

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202012013

滕秋梅, 杨晓东, 何成新, 等. 韭菜化感物质草莓酸对香蕉枯萎病菌的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(11): 1901–1912.
TENG QM, YANG XD, HE CX, et al. Effects of allelochemical strawberry acid from *Allium tuberosum* on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [J]. *Guihaia*, 2022, 42(11): 1901–1912.



韭菜化感物质草莓酸对香蕉枯萎病菌的影响

滕秋梅¹, 杨晓东², 何成新¹, 徐广平^{1,3}, 黄玉清⁴, 张德楠¹,
孙英杰¹, 牟海飞⁵, 韦绍龙⁵, 周龙武^{1*}

(1. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区广西植物研究所, 广西 桂林 541006; 2. 汕尾市陆河县陆河中学, 广东 汕尾 516700; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 4. 南宁师范大学, 广西北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001; 5. 广西壮族自治区农业科学院 生物技术研究所, 南宁 530007)

摘要:香蕉枯萎病主要由尖孢镰刀菌 4 号生理小种 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Foc4) 引起的一种土传病害, 严重威胁香蕉产业的可持续发展。为寻求一种经济有效且环保的防治措施, 以韭菜化感物质的衍生物草莓酸 (strawberry acid, SA) 为材料, 通过平板和盆栽实验, 研究了 SA 对 Foc4 的菌丝生长、香蕉枯萎病情指数、土壤微生物数量、土壤酶活性的影响。结果表明: (1) 随着 SA 浓度的增加, Foc4 的菌落生长直径显著减小, 第 5 天时菌落直径在 SA 浓度为 300、450 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比 150 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 分别减小了 49.15%、70.89%; 液体培养条件下 SA 浓度为 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 Foc4 的分生孢子数量显著低于对照处理 (相差 470 多倍); pH 为 5 时 SA 对 Foc4 的抑制效果显著比 pH 为 7 和 9 时好。(2) 随实验处理时间的延长, 添加 SA 后香蕉幼苗的病情指数显著低于对照。(3) 土壤细菌、真菌数量和微生物总量在 SA 为 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均为最高; Foc4 数量随 SA 浓度升高而降低, 在 1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著降低。(4) 各土壤酶在浓度 (300~600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) SA 处理时活性较高; 1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著降低, 过氧化氢酶和多酚氧化酶较对照分别降低了 41.88%、54.82%。(5) 相关性分析得出, 土壤微生物总量与细菌、真菌数量极显著正相关; 土壤真菌与放线菌显著负相关; 土壤细菌、真菌和放线菌数量均与蔗糖酶、多酚氧化酶显著正相关; 蔗糖酶与脲酶、过氧化氢酶与多酚氧化酶均显著正相关。综上认为, 添加 SA 浓度为 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 能较好地抑制 Foc4 的菌丝生长且能提高其抑制率, 病情指数明显降低, 有利于改善香蕉的生长环境。该研究结果为有效利用 SA 防治香蕉枯萎病提供了科学依据。

关键词: 草莓酸, 化感物质, 香蕉枯萎病, 尖孢镰刀菌 4 号生理小种, 土壤微生物数量, 土壤酶活性
中图分类号: Q945.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2022)11-1901-12

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA18118028); 国家自然科学基金 (31760162, 41361057); 广西自然科学基金 (2020GXNSFBA297048, 2018GXNSFAA050069); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题 (KDL & Guangxi202004); 广西植物研究所基本业务费项目 (桂植业 17012, 21009, 21010); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金 (19-185-7, 19-50-6); 广西植物研究所学科发展基金 (桂植发 001, 006) [Supported by Science and Technology Major Program of Guangxi (AA18118028); National Natural Science Foundation of China (31760162, 41361057); Natural Science Foundation of Guangxi (2020GXNSFBA297048, 2018GXNSFAA050069); Guangxi Major Science and Technology Innovation Base on Karst Dynamics (KDL & Guangxi202004); Basic Business Fee Project of Guangxi Institute of Botany (17012, 21009, 21010); Fund of Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain (19-185-7, 19-50-6); Construction Fund for Subjects of Guangxi Institute of Botany (001, 006)]。

第一作者: 滕秋梅 (1991-), 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤生态学和环修复研究, (E-mail) 1037014105@qq.com。

*通信作者: 周龙武, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤微生物与生态学的研究, (E-mail) 785989184@qq.com。

Effects of allelochemical strawberry acid from *Allium tuberosum* on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

TENG Qiumei¹, YANG Xiaodong², HE Chengxin¹, XU Guangping^{1,3}, HUANG Yuqing⁴, ZHANG Denan¹, SUN Yingjie¹, MOU Haifei⁵, WEI Shaolong⁵, ZHOU Longwu^{1*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, Guangxi, China; 2. Luhe middle school of Luhe County, Shanwei 516700, Guangdong, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China; 4. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 5. Biotechnology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: Banana *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* is a soil-borne disease, which seriously threatens the sustainable development of banana industry. In order to seek an economic, effective and environmental protection measures, plate and pot experiments were carried out by using allelochemical strawberry acid (SA) to investigate the effects on hypha growth, disease severity index of banana wilt, soil microorganism quantity and soil enzyme activity. The results were as follows: (1) With the increase of SA concentration, the colony growth diameter of Foc4 decreased significantly, which decreased by 49.15% and 70.89% when SA concentrations were 300 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ and 450 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ compared with 150 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, on the fifth day. The number of spores were significantly lower than that of the control treatment (more than 470 times) when SA concentration was 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ under liquid medium condition. SA had a better inhibitory effect on Foc4 at pH 5 and was significantly better than that at pH 7 and pH 9. (2) As time going, the disease severity index of banana seedlings was significantly lower than that of the control after adding SA. (3) The numbers of soil bacteria, fungi and the total amount of microorganisms were all the highest when SA was 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$; The number of Foc4 decreased with the increase of SA concentration, and significantly decreased when SA concentration was 1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$. (4) The soil enzyme activity was higher when SA concentration was 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, and was significantly decreased when SA concentration was 1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, the activity of catalase and polyphenol oxidase were lower by 41.88% and 54.82% compared with the control, respectively. (5) Correlation analysis showed that the total amount of soil microorganisms was extremely significantly positively correlated with the numbers of bacteria and fungi. Soil fungi was significantly negatively correlated with actinomycetes. The numbers of soil bacteria, fungi and actinomycetes were all significantly positively correlated with invertase and polyphenol oxidase. Invertase and urease, catalase and polyphenol oxidase were all significantly positively correlated. In general, adding SA at a concentration of 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ can better inhibit the hypha growth of Foc4, increase its inhibition rate, and significantly reduce the disease severity index. Meanwhile, it can improve the growth environment of bananas. This study provides an academic reference for the effective use of SA to control banana wilt.

Key words: strawberry acid, allelochemical, banana wilt, Foc4, soil microbial quantity, soil enzyme activity

香蕉 (*Musa nana*) 是世界产量第二大的水果,也是消费量最大的水果之一,目前香蕉枯萎病给全球香蕉产业带来了较大威胁。香蕉枯萎病又称巴拿马病,其病原菌主要由尖孢镰刀菌古巴专化型 4 号生理小种 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, Foc4) 侵染引起,是一种土传病害 (Ploetz, 2015)。香蕉枯萎病主要发生在非洲、南美洲和澳大利亚以及我国东南沿海各省等香蕉主产区,生

产中尚未有高效的防控措施。目前,防控香蕉枯萎病比较有效的措施是培育抗病品种以及轮作和套种等 (孙雪丽等, 2018)。近年来的研究发现,利用植物间的化感作用可以有效防控由真菌侵染等引起的土传病害,且对生态环境不会造成二次污染 (Gomes et al., 2017), 如西芹的挥发物通过化感作用能有效抑制黄瓜枯萎病 (陈磊等, 2012), 蚕豆和小麦间种对蚕豆枯萎病有抑制作用 (杨智仙等,

2014), 番茄-分蘖洋葱伴生栽培能显著控制灰霉病的发生(吴瑕等, 2015)。上述研究成果说明利用化感作用防治病害的发生切实可行, 但有关化感作用抗性机理的研究不多(高晓敏等, 2014)。

香蕉枯萎病初侵染主要来源于病株残体和带菌土壤, 由于 Foc4 的厚垣孢子可在土壤中存活数十年, 所以抑制土壤中 Foc4 的孢子萌发和菌丝生长可能是限制 Foc4 在香蕉根系生长和减少香蕉枯萎病发生的有效措施。前人研究发现, 韭菜 (*Allium tuberosum*) (柳红娟等, 2015)、番茄 (*Solanum lycopersicum*) (刘范等, 2018)、竹荪 (*Dictyophora indusiata*) (范田娜等, 2019)、木薯 (*Manihot esculenta*) (廉法卓等, 2019) 等提取物(含有化感物质)能够抑制 Foc4 菌丝生长且可降低香蕉枯萎病的发生, 但这些研究仅从某个方面(如抑制菌丝生长)进行了研究, 缺乏较系统的研究。为探明化感作用防控香蕉枯萎病的作用机制, 本研究在前期韭菜挥发物防治香蕉枯萎病的基础上, 选择韭菜代谢产物 2-甲基-2-戊烯醛的衍生物草莓酸(strawberry acid, SA)化感物质(Zhang et al., 2013), 通过 SA 与 Foc4 的互作实验, 系统地研究化感物质 SA 对 Foc4 菌丝生长、香蕉枯萎病病情指数以及对香蕉土壤微生物数量和土壤酶活性的影响, 以期对香蕉枯萎病的防治提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

香蕉幼苗为桂蕉 1 号(AAA), 由广西壮族自治区农业科学院生物技术研究所提供; Foc4 为前期实验室筛选和保存的菌株; 供试的 SA (分子式为 $C_6H_{10}O_2$, 无色透明液体, 含量 99%) 购自长沙凯美香精香料有限公司; 红壤土、营养土和泥炭土按照体积 1:2:2 的比例混合后作为供试土壤。土壤理化性质: 有机质 $23.51 g \cdot kg^{-1}$, 全氮 $1.12 g \cdot kg^{-1}$, 全磷 $0.66 g \cdot kg^{-1}$, 全钾 $15.94 g \cdot kg^{-1}$, 速效氮 $179.14 mg \cdot kg^{-1}$, 速效磷 $21.48 mg \cdot kg^{-1}$, 速效钾 $176.39 mg \cdot kg^{-1}$, pH 6.44。

1.2 方 法

1.2.1 SA 对 Foc4 菌丝生长的影响 配置 SA 母液: 用移液枪吸取 1 mL 纯的 SA 溶液至容量瓶, 用灭菌水定容到 100 mL, 该溶液中的 SA 浓度为 $10 mL \cdot L^{-1}$ 。先用移液枪分别吸取该浓度 SA 溶液 0、

1.2、2.4、3.6、4.8 mL 于 5 mL 灭菌的离心管中, 再分别加入一定量的灭菌水使其总体积为 5 mL, 混匀后分别加到 75 mL PDA 培养基中(温度降低至 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时), 使其充分混匀后配成含有 SA 浓度为 0、150、300、450、600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (分别记为 CK、A、B、C、D) 的培养基。分装到培养皿, 冷却凝固后接种一块直径为 0.5 cm 的 Foc4 菌饼, 置于 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的培养箱中培养 7 d, 每天测量每个平板上 Foc4 菌落直径, 用以评价 SA 对 Foc4 菌丝的生长抑制情况, 每个处理设置 5 个重复。参考漆艳香等(2007)的计算公式:

菌落扩展直径(cm) = 菌落直径平均值 - 0.5;

菌丝生长抑制率(%) = (对照组菌落直径 - 处理组菌落直径) / 对照组菌落直径 $\times 100$ 。

1.2.2 液体培养条件下 SA 对 Foc4 菌丝重量和分生孢子产量的影响 用打孔器在培养一周后的 Foc4 平板上打取直径为 0.5 cm 的 Foc4 菌饼, 放入 150 mL 的 PDA 培养基(马铃薯 200 g, 葡萄糖 20 g, 琼脂 18 g, 水 1 000 mL), 每瓶加入 9 mL SA, 使每瓶培养基中含 SA 的浓度为 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 不加 SA 的培养基作为对照处理, 每个处理 5 次重复。在 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $140 r \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡培养, 培养 7 d 后过滤, 收集菌丝和滤液, 用血球计数板计算 Foc4 的分生孢子产量。

1.2.3 不同 pH 条件下 SA 对 Foc4 菌丝生长的影响 分别用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 溶液将 PDA 培养基的 pH 调成 5、7、9, 分别加入不同浓度 SA 使培养基中的 SA 浓度分别为 0、300、600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 后面步骤同 1.2.1。

1.2.4 香蕉枯萎病病情指数的变化 先在 250 mL 的三角瓶中加入 100 mL 的 Czapek 培养基, 再加入 5 个直径为 0.5 cm 的 Foc4 菌块, $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $140 r \cdot \text{min}^{-1}$ 下振荡培养, 12 d 后过滤菌丝, 滤液经 $8 000 r \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后, 取上清液无菌过滤, 滤液即为粗毒素滤液。以添加 SA (SA 终浓度为 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) 的粗毒素滤液为处理组, 并以未添加 SA 的粗毒素滤液为对照。参考漆艳香等(2007)的方法, 将香蕉幼苗去除根主轴下部 2/3 和须根, 放入装有 30 mL 粗毒素滤液的培养瓶中, 香蕉苗基部有 2 cm 浸入液体中, 每个瓶子放置 1 株, 每个处理 5 个重复, 室温下培养。每隔 24 h 观察 1 次处理的香蕉症状, 调查其发病情况。参考许文耀等(2004)的方法, 将病情级别划分为 6 个等级: 0

级,无表现任何症状;1级,叶片出现失水状,轻微萎蔫,顶端4片叶中有1~2片叶开始变褐;3级,叶片萎蔫明显,顶端4片叶中有3~4片叶开始变褐;5级,叶片呈现暗绿色或暗褐色萎蔫;7级,部分叶片枯死;9级,全株枯死。香蕉枯萎病的计算公式病情指数:

病情指数 = $\sum(\text{各级病株数} \times \text{各级代表值}) / (\text{总株数} \times \text{最高级代表值}) \times 100\%$ 。

1.2.5 土壤微生物数量及土壤酶活性的变化特征 实验于人工气候箱中进行。Foc4培养2周后,用移液枪吸取无菌水反复吹打菌落,用灭菌后的玻璃涂布棒刮取Foc4的孢子到无菌水中,过滤后,利用微型旋涡混合仪,使孢子悬液振荡均匀,用血球计数板,统计菌液的孢子含量,无菌水稀释后使孢子悬液浓度约为 $10^6 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。香蕉苗(展叶期,有5片叶)种植于装有1.25 kg自然土(无枯萎病原菌)的小花盆中,香蕉枯萎病原菌采用灌根接菌法。实验设计有4个处理,分别为CK、A、B、C。每个处理均先加入50 mL Foc4菌液,再加入100 mL浓度分别为0、300、600、1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的SA溶液,其中CK的0 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以无菌水代替。施加SA的处理每隔4 d加1次。每个处理10盆香蕉苗,接菌半个月后采集对照及各处理的土壤并检测其土壤微生物数量、Foc4数量变化和土壤酶活性。

土壤细菌、真菌和放线菌的数量通过稀释平板计数法(许光辉和郑洪元,1986)测定,采用的培养基分别为牛肉膏蛋白胨、改良高氏1号(苯酚 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和马丁(Martin)孟加拉红-链霉素(链霉素 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。计算方法(细菌 $10^6 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土,真菌 $10^4 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土,放线菌 $10^3 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土):每克样品的菌数=同一稀释度几次重复的菌落平均数 \times 稀释倍数。Foc4数量的测定参考Smith等(2008)的方法,采用Komada改良培养基,即培养基成分为 KH_2PO_4 1 g、Fe-Na-EDTA 0.01 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g、L-天门冬酰胺 2 g、D-半乳糖 15 g、灭菌水 1 L;抗生素类为二硝基苯 1 g、牛胆盐 0.5 g、四硼酸钠 1 g、硫酸链霉素 0.3 g。培养基调节pH至(3.8 \pm 0.2)。以 $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 干土表示。

土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性的测定分别用苯酚钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、磷酸苯二钠比色

法、茚三酮比色法、高锰酸钾滴定法、碘量滴定法(关松荫,1986)。

1.3 数据分析

使用Excel 2016软件进行统计分析;用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并用最小显著差数法(least significant difference, LSD)进行差异显著性检验(显著性水平设定为 $\alpha < 0.05$,极显著水平设定为 $\alpha < 0.01$),采用皮尔森(Pearson)法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同培养浓度下SA对Foc4菌丝生长的影响

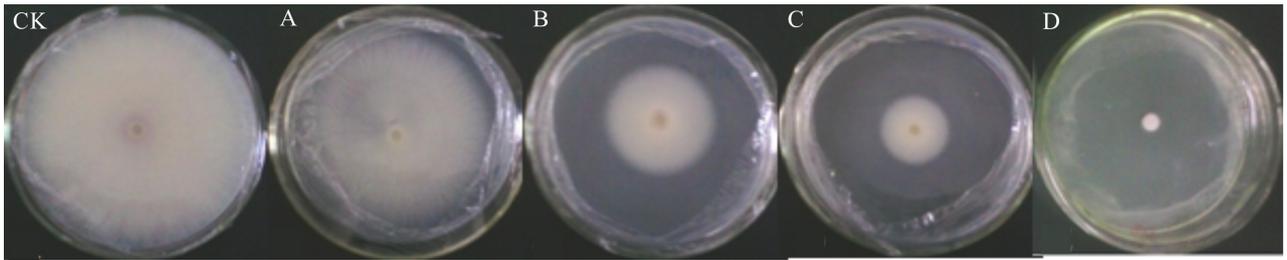
0(CK)、150、300、450、600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的SA在平板上处理7 d的结果如图1和表1所示。经CK、A、B和C处理后,随着时间的延长,同一浓度培养下Foc4的菌落直径均显著增加($P < 0.05$),第5天相比第3天分别增加了41.43%、48.20%、58.36%、57.14%;在同一培养时间,随着SA浓度的增加,Foc4菌落直径则显著减小($P < 0.05$),第5天时,B、C比A分别减少了49.15%、70.89%。经D处理后,Foc4菌落直径随着时间的增加均没有变化,说明该SA浓度对香蕉枯萎病原菌的菌落具有显著抑制效果。

2.2 不同培养时间下SA对Foc4的抑制作用

由图2可知,随着SA处理浓度的升高,抑制作用越大;第3天时,B、C、D处理的抑制率比A处理分别提高了49.21%、55.47%、57.29%,且彼此间的差异均显著($P < 0.05$);第1天至第7天,SA浓度为D时,抑制率始终达100%。另外,随着培养时间延长,SA对Foc4的抑制作用随之减弱,且呈现SA浓度越小抑制率降低越快的趋势,第7天时,浓度为A、B、C处理的抑制率比第4天分别下降了62.22%、32.41%、23.15%。结果表明,SA对Foc4的抑菌效果随着培养时间延长而减弱。

2.3 液体培养条件下,SA对Foc4菌丝和孢子产量的影响

由表2可知,液体培养条件下添加浓度为600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的SA后,Foc4孢子数量显著低于CK处理(相差470多倍),菌丝干重仅为0.008 g,说明产生的菌丝和孢子极少,表明添加SA显著抑制了菌丝干重增加和减少了培养基中孢子数量。



CK 为对照，未添加 SA；A、B、C、D 代表 SA 浓度分别为 150、300、450、600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。下同。
 CK is the control without SA；A, B, C and D represent SA concentrations of 150, 300, 450, 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The same below.

图 1 不同浓度 SA 对 Foc4 菌落生长的影响 (7 d)
 Fig. 1 Effects of different concentrations of SA on colony growth of Foc4 (7 d)

表 1 添加不同浓度 SA 后 Foc4 菌落生长的变化

Table 1 Changes of Foc4 colony growth after adding different concentrations of SA

处理 Treatment	菌落直径 Colony diameter (cm)		
	3 d	5 d	7 d
CK	4.41±0.17a	7.53±0.06a	9.01±0.62a
A	2.74±0.39b	5.29±0.43b	7.81±0.35b
B	1.12±0.14c	2.69±0.15c	4.64±0.39c
C	0.66±0.01d	1.54±0.09d	3.13±0.12d
D	0.50±0d	0.50±0e	0.50±0e

注：不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著。下同。
 Note: Different small letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below.

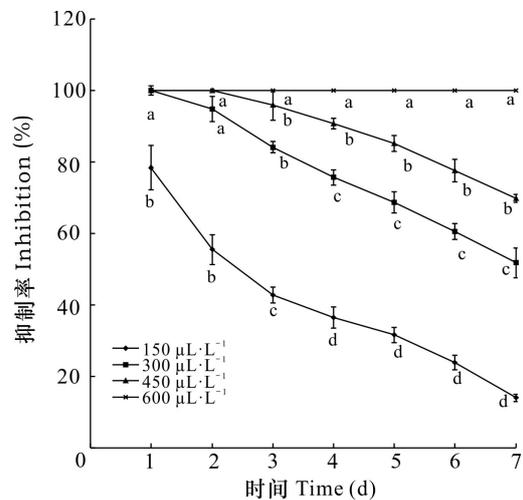
表 2 SA 对 Foc4 孢子数量和菌丝干重的影响

Table 2 Effects of SA on spore number and hypha dry weight of Foc4

处理 Treatment	孢子数量 Number of spores (cfu · mL ⁻¹)	菌丝干重 Dry weight of hypha (g)
CK	(7.58±1.03)×10 ⁷ a	0.300±0.03a
SA	(1.6±0.29)×10 ⁵ b	0.008±0.00013b

2.4 不同 pH 条件下 SA 对 Foc4 菌丝生长的影响

由图 3 可知，当浓度为 300 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 5 时，SA 对 Foc4 菌丝的抑制作用最大，随着 pH 增加，抑制率显著下降，pH 为 9 时的抑菌率较 pH 为 5 时低 52.68%；当 SA 浓度为 600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 5 时的抑制率也是最高 (100%)。可见，pH 不同，SA 对 Foc4 菌丝的抑菌率有差异，且偏酸性环境下 (pH 为 5) 的抑制作用更强。



不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著。下同。
 Different small letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below.

图 2 添加不同浓度 SA 后 Foc4 抑制率随时间的变化
 Fig. 2 Changes of the inhibition rate of Foc4 with time after adding different concentrations of SA

2.5 SA 对香蕉幼苗枯萎病病情指数的影响

随着时间的延长，香蕉苗发病程度越来越严重 (图 4:A)，病情指数逐渐增加 (图 4:B)。粗毒素处理 48 h 时，CK 的香蕉幼苗叶片出现萎焉，而添加 SA 的叶片表现正常 (不萎焉)，病情指数相比 CK 降低了 60%；处理 96 h 时，CK 植株呈现严重萎焉，植株部分叶片有些枯死，其病情趋向严重，添加 SA 的病情指数显著低于 CK；处理 96 h 和 120 h 较 CK 分别降低了 41.67%、40.00%，说明添加 SA 在很大程度上降低了香蕉苗枯萎病的发病程度。

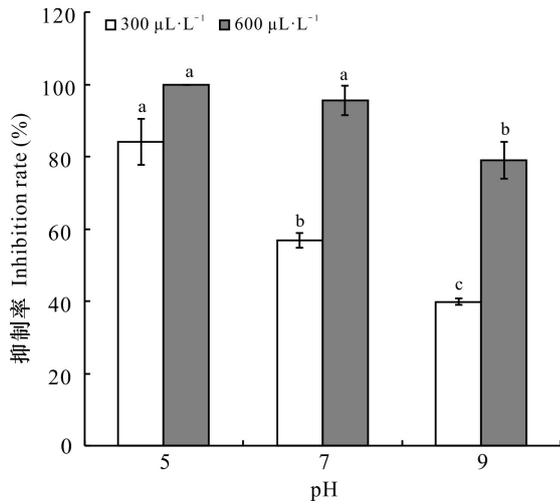


图3 不同pH梯度下添加SA后Foc4抑制率的变化
Fig. 3 Changes of the inhibition rate of Foc4 after adding SA under different pH conditions

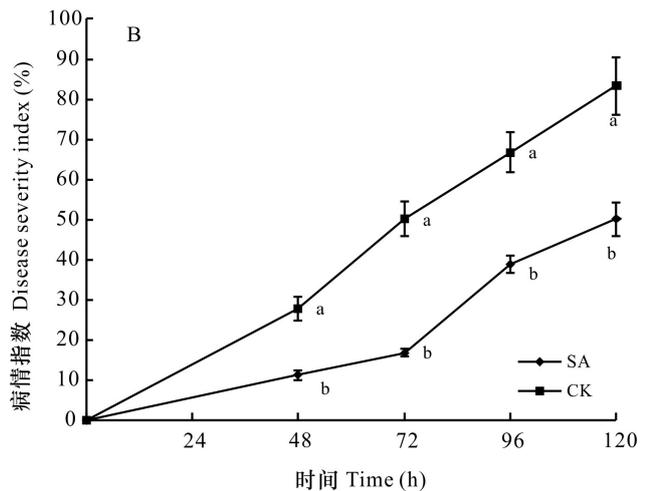
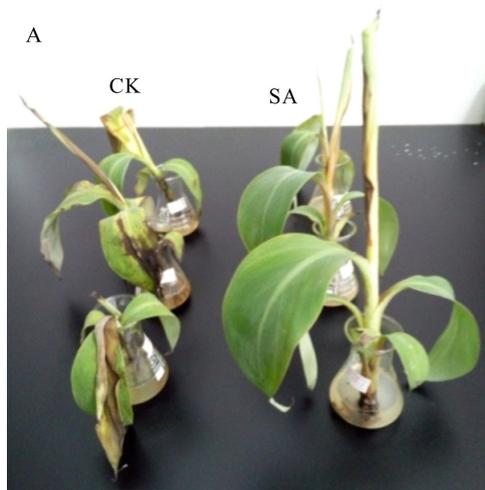


图4 添加SA对香蕉苗生长(A)和香蕉枯萎病病情指数(B)的影响
Fig. 4 Effects of SA addition on seedling growth (A) and wilt disease severity index (B) of banana

SA施到Foc4-香蕉-土壤系统的结果表明,Foc4数量(图5:L)随SA浓度的增加而降低,当浓度达到C($1\ 200\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)时,Foc4的数量显著低于CK(降低了26.75%),说明SA能抑制Foc4数量的增加,且高浓度的抑制作用更显著。

2.7 SA对土壤酶活性的影响

添加SA后,土壤酶活性差异明显(图6:M、N、O、P、Q、R)。土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和蛋白酶活性的变化特征一致,在A、B处理均趋于增大,特别是在B处理时均显著提高($P<0.05$),较CK分

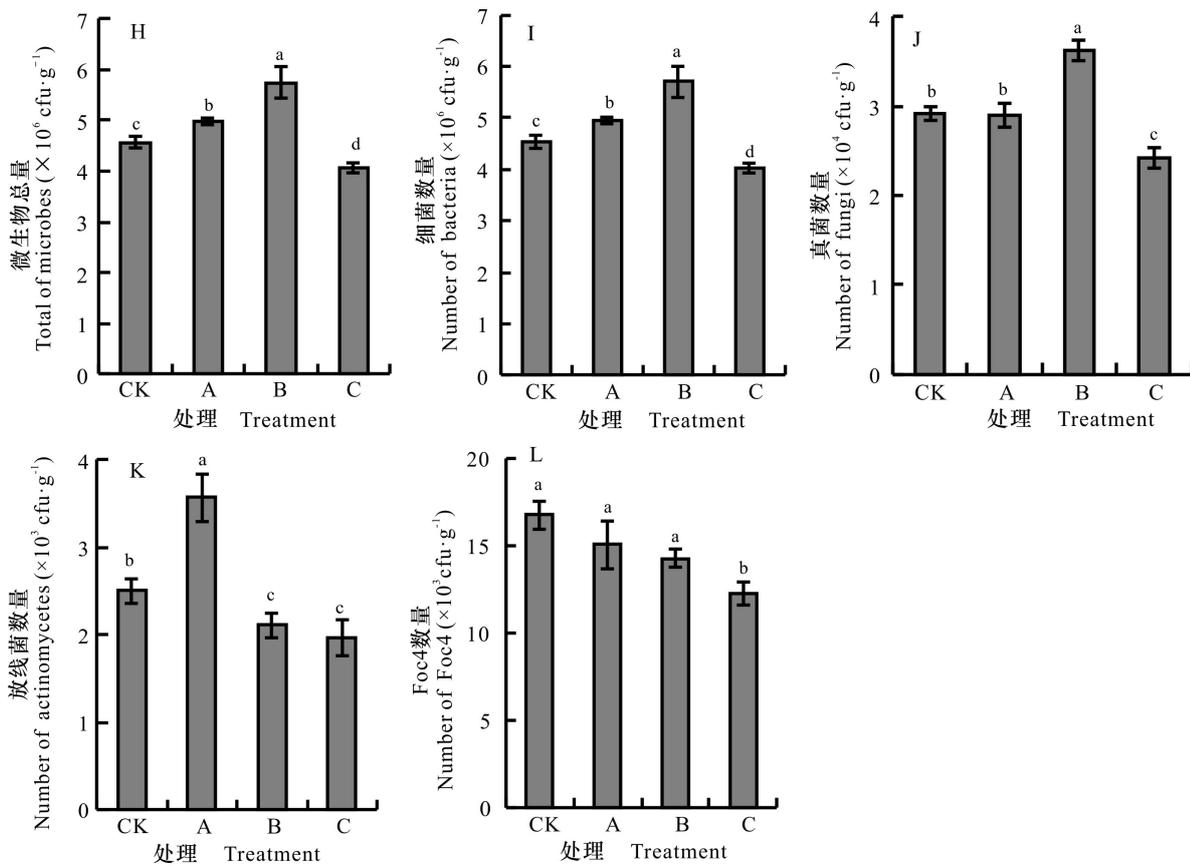
2.6 SA对土壤微生物数量的影响

不同类型微生物数量随SA浓度的变化表现有差异性(图5:H、I、J、K、L)。微生物总量(图5:H)在SA浓度为A和B时显著升高,C处理显著低于CK、A、B处理。细菌数量(图5:I)的表现规律与微生物总量相似,与CK相比,细菌数量在SA浓度为A时显著升高,B浓度达最大值(与CK相比增幅为20.67%),C浓度显著降低,不同浓度间的差异均显著($P<0.05$)。真菌数量(图5:J)在A浓度时降低且与CK无显著差异,B浓度显著升高并达最大值(增幅为19.34%),C浓度显著低于其他浓度,不同浓度间的差异均显著($P<0.05$)。放线菌数量(图5:K)则为A浓度时显著升高(相比CK增幅为42.58%),B、C浓度降低且均显著低于CK。总体而言,细菌、真菌和放线菌的数量在C浓度处理时均显著低于CK,这表明高浓度的SA对土壤微生物有抑制作用,显著降低了土壤微生物的数量。

别提高了18.52%、36.20%、28.57%、14.29%,C处理时均显著降低。而在A处理时土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶活性也是趋于增大,但在B处理时均趋于减小,C处理时均显著降低;与CK相比C处理的降幅分别为41.88%、54.82%($P<0.05$)。总体上,土壤酶活性随SA浓度的变化呈现“低促进高抑制”现象。

2.8 土壤微生物数量与土壤酶活性的相关性分析

在接有Foc4的条件下,添加SA后香蕉土壤微生物数量和土壤酶活性之间存在一定的相关性(表3)。土壤微生物总量与细菌、真菌数量极显



CK 为对照,未添加 SA; 横坐标中的 A、B、C 代表 SA 浓度分别为 300、600、1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。下同。

CK was the control without SA; A, B and C represent SA concentrations of 300, 600 and 1 200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The same below.

图 5 添加不同浓度 SA 后土壤微生物数量的响应

Fig. 5 Responses of soil microbial quantities after adding different concentrations of SA

著正相关 ($P < 0.01$), 与蔗糖酶、酸性磷酸酶、多酚氧化酶显著正相关 ($P < 0.05$)。土壤细菌数量与蔗糖酶、酸性磷酸酶、多酚氧化酶显著正相关 ($P < 0.05$), 土壤真菌与放线菌显著负相关 ($P < 0.05$), 与蔗糖酶、多酚氧化酶活性显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤放线菌与蔗糖酶、蛋白酶、多酚氧化酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$)。蔗糖酶与脲酶显著正相关 ($P < 0.05$), 与酸性磷酸酶、多酚氧化酶均显著负相关 ($P < 0.05$); 过氧化氢酶与多酚氧化酶显著负相关 ($P < 0.05$)。这说明土壤微生物数量和土壤酶活性互相影响, 同时受土壤微生物区系的双重调节。Foc4 的数量与细菌、放线菌、微生物总量具有显著的正相关关系, 而与其他 6 种酶和真菌的相关性均不显著。

3 讨论与结论

在水稻根系分泌物中, 提取的化感物质对西瓜枯萎病菌的孢子形成和萌发有抑制作用 (Ren et al., 2016), 2,4-二叔丁基苯酚显著抑制了番茄叶霉病菌的孢子萌发和菌丝生长 (周宝利等, 2013)。本研究与上述研究结果类似。以前期实验中从韭菜浸提液分离出的化感物质 2-甲基-2-戊烯醛的衍生物——SA 为材料 (Zhang et al., 2013), 本研究表明, SA 显著抑制了 Foc4 菌丝的生长。相对于对照, 添加 SA 显著抑制了 Foc4 菌丝生长, 减小了 Foc4 的菌落直径以及降低了孢子数量, 说明 SA 对 Foc4 菌丝的生长具有一定的化感效应, SA 可能

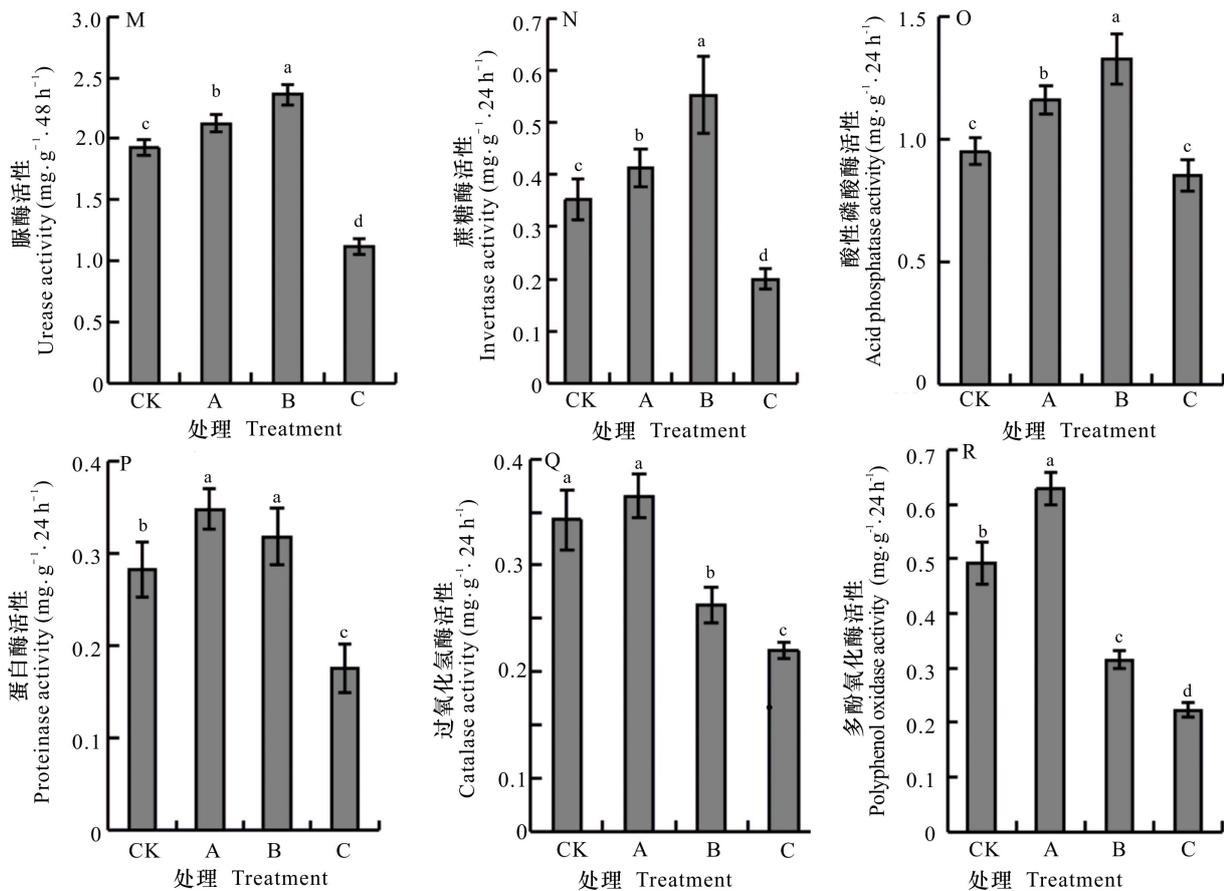


图 6 添加不同浓度 SA 后土壤酶活性的响应

Fig. 6 Responses of soil enzyme activities after adding different concentrations of SA

会通过抑制 *Foc4* 菌丝的生长以及抑制孢子数量的增加,从而降低香蕉枯萎病的发生或蔓延。本研究结果与 Zhang 等(2013)和黄永红等(2011)的实验结果一致,进一步证明韭菜化感物质对香蕉枯萎病的发生有一定的抑制效果。SA 对 *Foc4* 菌丝具有一定的化感作用,主要原因可能是韭菜属于葱属植物,其提取物中含有硫化物对 *Foc4* 具有抑制作用(杨静美等,2014;Gao et al.,2020)。

化感物质对病原菌的生长具有一定的抑制作用,所有化感物质的抑制作用几乎都与其浓度有关(Kravchenko et al.,2003)。不同浓度 SA 对 *Foc4* 的抑制情况有所差异,*Foc4* 菌落生长直径随着 SA 浓度的增加显著减小,抑制率随之升高,液体培养条件下 SA 浓度为 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的孢子数量显著低于对照,说明 SA 与培养基混合后浓度在 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 及以上时对 *Foc4* 抑制效果最佳,而在小于此浓度条件下,随着实验时间的持续,SA 对 *Foc4* 的抑

制效果则趋于减弱。此结果一方面与病原菌 *Foc4* 本身的生物学特性有关,SA 达不到抑制 *Foc4* 的临界浓度时,会对低浓度 SA 产生抗性。这说明一定浓度的韭菜粗提液能抑制 *Foc4* 菌丝生长和孢子数量增加,从而提高抑制率。这可能是草莓酸有效防控香蕉枯萎病的主要机制。

另外,林妃等(2010)的研究表明,pH 为 5 时最适合 *Foc4* 的菌丝生长,在 pH 6~7 时菌丝生长最快。本研究得出,不同 pH 条件下,SA 对 *Foc4* 菌丝的抑制作用有差异,当 pH 为 5 时抑制率显著大于 pH 为 7 和 9,说明 pH 为 5 时(即酸性环境下)SA 对 *Foc4* 菌丝的抑制作用可能更好。在实际农田中,香蕉连作会引起土壤向偏酸性发展,也说明 *Foc4* 趋向于生长在偏酸环境。通过添加外源化感物质 SA 来抑制香蕉枯萎病的发生,且 SA 还是在最适合 *Foc4* 菌丝生长的条件下发挥较好的作用,这在香蕉枯萎病防治上具有良好的应用前景。

本研究不足的是,对菌丝生长所设置的 SA 最终浓度只到 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,结合后面的实验结果,应当在 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 后加大最大浓度;只分析了 SA 对 Foc4 菌落和菌丝以及孢子数量影响的结果,应增加孢子萌发实验结果的分析,以使得研究内容更全面;SA 是韭菜挥发物中的衍生物,在环境中易挥发 (Zhang et al., 2013),这就导致 SA 对 Foc4 的实验结果可能会随着时间的变化而改变。为了提高 SA 的有效性,在今后的生产实践中可以提高 SA 微胶囊化等技术,更有利于香蕉枯萎病的防控。

土壤微生物数量与土传病害的发生和防控具有紧密的联系 (廖咏梅等, 2020)。袁秀梅等 (2016) 研究发现,蚕豆根系化感物显著影响土壤微生物数量和种群结构变化。本研究结果表明,在接有 Foc4 的条件下,与未添加化感物质 SA 相比,添加 SA 后香蕉苗土壤细菌、真菌和放线菌的数量发生显著变化,说明化感物 SA 对香蕉土壤微生物区系具有化感效应。SA 浓度不同,对不同种土壤微生物的数量影响有差异。其中,放线菌仅在 $300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时显著升高,其他处理时显著低于对照,而细菌和真菌均在 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时显著升高, $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时显著降低。另外, Foc4 的数量随 SA 浓度的升高呈降低的趋势。此结果与杨阳等 (2013) 的研究结果类似,其研究表明分蘖洋葱根系化感物增加了黄瓜土壤细菌和放线菌的数量,降低了尖镰孢菌的数量;韩春梅等 (2010) 也得出类似的结论。本研究中,可能是 SA 进入土壤后,对某些微生物具有趋化作用,可能会增加一些有益菌群的数量,减少有害菌群的数量,同时打破土壤微生物区系的平衡,削弱或消除有益菌群和有害菌群的拮抗作用,从而影响植物或植物与微生物的互作,这可能是减缓香蕉枯萎病发生的原因之一,与 Zhou 等 (2012) 结论相一致。因此,进一步研究不同浓度 SA 对香蕉土壤生物地球化学元素性质所造成的影响,将有助于进一步深入探讨 SA 化感作用的机理。

SA 对土壤酶活性存在一定的影响,与土壤微生物数量相似,添加不同浓度 SA,香蕉土壤酶活性随 SA 浓度的增加而增加,达到一定浓度后下降,表现出“低促高抑”的现象。与本研究结果相似,刘莘等 (2013) 的研究指出,花生所生长的土壤酶活性在低含量脂肪酸处理时增加,高含量脂肪酸处理时显著降低。而与韩春梅等 (2010)、Chen 等

(2009) 研究结果有所不同,其指出土壤酶活性随香草醛等化感物质含量的增加而增强。不同研究结果有差异,一方面可能是所研究的化感物质和植物不同;另一方面可能是土壤微生物是土壤酶的主要来源之一,其数量的变化可能会影响土壤酶活性的改变。本研究中,当 SA 浓度为 $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时,土壤细菌、真菌和放线菌的数量均显著降低,这与该浓度下土壤酶活性显著较低相一致,且相关性分析得出,土壤细菌、真菌和放线菌数量均与蔗糖酶、多酚氧化酶等显著正相关,此研究结果与韩春梅等 (2012) 相似。因此,本研究中化感物质 SA 对香蕉土壤的微生物和酶活性均表现出浓度效应的差异性,对香蕉生长的影响可能是直接作用和间接作用的综合表现。

化感物质与抗病特性存在相关性。大葱根系分泌物能提高土壤微生物的多样性,对枯萎病菌的萌发有明显的抑制作用 (时伟等, 2014)。李蕾等 (2009) 的研究表明,除 1% 浓度处理外,其余浓度的西芹鲜根乙醇浸提液对黄瓜枯萎病菌均有显著或极显著的化感抑制作用。茄子黄萎病抗病性与根际土壤中放线菌数量,与土壤多酚氧化酶、过氧化氢酶、脲酶、蛋白酶活性正相关 (周宝利等, 2013)。与前人的研究结果略有不同,本研究中 Foc4 数量随 SA 浓度的升高呈降低的趋势,到 $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著降低,可见该浓度 SA 对 Foc4 具有显著抑制效果;相关性分析表明,添加 SA 后土壤 Foc4 数量与细菌、放线菌、微生物总量具有显著相关性,与土壤酶和真菌的相关性未达到显著水平。土壤微生物是土壤酶的主要来源 (关松荫, 1986),土壤微生物数量的改变是香蕉枯萎病发病后的重要特征 (邓晓等, 2011)。而香蕉枯萎病是由 Foc4 侵染香蕉维管束引起的系统性病害,因为 Foc4 土壤种群密度与病害危害程度呈正相关 (吴小燕等, 2013),所以 Foc4 数量的减少在很大程度上说明香蕉枯萎病的发病率在降低,表明化感物质 SA 在一定程度上对香蕉枯萎病具有抑制作用。另外,本研究在平板实验中,当 SA 浓度为 $600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 Foc4 的菌丝生长具有显著的抑制效果,而在盆栽实验中,与对照相比,当用该浓度处理时,土壤微生物总量、细菌、真菌数量也显著升高,而 Foc4 的数量无显著差异,当 SA 浓度为 $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Foc4 的数量显著降低。可见, SA 对 Foc4 的影响因基质不同而有差异。可能是当 SA

表 3 土壤微生物数量与土壤酶活性的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of soil microorganism quantities and soil enzyme activities

项目 Item	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomyces	真菌 Fungi	微生物总量 Total of microbes	Foc4	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	酸性 磷酸酶 Acid phosphatase	蛋白酶 Proteinase	过氧化 氢酶 Catalase	多酚 氧化酶 Polyphenol oxidase
细菌 Bacteria	1										
放线菌 Actinomyces	0.134	1									
真菌 Fungi	0.968	-0.034*	1								
微生物总量 Total of microbes	1.000**	0.926	0.968**	1							
Foc4	0.847*	0.307*	0.884	0.846*	1						
脲酶 Urease	0.908	0.412	0.888	0.907	0.974	1					
蔗糖酶 Invertase	0.989*	0.195*	0.972*	0.989*	0.916	0.957*	1				
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.985*	0.236	0.911	0.985*	0.791	0.887	-0.964*	1			
蛋白酶 Proteinase	0.782	0.695*	0.693	0.778	0.868	0.939	0.835	0.810	1		
过氧化氢酶 Catalase	0.164	0.886	0.107	0.161	0.539	0.544	0.281	0.195	0.733	1	
多酚氧化酶 Polyphenolo xidase	0.199*	0.942*	0.099*	0.887*	0.507	0.545	-0.293*	0.244	0.762	-0.990*	1

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

进入土壤后,其影响着土壤微生物组分,潜在地影响着植物以及植物和微生物的相互作用(韩春梅等,2012);因为培养基和土壤是两个不同的基质,所以SA发挥显著效果所需要的量一般会有不同。本研究先在培养基上找出SA发挥作用的最适浓度,再应用于土壤(同时选择了最适浓度的0.5倍和2倍一起实验),进一步探索施用SA对土壤生态环境的影响。本研究结果发现,600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上高浓度时,SA对Foc4的菌丝生长和数量具有一定的抑制作用,且对土壤微生物和酶活性也产生了影响,但培养基上得出的SA对Foc4影响的最适浓度与在土壤中的不完全一致。因此,SA对Foc4在大田实验下的最佳表现还需进一步开展研究。

综上所述,韭菜挥发性物质SA能有效地抑制香蕉枯萎病病原菌的生长,抵御病原菌侵染寄主,且被施用后容易降解,对环境危害小,为人们开发杀菌剂提供了新思路。该物质对Foc4病原菌有显著的抑制作用,改善了香蕉土壤生态系统环境,

可以为农药领域提供一种高效且无毒的天然源杀菌剂。为了能够在生产上大面积推广使用SA技术防控香蕉枯萎病,SA对土壤生物活性起重要调控作用的最适浓度及其分子作用机理等需要进一步的研究。

在纯培养条件和有植物存在的条件下,SA对Foc4均具有化感效应,说明化感物质SA在香蕉枯萎病病害的防治上具有一定的应用潜力。SA浓度的增加对Foc4菌丝的生长抑制作用随之增加,偏酸性条件下SA对Foc4的抑制效果更好,添加SA后显著降低了香蕉幼苗的病情指数。600 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 及以上浓度的SA对Foc4的菌丝生长具有良好的抑制效果,SA浓度达到1200 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,土壤中Foc4的数量显著降低,土壤微生物数量的增加和酶活性的提高也被显著抑制了。由于土壤环境是十分复杂的缓冲系统,且SA容易挥发、在土壤中的半衰期短,因此同样浓度抑制Foc4的效果在室内培养基纯培养的条件下比实际土壤中的作用效果要显著。

致谢 感谢广西特聘专家 Azim Mallik 对本研究实验设计的悉心指导!

参考文献:

- CHEN L, LI L, XIANG PY, et al., 2012. Allelopathy of parsley volatiles on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumeris* [J]. *Chin J Ecol*, 31(4): 877-881. [陈磊, 李蕾, 项鹏宇, 等, 2012. 西芹挥发物对黄瓜枯萎病菌的化感作用 [J]. *生态学杂志*, 31(4): 877-881.]
- CHEN SL, ZHOU BL, WANG RH, et al., 2009. Effects of grafted eggplants on allelopathy of cinnamic acid and vanillin in root exudates [J]. *J Appl Hortic*, 11(2): 119-122.
- DENG X, LI QF, HOU XW, et al., 2011. The ecological characteristics of culturable microbes isolated from infected soil by *Fusarium* wilt of banana [J]. *Chin J Trop Crop*, 32(2): 283-288. [邓晓, 李勤奋, 侯宪文, 等, 2011. 香蕉枯萎病区土壤可培养微生物生态特征 [J]. *热带作物学报*, 32(2): 283-288.]
- FAN TN, SUN XL, HAO XY, et al., 2019. Inhibitory effect of tomato crude extracts on banana *Fusarium* wilt pathogen FocTR4 [J]. *Subtrop Agric Res*, 15(1): 52-57. [范田娜, 孙雪丽, 郝向阳, 等, 2019. 番茄粗提物对香蕉枯萎病菌 Foc4 的抑制效果 [J]. *亚热带农业研究*, 15(1): 52-57.]
- GAO XM, LI K, MA ZL, et al., 2020. Cucumber *Fusarium* wilt resistance induced by intercropping with celery differs from that induced by the cucumber genotype and is related to sulfur-containing allelochemicals [J]. *Sci Hortic*, 271: 109475.
- GAO XM, WANG JG, MA LG, et al., 2014. Research advances on the mechanism of pathogenesis and allelopathy of *Fusarium oxysporum* [J]. *Microbiol Chin*, 41(10): 2143-2148. [高晓敏, 王璐钢, 马立国, 等, 2014. 尖孢镰刀菌致病机理和化感作用研究进展 [J]. *微生物学通报*, 41(10): 2143-2148.]
- GOMES MP, GARCIA QS, BARRETO LC, et al., 2017. Allelopathy: An overview from micro- to macroscopic organisms, from cells to environments, and the perspectives in a climate-changing world [J]. *Biologia*, 72(2): 113-129.
- GUAN SY, 1986. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: Agricultural Press: 211-213. [关松荫, 1986. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 农业出版社: 211-213.]
- HAN CM, LI CL, YE SP, et al., 2012. Effects of ginger aqueous extract on soil enzyme activity, microbial community structure and soil nutrient content in the rhizosphere soil of ginger seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 32(2): 489-498. [韩春梅, 李春龙, 叶少平, 等, 2010. 生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响 [J]. *生态学报*, 32(2): 489-498.]
- HUANG YH, WEI YR, ZUO CW, et al., 2011. Effect of Chinese leek on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* growth and *Fusarium* wilt incidence in banana [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(9): 1840-1845. [黄永红, 魏岳荣, 左存武, 等, 2011. 韭菜对香蕉枯萎病菌生长及香蕉枯萎病发生的抑制作用 [J]. *西北植物学报*, 31(9): 1840-1845.]
- KOMADA H, 1975. Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil [J]. *Rev Plant Prot Res*, 8: 114-124.
- KRAVCHENKO LV, AZAROVA TS, LEONOVA-ERKO EI, 2003. Root exudates of tomato plants and their effect on the growth and antifungal activity of *Pseudomonas* strains [J]. *Microbiology*, 7: 37-41.]
- LI L, HAN Y, YUN XF, 2009. Researches of allelopathy of the ethanol extract of the root of parsley on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumeris* [J]. *J Inn Mongolia Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 30(4): 42-46. [李蕾, 韩燕, 云兴福, 2009. 西芹鲜根乙醇浸提液对黄瓜枯萎病菌化感作用的研究 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 30(4): 42-46.]
- LIAN FZ, XUE RR, LIN XH, et al., 2019. Inhibitory effects of aqueous leachates and volatiles from *Allium tuberosum* and *Ageratum conyzoides* on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [J]. *J S Chin Agric Univ*, 40(4): 40-46. [廉法卓, 薛蓉蓉, 林娴慧, 等, 2019. 韭菜和胜红蓟水浸提液和挥发物对香蕉枯萎病菌的抑制作用 [J]. *华南农业大学学报*, 40(4): 40-46.]
- LIAO YM, HUANG YTJ, ZOU CW, et al., 2020. Analysis of fungi diversity in root zone soil of banana plants [J]. *Guihaia*, 40(1): 99-107. [廖咏梅, 黄元腾吉, 邹承武, 等, 2020. 香蕉植株根区土壤的真菌多样性分析 [J]. *广西植物*, 40(1): 99-107.]
- LIN F, GAO J, ZENG T, et al., 2010. Isolation and identification of banana vascular wilt in Hainan Province and determination of biological characteristics of strains FocR1 and FocR4 [J]. *Genom and Appl Biol*, 29(2): 314-321. [林妃, 高剑, 曾涛, 等, 2010. 海南省香蕉枯萎病原菌的分离鉴定及 1 号、4 号小种的生物学特性 [J]. *基因组学与应用生物学*, 29(2): 314-321.]
- LIU F, LIU JP, XIANG LL, et al., 2018. Inhibitory effect of bamboo fungus crude extracts on banana *Fusarium* wilt pathogen [J]. *J Fujian Agric Sci*, 33(11): 47-51. [刘范, 刘嘉鹏, 项蕾蕾, 等, 2018. 竹荪粗提物对香蕉枯萎病菌 FocTR4 的抑制效果 [J]. *福建农业学报*, 33(11): 47-51.]
- LIU HJ, HUANG J, LIU ZF, et al., 2015. Allelopathic effects of extracts from cassava organ on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in banana [J]. *Guangdong Agric Sci*, 42(6): 66-69. [柳红娟, 黄洁, 刘子凡, 等, 2015. 木薯器官浸提液对香蕉尖孢镰刀菌的化感作用 [J]. *广东农业科学*, 42(6): 66-69.]
- LIU P, ZHAO HJ, ZHONG ZW, et al., 2013. The effects of three root exudated fatty acids on peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and soil enzymes activities [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(11): 3332-3339. [刘苹, 赵海军, 仲子文, 等, 2013. 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 33(11): 3332-3339.]

- PLOETZ RC, 2015. Management of *Fusarium* wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4 [J]. *Crop Prot*, 73: 7-15.
- QI YX, ZHANG X, PU JJ, et al., 2007. Inactivation effect of 10 compounds on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and its toxin [J]. *J Fruit Sci*, 25(1): 78-82. [漆艳香, 张欣, 蒲金基, 等, 2007. 10 种化合物对香蕉枯萎病菌的抑菌作用及对毒素钝化的效果 [J]. *果树学报*, 25(1): 78-82.]
- REN LX, HUO HW, ZHANG F, et al., 1986. The components of rice and watermelon root exudates and their effects on pathogenic fungus and watermelon defense [J]. *Plant Sig Behav*, 60: 1187357-1187359.
- SHI W, SHEN TR, WEI M, et al., 2014. Effects of rotation with welsh onion on microbial diversity in rhizosphere soil of cucumber in greenhouse [J]. *Shandong Agric Sci*, 7: 72-77. [时伟, 申太荣, 魏珉, 等. 大葱轮作对温室黄瓜根际土壤微生物多样性的影响 [J]. *山东农业科学*, 7: 72-77.]
- SMITHL J, SMITH MK, TREE D, et al., 2008. Development of a small-plant bioassay to assess banana grown from tissue culture for consistent infection by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* [J]. *AUS Plant Pathol*, 37(2): 171-179.
- SUN XL, HAO XY, WANG TC, et al., 2018. Researches on the control and disease resistance breeding of Banana *Fusarium* Wilt Disease [J]. *J Fruit Sci*, 35(7): 870-879. [孙雪丽, 郝向阳, 王天池, 等, 2018. 香蕉枯萎病防控和抗病育种研究进展 [J]. *果树学报*, 35(7): 870-879.]
- WU X, WU FZ, ZHOU XG, 2015. Effect of intercropping with tillered onion on mineral nutrient uptake and gray mold disease occurrence of tomato [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 21(3): 734-742. [吴瑕, 吴凤芝, 周新刚, 2015. 分蘖洋葱伴生对番茄矿质养分吸收及灰霉病发生的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 21(3): 734-742.]
- WU XY, LIU WB, YANG TY, 2013. The correlation of the disease severity of banana *Fusarium* wilt and the population density of the pathogen in soil [J]. *Chin J Trop Crop*, 34(9): 1761-1769. [吴小燕, 刘文波, 杨廷雅, 等. 香蕉枯萎病危害程度与土壤病菌种群密度的相关性分析 [J]. *热带作物学报*, 34(9): 1761-1769.]
- XU GH, ZHENG HY, 1986. Handbook of soil microbiological analysis methods [M]. Beijing: Agricultural Press: 249. [许光辉, 郑洪元, 1986. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社: 249.]
- XU WY, WU XH, LIN CH, 2004. The toxicity of the crude toxin of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and its model [J]. *Chin J Trop Crop*, 25(4): 25-29. [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 [J]. *热带作物学报*, 25(4): 25-29.]
- YANG JM, WANG Q, WU HM, et al., 2014. Toxicity of sulfocompounds in *Alliums* on *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and compound microencapsulation [J]. *J Fruit Sci*, 30(6): 1040-1046. [杨静美, 王强, 伍惠媚, 等, 2014. 葱属植物中的含硫化物对香蕉枯萎病菌的毒力测定及微胶囊化 [J]. *果树学报*, 30(6): 1040-1046.]
- YANG Y, LIU SW, PAN K, et al., 2013. Effects of Chinese onion's root exudates on cucumber seedlings growth and rhizosphere soil microorganisms [J]. *Chin J Appl Ecol*, 24(4): 1109-1117. [杨阳, 刘守伟, 潘凯, 等, 2013. 分蘖洋葱根系分泌物对黄瓜幼苗生长及根际土壤微生物的影响 [J]. *应用生态学报*, 24(4): 1109-1117.]
- YANG ZX, TANG L, ZHENG Y, et al., 2014. Effects of different wheat cultivars intercropped with faba bean on faba bean *Fusarium* wilt, root exudates and rhizosphere microbial community functional diversity [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 3: 570-579. [杨智仙, 汤利, 郑毅, 等, 2014. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 3: 570-579.]
- YUAN XM, GENG SN, ZHENG MY, et al., 2016. Effects of faba bean (*Vicia faba* L.) root exudate on soil available nutrients and microbial population in different purple soils [J]. *Chin J Eco-Agric*, 24(7): 910-917. [袁秀梅, 耿赛男, 郑梦圆, 等, 2016. 蚕豆根分泌物对紫色土有效养分及微生物数量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 24(7): 910-917.]
- ZHANG H, MALLIK A, ZENG RS, 2013. Control of Panama disease of banana by rotating and intercropping with Chinese chive (*Allium tuberosum* Rottler): Role of plant volatiles [J]. *J Chem Ecol*, 39(2): 243-252.
- ZHOU BL, LI N, LIU SS, et al., 2013. Effects of 2, 4-di-tert-butylphenol on tomato leaf mould and seedling growth [J]. *Chin J Ecol*, 32(5): 1203-1207. [周宝利, 李娜, 刘双双, 等, 2013. 2, 4-二叔丁基苯酚对番茄叶霉病及幼苗生长的影响 [J]. *生态学杂志*, 32(5): 1203-1207.]
- ZHOU XG, YU GB, WU FZ, 2012. Responses of soil microbial communities in the rhizosphere of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to exogenously applied hydroxybenzoic acid [J]. *J Chem Ecol*, 38(8): 975-983.

(责任编辑 蒋巧媛)