

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 5 期 2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制..... 王晶苑,张心昱,温学发,等 (1337)
- 工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展..... 梁淑敏,许艳萍,陈 裕,等 (1347)
- 最佳管理措施评估方法研究进展..... 孟凡德,耿润哲,欧 洋,等 (1357)
- 灌木年轮学研究进展..... 芦晓明,梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局..... 王艳兵,德永军,熊 伟,等 (1375)
- 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响..... 裴 斌,张光灿,张淑勇,等 (1386)
- 湖北石首麋鹿昼间活动时间分配..... 杨道德,李竹云,李鹏飞,等 (1397)
- 三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响..... 杨 桦,杨 伟,杨春平,等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征..... 徐佳奕,徐兆礼 (1413)
- 滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解..... 郭绪虎,肖德荣,田 昆,等 (1425)
- 安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌,刘 坤,周守标 (1433)
- 湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇,郭逍宇,赵 霏 (1443)
- 三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子..... 王兆国,王传宽 (1456)
- 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应..... 周 洁,张志强,孙 阁,等 (1465)
- 不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛莘莘,高玉葆,何兴东 (1475)
- 藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英,胡 锋,罗大庆 (1482)
- 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征..... 朱永恒,沈 非,余 健,等 (1495)
- 环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 ... 马 驿,彭金菊,王 芸,等 (1506)
- 基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志,高 颖,朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案..... 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等 (1524)
- 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴,何丙辉,湛 芸 (1535)
- 京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究..... 孟 丹,王明玉,李小娟,等 (1545)
- 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素..... 雷泳南,张晓萍,张建军,等 (1559)
- 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局..... 李明月,王 健,王振兴,等 (1569)
- 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇,李鹏飞,曾从盛,等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响..... 闫 宁,王晓清,王志丹,等 (1584)

佛手低温胁迫相关基因的差异表达..... 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)

美洲棘蓟马对不同蔬菜寄主的偏好性..... 朱 亮,石宝才,官亚军,等 (1607)

茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)

造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响..... 王 焱,席本野,崔向东,等 (1626)

基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率..... 赵 晨,王 远,谷学明,等 (1636)

研究简报

太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征..... 周 彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)

基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)

薇甘菊萎蔫病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响..... 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207201035

杨世勇,王蒙蒙,谢建春.茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应.生态学报,2013,33(5):1615-1625.

Yang S Y, Wang M M, Xie J C. Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1615-1625.

茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应

杨世勇^{1,2,*}, 王蒙蒙¹, 谢建春³

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学生物环境与生态安全省级重点实验室, 芜湖 241000;

3. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241000)

摘要:以植物生长调节物茉莉酸 (Jasmonic acid, JA) 为诱导子,以常规棉为研究对象,探讨了外源茉莉酸对棉花幼苗单宁和蛋白酶抑制素以及其它抗虫相关酶活性诱导的浓度依赖性和持久性,讨论了棉花抗虫相关物质的抗虫效果。结果表明,0.01、0.1 和 1.0 mmol/L 茉莉酸都能在 2 周内诱导棉花单宁和胰蛋白酶抑制素 (Proteinase inhibitors, PIs) 含量增加,诱导多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase, PPO)、苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性升高。对 3 种浓度茉莉酸的诱导效应进行分析表明,0.1 mmol/L 茉莉酸对于诱导 PIs、PPO、POD 和 CAT 最有效,0.1 和 1.0 mmol/L 茉莉酸对于诱导棉花单宁和苯丙氨酸解氨酶等效,二者的诱导效应均高于 0.01 mmol/L。对茉莉酸诱导抗性的持久性进行分析表明,最佳诱导效应发生的时间各不相同:POD 活性在 JA 处理后第 1 天最高,随后呈下降趋势,PIs 和单宁含量分别在 JA 处理后第 7 天和第 14 天达最大值;JA 处理后第 1 天和第 7 天的 PPO 活性无明显差异,但明显高于第 14 天;JA 处理后第 7 天和第 14 天的 PAL 活性无明显差异,但明显高于第 1 天;JA 处理后第 1、7 和 14 天棉花叶片的 CAT 活性均无明显差异。以上结果表明,茉莉酸可通过增加棉叶单宁和 PIs 含量、提高棉叶 PAL、PPO、POD 和 CAT 活性等增强棉花幼苗的抗虫性。

关键词:植物生长调节物;诱导防御;害虫防治;植物保护;常规棉

Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants

YANG Shiyong^{1,2,*}, WANG Mengmeng¹, XIE Jianchun³

1 School of Life Sciences, Anhui Normal University Wuhu 241000, China

2 Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui, Wuhu 241000, China

3 School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University Wuhu 241000 China

Abstract: Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) is an important crop worldwide challenged by a number of pests which cause enormous yield loss. Although extensive cultivation of transgenic Bt cotton has decreased the population growth of the most destructive pest, cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*), the secondary pest like mirid bug has become a primary pest. In addition to the evolution of Bt toxin resistance in cotton bollworm, it is urgent to develop environment friendly and plant-derived pesticides for the integrated pest management. Induction of plant defense against pests is very common among higher plants. Jasmonic acid (JA) is a kind of plant growth regulator with a variety of biological function except for induced plant defense against herbivores. The objectives of the current study were to investigate the dosage- and exposure time-dependent induction of defense-related secondary metabolites and antinutritive/antidigestive enzymes in cotton seedlings by exogenous

基金项目:国家自然科学基金项目 (31070338); 教育部高等学校博士学科点专项基金项目 (新教师类) (20093424120002); 安徽省杰出青年科学基金项目 (1108085J07); 安徽省自然科学基金项目 (090413078)

收稿日期:2012-07-20; 修订日期:2013-01-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiyan@mail.ahnu.edu.cn

application of JA. The potential pest control nature of induced defense in seedlings of conventional cotton plants by JA was also discussed in terms of the fecundity, developmental time, mortality and parasitism of insects. We hypothesized that, as a ubiquitous phytohormone, JA should regulate the induced plant defense in cotton like those in some model plants including mustard, tobacco and tomato by increasing the contents of some feeding deterrent secondary metabolites and the activity of enzymes responsible for their synthesis, as well as the activities of antinutritive and antidigestive enzymes. Results of the present study suggested that 0.01 mmol/L, 0.1 mmol/L, and 1.0 mmol/L JA were effective concentrations in priming the pest resistance nature of six-leaf cotton seedlings within two weeks in terms of enhanced contents of cotton tannin and protease inhibitors (PIs) and increased activities of phenylalanine ammonia-lyase (PAL), polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) and catalase (CAT). In comparison, 0.1 mmol/L jasmonic acid was more effective in inducing PIs, PPO, POD and CAT than the other two concentrations tested, while 0.1 mmol/L and 1.0 mmol/L JA were equally powerful in priming tannin and PAL, and both JA concentrations were more effective than 0.01 mmol/L JA. We also found that JA concentration, time after JA exposure and their interaction have significant effects on tannin content, PPO activity and POD activity, and that JA concentration and time after JA exposure have significant effect on PIs content and PAL activity, while JA concentration and its interaction with exposure time after JA exposure have significant effects on CAT activity. In addition, analysis of the duration of JA-mediated defense suggested that the optimal induction effects occurred one day after JA treatment for POD, 7 d for PIs, 14 d for tannin, 1 d and 7 d for PPO, 7 d and 14 d for PAL, while no significance was observed for CAT. In summary, JA can enhance cotton defense against insects by the induction of defense-related chemicals like tannin, some antinutritive/antidigestive enzymes like PPO, POD, CAT, and enzyme related to the synthesis of tannin like PAL. Future work should focus on the real effects of induced defense against insects in terms of the feeding behavior, oviposition preference, ecological immunity, detoxification capacity, and tritrophic interaction among cotton plant, herbivore insects and natural enemies, thereby facilitating the discovery of the physiological, ecological and biochemical basis of JA-induced plant defense.

Key Words: plant growth regulator; induced defense; pest control; crop protection; conventional cotton

诱导抗性是植物界存在的普遍现象,能通过对昆虫取食、产卵偏好、繁殖力、发育历期、免疫力、解毒力、被捕食和被寄生比率以及生活史其它特征的影响,间接调控害虫的种群密度和种群增长^[1-7]。茉莉酸(jasmonic acid, JA)是一种具有多种生理功能的植物激素,除调节植物的基础发育外,还在植物的伤反应、臭氧和紫外线暴露、病原菌侵染、昆虫取食和水分胁迫反应中起信号传递的作用,诱导植物直接和间接防御反应的发生^[8-9]。JA及其功能类似物茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)处理后,番茄^[1]、甘蓝^[2,10]、拟南芥^[3]、枸杞^[5-6]、豌豆^[11]、落叶松^[12]、玉米^[13-14]、水稻^[15]、花生^[16]等植物叶片或根部防御相关酶活性增强、防御性次生代谢物含量或挥发性有机物释放量增加,对害虫的抗性提高,但在棉花中相关研究并不多^[7, 17-18],对棉花抗虫性诱导的生化机理、浓度依赖性和持久性尚未见报道。本研究以棉花幼苗为试材,以不同浓度茉莉酸为诱导子,从棉花幼苗多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性以及棉叶丹宁和胰蛋白酶抑制素(Proteinase inhibitors, PIs)含量的诱导入手,探讨茉莉酸诱导棉花幼苗抗虫性的浓度依赖性和持久性,为农业害虫的防治和生物安全农药的研发提供理论与实验依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与茉莉酸处理

供试棉花(*Gossypium hirsutum* L.)种子皖棉 28F1 购自芜湖市城南某种子分公司,由安徽省农业科学研究院研制。将颗粒饱满的种子于室内催芽,待种子露白后播于盛满黄壤土:草木灰:砂子重量比 1:1:1 的塑料花盆(底面半径 $r=9$ cm;盆高 $H=15$ cm)中于大棚内育苗。棚内光照约为自然光照的 85%。育苗期间根据情

况适时浇水,无施肥。待幼苗长出 2 片真叶后,间苗至每盆 4 株。幼苗长至 5—6 片真叶时(出苗后 45d 左右)用于实验。实验设 4 个处理(包括对照),每处理重复 4 次。

茉莉酸($\geq 95\%$, Sigma-Aldrich)用无水乙醇和蒸馏水稀释成浓度为 0.01、0.1 和 1.0 mmol/L 的溶液。以无水乙醇 + 蒸馏水为对照,用手持式喷雾器向棉株均匀喷施,直到叶面有液滴落下为止。为减少茉莉酸因蒸发损失,喷施后用透明塑料袋将整株套住,8h 后移除塑料袋,并分别于喷施茉莉酸后 1、7、14d 采集棉花叶片进行生化分析。植物样从每盆的 4 株植物上采取并混合。

1.2 测定方法

1.2.1 棉叶单宁含量的测定

棉叶单宁含量采用香草醛法进行测定^[19]。取 0.2 g 棉叶剪碎后浸入 25 mL 甲醇中提取 2 h,再取上清液和 4% 的香草醛-甲醇溶液各 2.0 mL,与 1.0 mL 盐酸混合后于 30 °C 水浴中保温 20 min。室温下用 PG-1810APC(普析通用,北京)分光光度计测定 510 nm 下的吸光度值。以不同浓度单宁酸为标样绘制单宁浓度与吸光度的标准曲线并计算单宁含量。单宁含量用 mg/g 鲜重表示。

1.2.2 PIs 含量的测定

PIs 根据 Stout 等的方法进行测定^[20]。准确称取 0.2 g 棉花叶片,用 4 mL 含有 7% 的 PVP、1.67 mmol/L 苯硫脲、0.3 mol/L KCl 和 0.4 mmol/L 抗坏血酸的 Tris-HCl 缓冲液(50 mmol/L, pH 值 7.8)研磨成匀浆。再将匀浆在 13000 r/min, 4 °C 下离心 10 min,上清液用于测定棉胰凝乳蛋白酶含量。测定时,先在含有 0.0015 mg 胰凝乳蛋白酶的 HCl 溶液(1.0 mmol/L)中加入等量提取液混合反应 10 min,再取 100 μ L 混合液与 2.9 mL 含有 0.5 mmol/L BTEE(N-苯甲酰-L-酪氨酸乙酯)的甲醇-磷酸缓冲液(pH 值 8.0)混匀,于 256 nm 下测定 10 min 内吸光度的变化值。用 BTEE 和胰凝乳蛋白酶作对照。单位时间内吸光度值变化 0.01 代表生成一个单位 PIs(单位 U),PIs 含量用 U/g 鲜重表示。

1.2.3 PAL、PPO、POD 和 CAT 活性的测定

酶液提取:于冰浴中将 0.2 g 棉花叶片用 1.25 mL 含有体积分数 7% PVPP 的磷酸缓冲液(0.1 mol/L, pH 值 7.4)研磨成匀浆,再向匀浆中加入 0.4 mL 体积分数 10% 的 Triton X-100,混匀后在 10000 g, 4 °C 下离心 10 min。上清液直接用于 PPO、POD、CAT 和 PAL 活性测定。酶活性测定温度为 25 °C。

PAL 活性参照邹志燕和王振中的方法进行测定^[21]。在 2.80 mL 含有 L-苯丙氨酸(20 mmol/L)的硼酸缓冲液(0.2 mol/L, pH 值 8.8)中加入 20 μ L 酶提取液,混匀后于 290 nm 处测定 2 min 内吸光度值的变化。OD₂₉₀ 每增加 0.01 个单位相当于生成了 1 μ g/mL 肉桂酸, PAL 活性用 μ g $\cdot$ g⁻¹鲜重 $\cdot$ min⁻¹表示。

PPO 活性以邻苯二酚为底物,参照 Tan 等的方法进行测定^[22]。在 2.90 mL 含有邻苯二酚(0.02 mol/L)的磷酸缓冲液(0.2 mol/L, pH 值 7.4)中加入 100 μ L 酶提取液,混匀后于 420 nm 处测定 2 min 内吸光度值的变化。以每分钟吸光度值变化 0.01 表示 1 个酶活力单位, PPO 活性用 U $\cdot$ g⁻¹鲜重 $\cdot$ min⁻¹表示。

POD 活性以愈创木酚为底物,参照 Kumari 等的方法进行测定^[23]。在 2.99 mL 含有 0.2% 愈创木酚和 0.3% H₂O₂的磷酸缓冲液(0.05 mol/L, pH 值 7.4)中加入 10 μ L 酶提取液,混匀后于 470 nm 处测定 3 min 内吸光度值的变化。以每分钟吸光度值变化 0.1 表示 1 个酶活力单位, POD 活性用 U $\cdot$ g⁻¹鲜重 $\cdot$ min⁻¹表示。

CAT 活性参照 Kumari 等的方法进行测定^[23]。在含有 0.3% H₂O₂的磷酸缓冲液(0.05 mol/L, pH 值 7.0)中加入 20 μ L 酶提取液,混匀后于 240 nm 处测定 2 min 内吸光度值的变化。以每分钟吸光度值变化 0.1 表示 1 个酶活力单位, CAT 活性用 U $\cdot$ g⁻¹鲜重 $\cdot$ min⁻¹表示。

1.3 数据处理与分析

以酶活性和单宁含量为自变量,以茉莉酸浓度和时间为固定因子,采用单变量多因素方差分析对数据进行处理,并进行 Tukey HSD 多重比较(SPSS 15.0, $P = 0.05$)。浓度和处理后时间对酶活性和单宁含量的影响用一维方差分析(One-way analysis of variance)进行检验,并进行 Tukey HSD 多重比较($P = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 茉莉酸处理对棉花单宁含量的影响

由表 1 可知,茉莉酸浓度和处理后时间以及浓度和时间的交互作用对棉叶单宁含量影响极显著 ($P < 0.001$)。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明:0.1 mmol/L 和 1.0 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶单宁含量均明显高于对照 ($P < 0.001$);0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显优于 0.01 mmol/L ($P < 0.001$), 但和 1.0 mmol/L 的差异不显著 ($P = 0.057$)。

处理后不同时间单宁含量的多重比较表明:处理后第 14 天棉叶单宁含量明显高于第 1 天和第 7 天 ($P < 0.001$),但第 1 天和第 7 天棉叶单宁含量差异不明显 ($P = 0.106$)。

表 1 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉单宁含量影响的主效应检验

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after jasmonic acid (JA) treatment	222.5	2	111.2	37.03	< 0.001
JA 浓度 JA concentration	539.7	3	179.9	59.88	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	153.1	6	25.5	8.49	<0.001

浓度与处理后天数对棉叶单宁含量影响的多重比较表明 (图 1):茉莉酸处理后 1 天,各处理组棉叶单宁含量均明显高于对照,但以 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组单宁含量最高,且与 0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L 两处理组存在组间 ($P = 0.002$) 差异。处理后 7 天,0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶单宁含量仍明显高于对照和 0.01 与 1.0 mmol/L 处理组 (P 值分别为 < 0.001 , 0.002 和 0.001)。处理后 14d,1.0 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶单宁含量明显高于对照 ($P = 0.042$);0.1 和 1.0 mmol/L 处理组单宁含量明显高于 0.01 mmol/L 处理组 ($P=0.007$ 和 0.006)。

2.2 茉莉酸处理对 PIs 含量的影响

由表 2 可知,JA 浓度和处理后时间对棉叶 PIs 含量影响极显著 ($P < 0.001$)。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明:0.01 mmol/L 和 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶的 PIs 含量明显高于对照 ($P=0.027$ 和 0.000),但 0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显高于 0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L ($P=0.046$ 和 0.002);0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L 茉莉酸的诱导效果差异不明显 ($P=0.6$)。

表 2 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉叶 PIs 含量影响的主效应检验

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after JA treatment	24.99	2	12.5	20.84	< 0.001
JA 浓度 JA concentration	21.73	3	7.24	12.08	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	7.34	6	1.22	2.04	0.099

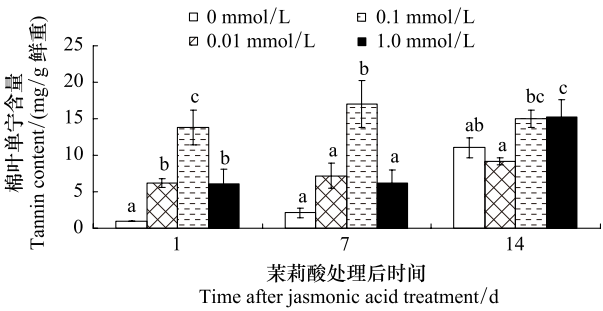


图 1 茉莉酸处理对棉叶单宁含量的影响

Fig.1 Effects of JA treatment on tannin content in cotton leaves
柱状图上方不同小写字母代表不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

处理后不同时间 PIs 含量的多重比较表明:处理后第 7 天棉叶 PIs 含量明显高于第 1 天 ($P=0.038$) 和第 14 天 ($P<0.001$),但处理后第 1 天的 PIs 含量却明显高于第 14 天 ($P=0.002$)。

浓度与处理后天数对棉叶 PIs 含量影响的多重比较表明 (图 2):处理后 1d,0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶 PIs 含量明显高于对照 ($P=0.049$),但和其它两处理组间的差异并不显著。处理后第 7 天,0.01 mmol/L 和 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶内 PIs 明显高于对照 ($P=0.032$ 和 0.035)。处理后第 14 天,除 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组和对照组有显著差异外 ($P<0.03$),其它各组间的差异不显著。

2.3 茉莉酸处理对棉叶 PPO 活性的影响

由表 3 可知,JA 浓度和处理后时间以及浓度和时间的交互作用对棉叶 PPO 活性的影响明显。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明:茉莉酸处理组棉叶 PPO 活性明显高于对照 ($P<0.004$);0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显高于 0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L ($P=0.001$),但 0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L 组无组间差异。

处理后不同时间 PPO 活性的多重比较表明:处理后第 7 天棉叶 PPO 活性明显高于第 14 天 ($P=0.012$),但和第 1 天差异不明显 ($P=0.52$)。

表 3 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉叶 PPO 活性影响的主效应检验

Table 3 Main effects of JA treatment and time after JA treatment on PPOs activities of cotton leaves

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after JA treatment	680.81	2	340.4	5.04	< 0.001
JA 浓度 JA concentration	4711.7	3	1637.2	24.25	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	675.3	6	112.5	1.67	0.015

浓度与处理后天数对棉叶 PPO 活性影响的多重比较表明 (图 3):3 种浓度茉莉酸处理均提高了棉叶的 PPO 活性,但各浓度的诱导效应不同 ($P<0.05$)。处理后 1d 和 7d,0.1 mmol/L 和 1.0 mmol/L 处理组棉叶 PPO 活性均明显高于对照组 (处理后第 1 天, $P=0.002$ 和 0.038 ; 处理后第 7 天, $P=0.006$ 和 0.04 ,但组间差异不明显)。处理后 14d,0.1 mmol/L 组棉叶 PPO 活性明显高于对照和 1.0 mmol/L 组 ($P=0.006$ 和 0.009),其它各处理组间差异不明显。

2.4 茉莉酸处理对棉叶 PAL 活性的影响

由表 4 可知,JA 浓度和处理后时间对棉叶 PAL 活性的影响明显 ($P<0.001$)。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明:0.1 mmol/L 和 1.0 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶的 PAL 活性明显高于对照 ($P<0.001$),但 0.01 mmol/L 茉莉酸处理组较对照组差异不明显 ($P=0.132$);0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶的 PAL 活性明显高于 0.01 mmol/L 组 ($P<0.001$),但较 1.0 mmol/L JA 处理组差异不显著 ($P=0.057$)。

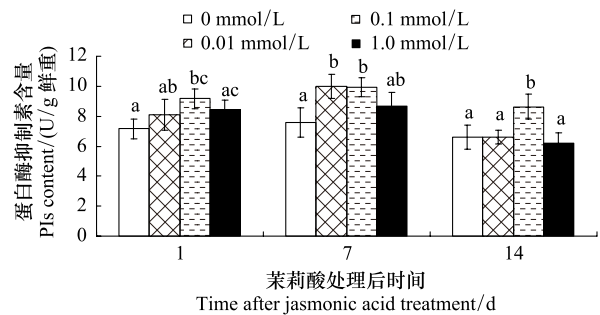


图 2 茉莉酸处理对棉叶 PIs 含量的影响

Fig. 2 Effects of JA treatment on PIs content in cotton leaves

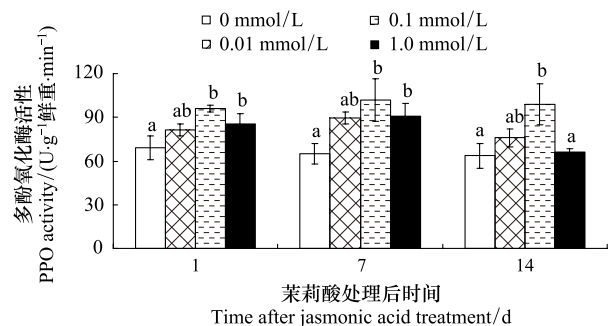


图 3 茉莉酸处理对棉叶 PPO 活性的影响

Fig. 3 Effects of JA treatment on PPO activity of cotton leaves

处理后不同时间 PAL 活性的多重比较表明：处理后第 7 天和第 14 天棉叶的 PAL 活性均明显高于第 1 天 ($P=0.000$ 和 0.006)，但第 7 天和 14 天棉叶的 PAL 活性差异不明显 ($P=0.106$)。

表 4 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉叶 PAL 活性影响的主效应检验

Table 4 Main effects of JA treatment and time after JA treatment on PAL activities of cotton leaves

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after JA treatment	5.80	2	2.90	15.68	< 0.001
JA 浓度 JA concentration	11.33	3	3.78	20.41	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	2.21	6	0.37	1.99	0.106

浓度与处理后天数对棉叶 PAL 活性影响的多重比较表明 (图 4)：处理后 1d 各组间 PAL 活性均无明显差异。处理后 7d, 0.1 和 1.0 mmol/L 组 PAL 活性均明显高于对照 ($P=0.003$ 和 0.007)，但组间差异不明显 ($P=0.86$)。处理后 14d, 0.1 mmol/L 组棉叶 PAL 活性明显高于对照组和 0.01 mmol/L 组 ($P < 0.05$)，但较 1.0 mmol/L 茉莉酸处理组差异不明显。

2.5 茉莉酸处理对棉叶 POD 活性的影响

由表 5 可知,JA 浓度和处理后时间以及浓度和时间的交互作用对棉叶 POD 活性的影响极显著 ($P < 0.001$)。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明：0.1 mmol/L 和 1.0 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶的 POD 活性均明显高于对照 ($P < 0.001$)；0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显高于 0.01 mmol/L 和 1.0 mmol/L ($P < 0.001$)，而 1.0 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显优于 0.01 mmol/L ($P=0.041$)。

处理后不同时间 POD 活性的多重比较表明：处理后第 7 天和第 14 天棉叶的 POD 均明显低于第 1 天 ($P=0.001$ 和 0.000)，但第 7 天和 14 天棉叶的 POD 活性差异不明显。

表 5 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉叶 POD 活性影响的主效应检验

Table 5 Main effects of JA treatment and time after JA treatment on POD activities of cotton leaves

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after JA treatment	1.34×10^5	2	6.71×10^4	13.49	< 0.001
JA 浓度 JA concentration	1.02×10^6	3	3.41×10^5	68.62	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	1.99×10^5	6	3.31×10^4	6.65	< 0.001

浓度与处理后天数对棉叶 POD 活性影响的多重比较表明 (图 5)：处理后第 1 天, 0.1 mmol/L 和 1.0 mmol/L 组棉叶 POD 活性显著高于对照 ($P < 0.001$)，且存在组间差异 ($P < 0.01$)。处理后第 7 天和 14 天, 0.1 mmol/L 组棉叶 POD 活性均明显高于其它各组 ($P < 0.01$)。

2.6 茉莉酸处理对棉叶 CAT 活性的影响

由表 6 可知,JA 浓度以及浓度和时间的交互作用对棉叶 CAT 活性的影响明显 ($P < 0.05$)。不同浓度茉莉酸诱导效果的多重比较表明：0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果明显高于 1.0 mmol/L ($P = 0.005$)。虽然 0.1 mmol/L 和 0.01 mmol/L 处理的组间差异不明显,但 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组的 CAT 活性却较 0.01

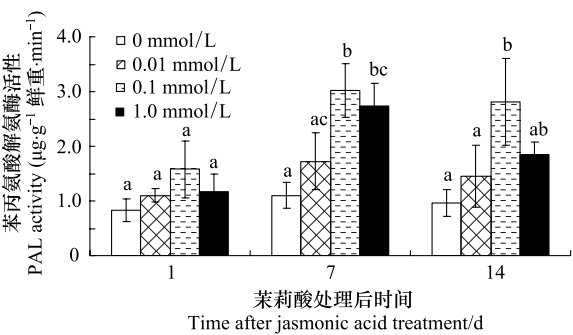


图 4 茉莉酸处理对棉叶 PAL 活性的影响

Fig. 4 Effects of JA treatment on PAL activities of cotton leaves

mmol/L 茉莉酸处理组高。处理后不同时间 CAT 活性的多重比较表明各处理组间 CAT 活性均无明显差异。

表 6 茉莉酸及茉莉酸处理后时间对棉叶 CAT 活性影响的主效应检验

Table 6 Main effects of JA treatment and time after JA treatment on CAT activities of cotton leaves

数据源 Data source	Type III 平方和 Type III sum of square	d/f	均方 Mean square	F	显著性 Significance
处理后时间 Time after JA treatment	273.38	2	136.69	0.902	0.421
JA 浓度 JA concentration	7201.12	3	2400.37	15.85	< 0.001
时间×浓度 Time×Conc	3296.36	6	549.39	3.63	0.013

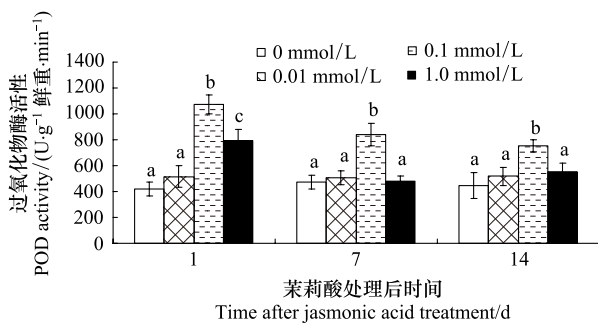


图 5 茉莉酸对棉叶 POD 活性的影响

Fig. 5 Effects of JA treatment on POD activities of cotton leaves

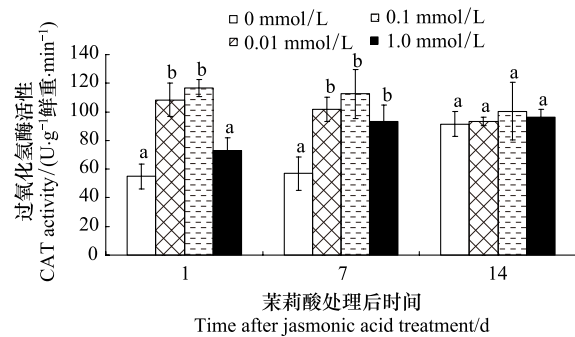


图 6 茉莉酸对棉叶 CAT 活性的影响

Fig. 6 Effects of JA treatment on CAT activities of cotton leaves

浓度与处理后天数对棉叶 CAT 活性影响的多重比较表明 (图 6): 0.01 mmol/L 和 0.1 mmol/L 茉莉酸对棉叶过氧化氢酶活性有明显影响 ($P < 0.05$)。处理后 1d 和 7d, 0.01 mmol/L 和 0.1 mmol/L 茉莉酸处理组棉叶 CAT 活性均明显高于对照 (处理后第 1 天, $P=0.008$ 和 0.004; 处理后第 7 天, $P=0.017$ 和 0.005, 但组间差异不明显 (图 6)。处理后 14d, 各组棉叶 CAT 活性均无明显差异。

3 讨论

茉莉酸是一种具有多种功能的植物生长调节物, 能通过防御相关基因的增强表达和抗虫相关化合物的增量合成提高植物的抗虫性。植物抗性诱导的效率取决于诱导因子施用的时机和浓度, 诱导抗性只有发生在食草昆虫生长和发育的关键期时才能发挥最大效率。本研究表明, 茉莉酸在诱导棉花幼苗抗虫相关次生代谢物含量和相关酶活性方面存在浓度依赖性和滞后性。棉花单宁、PIs、PPO、POD、PAL 和 CAT 等对 JA 处理的敏感性和滞后期各不相同。

3.1 茉莉酸对棉花单宁的诱导

单宁又称植物多酚, 能与昆虫的唾液蛋白和消化酶结合, 引起昆虫消化酶失活, 干扰昆虫对植物蛋白的消化吸收^[24]。外源茉莉酸或茉莉酸甲酯对植物单宁含量有一定的诱导作用, 但存在浓度依赖性和滞后性。冯远娇等研究外源茉莉酸对玉米 (*Zea mays*) 幼苗化学防御的系统诱导时发现, 0.1 mmol/L 茉莉酸处理后 48 h 玉米叶片总酚含量明显高于对照, 而其它浓度如 0.01, 0.05 和 0.2 mmol/L 对玉米幼苗总酚的诱导不明显, 在 48 h 以前甚至抑制玉米幼苗的酚酸合成^[14]。用更低浓度的 MeJA 诱导玉米幼苗异羟肟酸 (hydroxamic acid) 和酚酸时发现, 1 μ L/L 和 2 μ L/L (约 0.005 mmol/L 和 0.01 mmol/L) 的 MeJA 处理后 48 h, 处理组幼苗叶内酚酸含量明显高于对照^[25], 但 10 mmol/L JA 对玉米叶片总酚的诱导只局限在处理 3—6 h^[13]。Moreira 等研究发现, 用 5 mmol/L MeJA 处理海岸松 (*Pinus pinaster*) 幼苗后 60d, 针叶的总酚含量升高不明显^[26]。本研究没有采用低于 0.01 mmol/L 和高于 1.0 mmol/L 的 JA 对棉花幼苗进行处理, 也没有测定 24 h 以内 JA 的快速诱导效应, 但不排除更低或更高浓度 JA 对棉花幼苗单宁含量的诱导。实验所采用的 3 种浓

度的茉莉酸均能在 14d 内诱导棉花幼苗叶片单宁含量升高。如果采样时间延长,可能也会发现更长的诱导滞后期。

茉莉酸及功能类似物诱导植物抗性的浓度依赖性和滞后期表明,茉莉酸、茉莉酮和茉莉酸甲酯都能诱导落叶松单宁含量明显升高,且以 0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果最好,滞后期为 10—20d^[12]。宫玉艳等对枸杞的研究表明,0.1 mmol/L 茉莉酸处理 5d 后,枸杞叶片单宁酸含量增幅最大^[6]。海岸松经 40 mmol/L MeJA 处理后 2 周,针叶内总酚含量比对照植物高 1.9 倍^[27]。本研究发现 0.1 和 1.0 mmol/L 茉莉酸在诱导棉叶单宁含量上等效,JA 处理后第 14 天单宁含量最高,在诱导最佳浓度和滞后期方面分别与枸杞^[6]、落叶松^[12]和玉米^[14]、海岸松^[27]等相似。

3.2 茉莉酸对棉叶 PIs 和 PPO 的诱导

PPO 是与植物抗虫性密切相关的抗营养蛋白,其催化酚氧化所生成的醌极易攻击并烷基化某些必需氨基酸如半胱氨酸、赖氨酸、组氨酸和甲氨酸,引起昆虫营养失调,抑制幼虫生长和发育^[28]。PIs 亦称抗消化蛋白酶,能通过抑制昆虫中肠消化酶活性而影响昆虫对植物营养的获取、吸收、发育,甚至引起幼虫死亡^[29]。前人研究发现,番茄幼苗经 1.5 mmol/L 茉莉酸甲酯处理后 4d,叶片 PPO 和 PIs 活性明显升高^[22]。1—2 年生油松经 0.1 mmol/L 茉莉酸甲酯(浓度根据原文计算而得)处理 48 h 后,球果的 PPO 活性与 PIs 含量均明显高于对照^[30]。本研究发现,棉花幼苗经 0.01、0.1 和 1.0 mmol/L 3 种浓度 JA 处理后,PIs 含量和 PPO 活性均不同程度升高,说明外源 JA 能通过诱导棉花抗营养酶和抗消化酶活性而提高棉花幼苗的抗虫性。另有研究发现,0.1、0.5、1.0 和 5.0 mmol/L 茉莉酸甲酯也能诱导番茄叶片 PIs 含量上升,持久期可达 2 周^[31]。木豆(*Cajanus cajan*)经 0.1 mmol/L 茉莉酸甲酯处理后 24 h,叶片的 PIs 活性明显升高^[32]。辐射松(*Pinus radiata*)幼苗经 4.5 mmol/L 茉莉酸甲酯处理后 4d,针叶的 PPO 活性比对照高 2.3 倍,但当 MeJA 浓度高于 4.5 mmol/L 时,却对幼苗有毒^[33]。本研究发现,0.1 mmol/L 茉莉酸的诱导效果最佳,诱导的滞后期可达 2 周,但以 JA 处理后第 7 天棉叶的 PIs 含量和 PPO 活性最高,并没有观察到 JA 对棉花幼苗的植物毒性。就诱导的最佳浓度而言,与李新岗等对辐射松^[30]和 Lomate 和 Hivarel^[33]对木豆的研究相同;就诱导的滞后期而言,与 Fujimoto 等^[31]对番茄的研究类似。虽然也有研究表明茉莉酸甲酯在诱导番茄 PIs 含量上效果不明显^[34],但本研究所使用的 3 种浓度均在一定程度上诱导了棉花幼苗 PIs 含量的升高。

3.3 茉莉酸对棉叶 PAL 的诱导

茉莉酸处理能提高叶片的 PAL 活性^[21, 35]。豌豆幼苗经 JA 处理后叶片 PAL 活性明显上升^[35]。水稻幼苗经 0.1 mmol/L 茉莉酸处理后 PAL 活性升高,抗稻瘟性也随之增强,持久期可长达 15d^[21]。本研究表明,0.1 和 1.0 mmol/L 茉莉酸在诱导棉花幼苗 PAL 活性方面等效(经方差分析差异不显著),诱导的滞后期可达 1—2 周,结果与邹志燕和王振中^[21]对水稻的研究基本相同。此外,有研究表明 0.1 mmol/L 的茉莉酸甲酯能诱导石蒜(*Lycoris radiata*) PAL 基因的表达^[36]。由于 PAL 是酚类物质合成的关键酶和限速酶^[37],JA 处理后棉花幼苗 PAL 活性上升,说明茉莉酸激活或直接参与了棉花幼苗的苯丙烷代谢途径,在提高棉花幼苗防御性次生代谢物含量方面起重要作用。

3.4 茉莉酸对棉叶抗氧化酶 POD 和 CAT 的诱导

POD 参与酚的氧化,生成对病原菌毒性较高的醌类化合物,并参与木质素的合成,增厚细胞壁以抵御病菌的入侵和扩散。CAT 能将逆境条件下(包括昆虫取食)植物叶绿体和线粒体产生的过量 H₂O₂ 分解,减轻活性氧成分对植物细胞膜的伤害。前人研究表明,250 μmol/L 茉莉酸甲酯可诱导水稻保护酶系 POD 和 CAT 活性升高^[15]。25、100 和 250 μmol/L 茉莉酸处理提高了 7 日龄花生幼苗(*Arachis hypogaea* L.)根和叶片的 POD 和 CAT 活性^[23]。茉莉酸处理枸杞幼苗后 7d 枸杞叶 POD 活性升高,但 0.01 mmol/L 茉莉酸的诱导效果最佳^[6]。本研究 JA 对棉花 POD 和 CAT 的诱导效应表明,0.1 mmol/L 茉莉酸处理明显提高了棉叶的 POD 和 CAT 活性,诱导效应可持续 1—14d,诱导的滞后期与宫玉艳对枸杞和 Kumari 等对花生的研究基本相同^[6, 23]。也有研究表明,感染晚疫病的马铃薯(*Solanum tuberosum*)幼苗经 10⁻⁴ mmol/L 茉莉酸处理后,叶片 POD 活性

升高而 CAT 活性下降^[38]。Makissimov 等认为:外源茉莉酸处理后,马铃薯叶片可溶性 POD 活性升高,与晚疫菌 (*Phytophthora infestans*) 菌丝体的亲和力增加,起抑制病原菌扩散的作用;CAT 活性的下降则削弱 JA 诱导的马铃薯抗病性,因为 CAT 催化分解 H_2O_2 ^[38]。本研究中,棉花幼苗经外源 JA 处理后叶片 CAT 活性上升,与 Makissimov 等^[38]的报道相反,产生差异的原因可能是二者研究的系统、采用的 JA 浓度和处理后采样时间不同。Makissimov 等的研究对象是被晚疫菌感染的马铃薯植株,而本实验的对象是健康的棉花植株。另外,茉莉酸除可以诱导植株抗病、抗虫性外,还能诱导植株产生 H_2O_2 ^[35, 38],而过氧化氢酶在清除多余 H_2O_2 、保持细胞的氧化还原稳态中起重要作用。据此推测,本研究中所观察到的 CAT 活性升高,可能是所使用的茉莉酸诱导了棉花叶片的氧猝发。处理后第 14 天时 CAT 活性与对照相比无明显差异,可能是 JA 诱导的氧猝发随处理时间延长逐渐减弱的缘故。

棉叶中丰富的单宁和棉酚能抑制或减轻绿盲蝽 (*Apolygus lucorum*) 的危害^[39]、抑制棉铃虫化蛹^[40],甚至直接起毒杀作用^[11]。PPO 明显抑制棉铃虫的增重和取食^[41]。PIs 也在番茄和马铃薯的抗棉铃虫中起重要作用^[34, 42]。虽然本研究没有直接关注 JA 诱导棉花对棉铃虫等害虫的影响,但茉莉酸及其功能类似物的诱导抗虫性表明:2.0 mmol/L 茉莉酸处理的 Bt 棉叶大大降低了草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 的相对生长率^[7]。4 龄棉铃虫取食 MeJA 处理过的番茄 (Tainan ASVEG No. 6) 叶后,死亡率达 100%^[34],外源茉莉酸处理的枸杞苗木和水稻幼苗使枸杞蚜和稻褐飞虱若虫的发育历期延长^[5, 43]。本研究发现,棉花幼苗经茉莉酸处理后,单宁和抗消化酶含量上升、抗营养酶和抗氧化酶活性升高。因此,根据前人和本实验的结果推测,茉莉酸处理能提高棉花幼苗的抗虫性。另外,由于植物对茉莉酸诱导存在浓度依赖性、发育阶段特异性和物种专一性^[30, 44-45],开展茉莉酸的诱导抗性实验时除应该多设浓度梯度外,还应关注研究对象的发育阶段。未来应进一步采用分析化学的方法对茉莉酸诱导产生的抗虫性次生代谢物进行定性和定量分析,从棉花诱导防御对棉铃虫等害虫的取食行为、产卵偏好、生态免疫和解毒功能、从可诱导挥发物对棉铃虫捕食性/寄生性天敌的影响等多个营养级层面进行综合研究,揭示茉莉酸诱导普通棉抗虫性的生理、生态和生化机制。

References:

- [1] Boughton A J, Hoover K, Felton G W. Impact of chemical elicitor applications on greenhouse tomato plants and population growth of the green peach aphid, *Myzuc persicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2006, 120(3): 175-188.
- [2] Bruinsma M, van Dam N M, van Loon J J A, Dicke M. Jasmonic acid-induced changes in *Brassica oleracea* affect oviposition preference of two specialist herbivores. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33(4): 655-668.
- [3] Abe H, Shimoda T, Ohnishi J, Kugimiya S, Narusaka M, Seo S, Narusake Y, Tsuda S, Kobayashi M. Jasmonate-dependent plant defense restricts thrips performance and preference. *BMC Plant Biology*, 2009, 9: 27, doi:10.1186/1471-2229-9-97.
- [4] Guan X M, Liu X X, Lu Z Q, Zhao Z W, Zhang Q W, Xia J Y. Influence of tannic acid and Cry1Ac toxin of *Bacillus thuringiensis* on larval growth, growth and development of *Helicoverpa armigera*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2009, 132(1): 50-58.
- [5] Gong Y Y, Duan L Q, Wang A Q, Cui R J, Qiang Y S. Effects of exogenous jasmonic acid-induced resistance to wolfberry on the development and fecundity of the wolfberry aphid *aphis* sp. *Acta Entomologia Sinica*, 2010, 53(6): 670-674.
- [6] Gong Y Y, Duan L Q, Wang A Q. Induced effects of jasmonic acid on the contents of biochemical substances and enzyme activity in wolfberry leaves. *Plant Protection*, 2010, 36(2): 61-65.
- [7] Mészáros A, Beuzelin J M, Stout M J, Bommireddy P L, Riggio M R, Leonard B R. Jasmonic acid-induced resistance to the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in conventional and transgenic cottons expressing *Bacillus thuringiensis* insecticidal proteins. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2011, 140(3): 226-237.
- [8] Stratmann J W. Long distance run in the wound response-jasmonic acid is pulling head. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(6): 247-250.
- [9] Koo A J K, Gao X L, Jones A D, Howe G A. A rapid wound signal activates the systemic synthesis of bioactive jasmonates in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, 2009, 59(6): 974-986.
- [10] Bruinsma M, Posthumus M A, Mumm R, Mueller M J, van Loon J J, Dicke M. Jasmonic acid-induced volatiles of *Brassica oleracea* attract parasitoids: effects of time and dose, and comparison with induction by herbivores. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2575-2587.
- [11] Koussevitzky S, Ne'eman E, Harel E. Import of polyphenol oxidase by chloroplasts is enhanced by methyl jasmonate. *Planta*, 2004, 219(3):

412-419.

- [12] Meng Z J, Zhou Y Q, Yang S C, Jin H, Hu X. Effects of exogenous jasmonates on tannin content in needles of two larch species. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(3): 96-104.
- [13] Feng Y J, Wang J W, Luo S M. Timing and concentration effects on the defense response of *Zea mays* seedlings after application of jasmonic acid to leaves. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 812-823.
- [14] Feng Y J, Wang J W, Luo S M. Timing-and concentration effect of belowground treatment with jasmonic acid on maize seedlings chemical defense response. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1883-1890.
- [15] Wu G Z, Zeng R S. The influence of protective enzymes Perpendicular Gaozhou wild rice (*Oryza rufipogon*) treated with exterior signal compounds salicylates and jasmonates. *Acta Agricultural Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16(3): 82-84.
- [16] War A R, Paulraj M G, War M Y, Ignacimuthu S. Jasmonic acid-mediated-induced resistance in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) against *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Growth Regulation*, 2011, 30(4): 512-523.
- [17] Omer A D, Granett J, Karban R, Villa E M. Chemically induced resistance against multiple pests in cotton. *International Journal of Pest Management*, 2001, 47(1): 49-54.
- [18] Opitz S, Kunert G, Gershenzon J. Increased terpenoid accumulation in cotton (*Gossypium hirsutum*) foliage is a general wound response. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34(4): 508-522.
- [19] Lin F M, W D, Lu Y H, Zhang Y J, Wang M, Wu K M. The relationship between the main secondary metabolites and the resistance of cotton to *Apolygus lucorum*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2011, 39(3): 202-208.
- [20] Stout M J, Workman K V, Bostock R M, Duffey S S. Stimulation and attenuation of induced resistance by elicitors and inhibitors of chemical induction in tomato (*Lycopersicon esculentum*) foliage. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1998, 86(3): 267-279.
- [21] Zhou Z Y, Wang Z Z. Effects of jasmonic acid on induced resistance of rice seedlings to *Magnaporthe Grisea*. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2006, 36(5): 432-438.
- [22] Tan C W, Lou J C, Yadav J, Ravuiwasa K T, Hwang S Y. Methyl jasmonate induced responses in four plant species and its effects on *Spodoptera litura* Fab. Performance. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2011, 14(3): 263-269.
- [23] Kumari G J, Reddy A M, Naik S T, Kumar S G, Prasnathi J, Sriranganayakulu G, Reddy P C, Sudhakar C. Jasmonic acid induced changes in protein pattern, antioxidative enzyme activities and peroxidase isozymes in peanut seedlings. *Biologia Plantarum*, 2004, 50(2): 219-226.
- [24] Barbehenn R V, Jaros A, Lee G, Mozola C, Weir Q, Salminen J P. Hydrolyzable tannin as "quantitative defense": limited impact against *Lymantria dispar* caterpillars on hybrid poplar. *Journal of Insect Physiology*, 2009, 55(4): 297-304.
- [25] Wang J W, Xu T, Zhang L W, Zhong Z M, Luo S M. Effects of methyl jasmonate on hydroxamic acid and phenolic acid content in maize and its allelopathic activity to *Echinochloa crusgalli* (L.). *Allelopathy Journal*, 2007, 19(1): 161-17.
- [26] Moreira X, Sampedro L, Zas R. Defensive responses of *Pinus pinaster* seedlings to exogenous application of methyl jasmonate: concentration effect and systemic response. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 94-100.
- [27] Moreira X, Zas R, Sampedro L. Quantitative comparison of chemical, biological and mechanical induction of secondary compounds in *Pinus pinaster* seedlings. *Trees*, 2012, 26(2): 677-683.
- [28] Duffey S S, Stout M J. Antinutritive and toxic components of plant defense against insects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 1996, 32(1): 3-37.
- [29] Gatehouse A M R, Norton E, Davison G M, Babbé S M, Newell C A, Gatehouse J A. Digestive proteolytic activity in larvae of tomato moth, *Lacanobia oleraceae*; effects of plant protease inhibitors *in vitro* and *in vivo*. *Journal of Insect Physiology*, 1999, 45(6): 545-558.
- [30] Li X G, Liu H X, Hou H B, Gao W H. Response of Chinese pine cones to induction of exogenous methyl jasmonate and *Gravitar mata margarotna* larvae. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(3): 66-72.
- [31] Fujimoto T, Tomitaka Y, Abe H, Tsuda S, Futai K, Mizukubo T. Expression of profile of jasmonic acid-induced genes and the induced resistance against the root-know nematode (*Meloidogyne incognita*) in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) after foliar treatment with methyl jasmonate. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(10): 1084-1097.
- [32] Lomate P R, Hivrale V K. Wound and methyl jasmonate induced pigeon pea defensive proteinase inhibitor has potency to inhibit insect digestive proteinases. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57(2): 193-199.
- [33] Gould N, Reglinski, Northcott G L, Spiers M, Taylor J T. Physiological and biochemical responses in *Pinus radiata* seedlings associated with methyl jasmonate-induced resistance to *Diplodia pinea*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2009, 74(2): 121-128.
- [34] Tan C W, Chiang S Y, Ravuiwasa K T, Yadav J, Hwang S Y. Jasmonate-induced defenses in tomato against *Helicoverpa armigera* depend in part on nutrient availability, but artificial induction via methyl jasmonate does not. *Arthrod-Plant Interactions*, 2012, doi: 10.1007/s11829-012-9206-3.
- [35] Liu Y, Pan Q H, Yang H R, Liu Y Y, Huang W D. Relationship between H₂O₂ and jasmonic acid in pea leaf wounding response. *Russian*

- Journal of Plant Physiology, 2008, 55(6): 765-775.
- [36] Jiang Y M, Xia N, Li X D, Shen W B, Liang L J, Wang C Y, Wang R, Peng F, Xia B. Molecular cloning and characterization of a phenylalanine ammonia-lyase gene (*LrPAL*) from *Lycoris radiata*. Molecular Biology Reports, 2011, 38(3): 1935-1940.
- [37] Ritter H, Schulz G E. Structural basis for the entrance into the phenylpropanoid metabolism catalyzed by phenylalanine ammonia lyase. Plant Cell, 2004, 16(12): 3426-3436.
- [38] Maksimov I V, Sorokan A V, Cherepanova E A, Surina O B, Troshina N B, Yarullina L G. Effects of salicylic and jasmonic acids on the components of pro/antioxidant system in potato plants infected with late blight. Russian Journal of Plant Physiology, 2011, 58(2): 299-306.
- [39] Lin F M, Wu D, Lu Y H, Zhang Y J, Wang M, Wu K M. The relationship between the main secondary metabolites and the resistance of cotton to *Apolygus lucorum*. Acta Phytologica Sinica, 2011, 39(3): 202-208.
- [40] Guan X M, Liu X X, Lu Z Q, Zhao Z W, Zhang Q W, Xia J Y. Influence of tannic acid and Cry1Ac toxin of *Bacillus thuringiensis* on larval growth, growth and development of *Helicoverpa armigera*. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2009, 132(1): 50-58.
- [41] Bhonwong A, Stout M J, Attajarusit J, Tantasawat P. Defensive role of tomato polyphenol oxidases against cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*) and beet armyworm (*Spodoptera exigua*). Journal of Chemical Ecology, 2009, 35(1): 28-38.
- [42] Dunse K M, Stevens J A, Lay F T, Gaspar Y M, Health R L, Anderson M A. Coexpression of potato type I and II proteinase inhibitors gives cotton plants protection against insect damage in the field. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(34): 15011-15015.
- [43] Senthil-Nathan S, Kalaivani K, Choi M Y, Paik C H. Effects of jasmonic acid-induced resistance in rice on the plant brownhopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae). Pesticide Biochemistry and Physiology, 2009, 95(2): 77-84.
- [44] Matthes M C, Pickett J A, Napier J A. Natural variation in responsiveness of *Arabidopsis thaliana* to methyl jasmonate is developmentally regulated. Planta, 2008, 228(6): 1021-1028.
- [45] Cooper W R, Rieske L K. Differential responses in American (*Castanea dentata* Marshall) and Chinese (*C. mollissima* Blume) chestnut (Fagales: Fagaceae) to foliar application of jasmonic acid. Chemoecology, 2008, 18(2): 121-127.

参考文献:

- [5] 宫玉艳, 段立清, 王爱清, 崔瑞娟, 钱远松. 外源茉莉酸诱导枸杞对枸杞蚜生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 2010, 53(6): 670-674.
- [6] 宫玉艳, 段立清, 王爱清. 茉莉酸诱导对枸杞叶生化物质及酶活性的影响. 植物保护, 2010, 36(2): 61-65.
- [12] 孟昭军, 周永泉, 严善春, 金虎, 胡晓. 外源茉莉酸类化合物对2种落叶松针叶内单宁含量的影响. 林业科学, 2010, 46(3): 96-104.
- [13] 冯远娇, 王建武, 骆世明. 叶片涂施茉莉酸对玉米幼苗防御反应的时间和浓度效应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 812-823.
- [14] 冯远娇, 王建武, 骆世明. 外源茉莉酸处理地下部对玉米化学防御反应影响的时间和浓度效应. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1883-1890.
- [15] 吴国昭, 曾任森. 外源水杨酸甲酯和茉莉酸甲酯处理对挺立型普通野生水稻保护酶活性的影响. 西北农业学报, 2007, 16(3): 82-84.
- [21] 邹志燕, 王振中. 茉莉酸诱导水稻幼苗对稻瘟病抗性作用研究. 植物病理学报, 2006, 36(5): 432-438.
- [30] 李新岗, 刘慧霞, 候慧波, 高文海. 油松球果对外源茉莉酸甲酯和虫害诱导的生化反应. 林业科学, 2007, 43(3): 66-72.
- [39] 林凤敏, 吴敌, 陆晏辉, 张永军, 王沫, 吴孔明. 棉花主要抗虫次生物质及其对绿盲蝽抗性的关系. 植物保护学报, 2011, 39(3): 202-208.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
- Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
- A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
- Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
- Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
- Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
- Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethytidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
- Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
- The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
- Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
- Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
- Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
- An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
- Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
- Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
- Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
- Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
- Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade	MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment	LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C,N and P distribution of <i>Schima superba</i> seedlings in response to simulated nitrogen deposition	LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields	WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)

Resource and Industrial Ecology

Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of <i>Zizania latifolia</i> Turcz. plants are affected by <i>Ustilago esculenta</i> infection	YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron(<i>Citrus medica</i> L. var. <i>sarcodactylis</i> Swingle)	CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
Hosts preference of <i>Echinothrips americanus</i> Morgan for different vegetables ...	ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants	YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of <i>Populus tomentosa</i> seedlings	WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach	ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)

Research Notes

Characteristics of precipitation distribution in <i>Pinus tabulaeformis</i> plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain	ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing	JIA Baoqun (1654)
Effects of <i>Mikania micrantha</i> wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in <i>Mikania micrantha</i> H. B. K.	WANG Ruilong, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 5 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元