

李海玲, 苗红梅, 张海洋, 等. 芝麻枯萎病菌毒素主成分结构与特性分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 82–86.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.08.023

芝麻枯萎病菌毒素主成分结构与特性分析

李海玲¹, 苗红梅², 张海洋², 魏其超¹, 段迎辉², 汪学德¹

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001; 2. 河南省农业科学院芝麻研究中心, 河南郑州 450002)

摘要:芝麻枯萎病是芝麻主要病害之一, 由尖孢镰刀菌芝麻专化型侵染引起。为探明芝麻枯萎病菌产毒类型, 试验采用高效乙酸乙酯萃取法, 对尖孢镰刀菌株 HSFO07021 菌液进行了粗毒素提取; 采用中压制备色谱仪, 首次成功分离了尖孢镰刀菌芝麻专化型 3 种主要毒素。结构鉴定显示, 尖孢镰刀菌芝麻专化型的 3 种毒素分别为镰刀菌酸、9, 10-脱氢镰刀菌酸和 10-羟基镰刀菌酸。种子处理结果表明, 尖孢镰刀菌芝麻专化型产生的镰刀菌酸和 9, 10-脱氢镰刀菌酸均能抑制芝麻幼苗的茎叶生长和根部伸长, 对幼苗产生毒害; 镰刀菌酸的毒性强于 9, 10-脱氢镰刀菌酸。

关键词:芝麻; 尖孢镰刀菌芝麻专化型; 镰刀菌酸; 9, 10-脱氢镰刀菌酸; 分离

中图分类号: S435.653 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)08-0082-05

芝麻为胡麻科胡麻属植物, 是世界上最古老的特色油料作物之一, 也是我国重要的优势农产品^[1]。芝麻籽粒富含不

收稿日期: 2016-12-07

基金项目: 国家公益行业(农业)专项(编号: 201303072-2); 国家现代农业(芝麻)产业技术体系(编号: CARS15-1-10、CARS15-1-06、CARS15-1-2); 国家自然科学基金(编号: U1304321、31471537、31301653); 河南省科技创新杰出人才基金(编号: 164100510001); 河南省重大科技专项(编号: 151100111200)。

作者简介: 李海玲(1989—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为油脂与植物蛋白工程。E-mail: lyn98065@qq.com。

通信作者: 苗红梅, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为芝麻遗传育种与病害基础研究, Tel: (0371)-65720774, E-mail: miaohongmeichina@yahoo.com; 汪学德, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为粮油与植物蛋白工程研究, E-mail: wangxuede1962@126.com。

and zoosporeicide against the grapevine downy mildew pathogen *Plasmopara viticola* from *Streptomyces* sp. ANK313 [J]. The Journal of Antibiotics, 2011, 64(10): 655–659.

[7] 何 昆, 罗 宽. 中草药萃取液对植物病原真菌、细菌的抑制作用[J]. 湖南农业科学, 2003(1): 43–45.

[8] 何 军, 马志卿, 张 兴. 植物源农药概述[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 79–85.

[9] 焦文哲. 生防细菌和植物提取物等防治葡萄霜霉病研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.

[10] 郭秀萍, 车永梅, 侯丽霞, 等. 四种植物提取物对抵御葡萄霜霉病菌的影响[J]. 北方园艺, 2012(3): 130–133.

[11] Pawlus A D, Waffo-Tégou P, Saver J, et al. Stilbenoid chemistry from wine and the genus “Vitis”: a review[J]. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 2012, 46(2): 57–111.

[12] Çetin E S, Altinoz D, Tarcan E, et al. Chemical composition of grape canes[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 994–998.

[13] Schnee S, Queiroz E, Voinesco F, et al. Vitis vinifera canes, a new source of antifungal compounds against *Plasmopara viticola*, *Erysiphe necator*, and *Botrytis cinerea* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(23): 5459–5467.

[14] 袁 茜, 周宝利, 李之璞. 不同提取条件对葡萄叶提取物抑制两

饱和脂肪酸和维生素 E^[2-4], 并富含木酚素等多种生物活性物质, 对人体健康非常有益。但是在实际生产中, 芝麻易受病害、渍涝等因素侵袭, 产量与品质均受影响。芝麻枯萎病是由尖孢镰刀菌芝麻专化型(*Fusarium oxysporum* f. sp. *sesami*, FOS)侵染引起的 1 种真菌病害^[5-6]。研究表明, 尖孢镰刀菌在生长代谢过程中能够产生毒素(例如镰刀菌酸), 对寄主植物有强烈的毒害作用^[7-8]。在香蕉枯萎病菌株培养液中, 发现有镰刀菌酸(FA)等多种毒素成分存在^[8], 镰刀菌酸可导致香蕉表现枯萎症状, 而其他毒素成分则在致枯萎过程中起了增效作用, 加速了植株枯萎。Wu 等研究表明, 尖孢镰刀菌侵染时所产生的镰刀菌酸能够引起西瓜的氮素代谢紊乱; 此外研究也显示, 枯萎病菌毒素是较为普遍存在的一类毒素, 成分复杂, 对农作物生产和食品安全有重要影响^[9]。Smith 等从猪饲料、干玉米、高水分谷物、小麦、大麦中均不同程度地检测

种病原菌活性的影响[J]. 植物保护, 2009, 35(2): 125–127.

[15] 李晓琼, 唐 军, 毛润萍, 等. 圆叶葡萄叶提取物对南方根结线虫的生物活性[J]. 南方农业学报, 2015, 46(10): 1812–1816.

[16] 赵雪艳, 张 玮, 严 红, 等. 不同葡萄品种对霜霉病的田间苗期抗性评价[J]. 植物保护, 2014, 40(5): 172–175.

[17] 李宝燕, 王培松, 倪悦山, 等. 不同葡萄品种对霜霉病的抗性鉴定及相关生理生化研究[J]. 果树学报, 2016, 33(2): 217–223.

[18] 杜兴兰, 李正楠, 姬惜珠, 等. 葡萄生轴霜霉病菌孢子囊的长期保存[J]. 菌物学报, 2008, 27(6): 908–914.

[19] Riemann M, Büche C, Kassemeyer H, et al. Cytoskeletal responses during early development of the downy mildew of grapevine (*Plasmopara viticola*) [J]. Protoplasma, 2002, 219(1/2): 13–22.

[20] Pezet R G K, Gindro K, Viret O, et al. Effects of resveratrol, viniferins and pterostilbene on *Plasmopara viticola* zoospore mobility and disease development[J]. Vitis, 2004, 43(3): 145–148.

[21] Steimetz E, Trouvelot S, Gindro K, et al. Influence of leaf age on induced resistance in grapevine against *Plasmopara viticola* [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2012, 79(10): 89–96.

[22] 张 兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685–698.

出了镰刀菌酸的存在^[10]。近期研究表明,芝麻枯萎病菌亦能产生镰刀菌毒素(统称为 FOS 毒素),主要成分应包括镰刀菌酸(FA)以及 FA-H₂、FA+O 和 FA+O₂ 等 3 种镰刀菌酸类似物^[11]。但是受毒素提取纯化技术的限制,目前尚未获得各毒素纯品;芝麻枯萎病菌各主要毒素的特性如何尚不得而知。以往研究结果显示,为获得镰刀菌毒素,人们多采用活性炭吸附法^[12]、乙酸乙酯萃取法^[13]从尖孢镰刀菌滤液中提取。Bani 等使用乙酸乙酯萃取法,提取了尖孢镰刀菌粗毒素;随后采用硅胶板+乙酸乙酯-甲醇-水(体积比为 8.5:2:1)流动相的分离条件,成功分离到了尖孢镰刀菌酸^[14]。为此,本研究主要探讨芝麻枯萎病菌毒素主成分的制备和特性,首次获得了 FOS 毒素 3 个主成分的纯品,明确了毒素主成分对芝麻幼苗生长的毒害特点,为下一步开展芝麻枯萎病菌致病机理和防控技术研究奠定了技术和材料基础。

1 材料与方法

1.1 病原菌株及保存

选取尖孢镰刀菌芝麻专化型菌株(编号:HSFO07021)开展毒素提取研究。菌株由河南省农业科学院芝麻研究中心病理室保存。

1.2 仪器与试剂

毒素提取及分离用仪器设备主要包括:Waters 2695 液相色谱仪(Waters 公司,美国)、Waters LC150 半制备液相色谱(Waters 公司,美国)、液质联用质谱仪(UPLC-QTOF, xEVO G2, 美国)、NICOLET 6700 傅利叶红外光谱仪(赛默飞世尔公司,美国)、500 MHz Bruker 核磁共振仪(布鲁克公司,德国)、离心机、分液漏斗、冻干机、真空旋转蒸发仪、布氏漏斗、真空抽滤机等。盐酸、乙酸乙酯等试剂均为分析纯(国产)。乙腈(TEDIA, America)、乙酸(国产)均为高效液相色谱纯度级别,水为纯净水级别。

1.3 菌株培养

挑取 HSFO07021 菌株少量菌丝(-70℃保藏),接种在 PDA 平板培养基上,于 28℃培养 4 d。用无菌打孔器沿菌落边缘打出直径为 8 mm 菌片 3~5 个,接入装有 250 mL PD 培养液的 500 mL 三角瓶内,28℃、120 r/min 振荡培养 4 d。用灭菌纱布滤除菌丝,收集孢子液,用无菌水将所得孢子液浓度调至 10⁷ 个/mL 孢子,作为接菌母液。取 1 mL 接菌母液,加入 100 mL 理查德培养液中,28℃、120 r/min 振荡培养,用于毒素提取试验。5 d 取样 1 次,用于检测培养液 FA 含量,共计 45 d。

PDA 培养基:马铃薯 200 g(煮熟过滤),葡萄糖 20 g,琼脂 15 g,水 1 000 mL。PD 培养液:马铃薯 150 g(煮熟过滤),葡萄糖 20 g,水 1 000 mL。理查德培养液:KNO₃ 10 g, KH₂PO₄ 5 g, MgSO₄·7H₂O 2.5 g, FeCl₃ 0.02 g, 蔗糖 50 g, 蒸馏水 1 000 mL。

1.4 FOS 滤液的 HPLC 检测

取少量的 HSFO07021 菌株理查德培养液,2 层镜头纸过滤,以滤除菌丝;经 0.22 μm 水系滤膜过滤后进行液相色谱分析。色谱柱选用 sunfireC₁₈ 反相柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相 A 和 B 分别为乙腈、0.1% 乙酸水溶液。梯度洗脱程序设置:0~12 min, A:B=5:95;12~13 min, A 相变

化范围为 5%~27%, B 相变化范围为 95%~73%;13~16 min, A:B=27:73;16~17 min, A 相变化范围为 27%~10%, B 相变化范围为 73%~90%;17~22 min, A:B=10:90;22~23 min, A 相变化范围为 10%~5%, B 相变化范围为 90%~95%;23~25 min, A:B=5:95。流速为 1 mL/min,检测波长为 270 nm,进样量为 10 μL。

1.5 FOS 粗毒素提取

培养 45 d 后,取一定量的 HSFO07021 理查德培养液,用 2 层纱布过滤,以滤除菌丝;4 000 r/min 条件下离心 15 min,合并上清液,用于粗毒素提取。用 2 mol/L 盐酸溶液调制上清液 pH 值至最佳条件。选用乙酸乙酯(A)与上清液(B)不同配比溶液进行粗毒素提取;分别合并上层有机相和水相。真空旋转蒸发上层有机相,以去除乙酸乙酯,获得 FOS 粗毒素。对水相进行检测,放于 -20℃保存备用。

1.6 FOS 毒素主成分的分离与纯化

采用 Waters LC150 半制备液相色谱仪对 FOS 滤液进行分离和纯化。洗脱程序参照 1.4 FOS 滤液的 HPLC 检测方法进行。流速为 10 mL/min;检测波长为 270 nm;进样量为 500 μL,特定时间分别对提取物进行收集。将收集到的不同物质溶液分别合并,30℃真空旋转蒸发,去除部分溶剂后真空冻干。将获得的物质分别做液质、红外和核磁共振氢谱分析,确定物质结构。

1.7 FOS 毒素主要成分对芝麻毒性分析

挑选豫芝 11 号芝麻种子各 500 粒,用清水冲洗种子表面 5 min。3% 次氯酸钠浸泡种子 10 min 后,用无菌水冲洗种子 3~4 次;将消毒后的种子放入装有 10 mL 无菌水的三角瓶中振荡培养 24 h。挑选露白的芝麻种子,分别接种在加有 5 μg/mL FA 或 9,10-脱氢 FA 的 MS 固体培养基上,25℃、光-暗周期 14 h—10 h 下培养。每个处理设置 3 个重复,每个重复接种 6 粒种子,2 周后调查芝麻幼苗及根生长情况,拍照记录。

2 结果与分析

2.1 尖孢镰刀菌芝麻专化型培养液毒素成分检测

选取尖孢镰刀菌芝麻专化型 HSFO07021 菌株,理查德培养液培养 45 d,期间进行孢子浓度检测(图 1),并对菌液滤液进行液相色谱分析(图 2)。结果显示,在 5~45 d 培养过程中,理查德培养液中 HSFO07021 菌株的孢子数量在 8×10⁶~60×10⁶ 个/mL 范围,孢子生长量有一定的增长;在 25 d 时,孢子浓度达到最大值。液相色谱分析表明,在保留时间分别是 8.461、18.255、19.770 min 时,菌液中存在 3 种特异物质,

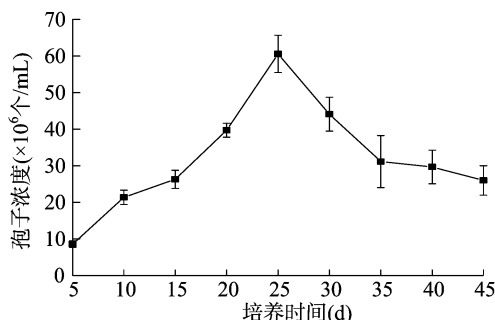


图1 尖孢镰刀菌芝麻专化型 HSFO07021 孢子生长浓度变化

分别命名为物质 I、II 和 III。物质保留时间与朱强宾等报道的物质 II、III 和 IV^[11] 较为一致。

2.2 尖孢镰刀菌芝麻专化型毒素制备与鉴定

根据上述 3 种物质的液相色谱峰位置,最终确定尖孢镰刀菌芝麻专化型毒素物质 I 的收集时间为 5.328~5.980 min (图 3-a);物质 II 的收集时间是 17.520~17.978 min,物质 III 的收集时间为 18.321~18.860 min(图 3-b)。

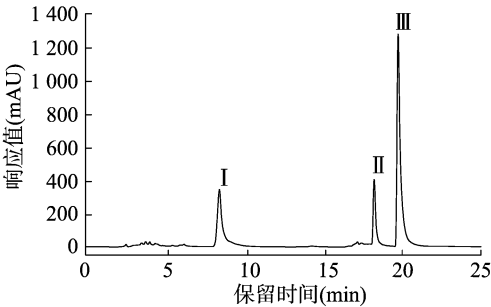
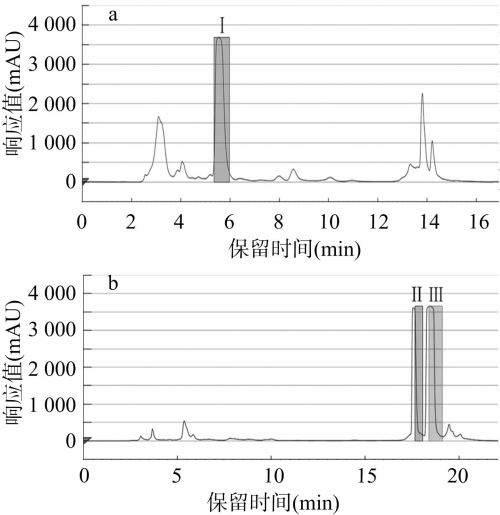
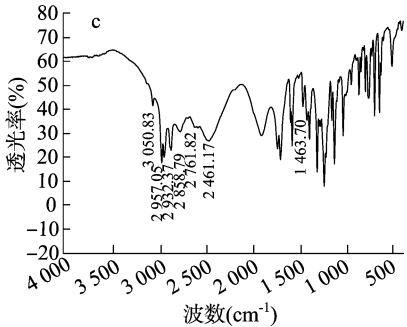
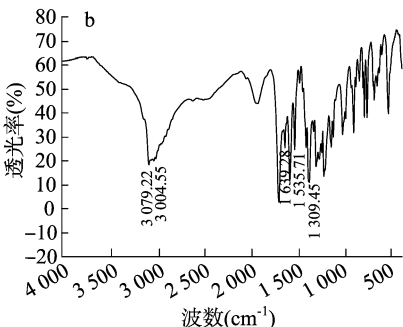
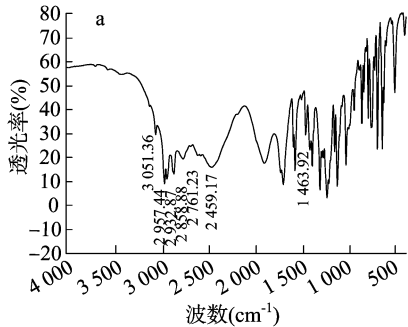


图2 尖孢镰刀菌芝麻专化型 HSFO7021 菌液滤液的液相色谱图



a—物质 I 收集时间与峰值; b—物质 II 和 III 收集时间与峰值
图3 物质 I、II 和 III 制备液相色谱图

将收集到的上述 3 种物质溶液分别合并,30 ℃ 真空旋转蒸发去除部分溶剂后,真空冻干,获得物质 I、II 和 III 纯品。其中物质 I 为棕黄色黏稠状液体,物质 II 为微黄色粉末,物质 III 为白色粉末。以 FA 标准品为对照,将获得的 3 种物质进



a—FA 标准品; b—物质 II 纯品; c—物质 III 纯品

图4 FOS 毒素3个主要成分的傅立叶变换红外光谱图

行结构分析。

2.3 毒素主要成分结构分析

采用质谱仪对获得的粗毒素和各纯化分离毒素成分进行分析(表 1)。结果显示,物质 I 的质核比值为 196.097 3 $[M+H]^+$, 218.079 0 $[M+Na]^+$;物质 II 的质核比值为 178.086 8 $[M+H]^+$;物质 III 的质核比值为 180.102 4 $[M+H]^+$ 。3 种物质的摩尔质量分别是 195.097 3、177.086 8、179.094 6 g/mol,分子式分别为 $C_{10}H_{13}NO_3$ 、 $C_{10}H_{11}NO_2$ 和 $C_{10}H_{13}NO_2$ 。

表 1 FOS 毒素 3 个主要成分的质谱分析结果

毒素成分代号	质荷比 (m/z)	摩尔质量 (g/mol)	分子式
物质 I	196.097 3 $[M+H]^+$	195.097 3	$C_{10}H_{13}NO_3$
物质 II	178.086 8 $[M+H]^+$	177.086 8	$C_{10}H_{11}NO_2$
物质 III	180.102 4 $[M+H]^+$	179.094 6	$C_{10}H_{13}NO_2$

因物质 I 获取量少、纯度较低,我们随后对物质 II、III 开展了傅立叶红外光谱仪分析。对比结果显示,FA 标品(图 4-a)在 2 957.44、2 858.88、1 463.92 cm^{-1} 处有吸收峰,结构中存在甲基;物质 II (图 4-b)在 3 079.22~3 004.55、1 639.28、1 535.71、1 309.45 cm^{-1} 处有特异的吸收峰,表明分子结构中存在端基烯烃键。比较发现物质 III (图 4-c)的峰位与 FA 完全一致,因此可以判定物质 III 与镰刀菌酸标准品完全相同。

为确定上述 3 种物质的结构,进一步进行了核磁共振氢谱信息分析(图 5)。

与镰刀菌酸标准品的核磁共振氢谱数据比对,确定物质 I 结构为 10-羟基镰刀菌酸(10-OH-FA)。该物质常温下为黏液状,可能与溶剂残留较多有关。物质 II 结构为 9,10-脱氢 FA,纯度约 98%。物质 III 核磁共振氢谱数据与标准品 FA 数据完全相同,再次确定该物质为镰刀菌酸 FA,纯度 >98%。

根据上述结果,最终确定上述 3 种毒素主成分分别为镰刀菌酸(FA)、9,10-脱氢镰刀菌酸(9,10-脱氢 FA)和 10-羟基镰刀菌酸(10-OH-FA)。结构见图 6。

2.4 FOS 毒素主要成分的毒性分析

为判定 FOS 毒素主要成分对芝麻的毒害作用,采用 HSFO7021 菌液制备的 FA 和 9,10-脱氢 FA 纯品进行了芝麻幼苗处理。由图 7 可知,对照中芝麻幼苗处于 1 对真叶期,根生长正常(图 7-a、图 7-d)。与对照相比,在 5 $\mu g/mL$ FA

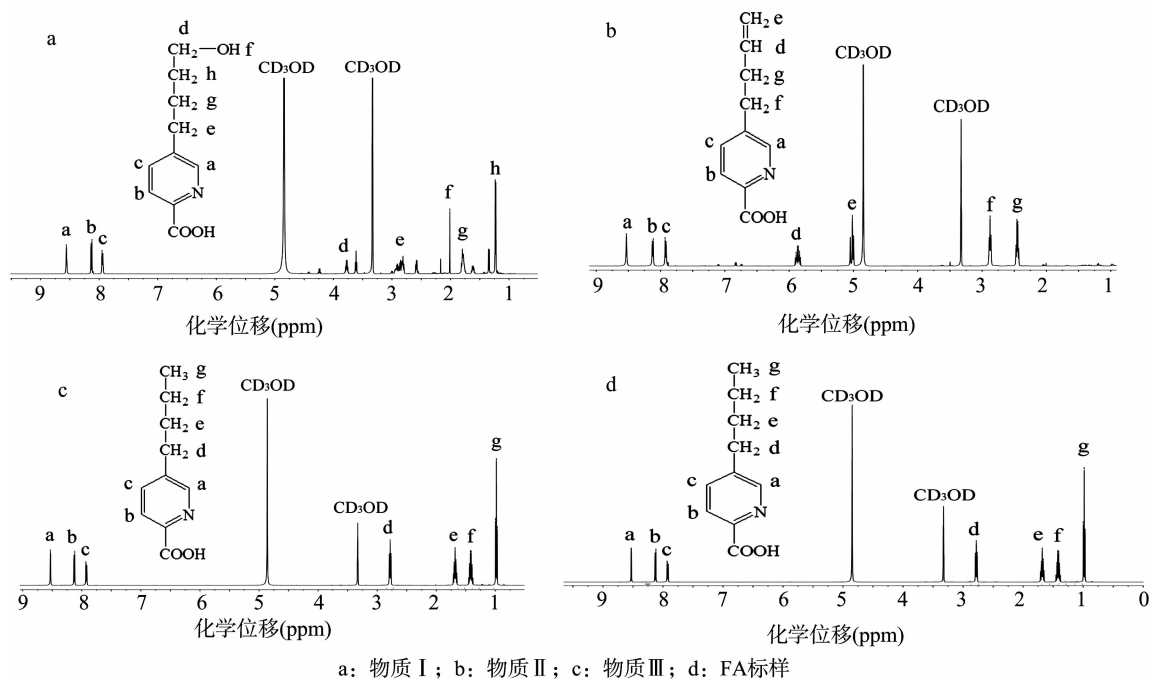
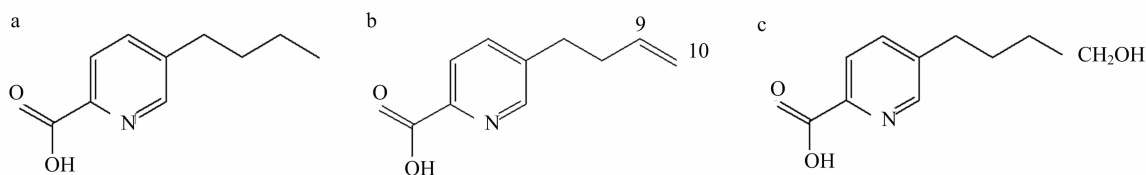


图5 FOS 毒素 3 个主要成分的核磁共振氢谱分析结果

a—FA; b—9, 10-脱氢FA; c—10-OH-FA
图6 FOS 毒素3个主要成分的分子结构

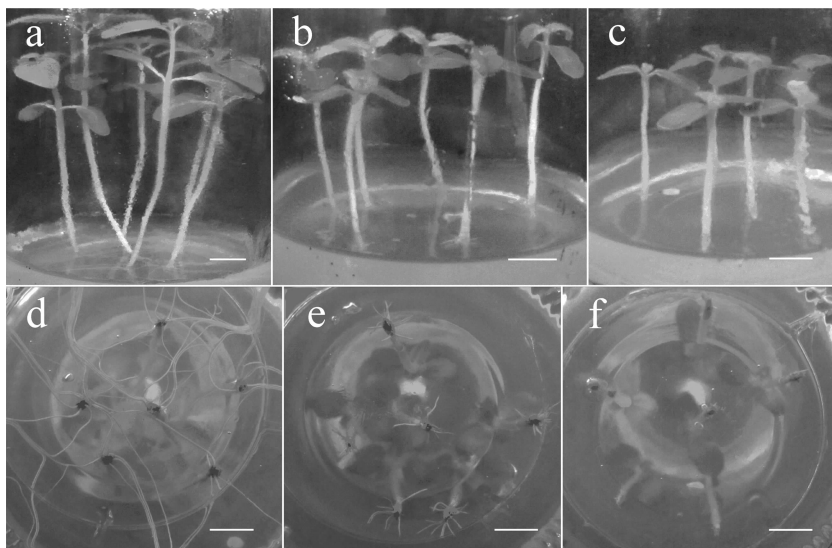
和 5 $\mu\text{g/mL}$ 9, 10-脱氢 FA 处理 2 周后, FA 处理组植株真叶尚未展开, 生长迟缓(图 7-b、图 7-c); 9, 10-脱氢 FA 处理组根伸长缓慢(图 7-e)或尚未长出(图 7-f)。结果表明, FA 和 9, 10-脱氢 FA 毒素对芝麻有毒害作用; 相对于 FA, 9, 10-脱氢 FA 毒素处理对芝麻茎叶生长和根伸长的抑制程度弱。

3 结论与讨论

为评价尖孢镰刀菌芝麻专化型产生毒素的种类和水平, 本研究利用建立的高效乙酸乙酯萃取方法和分离方法, 首次从 HSF07021 菌液中制备出了镰刀菌酸、9, 10-脱氢镰刀菌酸和 10-羟基镰刀菌酸等 3 种 FOS 毒素, 研究结果为后续的芝麻枯萎病菌致病机理及芝麻抗病机理研究奠定了技术和材料基础。在镰刀菌毒素提取方面, 目前主要选用活性炭吸附法^[12,15]、活性炭吸附萃取法^[16]和乙酸乙酯萃取法^[13]进行。Löffler 等发现引起百合茎腐病的尖孢镰刀菌可以产生镰刀菌酸, 并采用反相 HPLC 法和 GC-MS 法成功测定了粗毒素中镰刀菌酸的含量^[17]。Amalfitano 等建立了镰刀菌酸和脱氢镰刀菌酸(FA-2H)及其甲酯化物的液相快速检测方法^[18]。在毒素分离方面, 通用的方法为 TLC(thin layer chromatography)法和柱色谱法^[14]。但是由于该方法操作繁琐, 且物质获取量

小、成功率低, 毒素分离应用受到限制。本研究借助于半制备液相色谱仪, 结合液相检测方法, 最终确定用 5% 乙腈水溶液溶解粗毒素, 以改进液相分离方法, 从而成功建立了 FOS 毒素制备及分离方法。与原洗脱程序相比, 新方法在毒素分离方面节省了 time, 且样品分离效率得到显著提高(数据未公开)。

镰刀菌酸是一种非特异性真菌毒素, 可以由许多镰刀菌属种类产生, 可加速植物的枯萎。除镰刀菌酸外, 亦有学者从镰刀菌的培养液中, 发现了其他镰刀菌酸类似物。Cappaso 等首次从 *Fusarium nygamai* 菌株滤液中发现并分离出了 FA 和 9, 10-脱氢 FA 甲酯化物。处理后发现, FA 甲酯化物可导致番茄叶片变黄并迅速坏死, 并能严重抑制根的生长^[19]。近期朱强宾等研究结果显示, 采用液体培养基培养弱致病力菌株 HSF07021 和强致病力菌株 HSF009100, 不同菌株形成峰的数量有显著差异^[11]。检测发现 HSF07021 菌液有 4 种峰物质存在。本研究从 HSF07021 菌株的理查德培养液滤液中检测到了 10-羟基镰刀菌酸(物质 I)、9, 10-脱氢镰刀菌酸(物质 II)和镰刀菌酸(物质 III)等 3 种主成分(图 2), 纯品收集时间分别为 5.328 ~ 5.980 min、17.520 ~ 17.978 min 和 18.321 ~ 18.860 min(图 2)。结构检测进一步表明, 以上 3 种物质分别对应了朱强宾等预测的物质 II、III 和 IV^[11]。研究首



a、b、c—分别为清水对照及5 µg/mL 9,10-脱氢FA和5 µg/mL FA毒素处理后第15天芝麻幼苗生长情况；d、e、f—分别为清水对照及5 µg/mL 9,10-脱氢FA和5 µg/mL FA毒素处理后第15天芝麻根生长情况。标尺=1 cm

图7 FA 和 9, 10-脱氢FA毒素对芝麻幼苗生长的影响

次确定,尖孢镰刀菌芝麻专化型菌株产生的镰刀菌酸和脱氢镰刀菌酸2种毒素均对芝麻幼苗生长发育有抑制作用,且毒害水平有一定差异(图7)。Bani 等通过叶片穿刺试验,证实了FA和9,10-脱氢FA对豌豆叶均表现出了高毒害活性^[14]。Stipanovic 开展了镰刀菌酸、吡啶甲酸及其类似物对棉花子叶的生物测定试验,研究发现镰刀菌酸甲酯化物的毒性最高^[20]。为明确芝麻枯萎病菌致病机理,下一步我们将深入开展FA及其类似物的毒害机理研究,以最终实现对芝麻枯萎病害的高效防控。

参考文献:

- [1] Zhang H Y, Miao H M, Wang L, et al. Genome sequencing of the important oilseed crop *Sesamum indicum* L. [J]. *Genome Biology*, 2013, 14(1): 401.
- [2] Ashri A. Sesame breeding: plant breeding reviews [M]. Oxford: Oxford Press, 1998: 79–228.
- [3] Li C, Miao H M, Wei L B, et al. Association mapping of seed oil and protein content in *Sesamum indicum* L. using SSR markers [J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e105757.
- [4] 李桂华, 王瑞雪, 王婷婷. 河南省黑芝麻及其油脂组成成分分析研究[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(5): 10–13.
- [5] 仇存璞, 张海洋, 常淑娟, 等. 芝麻枯萎病原菌致病力室内鉴定方法[J]. *植物病理学报*, 2014, 44(1): 26–35.
- [6] 苏银玲, 苗红梅, 魏利斌, 等. 芝麻枯萎病原菌分离和纯化方法研究[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(1): 92–94.
- [7] 袁红旭, 商鸿生. 棉花枯萎病菌接种及粗毒素处理后棉苗维管束病理特征[J]. *植物病理学报*, 2002, 32(1): 16–20.
- [8] 于莉, 黎永坚, 李赤, 等. 香蕉枯萎病菌毒素的成分分析及其生物测定[C]//中国植物病理学会2008年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 228–234.
- [9] Wu H S, Yin X M, Zhu Y Y, et al. Nitrogen metabolism disorder in watermelon leaf caused by fusaric acid [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2007, 71(1/2/3): 69–77.
- [10] Smith T K, Sousadias M G. Fusaric acid content of swine feedstuffs [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41(12): 2296–2298.
- [11] 朱强宾, 张海洋, 段迎辉, 等. 芝麻枯萎病菌毒素成分分析及其对芝麻幼苗的毒性[J]. *植物保护*, 2016, 42(4): 27–33, 42.
- [12] 台莲梅, 许艳丽, 高凤昌. 尖孢镰刀菌毒素的初步研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2004, 16(4): 9–12.
- [13] 王纯利, 王冬梅, 黄炜, 等. 西瓜枯萎病菌致病力与镰刀菌酸和 β -1,4糖苷酶活性的关系研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2000, 23(1): 1–6.
- [14] Bani M, Rispaill N, Evidente A, et al. Identification of the main toxins isolated from *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi* race 2 and their relation with isolates' pathogenicity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(12): 2574–2580.
- [15] 徐敬友, 张华东, 张红, 等. 立枯丝核菌毒素的产生及致病力的关系[J]. *扬州大学学报*, 2004, 25(2): 61–64.
- [16] Vidhyasekaran P, Ponnmalar T R, Samiyappan R, et al. Host-specific toxin production by *Rhizoctonia solani*, the rice sheath blight pathogen [J]. *Phytopathology*, 1997, 87(12): 1258–1263.
- [17] Löffler H, Mouris J R. Fusaric acid; phytotoxicity and *in vitro* production by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lilii*, the causal agent of basal rot in lilies [J]. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 1992, 98(2): 107–115.
- [18] Amalfitano C, Pengue R, Andolfi A, et al. HPLC analysis of fusaric acid, 9,10-dehydrofusaric acid and their methyl esters, toxic metabolites from weed pathogenic *Fusarium* species [J]. *Phytochemical Analysis*, 2003, 13(5): 277–282.
- [19] Capasso R, Evidente A, Cutignano A, et al. Fusaric and 9,10-dehydrofusaric acids and their methyl esters from *Fusarium nygamai* [J]. *Phytochemistry*, 1996, 41(4): 1035–1039.
- [20] Stipanovic R D, Puckhaber L S, Liu J, et al. Phytotoxicity of fusaric acid and analogs to cotton [J]. *Toxicon*, 2011, 57(1): 176–178.