低了 GN,分析结果与本研究一致[23]。Larkin 比较了不同类型生物制剂对土壤微生物的影响,认为含 GP 细菌多的生物制剂,应用到土壤中明显提高细菌含量,FAME 检测也能发现土壤中 GP 细菌明显增多[24]。芽胞杆菌制剂能迅速提高土壤细菌数量,主要与芽胞杆菌抗逆性、抗病性和较强的定殖能力有关。

钾肥提高生物有机肥防治香蕉枯萎病效果研究,还需要进一步深入分析钾肥施用量、施用方法以及对病原菌和根际不同种类土著微生物数量的影响。

参考文献

[1] 魏岳荣,黄秉智,杨护,等. 香蕉镰刀菌枯萎病研究进展[J]. 果树学报, 2005, 22 (2): 154 - 159.

[2] Grosch R, Junge H, Krebs B, et al. Use of *Bacillus subtilis* as a biocontrol agent Ⅲ. Influence of *Bacillus subtilis* on fungal root diseases and on yield in soilless culture [J]. Journal of Plant Diseases & Protection, 1999, 106(6):568 - 580.

[3] 杨秀娟,杜宜新,甘林,等. 香蕉枯萎病生物防治和抗病育种研究进展[J]. 中国果树, 2008(5):42 - 45.

[4] Getha K, Vikineswary S, Wong W H, et al. Evaluation of *Streptomyces* spp. strain g10 for suppression of *Fusarium* wilt and rhizosphere colonization in pot-grown banana plantlets [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2005,32: 24 - 32.

[5] Saravanant T, Muthusmy M, Marimuthu T. Development of integrated approach to manage the fusarial wilt of banana[J]. Crop Protection, 2003, 22:1117 - 1123.

[6] 付琳,阮云泽,沈宗专,等. 生物有机肥对连作香蕉根际土壤可培养细菌区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012,35(6): 82 - 88.

[7] 樊小林, 梁有亮, 王孝强, 等. 香蕉营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 71.

[8] Bekker T F, Kaiser C, van der Merwe R, et al. *In-vitro* inhibition of mycelial growth of several phytopathogenic fungi by soluble potassium silicate [J]. South African Journal of Plant & Soil, 2006,23(3): 169 - 172.

[9] 熊桂林,陈怀谷, 李伟, 等. 不同施肥处理对小麦纹枯病发生及根际微生物的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(4): 414 - 418.

[10] 栾非时,郭亚芬,崔喜波. 不同施肥对保护地番茄土壤性状及番茄筋腐病发生的影响[J]. 东北农业大学学报, 1999, 30(3): 240 - 244.

[11] 李银水,余常兵,廖星,等. 施肥对油菜菌核病发生的影响[J]. 中国油料作物学报,2013,35(3): 290 - 294.

[12] 许志刚. 普通植物病理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 236 - 262.

(下转 96 页)

al responses to warming and increased precipitation among three contrasting grasshopper species [J]. Global Change Biology, 2009, 15(10):2539 - 2548.

[8] Carly Z, Emily A R, Jonathan A N. Climate change and voltinism in Californian insect pest species: sensitivity to location, scenario and climate model choice [J]. Global Change Biology, 2012, 18(18):2771 - 2780.

[9] 霍治国，李茂松，王丽，等. 气候变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学，2012，45(10):1926 - 1934.

[10] 张泉，乔璋，熊玲，等. 意大利蝗生物学特性研究[J]. 新疆农业科学，1995(6):256 - 257.

[11] 范福来. 新疆蝗虫灾害治理[M]. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社，2011:86 - 90.

[12] 王晗，于非，扈鸿霞，等. 新疆意大利蝗适生区的气候变化特征分析[J]. 中国农业气象，2014，35(6):611 - 621.

[13] 辛晓歌，吴统文，张洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍[J]. 气候变化研究进展，2012，8(5):378 - 382.

[14] 张海娟，陈勇，黄烈健，等. 基于生态位模型的薇甘菊在中国适生区的预测[J]. 农业工程学报，2011，27(S1):413 - 418.

[15] 吴庆明，王磊，朱瑞萍，等. 基于 MaxEnt 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例[J]. 生态学报，2016，36(12):3758 - 3764.

[16] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems [J]. Science, 1988, 240(4857):1285 - 1293.

[17] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modeling, 2006,190(3 - 4):231 - 259.

[18] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 2003, 421(6918): 37 - 42.

[19] Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421 (6918):57 - 60.

[20] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, et al. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century [J]. Science, 2008,320:1768 - 1771.

[21] Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, et al. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests [J]. Nature,2011,479(7374):517 - 520.

[22] Speight M R, Hunter M D, Watt A D. Ecology of insects: concepts and applications [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1999.

[23] Hickling R, Roy D B, Hill J K, et al. A northward shift of range margins in British Odonata [J]. Global Change Biology, 2005, 11(3):502 - 506.

[24] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. Ecological Modelling, 2000,135(2 - 3): 147 - 186.

[25] 任金龙. 意大利蝗生物学及生命表的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学，2015.

[26] 陈素华，乌兰巴特尔，吴向东. 内蒙古草地蝗虫生存与繁殖对气候变化的响应[J]. 自然灾害学报，2007,16(3):66 - 69.

[27] 吴瑞芬. 我国蝗虫发生的气候背景及长期预测研究[D]. 北京:中国农业大学，2005.

[28] 戈峰. 应对全球气候变化的昆虫学研究[J]. 应用昆虫学报，2011，48(5):1117 - 1122.

（责任编辑：田 喆）

（上接 69 页）

[13] Lukow T, Dunfield P F, Liesack W. Use of the T-RFLP technique to assess spatial and temporal changes in the bacterial community structure within an agricultural soil planted with transgenic and non-transgenic potato plants [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2000, 32(3): 241 - 247.

[14] Cavigelli M A, Robertson G P, Klug M J. Fatty acid methyl ester (FAME) profiles as measures of soil microbial community structure [J]. Plant and Soil, 1995, 170(1): 99 - 113.

[15] 左丽娟，赵正雄，杨焕文，等. 增加施钾量对红花大金元烤烟部分生理生化参数及“两黑病”发生的影响[J]. 作物学报，2010，36(5): 856 - 862.

[16] 李文娟，何萍，金继运. 氯化钾对玉米茎腐病抗性反应中酚类物质代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(3): 508 - 514.

[17] 刘晓燕，何萍，金继运. 氯化钾对玉米根系糖和酚酸分泌的影响及其与茎腐病菌生长的关系[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(5): 929 - 934.

[18] 刘晓燕，何萍，金继运. 钾在植物抗病性中的作用及机理的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报，2006,12(3): 445 - 450.

[19] 刘晓燕，金继运，何萍，等. 氯化钾抑制玉米茎腐病发生与土壤微生物关系初探[J]. 植物营养与肥料学报，2007,13(2): 279 - 285.

[20] Messiha N A S, van Diepeningen A D, Wenneker M, et al. Biological soil disinfestation (BSD), a new control method for potato brown rot, caused by *Ralstonia solanacearum* race 3 biovar 2 [J]. European Journal of Plant Pathology, 2007,117(4): 403 - 415.

[21] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review [J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2): 111 - 129.

[22] 蔡燕飞，廖宗文. FAME 法分析施肥对番茄青枯病抑制和土壤健康恢复的效果[J]. 中国农业科学，2003，36(8): 922 - 927.

[23] Park K C, Lim J H, Kim S D, et al. Effects of phytophthora blight-antagonistic microorganisms *Bacillus subtilis* AH18 and *Bacillus licheniformis* K11 on the soil microbial community [J]. Journal of Applied Biological Chemistry, 2009, 52: 121 - 125.

[24] Larkin R P. Relative effects of biological amendments and crop rotations on soil microbial communities and soilborne diseases of potato [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(6): 1341 - 1351.

（责任编辑：田 喆）