

### 3 种杀线虫剂对香蕉土壤线虫群落结构的影响

苏兰茜<sup>1</sup>, 王康<sup>1</sup>, 阮云泽<sup>2</sup>, 白亭玉<sup>2</sup>, 李荣<sup>1\*</sup>, 沈其荣<sup>1</sup>

(1. 江苏省固体有机废弃物资源化高技术重点实验室, 国家有机类肥料工程技术研究中心, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 海南大学农学院, 海口 570228)

**摘要** 比较不同杀线虫剂对植物寄生线虫的杀灭效果及其对土壤线虫群落的影响, 对于杀线虫剂的选择具有指导意义。本研究比较了 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉粉剂、1.8%阿维菌素乳油和 10%噻唑膦颗粒剂 3 种杀线虫剂对植食性线虫的防治效果及其对土壤线虫群落结构的影响。结果表明: 植物寄生线虫是连作蕉园优势营养类群。苗期时只有阿维菌素表现出对植食性线虫的杀灭效果; 蕾期 3 种杀线虫剂均表现出显著的杀灭效果, 植食性线虫的数量较 CK 分别减少 49.3%、17.4%和 84.2%; 苗期时 1.8%阿维菌素乳油表现出对螺旋线虫属和肾形线虫属的杀灭效果, 10%噻唑膦颗粒剂处理中肾形属丰度较 CK 减少了 20.3%; 蕾期相比于 CK, 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉粉剂、1.8%阿维菌素乳油和 10%噻唑膦颗粒剂处理中植物寄生线虫类群数均有所降低, 各处理对优势属螺旋线虫属和肾形线虫属均有杀灭作用, 减少的比例分别为 48.2%、40.6%、95.7%和 50.1%、7.1%、84.5%, 差异显著。3 种杀线虫剂处理均降低了土壤中的自由生活线虫种类和丰度。苗期 1.8%阿维菌素乳油处理能显著增加食细菌线虫的数量, 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉粉剂和 10%噻唑膦颗粒剂处理的自由生活线虫成熟指数 *MI* 和多样性指数 *H'* 较 CK 显著降低; 香蕉蕾期处理间 *MI* 没有显著差异, 10%噻唑膦颗粒剂处理的植物寄生线虫成熟指数 *PPI* 较 CK 显著减少, 均匀度指数 *J'* 显著高于其他处理。综上所述, 10%噻唑膦颗粒剂的效果最好, 持效期长, 对植食性线虫有明显的杀灭效果, 对土壤线虫类群多样性和线虫成熟指数无显著影响, 适宜在香蕉种植园推广使用。

**关键词** 淡紫拟青霉; 阿维菌素; 噻唑膦; 植食性线虫; 群落结构

**中图分类号:** S 432.45, S 482.51 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.03.015

### The effects of three nematicides on the community structure of nematodes in the soil of banana plantation

Su Lanxi<sup>1</sup>, Wang Kang<sup>1</sup>, Ruan Yunze<sup>2</sup>, Bai Tingyu<sup>2</sup>, Li Rong<sup>1</sup>, Shen Qirong<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Solid Organic Waste Utilization, National Engineering Research Center for Organic-based Fertilizers, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Agriculture, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract** In order to choose the best nematicides, it is significant to compare the effects of different nematicides on the community structure of plant-parasitic nematodes and total nematodes. The effects of three nematicides,  $5 \times 10^8$  spores/g *Paecilomyces lilacinus* DP, 1.8% abamectin EC and 10% fosthiazate GR, were investigated by the field experiment in this study. The results showed that the plant-parasitic nematodes were the dominant trophic groups in the continuous-cropping banana plantation. For plant-parasitic nematodes, 1.8% abamectin EC treatment showed nematocidal ability in the seedling stage, while in budding stage all three treatments showed significant nematocidal ability, the number of which was significantly decreased by 49.3%, 17.4% and 84.2% compared to the control. The number of *Helicotylenchus* and *Rotylenchulus*, the dominant genera in plant-parasitic nematodes, was significantly reduced in 1.8% abamectin EC treatment in seedling stage, while the abundance of *Rotylenchulus* in 10% fosthiazate GR treatment was decreased by 20.3% compared to the control. In budding stage, the three treatments,  $5 \times 10^8$  spores/g *Paecilomyces lilacinus* DP, 1.8% abamectin EC and 10% fosthiazate

收稿日期: 2015-04-05

修订日期: 2015-05-01

基金项目: 海南省应用技术研发与示范推广专项 (ZDXM2014038); 国家自然科学基金 (41101231); 国家重点基础研究发展计划 (2015CB150506); 南京农业大学 SRT 项目 (1413C10)

\* 通信作者 E-mail: lirong@njau.edu.cn

GR reduced the genera number of plant-parasitic nematodes and showed nematocidal ability to *Helicotylenchus* and *Rotylenchulus*, the number of which was significantly reduced by 48.2%, 40.6%, 95.7% and 50.1%, 7.1%, 84.5%, respectively, compared to the control. All treatments reduced the diversity and abundance of free-living nematodes in soil. In seedling stage, 1.8% abamectin EC significantly increased the number of bacteria-feeding nematodes; the maturity index (*MI*) and Shannon index (*H'*) in  $5 \times 10^8$  spores/g *Paecilomyces lilacinus* DP and 10% fosthiazate GR treatments were significantly decreased compared to the control. In budding stage, maturity index (*MI*) showed no significant difference among treatments while plant parasite index (*PPI*) in 10% fosthiazate GR treatment was significantly decreased compared to the control and the evenness (*J'*) significantly increased compared with other treatments. In conclusion, 10% fosthiazate GR is the best nematicide with strong nematocidal effect on plant-parasitic nematodes and with long-lasting effect. Moreover, compared to the control, it showed no significant difference in the diversity and maturity index of soil nematodes.

**Key words** *Paecilomyces lilacinus*; abamectin; fosthiazate; plant-parasitic nematode; community structure

香蕉是许多发展中国家的主要经济来源<sup>[1]</sup>,然而香蕉种植生产受许多病虫害影响<sup>[2]</sup>,其中植物寄生线虫是危害香蕉且最具破坏性的害虫之一,危害最严重的植物寄生线虫包括根结线虫属、短体线虫属、垫刃线虫属、茎线虫属和螺旋线虫属<sup>[3-4]</sup>等,其侵染导致香蕉严重减产,限制了香蕉产业的可持续发展<sup>[5-6]</sup>。研究表明,所有香蕉品种都是很多常见植物寄生线虫的寄主,因此,防治植食性线虫的危害对于香蕉生产具有重要的意义。

根结线虫病害的防治措施主要包括农业防治、物理防治、化学防治和生物防治。用于杀线虫的农药统称为杀线虫剂,其中,阿维菌素(abamectin)是20世纪80年代以来开发的具有广谱杀虫、杀螨、杀线虫活性的生物农药<sup>[7]</sup>。噻唑膦(fosthiazate)是一种具有触杀及内吸传导性能的新型杀线虫药剂<sup>[8]</sup>。生物防治中,淡紫拟青霉(*Paecilomyces lilacinus*)能够产生几丁质酶和丝氨酸蛋白酶,并通过这两种酶的作用破坏根结线虫卵壳,从而使菌丝侵入根结线虫的卵并寄生于卵内,被认为是具有应用前景的线虫生防真菌<sup>[9]</sup>。国内外都已有许多关于淡紫拟青霉、阿维菌素和噻唑膦防治根结线虫的研究,但主要关注的是单个药剂对根结线虫的防效<sup>[8,10-12]</sup>,缺少对这3种杀线虫药剂防治香蕉植食性线虫效果的比较研究,更缺少不同杀线虫药剂对蕉园土壤线虫群落结构影响的研究。

土壤线虫数量繁多,种类丰富,分布广泛,形态和习性多样,是重要的土壤生物类群<sup>[13]</sup>。其在土壤食物网中占多个营养级,在土壤腐食食物网中占据中心位置;同时在土壤有机质的分解、植物营养元素的矿化及养分循环中起着重要作用<sup>[14]</sup>,因此,可以用土壤线虫群落组成及其群落指数来指示土壤质量<sup>[15]</sup>。本研究首先比较了这3种杀线虫药剂对植食性线虫的防治效果,再进一步比较了这3种常用

杀线虫药剂对土壤线虫群落结构及生态环境的影响,以期为实际生产中线虫的防治提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试香蕉品种为‘农科1号’,由海南万钟实业有限公司提供。

供试药剂包括5亿活孢子/g淡紫拟青霉粉剂(广州农冠生物科技有限公司生产);1.8%阿维菌素乳油(上海亚泰农资有限公司);10%噻唑膦颗粒剂(日本石原产业株式会社生产)。

### 1.2 田间试验

田间试验于2013年5月至2014年6月在海南省乐东县万钟公司万亩农场进行,属于热带季风气候。供试田块已连续种植香蕉10年以上,枯萎病发病率大于60%。土壤性质如下:pH 6.58,有机质含量5.35 g/kg,全氮含量1.27 g/kg,速效磷和速效钾的含量分别为70.6 mg/kg和373 mg/kg。

试验共设4个处理:①5亿活孢子/g淡紫拟青霉粉剂用PDA液体培养基发酵培养3d后稀释成500倍液于种苗时灌根,单次施用量为5 kg/667 m<sup>2</sup>;②1.8%阿维菌素乳油,种苗时稀释2000倍灌根;③10%噻唑膦颗粒剂,将药剂与40~50 kg细干土拌匀,均匀撒于土表,再翻入15~20 cm耕层,施药当天定植香蕉苗,喷水。种苗一个月后于滴水线处撒施,与土拌匀后喷水溶解。单次施用量为2 kg/667 m<sup>2</sup>;④空白对照CK。整个生育期共施药2次,种苗时和种苗1个月后各施药1次,共4个处理,3次重复,随机区组排列。各小区长28 m,宽3 m,面积约84 m<sup>2</sup>,每小区种植香蕉苗20株。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 土样采集

试验分3个时期采集样品,分别为处理前,第1

次施药后 3 个月(苗期)和香蕉抽蕾期,各小区随机选择 5 株未见枯萎病发生的健康香蕉,用土钻于植株滴水线附近随机选取 3 点钻取距地表约 5~20 cm 处土样,各处理 3 个小区的土样分别混合,并放入自封袋带回实验室,剔除石块、大中型土壤动物及根茬等残体后过 2 mm 筛,4℃ 保存备用。

### 1.3.2 线虫收集

采用浅盘法<sup>[16]</sup>分离线虫。称取 100 g 土样,室温下分离 48 h 后,收集线虫悬液,在体视显微镜下进行计数。

### 1.3.3 线虫形态鉴定

使用 OLMPUS CX41RF 显微镜鉴定计数,根据线虫的口针、食道及尾部形态等特征,将线虫分为食细菌线虫、食真菌线虫、植食性线虫和捕食杂食性线虫 4 个功能类群<sup>[17-18]</sup>。

### 1.3.4 线虫生态指数的计算

自由生活线虫成熟指数<sup>[19]</sup> (maturity index)  $MI = \sum c \cdot p_i \cdot p_i$  (仅包括自由生活线虫)

植物寄生线虫成熟指数<sup>[19]</sup> (plant parasite index)  $PPI = \sum c \cdot p_i \cdot p_i$  (仅包括植物寄生线虫)

Shannon 多样性指数<sup>[20]</sup> (Shannon index)  $H' = -\sum p_i (\ln p_i)$

均匀度指数<sup>[21]</sup> (evenness)  $J' = H' / H'_{\max}$  ( $H'_{\max}$  为  $\ln S$ )

式中,  $c \cdot p_i$  是种  $i$  被赋予的 cp 值, cp 值 (colonizer-persister value) 是根据自由生活线虫在生态演替中的不同生活策略分别赋值为 1~5<sup>[19]</sup>。Bongers<sup>[19]</sup> 提出,根据线虫在  $r$ -对策到  $K$ -对策的生活史策略连续谱中的位置,可将线虫划分为 5 个类群,称为不同的 cp (colonizer-persister) 类群: cp 1, 为典型的机会主义者 (opportunist), 世代时间极短, 卵量巨大, 在食物丰富的条件下种群暴发, 极耐污染和环境压力; cp 2, 也是机会主义者, 世代时间短, 卵量大, 较耐污染和环境压力; cp 3, 世代时间较长, 对环境压力较敏感; cp 4, 世代时间长, 对环境压力敏感; cp 5, 则为典型的  $K$ -对策者, 世代时间很长, 卵量小, 对污染和环境压力极为敏感。  $p_i$  是种  $i$  的个体数占总个体数的比例。  $S$  为鉴定的线虫属数。

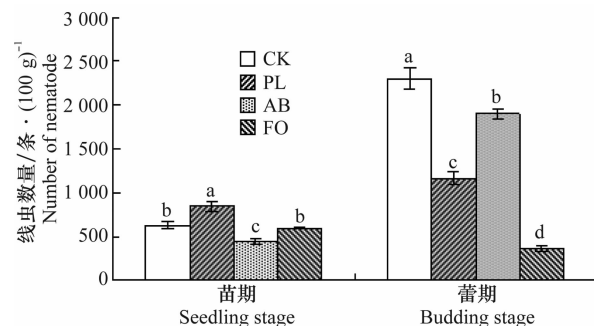
### 1.4 数据分析

各个生育期数据独立分析, 数据统计分析使用 Excel 和 SPSS 13.0, 通过 Duncan 新复极差法检验处理间差异的显著性水平, 在  $P < 0.05$  水平被认为有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对香蕉不同生育期土壤植食性线虫丰度的影响

不同处理在香蕉不同生育期对土壤中植食性线虫丰度的影响如图 1 所示, 苗期相比于对照, 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理未表现出对植食性线虫的杀灭效果, 反而增加了该类线虫的数量, 为 845 条/100 g 干土, 较 CK 显著增加 34.6%; 10% 噻唑膦 GR 处理同样未表现出对植食性线虫的杀灭效果, 其数量与 CK 相比无显著差异; 1.8% 阿维菌素 EC 处理则表现出了较好的杀灭效果, 植食性线虫数量最少, 为 442 条/100 g 干土, 较 CK 显著减少 29.6%, 较淡紫拟青霉和噻唑膦处理显著减少 47.7% 和 25.8%。蕾期, 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP、1.8% 阿维菌素 EC 和 10% 噻唑膦 GR 3 个处理对植食性线虫均表现出了杀灭效果, 与 CK 相比, 植食性线虫数量分别减少了 49.3%、17.4%、84.2%, 且差异显著; 其中 10% 噻唑膦 GR 处理的杀灭效果最优, 植食性线虫数量最少, 为 363 条/100 g 干土, 较 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 1.8% 阿维菌素 EC 处理显著减少 68.8% 和 80.9%。



CK: 对照(不施杀线剂); PL: 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP; AB: 1.8% 阿维菌素 EC; FO: 10% 噻唑膦 GR。同一生育期, 不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

CK: Control (no nematicide); PL: 500 million spores/g *Paecilomyces lilacinus* DP; AB: 1.8% abamectin EC; FO: 10% fosthiazate GR. In the same growth stage, different letters indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). The same below

图 1 不同处理对香蕉不同生育期土壤植食性线虫丰度的影响

Fig. 1 Effects of different nematicides on the abundance of plant-parasitic nematodes in soil at different growth periods of banana

### 2.2 不同处理对香蕉不同生育期土壤植食性线虫属丰度的影响

香蕉苗期, CK 以及经 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP、1.8% 阿维菌素 EC 和 10% 噻唑膦 GR 处理

的植物寄生线虫类群数分别为 5、4、4、4 种,其中螺旋线虫属 (*Helicotylenchus*) 和肾形线虫属 (*Rotylenchulus*) 为优势属(表 1)。相比于 CK,各处理对根结线虫属 (*Meloidogyne*) 和短体线虫属 (*Pratylenchus*) 线虫没有杀灭效果,但对螺旋线虫属、肾形线虫属、茎线虫属 (*Ditylenchus*) 和矮化线虫属 (*Tylenchorhynchus*) 的杀灭效果均较显著,其中经 1.8% 阿维菌素 EC 处理后,数量分别降低了 32.6%、31.1%、

100%、100%,对螺旋线虫属的杀灭效果显著优于其他处理,对肾形线虫属的杀灭效果与 10% 噻唑膦 GR 无显著差异,但优于 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理;5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理后,茎线虫属和矮化线虫属没有被检出,但是螺旋线虫属和肾形线虫属的数量增加了;经 10% 噻唑膦 GR 处理后,肾形线虫属、茎线虫属和矮化线虫属的数量分别减少了 20.3%、100%、100%。

表 1 不同处理对香蕉不同生育期土壤植食性线虫属丰度的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of different nematicides on the abundance of plant-parasitic nematodes community in soil at different development stages of banana

属 Genus	线虫数量/条 · (100 g) <sup>-1</sup> Number of nematodes			
	苗期 Seedling stage			
	CK	PL	A B	FO
螺旋线虫属 <i>Helicotylenchus</i>	(144±5.88)b	(201±25.06)a	(97±14.73)c	(216±18.12)a
肾形线虫属 <i>Rotylenchulus</i>	(429±24.17)b	(593±30.00)a	(295±24.90)c	(342±23.67)c
短体线虫属 <i>Pratylenchus</i>	(0±0.00)b	(20±8.56)ab	(36±18.78)a	(12±12.48)ab
根结线虫属 <i>Meloidogyne</i>	(16±5.36)a	(34±7.12)a	(19±8.60)a	(29±13.12)a
茎线虫属 <i>Ditylenchus</i>	(33±8.31)a	(0±0.00)b	(0±0.00)b	(0±0.00)b
矮化线虫属 <i>Tylenchorhynchus</i>	(10±5.97)a	(0±0.00)b	(0±0.00)b	(0±0.00)b

属 Genus	线虫数量/条 · (100 g) <sup>-1</sup> Number of nematodes			
	蕾期 Budding stage			
	CK	PL	AB	FO
螺旋线虫属 <i>Helicotylenchus</i>	(738±188.09)a	(382±85.54)b	(438±56.79)b	(32±21.79)c
肾形线虫属 <i>Rotylenchulus</i>	(1 471±41.02)a	(726±6.24)c	(1 366±31.94)b	(229±14.29)d
短体线虫属 <i>Pratylenchus</i>	(65±56.47)a	(24±26.97)a	(44±55.34)a	(87±31.12)a
根结线虫属 <i>Meloidogyne</i>	(39±8.93)ab	(40±12.43)ab	(58±10.06)a	(16±6.40)b
茎线虫属 <i>Ditylenchus</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a
矮化线虫属 <i>Tylenchorhynchus</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a

1)表中数据为平均值±标准差。各生育期数据独立分析。CK:对照(不施杀线剂);PL:5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP;AV:1.8%阿维菌素 EC;FO:10%噻唑膦 GR。同一生育期同行数据后不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Data in the table are means±standard deviation. Data of different growth stages are analyzed independently. CK: Control (no nematicide); PL:500 million spores/g *Paecilomyces lilacinus* DP; AB:1.8% abamectin EC; FO:10% fosthiazate GR. In the same growth stage, different letters in the same line indicate significant differences between treatments( $P<0.05$ ). The same below.

香蕉蕾期,5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP、1.8%阿维菌素 EC 和 10%噻唑膦 GR 处理对优势属螺旋线虫属和肾形线虫属均表现了很好的杀灭效果。与 CK 相比,经 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理后,上述 2 属线虫数量分别显著减少了 48.2%、50.1%,对螺旋线虫属的杀灭效果与 1.8%阿维菌素 EC 处理差异不显著,对肾形线虫属的杀灭效果优于 1.8%阿维菌素 EC 处理;1.8%阿维菌素 EC 处理后,数量分别显著降低了 40.6%和 7.1%;10%噻唑膦 GR 处理后,螺旋线虫属、肾形线虫属和根结线虫属数量分别显著降低了 95.7%、84.5%、58.9%,杀灭效果优于其他处理。所有处理均未体现出对短体线虫属杀灭效果。

### 2.3 不同处理对香蕉不同生育期土壤自由生活线虫丰度的影响

不同处理对香蕉不同生育期土壤自由生活线虫

丰度的影响如图 2 所示。苗期,1.8%阿维菌素 EC 对食细菌线虫、食真菌线虫和捕食杂食性线虫均没有杀灭效果,食细菌线虫的数量与对照相比,反而增加了 87%,为 289 条/100 g 干土,食细菌线虫和食真菌线虫数量显著高于其他处理;5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理后,食细菌线虫和食真菌线虫的数量分别为 40 条/100 g 干土和 8 条/100 g 干土,较 CK 分别减少 74.0%和 73.0%,且差异显著,但对捕食杂食性线虫影响不显著;10%噻唑膦 GR 对食细菌线虫、食真菌线虫和捕食杂食性线虫均有杀灭效果,处理后线虫数量分别为 92.4 和 38 条/100 g 干土,较 CK 分别减少 40.3%、87.0%和 56.5%,差异达显著水平,除食细菌线虫数量显著高于 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理外,其他食性线虫无显著差异。

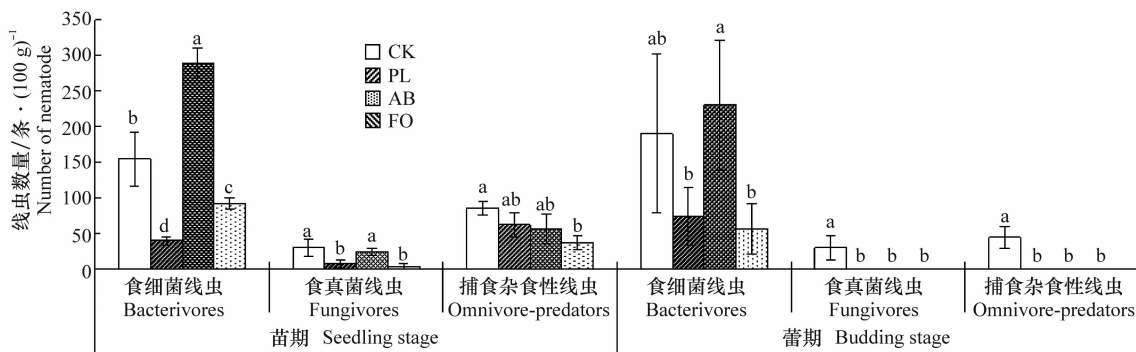


图2 不同处理对香蕉不同生育期土壤自由生活线虫数量的影响

Fig. 2 Effects of different nematicides on the abundance of free-living nematodes in different growth periods of banana

香蕉蕾期,1.8%阿维菌素 EC 处理后未检测到食真菌线虫和捕食杂食性线虫,表现出较好的杀灭效果,但对食细菌线虫影响不显著。5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理后,食真菌线虫和捕食杂食性线虫均未检测到,食细菌线虫数量较 CK 分别减少 60.7%和 70.3%,表明 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 对这 3 类自由生活线虫的杀灭效果较好,且 2 个处理之间差异不显著,其中 10%噻唑膦 GR 处理的杀灭效果最明显,3 类自由生活线虫数量均最少。

#### 2.4 不同处理对香蕉不同生育期土壤自由生活线虫属丰度的影响

香蕉苗期,对照以及经 5 亿活孢子/g 淡紫拟青

霉 DP、1.8%阿维菌素 EC 和 10%噻唑膦 GR 处理后的自由生活线虫类群数分别为 8、6、7、5 种,其中中杆属(*Mesorhabditis*)为优势属(表 2)。各处理对不同类型的线虫杀灭效果不同,1.8%阿维菌素 EC 对头叶属(*Cephalobus*)的杀灭效果显著,但对中杆属不仅没有杀灭效果反而刺激其生长,处理后该属线虫的数量达到 286 条/100 g 干土,较 CK 显著增加了 130.6%;5 亿活孢子/g 淡紫青霉 DP 仅对中杆属的杀灭效果较好,与 CK 相比,处理后使其数量降低了 81.5%,与其他处理无显著差异;与 CK 相比,10%噻唑膦 GR 能显著降低头叶属、孔咽属和锯齿属线虫的数量,与其他处理无显著差异,但对其他属无明显的杀灭效果。

表 2 不同处理在香蕉不同生育期对土壤自由生活线虫不同属丰度的影响

Table 2 Effects of different nematicides on the abundance of different genera for free-living nematodes in different growth periods of banana

营养类群及属 Trophic group /genus		线虫数量/条·(100 g) <sup>-1</sup> Number of nematodes			
		苗期 Seedling stage			
		CK	PL	AB	FO
食细菌线虫 Bacterivores	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	(124±36.03)b	(23±12.93)c	(286±16.01)a	(86±11.43)b
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	(27±10.92)a	(17±12.44)ab	(0±0.00)b	(0±0.00)b
	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	(3±2.75)a	(0±0.00)a	(3.15±5.45)a	(6±5.25)a
食真菌线虫 Fungivores	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	(13±7.94)a	(0±0.00)a	(17±9.80)a	(0±0.00)a
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	(18±5.51)a	(8±5.51)a	(8±4.93)a	(4±4.00)a
捕食杂食性线虫 Omnivore-predators	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	(29±7.23)a	(12±3.21)ab	(14±8.74)ab	(5±5.51)b
	中矛属 <i>Mesodorylaimus</i>	(40±8.00)a	(45±25.25)a	(33±13.49)a	(32±12.35)a
	锯齿属 <i>Prionchulus</i>	(18±3.48)a	(7±5.89)ab	(10±9.51)ab	(0±0.00)b
营养类群及属 Trophic group /genus		线虫数量/条·(100 g) <sup>-1</sup> Number of nematodes			
		蕾期 Budding stage			
		CK	PL	AB	FO
食细菌线虫 Bacterivores	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	(119±75.76)a	(45±22.91)a	(107±71.60)a	(37±27.37)a
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	(72±36.73)a	(30±36.75)a	(123±102.34)a	(20±12.35)a
	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a
食真菌线虫 Fungivores	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	(31±17.50)a	(0±0.00)b	(0±0.00)b	(0±0.00)b
捕食杂食性线虫 Omnivore-predators	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	(45±15.39)a	(0±0.00)b	(0±0.00)b	(0±0.00)b
	中矛属 <i>Mesodorylaimus</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a
	锯齿属 <i>Prionchulus</i>	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a	(0±0.00)a

香蕉蕾期,对照以及经 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP、1.8%阿维菌素 EC 和 10%噻唑膦 GR 处理后的自由生活线虫类群数分别为 4、2、2、2 种。与 CK 相比,各处理除对垫咽属和孔咽属有显著的杀灭效果外,对其他属的杀灭效果不显著(表 2)。

### 2.5 不同处理对香蕉不同生育期土壤线虫生态指数的影响

香蕉苗期,与 CK 相比,经 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理的自由生活线虫成熟指数 *MI* 显著减少;经 1.8%阿维菌素 EC 处理后的 *MI* 与 CK 无显著差异,显著高于 5 亿活孢子/g

淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理;各处理的植物寄生线虫成熟指数 *PPI* 差异不显著;CK、1.8%阿维菌素 EC、10%噻唑膦 GR 和 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 处理的 *H'* 依次减小,处理间差异显著;淡紫拟青霉处理的 *J'* 显著低于其他 3 个处理。

香蕉蕾期,各处理的 *MI* 和 *H'* 差异不显著;CK 的 *PPI* 显著高于 10%噻唑膦 GR 处理,与 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 1.8%阿维菌素 EC 处理的 *PPI* 无显著差异;10%噻唑膦 GR 处理的 *J'* 显著高于其他 3 个处理,体现了线虫多样性的稳定和均匀。

表 3 不同处理在香蕉不同生育期对土壤线虫生态指数的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of different nematocides on the ecological index of soil nematodes in different growth periods of banana

生育期 Stage	处理 Treatment	<i>MI</i> Maturity index	<i>PPI</i> Plant parasite index	<i>H'</i> Shannon index	<i>J'</i> Evenness
苗期 Seedling stage	CK	(0.77±0.07)a	(2.87±0.03)a	(1.74±0.06)a	(0.68±0.03)a
	5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 500 million spore/g <i>Paecilomyces lilacinus</i> DP	(0.42±0.06)b	(2.88±0.02)a	(1.24±0.03)d	(0.55±0.01)b
	1.8%阿维菌素 EC 1.8% Abamectin EC	(0.78±0.14)a	(2.87±0.05)a	(1.59±0.03)b	(0.69±0.03)a
	10%噻唑膦 GR 10% Fosthiazate GR	(0.41±0.06)b	(2.87±0.08)a	(1.38±0.01)c	(0.68±0.05)a
	抽蕾期 Budding stage	CK	(0.24±0.10)a	(2.95±0.01)a	(1.20±0.14)a
抽蕾期 Budding stage	5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 500 million spore/g <i>Paecilomyces lilacinus</i> DP	(0.08±0.06)a	(2.90±0.04)ab	(1.04±0.16)a	(0.63±0.03)b
	1.8%阿维菌素 EC 1.8% Abamectin EC	(0.16±0.08)a	(2.91±0.01)ab	(1.07±0.13)a	(0.62±0.04)b
	10%噻唑膦 GR 10% Fosthiazate GR	(0.18±0.09)a	(2.86±0.06)b	(1.28±0.09)a	(0.72±0.05)a

1)表中数据为平均值±标准差。各生育期数据独立分析。同一生育期不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。*MI*:自由生活线虫成熟指数;*PPI*:植物寄生线虫成熟指数;*H'*:Shannon 多样性指数;*J'*:均匀度指数。

Data in the table are means±standard deviation. Data of different growth stages are analyzed independently. In the same growth stage, different letters indicate significant differences between treatments( $P < 0.05$ ). *MI*:maturity index; *PPI*:plant parasite index; *H'*:Shannon index; *J'*:Evenness.

### 3 讨论

土壤中线虫按照食性分为食细菌线虫、食真菌线虫、植食性线虫和捕食杂食性线虫 4 个功能类群,本研究结果显示植食性线虫是所有处理的优势类群,本试验土壤连作种植香蕉多年,大量施用化肥,作物品种单一,可能是导致植物寄生线虫数量增加的原因<sup>[22-24]</sup>。钟爽等<sup>[25]</sup>和杨树泉等<sup>[26]</sup>的研究也得出随连作年限增加,植物寄生线虫的数量逐渐增加,食细菌线虫、食真菌线虫和捕食杂食性线虫的数量逐

渐降低。

本试验中香蕉苗期时 1.8%阿维菌素 EC 即表现出对植食性线虫优异的杀灭效果,这与 Putter 等<sup>[27]</sup>的结论符合,1.8%阿维菌素 EC 对根结线虫的防效长达 2 个月,而 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理在蕾期才表现出明显的杀灭效果。抽蕾期 3 种杀线剂均表现出明显的杀灭效果,且 10%噻唑膦 GR 处理的效果最优。香蕉苗期各处理均一定程度上减少了植食性线虫的类群数,其中对肾形线虫属和螺旋线虫属的杀灭效果最显

著。据报道,肾形线虫分布广,寄主多,其可侵染多种经济作物<sup>[28]</sup>。螺旋线虫是世界上 10 个重要的植物寄生线虫属之一,发生普遍,能取食广泛的寄主种类<sup>[29]</sup>。这两类线虫对香蕉生长危害大,研究报道淡紫拟青霉对多种植物寄生线虫有很强的寄生能力<sup>[30]</sup>,噻唑膦对根结线虫、短体线虫、茎线虫等有特效,可广泛应用于蔬菜、果树、药材等<sup>[31]</sup>。本研究中,在香蕉苗期 1.8%阿维菌素 EC 表现出对优势属螺旋线虫属和肾形线虫属明显的杀灭效果,10%噻唑膦 GR 处理明显抑制了肾形线虫属的数量。香蕉蕾期 3 个处理均表现出对优势属螺旋线虫属和肾形线虫属很好的杀灭效果,10%噻唑膦 GR 效果最优,其同时对根结属线虫表现出显著防效,这与刘玉霞等<sup>[32]</sup>的研究类似。芮凯等<sup>[33]</sup>的研究也认为阿维菌素乳油对土壤中根结线虫具有中等水平的控制能力,速效性好、同时具有一定的持效性;淡紫拟青霉粉剂在香蕉生长前期防效较差,而在生长中期的防效逐渐上升并保持稳定。朱金文等<sup>[34]</sup>在对黄瓜根结线虫的防治试验中也得出 10%噻唑膦 GR 有较好的防效。不仅如此,杀线虫剂的正确使用对作物有一定的增产效果,郑永利等<sup>[12]</sup>发现 10%噻唑膦 GR 对芹菜无明显药害,产量随处理浓度升高而增加,而 1.8%阿维菌素 EC 虽然增产效果及短期防效均较理想,但持效期短,根系发病症状十分明显。

Ferris<sup>[35]</sup>的研究表明,食细菌线虫和食真菌线虫通过取食细菌、真菌等微小生物,影响微生物生长和新陈代谢活动,改变微生物群落结构,从而调节有机物的分解速度与养分的周转速率,提高植物对土壤养分的利用率。本研究中,香蕉苗期施用 1.8%阿维菌素 EC 显著促进了食细菌线虫的繁殖,主要是优势属中杆属的丰度增加了,而 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 对食细菌线虫和食真菌线虫均有明显的杀灭作用,可见无论是生物型杀线剂还是化学型杀线剂处理后对土壤自由生活线虫群落结构都产生显著影响,降低了土壤食物网中微生物捕食者的数量,对土壤微生态环境有一定的影响。 $MI$  指数和  $PPI$  指数反映土壤线虫群落功能结构特征,用以评价人类干扰活动对土壤线虫群落的影响<sup>[36]</sup>, $MI$  指数反映自由生活线虫的成熟度, $PPI$  指数反映植物寄生线虫的成熟度,低的  $MI$  值表明土壤生态系统扰动强烈,反之则表明土壤生态系统趋于稳定<sup>[37]</sup>。本研究结果表明,苗期时 5 亿活

孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理的  $MI$  显著降低,这说明这两个处理对土壤扰动程度大,降低了自由生活线虫在土壤线虫群落中的数量,扰乱了土壤线虫群落和食物网的结构复杂性。蕾期  $MI$  没有显著变化,说明蕾期各处理和 CK 的土壤受干扰程度一样,但 10%噻唑膦 GR 处理的  $PPI$  显著减少了,说明 10%噻唑膦 GR 能更好地保持土壤的稳定性,减少对土壤的干扰。线虫的种类数能够反映土壤的生境多样性<sup>[38]</sup>,Shannon 多样性指数 ( $H'$ )<sup>[23]</sup> 给予稀有种更大的权重, $H'$  值越大,多样性越大,均匀度指数 ( $J'$ )<sup>[24]</sup> 越大表示种类越均匀。Ferris<sup>[35]</sup>认为扰动程度高的生态系统中生物多样性和丰富度较低。苗期 1.8%阿维菌素 EC 处理的土壤扰动小,生物多样性丰富;而 5 亿活孢子/g 淡紫拟青霉 DP 和 10%噻唑膦 GR 处理的土壤干扰程度大,生物多样性被破坏的程度大。蕾期 3 种杀线剂处理的土壤线虫多样性与 CK 无显著差异,对土壤线虫多样性无显著影响。但蕾期  $MI$  和  $H'$  显著低于苗期, $MI$  减少的原因可能是杀线剂的持效性对土壤的扰动大; $H'$  减少的主要原因是稀有属线虫数量的减少<sup>[25]</sup>。10%噻唑膦 GR 处理的  $J'$  显著高于其他处理,说明线虫种类均匀。

试验比较了 3 种低毒环保的杀线剂对土壤植食性线虫和线虫群落结构的影响,结果表明 10%噻唑膦 GR 的效果最好,持效期长,对植食性线虫有明显的杀灭效果,对土壤线虫类群多样性和线虫成熟指数无显著影响,是供试的药剂中防治植食性线虫效果最优,对土壤线虫群落多样性影响最小的杀线剂,适宜在香蕉园区推广使用。

## 参考文献

- [1] Wang Beibei, Yuan Jun, Zhang Jian, et al. Effects of novel bioorganic fertilizer produced by *Bacillus amyloliquefaciens* W19 on antagonism of *Fusarium* wilt of banana[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(4):435-446.
- [2] Rahman S A S A, Mohamed Z, Othman R Y, et al. In planta PCR-based detection of early infection of plant-parasitic nematodes in the roots: a step towards the understanding of infection and plant defence[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2010, 128(3):343-351.
- [3] Quénéhervé P. Integrated management of banana nematodes [M]// Ciancio A. Integrated management of fruit crops nematodes. Springer Netherlands, 2009:3-62.
- [4] Gowen S R, Quénéhervé P, Fogain R, et al. Nematode para-

- sites of bananas and plantains[M]// Luc M, Sikora R A, Bridge J. Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture (Ed. 2). CABI Publishing, 2005:611 - 643.
- [5] Moens T, Araya M, Swennen R, et al. Enhanced biodegradation of nematicides after repetitive applications and its effect on root and yield parameters in commercial banana plantations [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(6):407 - 414.
- [6] Jaizme-Vega M C, Tenoury P, Pinochet J, et al. Interactions between the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* and *Glomus mosseae* in banana [J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1):27 - 35.
- [7] 王成菊, 李学锋, 吴学民, 等. 阿维菌素对棉铃虫毒力及增效剂的作用[J]. *中国农业大学学报*, 1999, 4(5):6 - 10.
- [8] 郑永利, 吴华新, 陈彩霞, 等. 10%福气多颗粒剂防治芹菜根结线虫药效试验[J]. *中国蔬菜*, 2006 (5):24 - 25.
- [9] Khan A, Williams K L, Nevalainen H K M. Effects of *Paecilomyces lilacinus* protease and chitinase on the eggshell structures and hatching of *Meloidogyne javanica* juveniles [J]. *Biological Control*, 2004, 31(3):346 - 352.
- [10] Khan A, Williams K L, Nevalainen H K M. Control of plant-parasitic nematodes by *Paecilomyces lilacinus* and *Monacrosporium lysipagum* in pot trials [J]. *Biocontrol*, 2006, 51(5):643 - 658.
- [11] Al-Raddad A M. Interaction of *Glomus mosseae* and *Paecilomyces lilacinus* on *Meloidogyne javanica* of tomato [J]. *Mycorrhiza*, 1995, 5(3):233 - 236.
- [12] Lu S. Effect of Anti-nematode preparations on physiological traits of cucumber leaves affected by root-knot nematode [C]// Proceedings of the 2012 international conference on applied biotechnology (ICAB 2012). Springer Berlin Heidelberg, 2014:973 - 980.
- [13] Fu Shenglei, Zou Xiaoming, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):868 - 876.
- [14] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators [J]. *Journal of Nematology*, 2001, 33(4):161 - 168.
- [15] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14:224 - 228.
- [16] Goodfriend W L, Olsen M W, Frye R J. Soil microfloral and microfaunal response to *Salicornia bigelovii* planting density and soil residue amendment [J]. *Plant and soil*, 2000, 223:23 - 32.
- [17] Yeates G W, Coleman D C. Role of nematodes in decomposition [M]// Freckman D W. Nematodes in soil ecosystems, 1982:55 - 80.
- [18] Yeates G W, Bongers T, de Goede R G M, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists [J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3):315 - 331.
- [19] Bongers T. The maturity index, an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83(1):14 - 19.
- [20] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana:University of Illinois Press, 2002.
- [21] Pielou E C. Ecological diversity [M]. New York:Wiley, 1975.
- [22] Akhtar M, Mahmood I. Control of plant-parasitic nematodes with organic and inorganic amendments in agricultural soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 1996, 4(3):243 - 247.
- [23] Griffiths B S, Ritz K, Wheatley R E. Nematodes as indicators of enhanced microbiological activity in a Scottish organic farming system [J]. *Soil Use and Management*, 1994, 10(1):20 - 24.
- [24] Neher D A, Olson R K. Nematode communities in soils of four farm cropping management systems[J]. *Pedobiologia*, 1999, 43(5):430 - 438.
- [25] 钟爽, 何应对, 韩丽娜, 等. 连作年限对香蕉园土壤线虫群落结构及多样性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):604 - 611.
- [26] 杨树泉, 沈向, 毛志泉, 等. 环渤海湾苹果产区老果园与连作果园土壤线虫群落特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(16):4445 - 4451.
- [27] Putter I, MacConnell J G, Preiser F A, et al. Avermectins: novel insecticides, acaricides and nematicides from a soil micro-organism [J]. *Experientia*, 1981, 37(9):963 - 964.
- [28] Robinson A F, Inserra R N, Caswell-Chen E P, et al. *Rotylenchulus* species: Identification, distribution, host ranges, and crop plant resistance [J]. *Nematropica*, 1997, 27(2):127 - 180.
- [29] 梅圆圆, 郑炜, 郑经武. 4种螺旋线虫记述[J]. *植物保护*, 2008, 34(5):116 - 118.
- [30] Jatala P. Biological control of plant-parasitic nematodes[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1986, 24(1):453 - 489.
- [31] 陈伟强, 於维维. 噻唑膦防治番茄根结线虫的田间试验[J]. *浙江农业科学*, 2014 (9):1403.
- [32] 刘玉霞, 孟丽, 漆永红, 等. 4种药剂对豇豆根结线虫病的防治效果[J]. *植物保护*, 2014, 40(4):177 - 180.
- [33] 芮凯, 肖彤斌, 谢圣华, 等. 9种杀线剂对香蕉根结线虫病的防效评价[J]. *植物保护*, 2011, 37(5):196 - 200.
- [34] 朱金文, 郑经武, 洪文英, 等. 10%噻唑膦颗粒剂防治黄瓜根结线虫[J]. *植物保护*, 2004, 30(3):82.
- [35] Ferris H. Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2):97 - 104.
- [36] Yeates G W, Newton P C D, Ross D J. Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(5):319 - 326.
- [37] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1993, 45(3):239 - 261.
- [38] Ekschmitt K, Bakonyi G, Bongers M, et al. Nematode community structure as indicator of soil functioning in European grassland soils [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(4):263 - 268.