

# 香蕉枯萎病菌新毒素——白僵菌素的鉴定

李春雨<sup>1,\*</sup>, 陈石<sup>2,\*</sup>, 左存武<sup>1,\*</sup>, 邝瑞彬<sup>1</sup>, 易干军<sup>1,\*\*</sup>

(<sup>1</sup>广东省农业科学院果树研究所, 广州 510640; <sup>2</sup>福建省农业科学院闽台园艺研究中心, 福建漳州 363005)

**摘要:** 调查并分离了广东、海南、广西、福建和云南等香蕉枯萎病疫区的一批病原菌样本。利用高效液相色谱—电喷雾离子阱质谱(HPLC-ESI-MS)法对所分离的 28 个 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* 菌株的次生代谢产物进行初步分析。发现了分子量为 179 D 的镰刀菌酸及分子量约为 783 D 的未知产物; 利用 <sup>1</sup>H-NMR 对一株 4 号生理小种的未知产物进行了结构测定, 结果表明该化合物为白僵菌素。离体试验表明白僵菌素能够导致香蕉假茎腐烂。

**关键词:** 香蕉枯萎病; 白僵菌素; 结构; 毒性

**中图分类号:** S 668.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2011) 11-2092-07

## Identification of Beauvericin, a Novel Mycotoxin from *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

LI Chun-yu<sup>1,\*</sup>, CHEN Shi<sup>2,\*</sup>, ZUO Cun-wu<sup>1,\*</sup>, KUANG Rui-bin<sup>1</sup>, and YI Gan-jun<sup>1,\*\*</sup>

(<sup>1</sup>*Institution of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;*  
<sup>2</sup>*Fujian-Taiwan Horticulture Research Center, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Zhangzhou, Fujian 363005, China*)

**Abstract:** The 28 isolates of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*) including Race 1 and 4 were collected from the banana *Fusarium* wilt diseases epidemic areas of Guangdong, Hainan, Guangxi, Fujian and Yunnan provinces. The secondary metabolites were analyzed by HPLC-ESI-MS. We found fusaric acid which the molecular weight is 179 Dalton and another compound with a molecular weight of 783 Dalton. The latter was purified and identified to be beauvericin by <sup>1</sup>H-NMR. Experiments *in vitro* proved that the banana pseudostem rot caused by the beauvericin which was produced by *Foc*.

**Key words:** *Fusarium* wilt of banana; beauvericin; structure; toxicity

香蕉产业的发展正遭受到镰刀菌枯萎病(又称巴拿马病或黄叶病)的毁灭性威胁, 其病原菌为尖孢镰刀菌古巴专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, *Foc*), 共有 4 个生理小种(Persley & de Langhe, 1986), 中国目前有 1 号和 4 号小种。在自然条件下 1 号小种可侵染粉蕉, 不侵染香牙蕉; 4 号生理小种既可侵染香牙蕉, 又可侵染粉蕉。香蕉枯萎病菌在致病过程中产生的毒素(如镰刀菌酸, FA)在病菌侵入寄主后, 可导致维管束细胞产生褐变、坏死等病理变化(许文耀等, 2004)。

**收稿日期:** 2011-05-23; **修回日期:** 2011-10-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(30971991); 广东省自然科学基金项目(10151064001000007); 公益性行业(农业)科技专项(200903049); 中非政府间合作项目(2010DFA32470)

\* 并列为第一作者

\*\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: yiganjun@vip.163.com)

目前对香蕉枯萎病菌毒素的相关研究和报道集中在粗毒素以及粗毒素中的镰刀菌酸。Drysedale (1984) 证明香蕉枯萎病菌分泌非专化性毒素——镰刀菌酸, 该毒素能够抑制植物防御酶系统的活性并降低植物细胞的生活力 (Gapillout et al., 1995), 也可以快速引起寄主其它生理反应, 如活性氧的产生 (Kuznia, 2001)、细胞膜渗透性 (Dalton & Etherton, 1984) 或膜电势 (Marré et al., 1993) 的改变。许文耀等 (2004) 认为镰刀菌酸是香蕉枯萎病菌粗毒素中主要致枯萎物质, 除镰刀菌酸外, 粗毒素中可能还含有其它毒素。但是其它毒素是何物质至今未见报道。

本课题组研究了香蕉枯萎病菌 1 号和 4 号生理小种的次生代谢产物, 分离纯化到一种新的毒素, 并对其物质结构和致病活性进行鉴定, 以期为进一步研究病原菌的致病机理奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

香蕉组培苗: ‘巴西香蕉’ (*Musa AAA Cavendish*) 和 ‘广粉 1 号粉蕉’ (*Musa ABB Pisang Awak*) (黄秉智 等, 2005), 2010 年取自“国家果树种质广州荔枝、香蕉圃”和广东省农业科学院果树研究所组培中心。病原菌材料取自广东、海南、福建、云南和广西等各香蕉枯萎病疫区的病株, 用于病原菌分离和鉴定。毒素提取所用试剂均为国产分析纯。

毒素分析采用美国 Thermo Finnigan 公司 LCQ DECA XP 型串联质谱 (HPLC-ESI-MS) 仪和 JEOL2FX290Q 型核磁共振仪 ( $^1\text{H-NMR}$ )。色谱、质谱分析试剂甲醇、石油醚、乙酸乙酯和超纯水均为 HPLC 级, 其他均为进口或国产分析纯。

### 1.2 病原菌的采集、分离与鉴定

从染病的 ‘巴西香蕉’ (或 ‘广粉 1 号粉蕉’) 假茎的病健交界处切取  $5 \sim 6 \text{ mm}^3$  的组织, 用 75% 乙醇和 0.1% 升汞进行表面消毒后, 无菌水漂洗 3 次, 再将组织置于 PDA 平板上, 在  $28^\circ\text{C}$  培养箱中培养 5 ~ 10 d。待长成菌落, 经 3 次纯化后, 用稀释法进行单孢分离和培养。

选 5 ~ 6 叶期健康 ‘巴西香蕉’ 和 ‘广粉 1 号粉蕉’ 组培苗作为接种植株, 种植于蛭石、泥碳和椰糠 (3:1:0.5) 的混合基质 (经过高压灭菌) 上。按照 Sun 和 Su (1984) 的方法进行伤根淋菌液接种, 接种孢子浓度为  $10^5 \cdot \text{mL}^{-1}$ 。每个菌株接种 ‘巴西香蕉’ 和 ‘广粉 1 号粉蕉’ 组培苗各 30 株。接种 30 d 后观察致病结果。生理小种的鉴定方法如下: 同时侵染 ‘巴西香蕉’ 和 ‘广粉 1 号粉蕉’ 为 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Smith) Snyder & Hansen 4 号生理小种; 只侵染 ‘广粉 1 号粉蕉’ 不侵染 ‘巴西香蕉’ 为 1 号生理小种。

### 1.3 HPLC-ESI-MS 分析病原菌次生代谢产物

在 PDA 上培养 1 号小种和 4 号小种, 15 d 后刮取菌丝, 超声波破碎后用甲醇提取菌丝的次生代谢产物。提取液用高效液相色谱—电喷雾离子阱质谱法 (HPLC-ESI-MS) 分析。HPLC 的流动相为甲醇: 水 (50:50), 电喷雾源操作电压为 3.01 kV, 操作温度为  $250.3^\circ\text{C}$ , 操作压力为  $10^4 \text{ Pa}$ 。用于 HPLC-ESI-MS 分析的菌株如表 1 所示。

### 1.4 病原菌的培养、毒素提取及结构测定

将 PDA 培养 7 d 的香蕉枯萎病菌 4 号小种 (CGMCCC 3.12196), 用无菌水制成  $10^6 \cdot \text{mL}^{-1}$  的孢子悬液, 按 1/20 (菌液/培养基) 的接种量接种于大米培养基 (Sagawa et al., 2006), 充分混匀, 置于  $28^\circ\text{C}$  培养箱中避光条件下静置培养 20 d。大米培养基配置方法: 50 g 大米在含 0.5% 土壤浸出液

和 0.2% ZnSO<sub>4</sub> 溶液中浸泡过夜, 纱布过滤后称取 50 g 置于 250 mL 三角瓶中, 加入 10% 的浸泡水, 加塞后 121.3 °C 灭菌 30 min 后备用。取出培养物 85 °C 灭菌 30 min 杀死菌丝和孢子, 用甲醇超声提取 3 ~ 4 次, 减压浓缩至干, 再用少量甲醇反复复溶, 除去大量淀粉, 将甲醇溶液浓缩至干, 得膏状物约 10 g, 即为粗毒素。该粗毒素经硅胶柱层析分离, 用石油醚—乙酸乙酯洗脱。在石油醚—乙酸乙酯 (4:6) 的洗脱相得目标化合物, 再通过硅胶柱层析, 用氯仿—甲醇溶剂系统洗脱, 得到白色粉末状化合物约 5 mg。用 <sup>1</sup>H-NMR 等仪器分析鉴定其结构。

1.5 毒素致病活性的测定

将纯化的白色化合物溶于乙酸乙酯, 制成浓度为 1 mg · mL<sup>-1</sup> 的母液, 并稀释成 100 μg · mL<sup>-1</sup>、200 μg · mL<sup>-1</sup>、300 μg · mL<sup>-1</sup>、500 μg · mL<sup>-1</sup> 和 1 mg · mL<sup>-1</sup> 系列梯度浓度处理液。切取巴西蕉幼苗假茎, 长约 10 cm, 乙醇表面消毒, 晾干后, 用处理液处理假茎的底端, 处理量为 200 μL, 并以相同量的水和乙酸乙酯处理作对照, 每个处理 3 段, 重复 5 次, 10 d 后观察结果。

2 结果与分析

2.1 分离的病原菌

分别从广粉 1 号粉蕉和巴西香蕉感病组织上分离到 28 个菌株, 显微镜下观察形态为典型的镰刀菌。经致病性测定, 进一步确定所分离到的菌株均属镰刀菌, 其中 1 号生理小种 6 株, 4 号生理小种 22 株 (表 1)。

表 1 香蕉枯萎病菌的来源地、生理小种和毒素信号  
Table 1 Source, race, and toxin signal of strains of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

菌株编号 Pathogen number	来源地 Source	生理小种 Race	白僵菌素信号 Signal of beauvericin	镰刀菌酸信号 Signal of fusaric acid
1	广东番禺 Panyu, Guangdong	1	+	+
2	广东番禺 Panyu, Guangdong	4	+	+
3	广东中山 Zhongshan, Guangdong	1	+	+
4	广东中山 Zhongshan, Guangdong	4	+	+
5	广东东莞 Dongguan, Guangdong	4	+	+
6	广东湛江 Zhanjiang, Guangdong	4	+	+
7	广东湛江 Zhanjiang, Guangdong	1	+	+
8	广东高州 Gaozhou, Guangdong	1	+	+
9	广东高州 Gaozhou, Guangdong	4	+	+
10	广东珠海 Zhuhai, Guangdong	4	+	+
11	广东肇庆 Zhaoqing, Guangdong	4	+	+
12	广东广州 Guangzhou, Guangdong	4	+	+
13	广东信宜 Xinyi, Guangdong	4	+	+
14	海南澄海 Chenghai, Guangdong	4	+	+
15	海南三亚 Sanya, Hainan	1	+	+
16	海南海口 Haikou, Hainan	4	+	+
17	海南乐东 Ledong, Hainan	4	+	+
18	海南澄迈 Chengmai, Hainan	4	+	+
19	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	1	+	+
20	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	4	+	+
21	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	4	+	+
22	福建漳州 Zhangzhou, Fujian	4	+	+
23	云南景洪 Jinghong, Yunnan	4	+	+
24	云南河口 Hekou, Yunnan	4	+	+
25	广西武鸣 Wuming, Guangxi	4	+	+
26	广西南宁 Nanning, Guangxi	4	+	+
27	广西浦北 Pubei, Guangxi	4	+	+
28	广西武鸣 Wuming, Guangxi	4	+	+

注: “+” 表示能够检测到 BEA 或 FA 的 HPLC-ESI-MS 信号。  
Note: “+” indicate the HPLC-ESI-MS signal of BEA and FA.

## 2.2 次生代谢产物

利用高效液相色谱—电喷雾离子阱质谱法 (HPLC-ESI-MS) 分析了 6 株 1 号生理小种和 22 株 4 号生理小种的次生代谢产物, 结果显示: 28 株菌株均有出现白僵菌素信号和镰刀菌酸信号 (表 1)。在 28 个菌株次生代谢产物的电喷雾质谱图中, 虽然没有找到与生理小种紧密连锁的特征性指纹图谱, 但是可以发现两者共同的特征峰, 如  $m/z$  178.11、 $m/z$  179.10、 $m/z$  180.13、 $m/z$  784.33、 $m/z$  801.27、 $m/z$  806.47 等信号 (图 1, A, B)。 $m/z$  178.11 和  $m/z$  179.10 的信号基本与镰刀菌酸的相同 (图 1, A), 这与很多香蕉枯萎病菌分泌镰刀菌酸的相关报道结果 (Drysdale, 1984; 许文耀 等, 2004) 相符。 $m/z$  784.33、 $m/z$  801.27、 $m/z$  806.47 等可能为同一种化合物, 是在不同的基团上结合 H、 $\text{NH}_3$ 、Na 等所致。对这种化合物纯化后将进行结构测定。

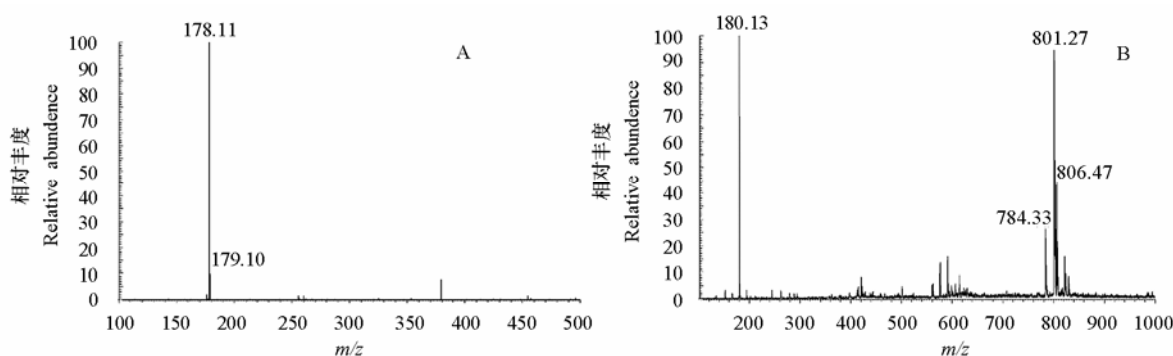


图 1 香蕉枯萎病菌菌株 2 的次生代谢产物 HPLC-ESI-MS 图谱

A. 菌株 2 的镰刀菌酸  $[\text{M} - \text{H}]^-$  图谱; B. 菌株 2 次生代谢产物的  $[\text{M} + \text{H}]^+$  图谱。

$[\text{M} - \text{H}]^-$  和  $[\text{M} + \text{H}]^+$  是准分子离子峰的两表现形式, 其中  $[\text{M} - \text{H}]^-$  为阴离子图谱 (电子轰击后显阴性),

$[\text{M} + \text{H}]^+$  为阳离子图谱 (电子轰击后显阳性)。

Fig. 1 HPLC-ESI-MS map of secondary metabolic of *Foc* No.2

A. Fusaric acid map  $[\text{M} - \text{H}]^-$  of *Foc* No.2; B.  $[\text{M} + \text{H}]^+$  map of secondary metabolic of *Foc* No.2.

$[\text{M} - \text{H}]^-$  and  $[\text{M} + \text{H}]^+$  are two forms of quasi-molecular peak,  $[\text{M} - \text{H}]^-$  is anion peak (show negative after electron bombardment),

$[\text{M} + \text{H}]^+$  is cation peak (show positive after electron bombardment) .

## 2.3 目标化合物结构分析

大米培养基培养病原菌, 并纯化目标化合物后, 利用  $^1\text{H}$ -NMR 谱进行结构测定。正常的  $^1\text{H}$ -NMR 谱技术能提供的结构信息参数主要是化学位移 ( $\delta$ , 图 2 横坐标)、耦合常数 ( $J$ ) 及质子数。 $^1\text{H}$  核因周围化学环境不同, 其外围电子云密度及绕核旋转产生的磁屏蔽效应不同, 不同类型的  $^1\text{H}$  核共振信号出现在不同区域, 据此可以识别。化学位移是相对比值, 通常  $\delta = (\nu_{\text{样品}} - \nu_{\text{TMS}}) \times \nu_{\text{TMS}}^{-1} \times 10^6$  或者  $\delta = (B_{\text{TMS}} - B_{\text{样品}}) \times B_{\text{TMS}}^{-1} \times 10^6$ , 其中  $\nu$  为电磁波频率, TMS 为基准物质四甲基硅烷,  $B$  为外加磁场强度 (孔垂华和徐效华, 2003)。不等同的两个或两组氢核, 在一定距离内因相互自旋耦合干扰使信号发生裂分, 其形状有单峰 (s)、二重峰 (d)、三重峰 (t)、四重峰 (q) 及多重峰 (m) 等, 裂分间的距离为耦合常数  $J$  (Hz), dd 代表两个双重峰, 也就是双峰被裂分了。各种不同环境下  $^1\text{H}$  核相邻结构具有一定的耦合常数值 (孔垂华和徐效华, 2003)。根据图 2 对未知化合物结构推导如下:  $^1\text{H}$ -NMR 谱在化学位移  $\delta$  7.28 (5H, ar) 处有吸收信号 (接近  $\delta$  7.2 有 5 个相同的氢), 推出分子中有芳环, 又化学位移  $\delta$  5.57 (1H, dd,  $J = 4.8, 12.4$  Hz), 3.42 (1H, dd,  $J = 4.4, 14.4$  Hz), 3.03 (1H, dd,  $J = 12.4, 14.4$  Hz) 有吸收信号, 推出苯丙氨酸结构, 其中  $\delta$  5.57 为连氨基酸上质子吸收信号,  $^1\text{H}$ -NMR 谱还给出  $\delta$  3.06 (3H, s) 的单峰信号推出分子中有甲基, 且连在氨基上;  $^1\text{H}$ -NMR 谱还有化学位移  $\delta$  4.91 (1H, d,  $J = 8.4$  Hz), 1.90 (1H, m), 0.82 (3H, d,  $J = 6.6$  Hz), 0.43 (3H,

d,  $J = 6.6 \text{ Hz}$ ) 的吸收信号, 推出苯丙氨酸与 D-2 羟异戊酸相连, 其中  $\delta 4.91$  为 D-2 羟异戊酸结构片段中  $\alpha$  位连羟基碳上质子吸收信号,  $\delta 0.82, 0.43$  为两个甲基质子信号 (图 2); 又根据 ESI-MS 谱有  $m/z$ :  $806.4 [M + Na]^+$ ,  $801.3 [M + NH_4]^+$ ,  $784.3 [M + H]^+$  信号, 揭示分子中有对称结构, 说明其分子量  $M$  为  $783.3 \text{ D}$ , 推出纯化化合物为白僵菌素 (beauvericin), 分子结构与 Hamill 等 (1969) 测定的结构相同。

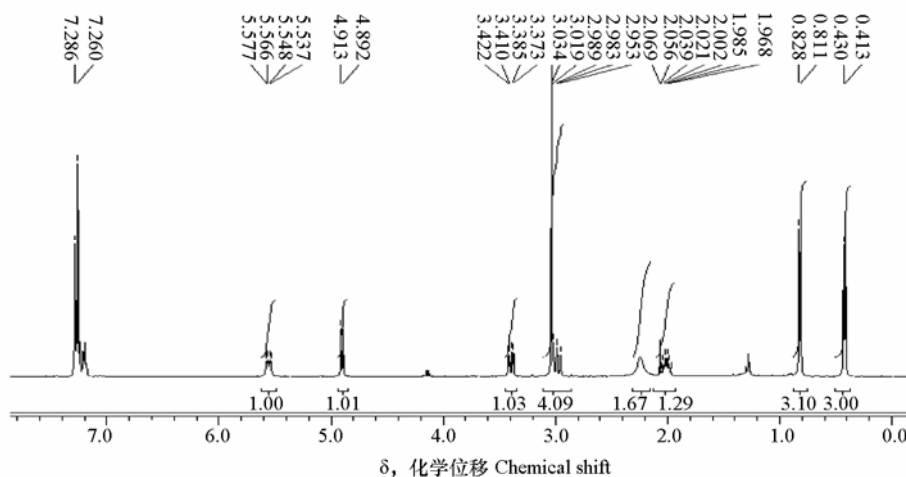


图 2 目标化合物的  $^1\text{H-NMR}$  图谱

Fig. 2  $^1\text{H-NMR}$  map of target compounds

## 2.4 白僵菌素的植物毒性

利用梯度浓度的白僵菌素处理表面消毒的巴西蕉假茎底端, 出现腐烂症状的最小浓度为  $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 但是腐烂比例比较小, 略高于对照, 腐烂假茎段率为  $3.2\%$ ; 随着浓度升高, 腐烂的症状越来越明显, 比例也越来越高,  $500 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  浓度处理导致  $5.2\%$  的组织腐烂,  $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  浓度处理则上升为  $11.9\%$  (图 3)。溶剂和水处理产生的症状与毒素处理明显不同, 更类似自然条件下的褐化, 褐化比例分别为  $2.63\%$  和  $0.98\%$ 。该结果表明, 在离体条件下, 白僵菌素能导致香蕉假茎腐烂。

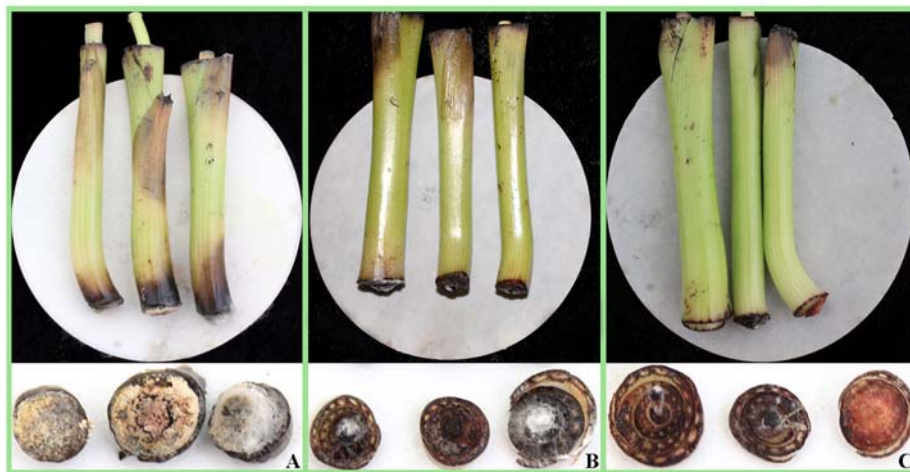


图 3 白僵菌素对植物毒性测定结果

A:  $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  白僵菌素处理; B: 等量溶剂乙酸乙酯处理; C: 水处理。

Fig. 3 Determination results of beauvericin toxicity to banana

A: Treated with  $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  beauvericin; B: Treated with ethyl acetate; C: Treated with  $\text{H}_2\text{O}$ .

### 3 讨论

白僵菌素是一种环六缩酚酸肽, 带有 L - N - 甲基 - 苯丙氨酸和 D -  $\alpha$  - 羟基异戊酰残基 (Logrieco et al., 2002), 由于对害虫有毒性, 所以起初被认为只是昆虫病原真菌白僵菌的一种毒枝菌素 (Hamill et al., 1969)。最近, 人们发现一些尖孢镰刀菌也能够合成这种有毒性的化合物 (Song et al., 2009), 如侵染百合花的 *Fusarium oxysporum* f. sp. *lilii* (Löffler & Mouris, 1992), 侵染小麦和玉米的 *F. oxysporum* (ITEM-2470) (Logrieco et al., 2002) 等。Lemmens 等 (2000) 利用人工膜作为一个模型研究了白僵菌素的作用方式, 发现该毒素在微量存在的情况下, 在生物膜上形成通道。Pavlovkin 等 (2006) 证明白僵菌素处理能够使玉米根系外皮层细胞膜电势快速并显著地去极化。以上研究都是在微量白僵菌素处理情况下的结果, 但是在感病的香蕉植株体内累积大量的毒素会产生什么样的症状, 还不得而知。本研究中利用较高浓度的白僵菌素处理表面消毒的香蕉假茎的末端, 发现该毒素能够导致腐烂, 这一结果有助于解释香蕉枯萎病的症状出现的机理。

尽管以前一些研究发现部分专化型的尖孢镰刀菌能够产生白僵菌素 (Löffler & Mouris, 1992; Logrieco et al., 2002; Moretti et al., 2002), 但对引致香蕉枯萎病的 *Foc*, 之前尚未见其能够产生白僵菌素的报道。在所测定的 6 株 1 号生理小种和 22 株 4 号生理小种的菌株中, 都能检测到镰刀菌酸和白僵菌素的信号, 这说明它们的产生与生理小种的划分并不存在直接关系。由于在本研究中没有比较各个菌株致病性的差异, 因此各个菌株产生毒素的量与致病力的关系有待进一步研究。镰刀菌酸是香蕉枯萎病菌产生的另外一种毒素。该毒素对很多原核生物和真核生物有毒 (Marré et al., 1993), 其中包括很多植物。前人研究认为镰刀菌酸的致萎作用主要是破坏了根系的膜系统, 造成代谢紊乱, 根系防卫机能丧失, 活力下降, 很快使植株地上部缺水萎蔫 (许文耀 等, 2004)。许文耀等 (2004) 研究发现, 毒素导致病株可产生胶状物, 而胶状物可能会堵塞香蕉导管的营养和水分运输, 这也是导致病株萎蔫的可能原因之一。本研究结果证明, 白僵菌素亦可导致假茎腐烂, 而几种毒素同时积累是否会导致大量腐烂还有待进一步研究。

白僵菌素的发现为进一步研究香蕉枯萎病菌致病、致毒机理及香蕉抗枯萎病能力的评价等提供了新思路。香蕉枯萎病菌能够同时产生镰刀菌酸和白僵菌素, 除了证明这两种毒素作为植物病原真菌的常规代谢物而显得非常重要之外, 同时应该加强这两种毒素在香蕉植物体内的协同或加性效应的研究, 以及这两种毒素在香蕉抗病育种上的应用研究。

### References

- Companioni B, Mora N, Arzola M, Ventura J, Pérez M C, Santos R, Lorenzo J C. 2005. Improved technique for rapid and non-destructive *in vitro* differentiation between resistant and susceptible banana clones of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Biotechnology Letters*, 26 (3): 213 - 216.
- Dalton A, Etherton B. 1984. Effects of fusaric acid on tomato root hair membrane potentials and ATP levels. *Plant Physiol*, 74: 39 - 42.
- Drysdale R B. 1984. The production and significance in phytopathology of toxins produced by species of *Fusarium*// Moss M O, Smith J E. The applied mycology *Fusarium*. Cambridge: Cambridge University Press: 95 - 105.
- Gapillout I, Milat M L, Blein J P. 1995. Effect of fusaric acid on cells from tomato cultivars resistant or susceptible to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *European Journal of Plant Pathology*, 102: 127 - 132.
- Hamill R L, Higgins C E, Boaz H E, Gorman M. 1969. The structure of beauvericin, a new depsipeptide antibiotic toxic to *Artemia salina*. *Tetrahedron Lett*, 49: 4255 - 4258.
- Huang Bing-zhi, Xu Lin-bin, Yang Hu, Tang Xiao-lang, Wei Yue-rong, Qiu Ji-shui, Li Guan-qiu. 2005. Preliminary results of field evaluation of banana germplasm resistant to *Fusarium* wilt disease. *Guangdong Agricultural Science*, (6): 9 - 10. (in Chinese)
- 黄秉智, 许林兵, 杨 护, 唐小浪, 魏岳荣, 邱继水, 李贯球. 2005. 香蕉种质资源枯萎病抗性田间评价初报. *广东农业科学*, (6):

9 - 10.

- Kong Chui-hua, Xu Xiao-hua. 2003. Isolation and struction identification of organic compounds. Beijing: Chemical Industry Press. (in Chinese)
- 孔垂华, 徐效华. 2003. 有机物的分离和结构鉴定. 北京: 化学工业出版社.
- Kuzniak E. 2001. Effect of fusaric acid on reactive oxygen species and antioxidants in tomato cell cultures. *Journal of Phytopathology*, 149 (10): 575 - 582.
- Lemmens-Gruber R, Rachoy B, Steininger E, Kouri K, Saleh P, Krska R, Josephs R, Lemmens M. 2000. The effect of the *Fusarium* metabolite beauvericin on electromechanical and physiological properties in isolated smooth and heart muscle preparations of guinea pigs. *Mycopathologia*, 149 (1): 5 - 12.
- Löffler H J M, Mouris J R. 1992. Fusaric acid: Phytotoxicity and in vitro production by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lilii*, the causal agent of basal rot in lilies. *European Journal of Plant Pathology*, 98 (2): 107 - 115.
- Logrieco A, Moretti A, Ritieni A, Caiaffa M F, Macchia L. 2002. Beauvericin: Chemistry, biology and significance//Upadhyay R K. *Advances in microbial toxin research and its biotechnological exploitation*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers: 23 - 30.
- Marré M T, Vergani P, Albergoni F G. 1993. Relationship between fusaric acid uptake and its binding to cell structures in leaves of *Egeria densa* and its toxic effects on membrane permeability and respiration. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 42 (2): 141 - 157.
- Matsumoto K, Copati Souzal, Barbosa M L. 1999. *In vitro* selection for *Fusarium* wilt resistance in banana I Co-cultivation technique to produce culture filtrate of race 1 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Fruits*, 54 (2): 97 - 102.
- Moretti A, Belisario A, Tafuri A, Ritieni A, Corazza L, Logrieco A. 2002. Production of beauvericin by different races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *melonis*, the *Fusarium* wilt agent of muskmelon. *European Journal of Plant Pathology*, 108 (7): 661 - 666.
- Morpurgo R, Lopato S V, Afza R, Novak F J. 1994. Selection parameters for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 and race 4 on diploid banana (*Musa acuminata* Colla). *Euphytica*, 75 (1 - 2): 121 - 129.
- Pavlovkin J, Mistriková I, Luxová M, Mistrik I. 2006. Effects of beauvericin on root cell transmembrane electric potential, electrolyte leakage and respiration of maize roots with different susceptibility to *Fusarium*. *Plant Soil Environ*, 52 (11): 492 - 498.
- Persley G J, De Langhe E A. 1986. Summary of discussions and recommendations// Persley G J, de Langhe E A. *Banana and plantain breeding strategies*. Australian Center of International Agricultural Research (ACIAR) Proceeding 21. Australia: ACIAR: 9 - 17.
- Sagawa N, Takino T, Kurogochi S. 2006. A simple method with liquid chromatography/tandem mass spectrometry for the determination of the six trichothecene mycotoxins in rice medium. *Biosci Biotechnol Biochem*, 70 (1): 230 - 236.
- Song H H, Lee H S, Lee G P, Ha S D, Lee C. 2009. Structural analysis of enniatin H, I, and MK1688 and beauvericin by liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) and their production by *Fusarium oxysporum* KFCC 11363P. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 26 (4): 518 - 526.
- Sun E J, Su H J. 1984. Rapid method for determining differential pathogenicity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* using banana plantlets. *Trop*, 61 (1): 7 - 8.
- Xu Wen-yao, Wu Xu-hui, Lin Cheng-hui. 2004. The toxicity of the crude toxin of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and its model. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 25 (4): 25 - 29. (in Chinese)
- 许文耀, 兀旭辉, 林成辉. 2004. 香蕉枯萎病菌粗毒素的毒性及其模型. *热带作物学报*, 25 (4): 25 - 29.