

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第16期 Vol.32 No.16 **2012**

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32卷第16期 2012年8月 (半月刊)

目次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例	李菁, 骆有庆, 石娟 (4943)
中国能源消费碳排放的时空特征	舒娱琴 (4950)
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素	姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素	王合玲, 张辉国, 秦璐, 等 (4969)
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征	李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981)
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993)
种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响	钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002)
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估	邓培雁, 雷远达, 刘威, 等 (5014)
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征	梁威, 邵学新, 吴明, 等 (5025)
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系	葛雅丽, 席貽龙, 马杰, 等 (5034)
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应	周文, 刘茂松, 徐驰, 等 (5043)
荒漠植物白刺属4个物种的生殖分配比较	李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054)
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应	牛俊峰, 张巍巍, 李丽, 等 (5062)
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系	田旭平, 常洁, 李娟娟, 等 (5071)
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价	谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076)
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究	左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087)
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征	戴斯迪, 马克明, 宝乐 (5095)
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征	刘恩, 刘世荣 (5103)
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例	赵则海 (5110)
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化	王晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121)
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响	吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128)
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响	熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138)
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测	周磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146)
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响	姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154)
基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法	常青, 邱瑶, 谢苗苗, 等 (5164)
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价	秦天天, 齐伟, 李云强, 等 (5175)
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响	杨洪, 王召, 金道超 (5184)
6种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响	王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191)
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局	叶文丰, 李林, 孙来亮, 等 (5199)
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建	邓合黎, 马琦, 李爱民 (5208)
专论与综述	
生态系统服务竞争与协同研究进展	李鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219)
中国沿海无柄蔓足类研究进展	严涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230)
冰雪灾害对森林的影响	郭淑红, 薛立 (5242)
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展	杨平, 全川 (5254)
采石场废弃地的生态重建研究进展	杨振意, 薛立, 许建新 (5264)
研究简报	
基于地统计学和CFI样地的浙江省森林碳空间分布研究	张峰, 杜群, 葛宏立, 等 (5275)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔4200多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

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

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation; a case study in Aershan forest area	LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China	SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China	YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China	WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China	LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against <i>Proocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China	SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands	LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors	GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin	ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L.	LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads	NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density	TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration	TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species	ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing	DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area	LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example	ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...	WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat	WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat	XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO ₂ uptake	ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction	CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area	QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae)	YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i>	WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan	YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing	DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)
Review and Monograph	
Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview	LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China	YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests	GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance	YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries	YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)
Scientific Note	
Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots	ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201203060302

王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 宋圆圆, 苏贻娟, 朱克岩, 曾任森. 6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(16): 5191-5198.

Wang R L, Sun Y L, Liang X T, Song Y Y, Su Y J, Zhu-Salzman Keyan, Zeng R S. Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in *Spodoptera litura*. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5191-5198.

6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响

王瑞龙^{1,2,3}, 孙玉林^{1,2,3}, 梁笑婷^{1,2,3}, 宋圆圆^{1,2,3}, 苏贻娟^{1,2,3},
朱克岩⁴, 曾任森^{1,2,3,*}

(1. 华南农业大学亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广州 510642;

2. 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省普通高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642;

4. 德克萨斯农工大学昆虫学系, 德克萨斯州 77843 美国)

摘要: 草食性昆虫取食植物时遇到宿主植物中大量次生物质的化学防御, 研究昆虫适应植物毒素的反防御策略具有重要的科学意义。分别添加 0.01% 肉桂酸、0.01% 水杨酸、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素、0.05% 黄酮和 0.1% 香豆素等 6 种植物次生物质的饲料饲养斜纹夜蛾 (*Spodoptera litura*) 五龄幼虫 48 h 后, 测定斜纹夜蛾幼虫中肠和脂肪体中谷胱甘肽 S-转移酶 (GSTs)、羧酸酯酶 (CarE)、P450 的酶含量及头部乙酰胆碱酯酶 (AChE) 的活性, 利用半定量 RT-PCR 检测中肠和脂肪体中 CYP4M14 和 CYP4S9 的基因表达水平。结果表明: 取食肉桂酸和香豆素后, 斜纹夜蛾中肠中 CarE 的酶活性分别提高了 1.67 和 1.37 倍, 取食 6 种次生物质均能显著提高斜纹夜蛾脂肪体中 GSTs 酶活性。取食肉桂酸和香豆素 48 h 后, 脂肪体中 P450 酶含量比对照增加 2.93 和 14.50 倍。取食肉桂酸、花椒毒素、槲皮素和香豆素后, 斜纹夜蛾头部 AChE 酶活性与对照相比提高了 1.53、1.80、2.36 和 1.56 倍。6 种次生物质均可诱导脂肪体中 CYP4M14 基因表达, 槲皮素、肉桂酸和香豆素强烈诱导 CYP4S9 在脂肪体中表达。表明, 斜纹夜蛾具有利用植物次生物质诱导其解毒酶的能力, 进而提高其对毒素的抗性。

关键词: 斜纹夜蛾; 解毒酶; 细胞色素 P450; 植物次生物质; 昆虫反防御策略

Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in *Spodoptera litura*

WANG Ruilong^{1,2,3}, SUN Yulin^{1,2,3}, LIANG Xiaoting^{1,2,3}, SONG Yuanyuan^{1,2,3}, SU Yijuan^{1,2,3}, ZHU-SALZMAN Keyan⁴, ZENG Rensen^{1,2,3,*}

1 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2 Key Laboratory of Tropical Agro-environment, Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

4 Department of Entomology, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA

Abstract: Herbivorous insects encounter chemical defense in the form of numerous secondary metabolites in host plants. Understanding insect counter-defense mechanisms is important. In this study fifth instar *Spodoptera litura* insects were exposed to diets containing 0.01% cinnamic acid, 0.01% salicylic acid, 0.01% xanthotoxin, 0.02% quercetin, 0.05% flavone and 0.1% coumarin for 48 h. Activities of detoxification enzymes including glutathione S-transferase (GSTs), carboxylesterase (CarE), cytochrome P450 (P450) and acetylcholinesterase (AChE) were then determined in midguts and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31000260, 31100286, 31028018); 广东省自然科学基金项目 (S2011040004336)

收稿日期: 2012-03-06; **修订日期:** 2012-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rszeng@scau.edu.cn

fatbodies, and transcript levels of *CYP4M14* and *CYP4S9* were examined by semi-quantitative RT-PCR. CarE activity in midguts was increased 1.67- and 1.37-fold after consumption of cinnamic acids and coumarin, respectively. All six plant secondary metabolites induced GSTs activity in the fatbodies. Total P450 activity in the fatbodies was increased 2.93- and 14.50-fold after consumption of cinnamic acid and coumarin, respectively. Consumption of cinnamic acid, xanthotoxin, quercetin and coumarin increased AChE activity 1.53-, 1.80-, 2.36- and 1.56-fold, respectively. All six plant secondary metabolites induced transcripts of *CYP4M14* in the fatbodies of *S. litura*. Cinnamic acid, quercetin and coumarin strongly induced transcripts of *CYP4S9* in the fatbodies. These results indicated that *S. litura* is able to induce its detoxification enzymes to minimize toxicity from plant secondary metabolites.

Key Words: *Spodoptera litura*; detoxification enzymes; cytochrome P450; plant secondary metabolites; insect counter-defense

自 Ehrlich 和 Raven^[1]提出昆虫与植物协同进化理论以来,以植物次生物质为媒介的昆虫与植物间的关系成为化学生态学研究的热点之一。在进化中,昆虫对植物次生物质形成多种抗性,包括代谢抗性、靶标抗性和行为抗性^[2]。当昆虫取食不同宿主植物时,其解毒酶系也会发生明显的变化^[3-4]。昆虫的解毒酶能够代谢大量的外源毒素,是昆虫适应植物防御化学物质的重要方式^[5-8]。谷胱甘肽-S-转移酶(Glutathione S-transferase, GSTs)、羧酸酯酶(Carboxylesterase, CarE)和细胞色素 P450(Cytochrome P450, CYP450)是昆虫体内最重要的三大解毒酶系,在对外源化合物的解毒代谢中这些解毒酶可被诱导增强其活性^[9-11]。乙酰胆碱酯酶(Acetylcholinesterase, AChE)是神经突触传导中的关键酶,它是有机磷类和氨基甲酸酯类杀虫剂的重要作用靶标^[12]。细胞色素 P450 为一类亚铁血红素-硫醇盐蛋白的超家族,可参与内源性物质和药物、环境化合物等外源性物质的代谢^[13-14]。CYP4 基因家族是 P450 超家族最古老的基因家族之一, CYP4 家族基因的代谢解毒作用是大多数昆虫适应其寄主植物的重要机制^[13]。

斜纹夜蛾(*Spodoptera litura* Fabricius)属鳞翅目(Lepidoptera)夜蛾科(Noctuidae),是一种世界性分布的广食性和暴发性农业害虫^[15],已知寄主范围多达 99 科 290 种以上^[16]。目前防治斜纹夜蛾主要依靠化学药剂进行防治,但大量使用化学农药导致斜纹夜蛾对有机氯、有机磷、氨基甲酸酯、拟除虫菊酯等多种杀虫剂产生了不同程度的抗药性,防治效果减低^[17-18]。

斜纹夜蛾能够适应 290 多种植物中的各种次生代谢物质的机理值得研究^[16,18]。为此,本文研究了肉桂酸、水杨酸、花椒毒素、槲皮素、黄酮和香豆素等 6 种常见的植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性及对相关基因表达的影响,旨在探明斜纹夜蛾适应次生物质的生理生化机制,揭示广食性昆虫抗药性形成的机理。

1 材料与方法

1.1 供试材料

斜纹夜蛾幼虫采自华南农业大学实验农场,在实验室养虫室内用人工饲料饲养^[19]。饲养温度为(25±3)℃,相对湿度为(60±5)%,光周期为 14 L:10 D。

二甲基亚砜(Dimethyl sulfoxide, DMSO)(≥99.8%)和香豆素(≥98.0%)购自广州化学试剂厂;肉桂酸(≥98.0%)购自中国医药(集团)上海化学试剂公司;水杨酸(≥99.5%)购自成都市联合化工试剂研究所;槲皮素(≥98.0%)、花椒毒素(≥98.0%)和黄酮(≥99.0%)购于 Sigma-Aldrich。其他试剂均为化学纯。

1.2 试验方法

1.2.1 实验设计

将肉桂酸、水杨酸、花椒毒素、槲皮素、黄酮和香豆素用 DMSO 溶解,分别配制含有 0.01% 肉桂酸、0.01% 水杨酸、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素、0.05% 黄酮和 0.1% 香豆素的人工饲料。对照为 100 g 人工饲料中加入 200 μL 的溶剂 DMSO。饲喂斜纹夜蛾五龄幼虫 48 h 后,分别提取斜纹夜蛾的中肠和脂肪体,-80℃ 保存备用。每个处理 20 头斜纹夜蛾,实验设 3 次重复。

1.2.2 乙酰胆碱酯酶的活性测定

乙酰胆碱酯酶的活性测定参考改进的 Ellman 方法测定^[20]。将 10 头 5 龄斜纹夜蛾幼虫头部用液氮研磨,加 2 mL 生理盐水混匀,4℃ 3500 g/min 离心 10 min,取上清液备用。按照南京建成生物工程研究所提供的试剂盒,加入各试剂后混匀,室温静置 15 min,在 412 nm 处测定其吸光度值,重复 3 次,计算酶的活性。

1.2.3 P450 酶含量的测定

P450 酶含量的测定参考 Omura^[21]的方法。斜纹夜蛾 5 龄幼虫 5 头 1 组,提取中肠和脂肪体后分别用液氮研磨,加入 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0、含 1 mol/L EDTA、0.1 mmol/L PMSF、0.1 mmol/L DTT、10% 甘油),4℃ 10000 g/min 离心 20 min,上清液即为 P450 酶液。用 Na₂S₂O₄将样品杯和参比杯中的 P450 酶液还原,在参比杯中通入 CO 约 1 min,分别测定其在 450 nm 和 490 nm 处的吸光度值,重复 3 次,计算 P450 酶的含量。

1.2.4 谷胱甘肽-S 转移酶活性测定

谷胱甘肽-S 转移酶活性的测定参考 Lee^[22]的方法。斜纹夜蛾中肠和脂肪体分别用液氮研磨后,加入 2 mL 0.04 mol/L 磷酸缓冲液,4℃ 12000 g/min 离心 30 min,取上清液即为酶源。将 2.4 mL 的磷酸缓冲液(66 mmol/L,pH 7.0),0.1 mL 酶源,50 mmol/L GSH 溶液 0.3 mL,30 mmol/L CDNB 溶液 0.1 mL 加入到比色杯中,记录连续 1 min 340 nm 处的光吸收变化值,重复 3 次。

蛋白质含量的测定参考 Bradford^[23]的方法,以牛血清蛋白为标准蛋白。取 1 mL 酶源加入 5 mL 考马斯亮蓝溶液,混匀静置 2 min 后,在 595 nm 处测吸光度值,通过标准曲线计算蛋白质的含量。

1.2.5 羧酸酯酶的活性测定

羧酸酯酶活性测定参考 van Asperen^[24]的方法。将提取的斜纹夜蛾中肠和脂肪体用液氮研磨后,加入 2 mL 0.04 mol/L 磷酸缓冲液,4℃ 12000 g/min 离心 30 min,取上清液,用 0.04 mol/L 磷酸缓冲液稀释 50 倍,即为酶源。取 0.3 mL 酶液,0.7 mL 0.04 mol/L 磷酸缓冲液和 5 mL 3×10⁴底物,37℃ 摇床振荡 30 min,加入 1 mL 显色剂,混匀后室温静置 30 min,测定其在 600 nm 处的吸光度值,重复 3 次。以不同浓度的 α-萘酚作标准曲线。

1.2.6 半定量 RT-PCR 检测表达量

(1) 总 RNA 提取

斜纹夜蛾置于冰上,以预冷的磷酸缓冲液(pH 7.8)为解剖液,解剖提取中肠和脂肪体。将中肠和脂肪体用液氮分别充分研磨,采用 TRIzol(Invitrogen)法提取总 RNA,超微量核酸蛋白测定仪(Nanodrop ND-1000)检测 RNA 样品的浓度和纯度,0.75% 的琼脂糖凝胶电泳检测 RNA 样品的完整性。

(2) cDNA 的合成

cDNA 合成参照北京天根的 TIANScript RT Kit 说明书的步骤进行。在无核酸酶的离心管中加入总 RNA 1—5 μg,2 μL (10 μmol/L) Oligo (dT),2 μL (2.5 mmol/L) dNTP,灭菌水补足 14.5 μL,混匀后 70℃ 5 min,置于冰上 2 min,短暂离心后加入 4 μL 5 × First-Strand Buffer,0.5 μL (40 U/μL) RNasin,1 μL (200 U/μL) TIANScript M-MLV,混匀后 25℃ 10 min,42℃ 50 min,95℃ 5 min,-20℃ 保存备用。

(3) 引物设计

根据 GenBank 中斜纹夜蛾的 *CYP4M14* (DQ352137) 和 *CYP4S9* (DQ355383) 序列分别设计 PCR 扩增引物^[25],以延伸因子-1a (Elongation factor-1a, *EF-1a*) (U20129) 为内标基因,其引物^[25]分别为:

CYP4M14 F 5'-GTTGCTCGCTAATCATAGGAAAAT-3',

CYP4M14 R 5'-GGTTCTTAAACAAATCTGGTCTCAA-3'。

CYP4S9 F 5'-CAACGATGTCTGATCTGGCT-3',

CYP4S9 R 5'-GCAGGTCGTATATGTGGATTGAT-3'。

EF-1a F 5'-GACAAACGTACCATCGAGAAG-3',

EF-1α R 5'-GATACCAGCCTCGAACTCAC-3'。

(4) 半定量 RT-PCR 检测

半定量 RT-PCR 在 PTC-100 Thermal Cycler PCR 仪(Bio-Rad)中进行。采用 25.0 μL 反应体系;10×Buffer 2.5 μL;cDNA 模板 1.0 μL;2.5 mmol/L dNTP 2.0 μL;ddH₂O 18.3 μL;*r* Taq DNA 聚合酶 0.2 μL;正向和反向引物各 0.5 μL。PCR 反应条件为:94℃ 3min 开始并持续 32 个循环;变性 94℃ 30 s,退火 55.9℃ 45 s,延伸 72℃ 1 min;最后 72℃ 10 min 结束。

取 5 μL PCR 产物,加入 1 μL 6×loading buffer 混匀,电泳后利用凝胶成像系统检测目的基因的表达量。

1.3 数据的统计与分析

试验数据用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析,差异显著性分析采用 Duncan 多重比较法检验,所有数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 次生物质对斜纹夜蛾五龄幼虫 AChE 活性的影响

当斜纹夜蛾五龄幼虫取食了含有 0.01% 肉桂酸、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素和 0.1% 香豆素人工饲料 48 h 后,斜纹夜蛾幼虫头部 AChE 的活性分别比对照提高了 1.53、1.80、2.36 和 1.56 倍 ($F=15.605, P<0.001$)。取食含有水杨酸和黄酮人工饲料 48 h 后对斜纹夜蛾幼虫头部 AChE 的活性无显著影响。表明肉桂酸、花椒毒素、槲皮素和香豆素等植物次生物质可诱导斜纹夜蛾增强头部 AChE 的活性(表 1)。

表 1 6 种植物次生物质对斜纹夜蛾五龄幼虫头部 AChE 活性的影响

Table 1 Acetylcholinesterase activities of the fifth instar larvae of <i>S. litura</i> exposed to diets containing the six plant secondary metabolites			
次生物质 Secondary metabolites	AChE 活性 AChE activity /(U/mg 蛋白质)	次生物质 Secondary metabolites	AChE 活性 AChE activity /(U/mg 蛋白质)
对照 Control	0.055±0.003 de	0.01% 肉桂酸 cinnamic acid	0.084±0.010 bc
0.01% 水杨酸 Salicylic acid	0.061±0.005 cd	0.01% 花椒毒素 xanthotoxin	0.099±0.004 b
0.02% 槲皮素 Quercetin	0.130±0.016 a	0.05% 黄酮 flavone	0.035±0.004 e
0.1% 香豆素 Coumarin	0.086±0.007 bc		

同列中不同字母间差异显著($P<0.05$)

2.2 次生物质对斜纹夜蛾细胞色素 P450 酶含量的影响

斜纹夜蛾五龄幼虫取食含有 0.01% 水杨酸、0.02% 槲皮素、0.1% 香豆素人工饲料 48 h 后,斜纹夜蛾中肠中 P450 酶含量分别比对照显著增加了 3.20、3.53 和 7.33 倍 ($F=79.546, P<0.001$) (表 2)。而 0.01% 肉桂酸、0.01% 花椒毒素和 0.05% 黄酮人工饲料的对斜纹夜蛾中肠中 P450 酶含量无显著影响。取食含有 0.01% 肉桂酸和 0.1% 香豆素的人工饲料 48 h 后,斜纹夜蛾脂肪体中 P450 酶含量分别比对照提高了 2.93 和 14.50 倍 ($F=110.005, P<0.001$)。表明不同植物次生物质可诱导斜纹夜蛾增加中肠和脂肪体中 P450 酶的含量。

表 2 六种植物次生物质对斜纹夜蛾五龄幼虫细胞色素 P450 酶含量的影响

Table 2 The content of cytochrome P450 enzymes of the fifth instar larvae of *S. litura* exposed to diets containing the six plant secondary metabolites

次生物质 Secondary metabolites	P450 酶含量 P450 enzyme content/(nmol/mg 蛋白质)	
	中肠 Midgut	脂肪体 Fatbody
对照 Control	0.015±0.004 cd	0.014±0.004 c
0.01% 肉桂酸 Cinnamic acid	0.027±0.004 c	0.041±0.008 b
0.01% 水杨酸 Salicylic acid	0.048±0.004 b	0.027±0.004 bc
0.01% 花椒毒素 Xanthotoxin	0.016±0.004 cd	0.031±0.012 bc
0.02% 槲皮素 Quercetin	0.053±0.004 b	0.014±0.004 c
0.05% 黄酮 Flavone	0.008±0.002 c	0.022±0.006 bc
0.1% 香豆素 Coumarin	0.110±0.006 a	0.203±0.004 a

同列中不同字母间差异显著($P<0.05$)

2.3 次生物质对斜纹夜蛾 CYP4M14 和 CYP4S9 表达的影响

取食含有不同次生物质人工饲料的五龄斜纹夜蛾幼虫,其中肠和脂肪体中 CYP4M14 和 CYP4S9 受到不同程度的诱导表达。取食含有 0.05% 黄酮、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素和 0.01% 肉桂酸的人工饲料 48h 后,中肠中 CYP4M14 的表达量比对照组高(图 1);而取食含有 0.01% 水杨酸和 0.1% 香豆素的人工饲料的斜纹夜蛾幼虫,其中肠中 CYP4M14 的表达量与对照无差异。斜纹夜蛾幼虫取食含有 0.05% 黄酮、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素、0.01% 肉桂酸和 0.1% 香豆素的人工饲料 48 h 后,与对照组相比 CYP4S9 在中肠中表达量均增加,而取食含 0.01% 水杨酸人工饲料的 CYP4S9 没有被诱导表达。

在脂肪体中,取食含有 0.05% 黄酮、0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素、0.01% 肉桂酸、0.01% 水杨酸和 0.1% 香豆素的人工饲料 48 h 后,与对照相比 CYP4M14 表达量增强。取食含有 0.01% 花椒毒素、0.02% 槲皮素、0.01% 肉桂酸和 0.1% 香豆素的人工饲料 48h 后 CYP4S9 表达量增加,而取食普通饲料、含有 0.05% 黄酮和 0.01% 水杨酸人工饲料的 CYP4S9 在脂肪体中无表达。

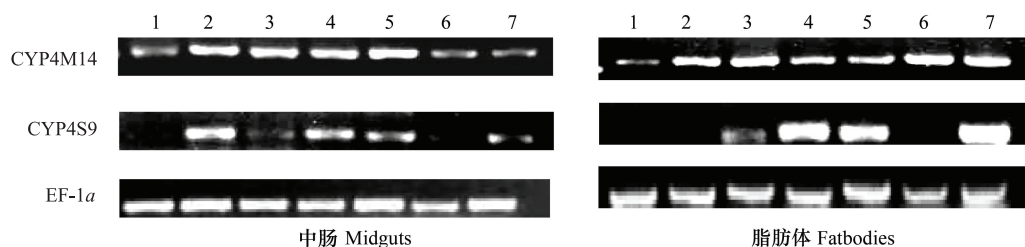


图 1 半定量 RT-PCR 检测 6 种次生物质对斜纹夜蛾中肠和脂肪体 CYP4M14 和 CYP4S9 表达的影响

Fig. 1 Transcript levels of CYP4M14 and CYP4S9 in midguts and fatbodies of caterpillars of *S. litura* exposed to diets containing the six plant secondary metabolites

1:对照;2:0.05% 黄酮;3:0.01% 花椒毒素;4:0.02% 槲皮素;5:0.01% 肉桂酸;6:0.01% 水杨酸;7:0.1% 香豆素

2.4 次生物质对斜纹夜蛾 GSTs 活性的影响

斜纹夜蛾五龄幼虫取食含有 0.01% 花椒毒素、和 0.01% 水杨酸 0.1% 香豆素的人工饲料 48 h 后,中肠中 GSTs 活性比对照分别增加 1.97、2.24 和 3.21 倍($F=33.743, P<0.001$)。而在脂肪体中,0.01% 肉桂酸、0.01% 水杨酸、0.01% 花椒毒素、0.05% 黄酮和 0.1% 香豆素都可显著诱导 GSTs 的活性,其中含有 0.01% 水杨酸的人工饲料与对照相比,GSTs 活性显著增强了 7.05 倍($F=48.086, P<0.001$) (表 3)。结果表明斜纹夜蛾取食不同植物次生物质后,中肠和脂肪体中 GSTs 的活性被不同程度的诱导增强。

表 3 六种植物次生物质对斜纹夜蛾五龄幼虫 GSTs 活性的影响

Table 3 Glutathione S-transferase (GSTs) activities in midguts and fatbodies of the fifth instar larvae of *S. litura* exposed to diets containing the six plant secondary metabolites

次生物质 Secondary metabolites	GSTs 活性 GSTs activity/(mmol·min ⁻¹ ·mg ⁻¹ 蛋白质)	
	中肠 Midgut	脂肪体 Fatbody
对照 Control	0.146±0.006 c	0.019±0.004 e
0.01% 肉桂酸 Cinnamic acid	0.184±0.002 c	0.102±0.009 b
0.01% 水杨酸 Salicylic acid	0.327±0.016 b	0.134±0.004 a
0.01% 花椒毒素 Xanthotoxin	0.287±0.044 b	0.116±0.007 ab
0.02% 槲皮素 Quercetin	0.192±0.004 c	0.040±0.005 d
0.05% 黄酮 Flavone	0.209±0.016 c	0.067±0.005 c
0.1% 香豆素 Coumarin	0.468±0.006 a	0.072±0.004 c

同列中不同字母间差异显著($P<0.05$)

2.5 次生物质对斜纹夜蛾 CarE 活性的影响

斜纹夜蛾五龄幼虫取食植物次生物质 48 h 后,其中肠和脂肪体中 CarE 的活性变化见表 4。取食了含有 0.01% 肉桂酸、0.1% 香豆素的人工饲料使斜纹夜蛾中肠 CarE 的活性显著增强,与对照相比分别增加了 1.67

和 1.37 倍 ($F=23.763, P<0.001$); 而取食含有 0.01% 花椒毒素的人工饲料 48 h 后, 斜纹夜蛾中肠 CarE 的活性则受到抑制, 比对照减少了 0.73 倍。取食 6 种植物次生物质后, 脂肪体中 CarE 的活性与对照相比无显著差异 ($F=2.459, P=0.078$), 表明 CarE 在次生物质的诱导下, 其酶活性变化在中肠中比脂肪体中明显。

表 4 六种植物次生物质对斜纹夜蛾五龄幼虫 CarE 活性的影响

Table 4 Carboxylesterase (CarE) activities in midguts and fatbodies of the fifth instar larvae of *S. litura* exposed to diets containing the six plant secondary metabolites

次生物质 Secondary metabolites	CarE 活性 CarE activity/($\mu\text{mol} \cdot \text{mg 蛋白质}^{-1}$)	
	中肠 Midgut	脂肪体 Fatbody
对照 Control	0.715 $\pm$ 0.049 c	0.787 $\pm$ 0.013 ab
0.01% 肉桂酸 cinnamic acid	1.191 $\pm$ 0.060 a	0.900 $\pm$ 0.056 a
0.01% 水杨酸 salicylic acid	0.718 $\pm$ 0.005 c	0.853 $\pm$ 0.156 a
0.01% 花椒毒素 xanthotoxin	0.519 $\pm$ 0.041 d	0.447 $\pm$ 0.055 b
0.02% 槲皮素 quercetin	0.730 $\pm$ 0.042 c	0.646 $\pm$ 0.035 ab
0.05% 黄酮 flavone	0.785 $\pm$ 0.013 c	0.545 $\pm$ 0.047 ab
0.1% 香豆素 coumarin	0.977 $\pm$ 0.067 b	0.699 $\pm$ 0.033 ab

同列中不同字母间差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

植食性昆虫与植物在长期进化过程中, 一方面植物产生许多具有毒性的次生物质(如酚类、萜类、生物碱等)对昆虫进行化学防御^[3,7,26], 另一方面, 植食性昆虫也发展各种反防御策略适应植物的化学防御^[5,11]。植食性昆虫利用植物次生物质诱导相关解毒酶系, 可能影响到昆虫对人工施用农药的抗性^[7,25]。研究表明不同浓度的植物次生物质对昆虫解毒酶的诱导效果不同。低剂量单宁酸可诱导棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)幼虫中肠和脂肪体中的 GSTs 活力增强, 高剂量处理则没有诱导增加, 甚至有抑制作用^[27]。不同宿主植物对草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)谷胱甘肽 S-转移酶的诱导作用不同, 诱导能力大小依次是: 欧洲防风> 香芹菜> 芥菜> 芜菁> 萝卜> 豇豆> 甘蓝> 大白菜> 花生> 棉花^[28]。不同种类的次生物质对昆虫不同解毒酶系的影响各不相同, 花椒毒素、黄酮等次生物质可以诱导草地贪夜蛾 GSTs 活性增强, 而五羟黄酮、杨梅黄酮等次生物质使 GSTs 活性降低, 棉酚、豆甾醇、谷甾醇对 GSTs 活性无影响^[29]。本研究表明花椒毒素、水杨酸、香豆素等次生物质可诱导斜纹夜蛾中肠 GSTs 活性增强, 花椒毒素使斜纹夜蛾脂肪体中 GSTs 活性显著增加了 6.11 倍, 表明不同植物次生物质可诱导斜纹夜蛾中肠和脂肪体中 GSTs 的活性增强。利用昆虫酶系体外抑制法研究显示: 0.06% 单宁酸可强烈抑制麦长管蚜(*Macrosiphum avenae*) CarE 和 GSTs 的活力; 0.08% 没食子酸显著抑制 CarE 和 GSTs 的活力; 0.065% 香豆素极显著地抑制 GSTs 的活力^[30]。B 型烟粉虱(*Bemisia tabaci*)在不同的宿主植物上可通过不同强度的解毒酶活性来实现对宿主植物的适应, 在茄子上表现为较高的 AChE 和 GSTs 活性, 在番茄上主要体现为较高的 CarE 活性, 在棉花上表现为相对较高的 GSTs 活性, 其解毒酶具有较强的可塑性^[31]。

细胞色素 P450 是昆虫体内主要解毒酶系^[5,7,32], 目前昆虫中已鉴定的细胞色素 P450 分属于 CYP4、CYP6、CYP9、CYP12、CYP15、CYP18、CYP28、CYP48 等 27 个家族, 其中 CYP4 家族的一些成员与昆虫抗性相关^[26]。斜纹夜蛾对溴氰菊酯的高水平抗性可能与 CYP4M14 和 CYP4S9 的过量表达有关^[25]。CYP4 家族基因代谢解毒作用是大多数昆虫适应其寄主植物的重要机制^[14], 斜纹夜蛾取食含有黄酮、花椒毒素、槲皮素和肉桂酸的人工饲料可诱导中肠和脂肪体中 CYP4M14 的表达量增加, 而花椒毒素、槲皮素、肉桂酸和香豆素使斜纹夜蛾脂肪体中 CYP4S9 表达量升高, 表明斜纹夜蛾中肠或脂肪体中 CYP4M14 和 CYP4S9 可被不同植物次生物质诱导表达增强, 同时增加了斜纹夜蛾中肠或脂肪体中 P450 酶的含量。烟草天蛾(*Manduca sexta*)取食含有烟碱的植物后, 诱导幼虫体内 P450 的酶活性提高, 从而增加对烟碱的解毒作用^[33]。棉铃虫可通过增强细胞色素酶 P450 的表达, 从而对植物次生物质做出反应^[34]。美洲棉铃虫(*Helicoverpa zea*)体内 CYP6B8 可

被苯巴比妥和花椒毒素诱导表达,CYP6B8 参与花椒毒素的代谢,能够帮助其适应花椒毒素的危害^[35]。取食 Bt 转基因棉的甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua*)幼虫体内 AChE 的比活力比取食普通棉花及其它植物的明显增高^[36]。同样本研究也表明斜纹夜蛾取食肉桂酸、花椒毒素、槲皮素和香豆素等植物次生物质使其头部 AChE 活性增强。

植物次生物质种类繁多,目前已经分离鉴定的物质超过 20 万种,它们在昆虫与植物协同进化过程中具有重要的作用^[5,11]。进一步探明次生物质对昆虫解毒酶系的诱导调控机制,不仅有利于揭示植物与昆虫间复杂的协同进化关系,对于制定害虫防治策略具有重要的指导作用。

References:

- [1] Ehrlich P R, Raven P H. Butterflies and plants: a study in coevolution. *Evolution*, 1964, 18 (4) : 586-608.
- [2] Dong J F, Zhang J H, Wang C Z. Effects of plant allelochemicals on nutritional utilization and detoxication enzyme activities in two *Helicoverpa* species. *Acta Entomologica Sinica*, 2002, 45 (3) : 296-300.
- [3] Zeng R S, Su Y J, Ye M, Xie L J, Chen M, Song Y Y. Plant induced defense and biochemical mechanisms. *Journal of South China Agricultural University*, 2008, 29 (2) : 1-6.
- [4] Mainguet A M, Louveaux A, El Sayed G, Rollin P. Ability of a generalist insect, *Schistocerca gregaria*, to overcome thioglucoside defense in desert plants: tolerance or adaptation?. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2000, 94 (3) : 309-317.
- [5] Zeng R S, Niu G, Wen Z, Schuler M A, Berenbaum M R. Allelochemical induction of cytochrome P450 monooxygenases and amelioration of xenobiotic toxicity in *Helicoverpa zea*. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33 (3) : 449-461.
- [6] Tiwari S, Pelz-Stelinski K, Stelinski L L. Effect of *Candidatus Liberibacter asiaticus* infection on susceptibility of Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri*, to selected insecticides. *Pest Management Science*, 2011, 67 (1) : 94-99.
- [7] Wen Z, Zeng R S, Niu G, Berenbaum M R, Schuler M A. Ecological significance of induction of broad-substrate cytochrome P450s by natural and synthetic inducers in *Helicoverpa zea*. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, 35 (2) : 183-189.
- [8] Piskorski R, Dorn S. How the oligophage codling moth *Cydia pomonella* survives on walnut despite its secondary metabolite juglone. *Journal of Insect Physiology*, 2011, 57 (6) : 744-750.
- [9] Furihata T, Hosokawa M, Satoh T, Chiba K. Synergistic role of specificity proteins and upstream stimulatory factor 1 in transactivation of the mouse carboxylesterase 2/microsomal acylcarnitine hydrolase gene promoter. *Biochemical Journal*, 2004, 384 (15) : 101-110.
- [10] Duan H, Schuler M A. Differential expression and evolution of the *Arabidopsis* CYP86A subfamily. *Plant Physiology*, 2005, 137 (3) : 1067-1081.
- [11] Després L, David J, Gallet C. The evolutionary ecology of insect resistance to plant chemicals. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, 22 (6) : 298-307.
- [12] Hama H, Hosoda A. High aliesterase activity and low acetylcholinesterase sensitivity involved in organophosphorus and carbamate resistance of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae). *Applied Entomology and Zoology*, 1983, 18 (4) : 475-485.
- [13] Claudianos C, Ranson H, Johnson R M, Biswas S, Schuler M A, Berenbaum M R, Feyereisen R, Oakeshott J G. A deficit of detoxification enzymes: pesticide sensitivity and environmental response in the honeybee. *Insect Molecular Biology*, 2006, 15 (5) : 615-636.
- [14] Pedrini N, Zhang S, Juárez M P, Keyhani N O. Molecular characterization and expression analysis of a suite of cytochrome P450 enzymes implicated in insect hydrocarbon degradation in the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *Microbiology*, 2010, 156 (8) : 2549-2557.
- [15] Ahmad M, Arif M I, Ahmad M. Occurrence of insecticide resistance in field populations of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) in Pakistan. *Crop Protection*, 2007, 26 (6) : 809-817.
- [16] Qin H G, Wang D D, Ding J, Huang R H, Ye Z R. Host plant list of *Spodoptera litura*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006, 18 (5) : 51-58.
- [17] Huang S J, Xu J F, Han Z J. Baseline toxicity data of insecticides against the common cutworm *Spodoptera litura* (Fabricius) and a comparison of resistance monitoring methods. *International Journal of Pest Management*, 2006, 52 (3) : 209-213.
- [18] Xiao P, He J, Liu Y J, Qiu X C, Jiao Y Y. The relationship of resistance to lambda-cyhalothr in with detoxification enzyme activity in *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 2009, 52 (10) : 1097-1102.
- [19] Chen Q J, Li G H, Pang Y. A simple artificial diet for mass rearing of some noctuid species. *Entomological Knowledge*, 2000, 37 (6) : 325-327.
- [20] Gao X W. Introduction of Ellman procedure for assay of cholinesterases in crude enzymatic preparations modified by Gorun. *Entomological Knowledge*, 1987, 24 (4) : 245-246.

- [21] Omura T, Ito A. Biosynthesis and intracellular sorting of mitochondrial forms of cytochrome P450. *Methods Enzymol*, 1991, 206 : 75-81.
- [22] Lee K. Glutathione S-transferase activities in phytophagous insects: Induction and inhibition by plant phototoxins and phenols. *Insect Biochemistry*, 1991, 21 (4) : 353-361.
- [23] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72 : 248-254.
- [24] van Asperen K. A study of housefly esterase by means of a sensitive colorimetric method. *Journal of Insect Physiology*, 1962, 8 : 401-416.
- [25] Huang S J, Qin W J, Chen Q. Cloning and mRNA expression levels of cytochrome P450 Genes *CYP4M14* and *CYP4S9* in the common cutworm *Spodoptera litura* (Fabricius). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (15) : 3115-3124.
- [26] Piskorski R, Ineichen S, Dorn S. Ability of the oriental fruit moth *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to detoxify juglone, the main secondary metabolite of the non-host plant walnut. *Journal of chemical ecology*, 2011, 37 (10) : 1110-1116.
- [27] Chen F J, Gao X W, Lei M Q, Zheng B Z. Effects of tannic acid on glutathione S-transferases in *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Entomologica Sinica*, 2003, 46 (6) : 684-690.
- [28] Yu S J. Interactions of allelochemicals with detoxication enzymes of insecticide-susceptible and resistant fall armyworms. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 1984, 22 (1) : 60-68.
- [29] Yu S J, Hsu E L. Induction of detoxification enzymes in phytophagous insects: Role of insecticide synergists, larval age, and species. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 1993, 24 (1) : 21-32.
- [30] Chen J L, Ni H X, Sun J R, Cheng D F. Effects of major secondary chemicals of wheat plants on enzyme activity in *Sitobion avenae*. *Acta Entomologica Sinica*, 2003, 46 (2) : 144-149.
- [31] An Z L, Chu D, Guo D F, Fan Z X, Tao Y L, Liu G X, Zhang Y J. Effects of host plant on activities of some detoxification enzymes in *Bemisia tabaci* biotype B. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (4) : 1536-1543.
- [32] Fleming I. The cytochrome P450 pathway in angiogenesis and endothelial cell biology. *Cancer and Metastasis Reviews*, 2011, 30 (3/4) : 541-555.
- [33] Snyder M J, Glendinning J I. Causal connection between detoxification enzyme activity and consumption of a toxic plant compound. *Journal of Comparative Physiology*, 1996, 179 (2) : 255-261.
- [34] Arimura G, Huber D P W, Bohlmann J. Forest tent caterpillars (*Malacosoma disstria*) induce local and systemic diurnal emissions of terpenoid volatiles in hybrid poplar (*Populus trichocarpa* × *deltoides*): cDNA cloning, functional characterization, and patterns of gene expression of (-)-germacrene D synthase, *PtdTPS1*. *The Plant Journal*, 2004, 37 (4) : 603-616.
- [35] Li X C, Baudry J, Berenbaum M R, Schuler M A. Structural and functional divergence of insect CYP6B proteins: From specialist to generalist cytochrome P450. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101 (9) : 2939-2944.
- [36] Xue M, Dong J, Zhang C S. Effect of feeding Bt cotton and other plants on the changes of development and insecticide susceptibilities of lesser armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner). *Journal of Plant Protection*, 2002, 29 (1) : 13-18.

参考文献:

- [2] 董钧锋, 张继红, 王琛柱. 植物次生物质对烟青虫和棉铃虫食物利用及中肠解毒酶活性的影响. *昆虫学报*, 2002, 45 (3) : 296-300.
- [3] 曾任森, 苏始娟, 叶茂, 谢丽君, 陈敏, 宋圆圆. 植物的诱导抗性及其生化机理. *华南农业大学学报(自然科学版)*. 2008, 29 (2) : 1-6.
- [16] 秦厚国, 汪笃栋, 丁建, 黄荣华, 叶正襄. 斜纹夜蛾寄主植物名录. *江西农业学报*, 2006, 18 (5) : 51-58.
- [18] 肖鹏, 贺金, 刘永杰, 邱秀翠, 焦艳艳. 斜纹夜蛾对氯氟氰菊酯不同抗性水平与解毒代谢酶的关系. *昆虫学报*, 2009, 52 (10) : 1097-1102.
- [19] 陈其津, 李广宏, 庞义. 饲养五种夜蛾科昆虫的一种简易人工饲料. *昆虫知识*, 2000, 37 (6) : 325-327.
- [20] 高希武. Gorun 等改进的 Ellman 胆碱酯酶活性测定方法介绍. *昆虫知识*, 1987, 24 (4) : 245-246.
- [25] 黄水金, 秦文婧, 陈琼. 斜纹夜蛾 P450 基因 *CYP4M14* 和 *CYP4S9* 的克隆与 mRNA 表达水平研究. *中国农业科学*, 2010, 43 (15) : 3115-3124.
- [27] 陈凤菊, 高希武, 雷明庆, 郑炳宗. 单宁酸对棉铃虫谷胱甘肽 S-转移酶的影响. *昆虫学报*, 2003, 46 (6) : 684-690.
- [30] 陈巨莲, 倪汉祥, 孙京瑞, 程登发. 小麦几种主要次生物质对麦长管蚜几种酶活力的影响. *昆虫学报*, 2003, 46 (2) : 144-149.
- [31] 安志兰, 褚栋, 郭笃发, 范仲学, 陶云荔, 刘国霞, 张友军. 寄主植物对 B 型烟粉虱 (*Bemisia tabaci*) 几种主要解毒酶活性的影响. *生态学报*, 2008, 28 (4) : 1536-1543.
- [36] 薛明, 董杰, 张成省. 取食转 Bt 基因棉等植物对甜菜夜蛾生长发育和药剂敏感性的影响. *植物保护学报*, 2002, 29 (1) : 13-18.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 16 (August, 2012)

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元