

华中昆虫研究

(第十三卷)

原国辉 王高平 李为争 主编



中国农业科学技术出版社

华中昆虫研究

(第十三卷)

原国辉 王高平 李为争 主编



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

华中昆虫研究: 华中三省昆虫学会 2017 年学术年会论文集.第十三卷 / 原国辉, 王高平, 李为争主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5116-3300-2

I. ①华… II. ①原…②王…③李… III. ①昆虫-中国-文集 IV. ①Q968.22-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 251890 号

责任编辑 姚 欢
责任校对 马广洋

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010)82106636(编辑室) (010)82109702(发行部)
(010)82109709(读者服务部)
传 真 (010)82106631
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 17
字 数 420 千字
版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
定 价 60.00 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

《华中昆虫研究（第十三卷）》

编 委 会

主 编：原国辉 王高平 李为争

编 委：（按姓氏笔画为序）

王高平 王满囤 朱 芬 李为争

李有志 原国辉 黄国华

前 言

湖南、湖北和河南 3 省地跨东洋区、古北区两大区系；境内山脉绵延起伏、江河曲折蜿蜒，粮油丰盛、植被繁茂，是昆虫学基础研究的重要地域，也是农林害虫监测与防控的核心地带。自 2001 年 11 月在洛阳举办华中三省昆虫学会首届学术交流会至 2016 年 11 月在长沙召开第十二次学术交流会，由河南省、湖北省和湖南省昆虫学会组织的区域性学术交流已跨越了 16 年，三省学会编写的《华中昆虫研究》也已出版了 12 卷。在“华中三省昆虫学会 2017 学术年会”即将于 11 月 3—6 日在河南省信阳市召开之际，将本次会议收到的综述、论文和摘要等结集出版，以反映华中三省昆虫学研究的最新进展、促进昆虫学研究区域性协作的开展。

本论文集共收录综述 15 篇、研究论文 21 篇、摘要 17 篇和昆虫学教学方法论文 1 篇。这 54 篇论著按研究层次可分基础研究、应用基础研究和应用研究，按研究对象则包含了大田作物昆虫、园艺植物昆虫、特色经济作物昆虫、嗜尸性昆虫、螨类、其他有害动物等；基础和应用基础研究涉及昆虫生态、昆虫生理、昆虫分类、学科交叉等各个领域，应用研究论文则涵盖了害虫的生物防治、物理机械防治、农业防治和化学防治等害虫综合治理措施的各个方面。论文作者单位包含高等院校、科研院所和技术推广部门，论文第一作者则既有长期奋战在农林一线经验丰富的专家，也有大量初入昆虫学研究门槛的学子。本着文责自负、重在交流原则组编的该论文集，可作为农林科研单位、农林院校、农林技术推广部门同行的参考资料。

本书的出版得到了河南省科学技术协会创建五星学会专项的支持，在此表示由衷的感谢！

《华中昆虫研究》编委会

2017 年 10 月

目 录

研究综述

植物化感物质与化学农药的交互抗性研究	
..... 张鸿飞, 赵琦, 郝志鑫, 樊佳伟, 魏光华, 郭线茹, 李为争, 原国辉 (3)	
EPG 技术在烟粉虱寄主适应性和传毒机理研究中的应用	
..... 卢少华, 宋丹阳, 王青, 唐雪飞, 李静静, 白润娥, 闫凤鸣 (10)	
昆虫卵黄原蛋白分子特性的研究进展	张乾, 李有志, 贺华良 (17)
茶园天敌昆虫研究进展	程予奇, 谭琳, 顾松松, 汤心砚 (25)
斜纹夜蛾对博落回适应性初步研究进展	冯睿, 曾爱平 (31)
昆虫脂肪酸的研究与利用进展	高正辉, 逢利, 罗巧, 朱芬 (38)
二化螟滞育的研究进展	吕亮 (46)
喜花昆虫访花利用的信息研究进展	
..... 胡璞, 赵琦, 原明珠, 刘紫晶, 王高平, 郭线茹, 原国辉, 李为争 (52)	
昆虫室内学习训练和测试存在的问题	
..... 骆倩文, 赵琦, 郑莹莹, 庄宇彤, 王高平, 郭线茹, 原国辉, 李为争 (63)	
植物地上部分和地下部分的昆虫相互作用研究进展	
..... 滕小慧, 赵琦, 范慧杰, 杜腾云, 田亚立, 王友红, 李为争, 原国辉 (74)	
地理种群遗传分化研究方法的介绍和展望	胡岩, 李有志 (82)
农田重金属污染对昆虫行为及种群影响的研究进展	朱潜, 李有志 (90)
草莓访花昆虫研究进展	刘晓玉, 曾爱平 (96)
室内嗜尸性昆虫在法医学应用中的研究进展	
..... 任立品, 尚艳杰, 陈威, 孟凡明, 蔡继峰, 郭亚东 (101)	
壶瓶山国家级自然保护区蝴蝶物种多样性研究进展	
..... 肖乾鹏, 廖明玮, 李欣, 龚文雅, 康祖杰 (108)	

研究论文

越南松树中泰国伞滑刃线虫的分离与鉴定	
..... Nguyen Thanh Tuan, Le Bao Thanh, 颜学武 (117)	

7 种抗病毒制剂对蚜虫翅型分化等生物学的影响 郭圆, 李昭, 刘勇, 王小平, 朱智慧 (123)

噻虫胺种子处理悬浮剂和吡虫啉种衣剂混配对小麦蚜虫的田间防治效果 苗昌见, 彭立存, 胡媛媛, 黄松涛, 肖凡生, 郭线茹 (131)

瓢甲科线粒体基因组及系统发生研究 李欣欣, 宋南 (137)

斯氏侧沟茧蜂的形态学特征记述 李林, 唐泽珺, 陈旭阳, 王星 (148)

斯氏侧沟茧蜂的繁殖效率及策略 唐泽珺, 陈旭阳, 李林, 李永鑫, 王星 (153)

三种药剂对山楂叶螨的定居、扩散和产卵选择性的影响 权澎琪, 李定旭, 聂学纯, 李先雅, 陈凯威 (158)

湖北玉米害虫发生规律及防治 李文静, 许冬, 杨甜甜, 武怀恒, 万鹏 (165)

湖北省设施蔬菜害虫防控中非化防措施的应用现状 尹涵, 李乔, 杨帆, 司升云, 王小平 (171)

八大公山国家级自然保护区蝶类名录 代国旗, 肖伟, 谷志荣, 殷家幸, 吴雨恒, 李逸豪, 何鑫鑫, 金彪 (177)

三峡库区(夷陵区)白蚁危害现状及防治对策 刘超华, 屈汉林, 刘治云, 周鹏, 李为众 (195)

保护地蔬菜鼠妇发生规律及综合防治技术 朱富春, 朱芳云 (200)

梨树虫害发生规律及防治技术研究 杨晓芳 (204)

保护地蔬菜蜗牛发生规律及绿色防控对策 朱富春, 朱芳云 (208)

许昌市国槐尺蠖的危害规律及植保无人机防治尺蠖幼虫技术进展 周扬, 蔡富贵, 周国有, 陈运清 (211)

不同悬浮剂对白僵菌孢子萌发的影响 赵东容, 戈媛媛, 张建华, 唐桂林, 查玉平, 陈京元 (213)

食用菌害螨发生特点与综合防治对策 朱富春 (216)

仰韶黄杏鳞翅目害虫发生规律及防治技术 王晓霞 (219)

豫西地区茶黄螨生物生态学及综合防治技术研究 高国峰, 王晓霞 (225)

召陵区夏玉米白星花金龟发生规律及绿色防控对策 朱富春 (228)

中原地区夏玉米黏虫发生规律与绿色防控技术初探 朱富春 (231)

研究简报

两种夜蛾复眼结构观察 黄志娟, 王丽君, 雷朝亮 (237)

中国隐芒蝇科系统分类研究 席玉强, 尹新明 (238)

二化螟寄主种群间季节性生殖隔离的形成机制: 种群间滞育诱导的差异 周媛, 丁楠, 刘文, 马伟华, 王小平 (239)

甲基苯丙胺对巨尾阿丽蝇生长发育的影响及其法医学意义 陈威, 任立品, 尚艳杰, 孟凡明, 蔡继峰, 郭亚东 (240)

磺胺类抗生素对亮斑扁角水虻生长发育的影响	李梦雅, 吴家园, 刘馨桢, 雷朝亮, 朱芬 (241)
黏虫夏季补充营养蜜源植物种类初步研究	郭培, 王高平, 金利杰, 樊星杞, 何翰林, 郭线茹, 李为争, 原国辉 (242)
河南省大宗水果中有机磷和氨基甲酸酯类农药残留分析	刘向阳, 席玉强, 尹新明, 李振亚, 刘金艳, 刘静雅, 吴文龙 (243)
CCYV 对烟粉虱两种生物型生长发育和繁殖的影响	唐雪飞, 李静静, 卢少华, 宋丹阳, 王青, 闫凤鸣 (244)
Q 型烟粉虱在健康和 CCYV 侵染的黄瓜植株上取食选择行为	宋丹阳, 卢少华, 李静静, 唐雪飞, 王青, 闫凤鸣 (245)
一种皮蠹 <i>Anthrenus fuscus</i> 的线粒体基因组分析	林爱丽, 宋南, 赵新成 (246)
亮斑扁角水虻室内饲养条件的优化及其视蛋白基因的鉴定	刘馨桢, 吴家园, 李梦雅, 雷朝亮, 朱芬 (247)
利用数字基因表达谱探究大猿叶虫响应光周期滞育诱导的机制	孙丹, 朱莉, 尹涵, 刘文, 王小平 (248)
重金属在“猪粪—蝇蛆—鸡”生产链中的流向研究	王婉强, 张文娟, 王小平, 雷朝亮, 朱芬 (249)
辽宁省韭菜根蛆发生为害对土壤理化性质的影响研究	文栋, 吴刚 (250)
辽宁省韭菜根蛆发生为害对土壤微生物种类及比例的影响	文栋, 吴刚 (252)
不同日龄亮斑扁角水虻幼虫耐饥力研究	吴家园, 刘馨桢, 李梦雅, 雷朝亮, 朱芬 (253)
向川安瘿蜂无性世代幼虫和成虫期虫瘿的游离氨基酸含量和组分的比较	杨筱慧, 李香妹, 朱道弘 (254)

其 他

应用 3D 打印技术辅助果蝇脑结构教学的实践	赵新成, 谢桂英, 陈秋燕, 路志青, 常亚军, 郭倩倩, 苏冉冉, 王博, 贺静 (257)
------------------------------	---

研究综述

植物化感物质与化学农药的交互抗性研究*

张鸿飞^{1**}, 赵琦², 郝志鑫¹, 樊佳伟¹,魏光华¹, 郭线茹¹, 李为争¹, 原国辉^{1***}

(1. 河南农业大学植物保护学院, 郑州 450002;

2. 中国农业大学开封实验站, 开封 475000)

摘要: 当前植物源农药与化学农药的施用处于并行阶段。农田生态系统中的害虫会同时经历这两种选择压, 如果二者之间发生交互抗性的话, 会严重影响可持续害虫治理策略的研发。针对两大类杀虫剂, 昆虫的适应机制可能存在着很大的不同。本文综述了昆虫对植物源化感物质的抗性, 重点是讨论其分子基础和代谢代价。

关键词: 化感物质; 化学农药; 交互抗性

Cross-resistance between Plant Allelochemicals and Pesticides

Zhang Hongfei^{1**}, Zhao Qi², Hao Zhixin¹, Fan Jiawei¹, Wei Guanghua¹,Guo Xianru¹, Li Weizheng¹, Yuan Guohui^{1***}

(1. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Kaifeng Experimental Station of China Agricultural University, Kaifeng 475000, China)

Abstract: Currently, plant-derived insecticides and chemical pesticides are concurrently applied in cultured lands. In a specific agroecosystem, the pests will experience the two selection pressures during their lives. If cross-resistance occurs between these two types of substances, then the development of sustainable pest management strategies will be more and more difficult in the future. Insect pests may adapt to these substances differently. In this paper, we reviewed the resistance of insects to plant allelochemicals as well as the possible cross-resistance between plant allelochemicals and chemical pesticides, and make an emphasis on their molecular basis and detoxification costs.

Key words: Allelochemical; Chemical pesticide; Cross-resistance

昆虫抗药性的机制研究已经取得了较大进展, 但对植物源杀虫物质抗性的机制还不很明确。某些农药是以植物源活性物质为基本母核的, 但昆虫受到自然选择的强度和昆虫抗性的本质可能有巨大的差异。植物防卫化合物在时空上的分布是异质性的, 昆虫对植物源化学物质抗性产生的程度和本质可能会随着植物品种的地理分布、植物种类、昆

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (31471772)

** 第一作者: 张鸿飞, 博士研究生; E-mail: zhanghongfei610@163.com

*** 通信作者: 原国辉; E-mail: hnn dygh@126.com

虫种类、农田生态系统的其他组分而变化,也可能会干扰昆虫的抗药性。例如,草地黏虫 *Spodoptera frugiperda* 取食的植物种类不同,耐药性也不同 (Yu & Ing, 1984)。二者交互抗性的研究有助于推测昆虫抗药性的扩散和可持续害虫管理策略的研发。从进化的角度讲,植物源次生代谢物除了在昆虫和植物的协同进化中驱动“化学武器竞赛”的作用之外,当前的大量研究仅仅是描述多种多样的植物化合物对植食性昆虫的生物活性,而昆虫克服这类化学防卫的多重机制了解得很少。这类机制包括驱避、拒食、排泄代谢、选择性储存、解毒、靶标突变等。昆虫对植物毒素的行为学和代谢学抗性通常是可以诱导产生的,另外,自然环境中的植物防卫物和杀虫剂处理对昆虫施加的选择压格局是不同的。

1 避毒抗性

1.1 昆虫的寄主植物选择和取食

昆虫可以通过视觉信息、嗅觉信息或者接触后感觉来避免取食到对自己身体有害的植物 (Chapman, 2003)。回避行为的产生可能是遗传决定的或者后天学习决定的,例如雌成虫回避在不适合的植物上产卵这种行为往往就是遗传决定的。然而,幼虫的生长表现往往并不总是与雌成虫的产卵偏好性吻合,有些种类幼虫非常活泼,例如,海灰翅夜蛾 *Spodoptera littoralis* 可以矫正母代的产卵错误 (Sadek, 2011)。昆虫在植物不同组织之间或者植物的敏感生育期的选择性取食,也能进一步帮助它们逃脱毒素的伤害 (Nealis & Nault, 2005)。烟草天蛾 *Manduca sexta* 幼虫不能鉴别两种苦味物质,一种是无毒的水杨苷,另一种是有毒的咖啡因,因为二者的分子信号通路一致 (Glendinning, 2002)。类似地,蝗虫和象甲也受到苦味的生氰糖苷类物质的拒食作用,尽管浓度在致毒阈值之下 (Zagrobelny, 2004)。因此,苦味的物质不一定致毒,有毒的物质和无毒的物质激发相同分子信号通路的话,就会限制昆虫的寄主范围,导致回避作用的进化代价上升。生态情境也能修饰昆虫的取食行为。散居型和群居型的美洲沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 对茛苳碱苦味物质的反应不同,摄入之后的蝗虫能有效避免鸟类的啄食。但是只有散居型才会收到拒食,而群居型的蝗虫甚至更喜欢取食含有茛苳碱的食物 (Despland, 2005)。

1.2 植物化学防卫的操控

昆虫取食前也能解除植物的“化学防卫武装”。例如,粉纹夜蛾 *Trichoplusia ni* 能够横切叶片,首先使叶片内部的有毒汁液泌出,然后开始取食 (Dussourd, 2003)。这种取食行为耗费时间很长,能被莴苣汁液中的山莴苣素、芹菜中的肉豆蔻醚以及时钟花 (cardinal flower) 中的山梗菜碱诱发,但是几种植物源拒食剂却没有这样的触发功能 (Helmus, 2005; Dussourd, 2003)。另一种回避植物毒素的方式是调控植物防卫,如一些咀嚼式口器的昆虫唾液腺中含有诱导植物防卫的激发因子。几种鳞翅目幼虫的口器分泌物反而能抑制或者降低寄主植物的防卫物质。谷实夜蛾 *Helicoverpa zea* 唾液的主成分是一种葡萄糖氧化酶,能降低被害烟叶产生的烟碱量 (Musser, 2002)。形成虫瘿的昆虫如叶蜂类能减少其幼虫发育的虫瘿中酚类的含量,与寄主植物种类关系不大 (Nyman, 2000)。

1.3 植物毒素的排泄、储存和反利用

有的昆虫可以将富集的植物毒素大部分排泄掉，或者在蜕皮的过程中遗留在虫蜕中 (Zagrobelny, 2004)。植物化合物也能被植食性昆虫储存 (Willinger, 2001) 用于抵御更高营养层生物 (Ode, 2006)，或作为成虫警戒色、信息素等 (Nishida, 2002)，或免受光活化毒素的损伤 (Carroll, 1997)。这类物质的储存需要选择性的运输通道和储存能力，才能保证昆虫本身不被毒害。

1.4 代谢抗性

植物毒素的转化是昆虫与植物协同进化利用的关键武器之一。代谢抗性往往是过度生产一些能代谢外源抗生素的解毒酶造成的，该机制往往伴随着表型可塑性。然而，植物毒素的抗性也可能是编码解毒酶的基因发生特异性突变造成的 (Wen, 2005)。解毒酶一般有 3 个主要家族：细胞色素 P450 单氧加氧酶、谷胱甘肽 S-转移酶和羧酸酯酶，其中细胞色素 P450 单氧加氧酶已经广泛研究过，如凤蝶科、防风草织蛾 *Depressaria pastinacella* (Cianfroga, 2002)、烟草天蛾 (Stevens, 2000) 和几种实夜蛾 (Li, 2002)。谷实夜蛾甚至嗅闻到有毒植物的气味就能激活相应的 P450 解毒酶 (Li, 2002)。谷胱甘肽 S-转移酶在大量取食农作物的鳞翅目害虫和取食阔叶树的昆虫中广泛研究过 (Yu, 1996)。桃蚜 *Myzus persicae* 过度产生这种酶来对抗十字花科寄主中的硫代葡萄糖苷和异硫氰酸酯类毒素 (Francis, 2005)。有趣的是，桃蚜的天敌细扁食蚜蝇 *Episyrphus balteatus* 也能进一步诱导出这种酶 (Vanhaelen, 2001)。多食性昆虫往往细胞色素 P450 和谷胱甘肽 S-转移酶更多样化，与其寄主范围是适应的 (Francis, 2005, Francis, 2001)。羧酸酯酶能水解毒素的酯官能团，拟除虫菊酯就是这种酶解毒的 (Yang, 2005; Usmani, 2001)。

1.5 其他抗性机制

四纹豆象幼虫 *Callosobruchus maculatus* 在含有大豆半胱氨酸蛋白酶抑制剂 (soyacystatin N, scN) 的饲料中取食，会激活一系列对抗防卫的基因。Monn *et al.* (2004) 发现类半胱氨酸蛋白酶的过度表达有着重要的功能。盐泽灯蛾 *Estigmene acrea* 和朱砂蛾 *Tyria jacobaeae* 取食菊科植物，不仅储存吡咯烷生物碱，也能用特异性的黄酮依赖性单氧加氧酶催化解毒 (Hartmann, 2005; Naumann, 2002)，用于防卫自身的天敌和种内信息素。小菜蛾 *Plutella xylostella* 分泌黑芥子苷酶消除十字花科寄主中“芥子油炸弹”的威胁 (Ratzka, 2002)。菜青虫 *Pieris rapae* 的适应机制是通过特异性的肠道蛋白改变硫代葡萄糖苷的代谢途径，使其不生成毒性的异硫氰酸酯类，而是生成毒性较低的腈类 (Wittstock, 2004)。发育出针对寄主植物防卫的解毒酶的昆虫，可能会进一步在寄主植物上专化，并最优化其适合度，如防风草织蛾 (Mao, 2006)。

1.5.1 植物毒素靶标位点的突变

各种昆虫均发现了对化学农药产生系统性抗性的突变 (French-Constant, 2004)，但昆虫对寄主植物化合物产生突变的研究较少。当前研究比较透彻的例子是专食性的帝王蝶 *Danaus plexippus* 和两种金叶甲对箭毒苷这种乳草中发现的强心苷类物质产生的抗性。在这个例子中，箭毒苷靶标位点仅一个氨基酸发生取代就足以产生抗性 (Holzinger, 1996; Labeyrie, 2004)。为什么昆虫对化学农药产生的靶标位点突变如此

多,但是对植物毒素产生的突变如此少?可能是这种突变在自然种群中扩散时代价过高,并且在进化的时间尺度上行为抗性和代谢抗性比突变更有优势。已经证明,化学农药处理数十年的昆虫,可以自动进化出代价最低的抗性机制(Raymond, 2001)。

1.5.2 进化的透视

昆虫处理植物化感物质的机制可能并存多种。例如,行为回避往往伴随着代谢机制,储存往往伴随着昆虫对毒素的钝化。尽管有这个一般趋势,这些不同抗性性状之间的遗传连锁关系还不明确,它们之所以伴随出现可能是生态学的而不是遗传上的限制因素。对毒素的钝化可以视为储存能力进化的前导步骤,但是行为回避和代谢降解能力的共同出现是矛盾的。可能是由于,抗性性状的适合度代价越来越高,并且遇到有毒防卫植物的机会较低时,这种复合抗性的策略是最优化的。

1.5.3 对植物毒素抗性的代价和收益

昆虫不同抗性性状的代价与收益结果取决于生态系统中植物毒素的空间分布。植物毒素的分布在种间和种内异质性较强,也与植物的品种及生长/防卫资源分配比例有关。行为抗性,例如搜索合适寄主或者灭活寄主防卫是需要大量时间的,而诱导性代谢抗性涉及能量损失,二者均涉及频率依赖性代价。储存毒素也涉及能量代价,尽管可以被抗捕食者、抗紫外线等生态学收益掩盖。因此,维持这种性状的净输出结果强烈取决于局部生态学因子。最后,靶标位点的突变会带来突变昆虫生理性效率的下降。和其他机制相反,这种代价是恒定的,取决于靶标基因的功能,并不随着遇到有毒植物概率的增加而上升。解毒酶的过度生产和回避行为通常是植物毒素诱导的,而靶标位点的系统性突变仅限于少数的专食性昆虫种类。最后,同时维持数种诱导性抗性机制,可以降低长期抗性的进化代价以及灭绝的风险,允许多食性昆虫和专食性昆虫进行寄主转移(Termonia, 2001)。

1.5.4 植物毒素、化学农药及其交互抗性

植物毒素分布不均,而化学农药在处理区是均匀分布的。另外,植物往往产生多元组分的防卫物质,而化学农药的有效成分往往是单剂或者简单的二元混剂。因此,农药处理区昆虫的合适对抗机制是解毒酶的特异性突变,这种选择压超越了其他选择压的重要性。相反,植物毒素往往比较分散,自然区域这种选择压最重要。尽管有这些差异,两大类物质之间的交叉抗性也是常见的现象(Feyereisen, 2005)。然而,只有少数研究发现昆虫被饲喂植物毒素之后对化学农药的抗药性增强,至今发现的交叉抗性案例是通过解毒酶的代谢机制实现的。这一点并不奇怪,因为一种解毒酶的底物多样。谷实夜蛾取食过花椒毒素之后,存活的个体和它们的后代对高效氯氰菊酯耐受力更强(Li, 2000)。取食玉米的草地黏虫幼虫和取食大豆的个体相比,对各种农药敏感性更低,是由于单氧加氧酶的活性增强。类似地,取食豌豆的幼虫摄入了谷胱甘肽转移酶的强力诱导因子,对有机磷的耐受力和取食大豆的个体相比增强了2倍(Yu, 1984)。相反,一些植物化合物的暴露能降低昆虫对农药的敏感性。一些能抑制谷胱甘肽转移酶的酚类化合物被草地黏虫摄入后,农药杀虫效率增强(Yu, 2000)。

2 展望

昆虫面临着化学环境的马赛克化,遇到有毒植物的概率存在较大的变异。因此,局部群落成分的复杂性是维持昆虫对植物毒素适应机制多样化的关键因素。昆虫对植物毒素抗性的机制,和杀虫剂抗性的机制相比,可塑性更强,也更复杂。然而,由于解毒酶的底物多样性,植物毒素和化学农药之间的交叉抗性在一些特殊的生态系统期望会发生。未来需要将当前已经筛选出的具有杀虫或者拒食活性的植物次生代谢物组建一个库,将有机杀虫剂分为若干大类,以中国重大农业害虫为研究对象,系统地测试两大类物质之间产生交叉抗性的可能。需要注意的是,两类化合物相继处理同一昆虫种类时,其处理的前后顺序是特别关键的;另一个注意事项是,既然两大类昆虫存在着这样的相互作用,作为被试昆虫的基础饲料需要严格地控制。众所周知,麦胚基饲料可以用来饲养大量的多食性昆虫和专食性昆虫,麦胚中也含有可能改变昆虫对农药耐受力的燕麦酰胺、黄酮等植物次生代谢物,如何寻找一种中性的饲料也是十分复杂的问题。

参考文献

- Carroll M, *et al.* 1997. Behavioral effects of carotenoid sequestration by the parsnip webworm, *Depressaria pastinacella* [J]. J. Chem. Ecol. 12: 2 707-2 719.
- Chapman, R F. 2003. Contact chemoreception in feeding by phytophagous insects [J]. Annu. Rev. Entomol. 48: 455-484.
- Cianfroga J A, *et al.* 2002. Dietary and developmental influences on induced detoxification in an oligophage [J]. J. Chem. Ecol. 28: 1 349-1 364.
- Despland E, Simpson S J. 2005. Food choices of solitary and gregarious locusts reflect cryptic and aposematic antipredator strategies [J]. Anim. Behav. 69: 471-479.
- Dussourd D E. 2003. Chemical stimulants of leaf-trenching by cabbage loopers: Natural products, neurotransmitters, insecticides, and drugs [J]. J. Chem. Ecol. 29: 2 023-2 047.
- French-Constant R H, *et al.* 2004. The genetics and genomics of insecticide resistance [J]. Trends Genet. 20: 163-170.
- Francis F, *et al.* 2001. Effects of allelochemicals from first (Brassicaceae) and second (Myzus persicae and Brevicoryne brassicae) trophic levels on Adalia bipunctata [J]. J. Chem. Ecol. 27: 243-256.
- Francis F, *et al.* 2005. Glutathione S-transferases in the adaptation to plant secondary metabolites in the Myzus persicae aphid [J]. Arch. Insect Biochem. Physiol. 58: 166-174.
- Glendinning J I, *et al.* 2002. Contribution of different taste cells and signaling pathways to the discrimination of "bitter" taste stimuli by an insect [J]. J. Neurosci. 22: 7 281-7 287.
- Hartmann T, *et al.* 2005. Specific recognition, detoxification and metabolism of pyrrolizidine alkaloids by the polyphagous arctiid Estigmene acrea. Insect Biochem [J]. Mol. Biol. 35: 391-411.
- Helmus M R, Dussourd D E. 2005. Glues or poisons: which triggers vein cutting by monarch caterpillars? [J]. Chemoecology 15: 45-49.
- Holzinger F, Wink M. 1996. Mediation of cardiac glycoside insensitivity in the Monarch butterfly (Danaus plexippus): Role of an amino acid substitution in the ouabain binding site of Na⁺, K⁺-ATPase [J]. J. Chem. Ecol. 22: 1 921-1 937.

- Labeyrie E, Dobler S. 2004. Molecular adaptation of Chrysomelid beetles to toxic compounds in their food plants [J]. Mol. Biol. Evol. 21: 218-221.
- Li X, et al. 2000. Cross-resistance to alpha-cypermethrin after xanthotoxin ingestion in *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. J. Econ. Entomol. 93: 18-25.
- Li X, et al. 2002. Plant allelochemicals differentially regulate *Helicoverpa zea* cytochrome P450 genes [J]. Insect Mol. Biol. 11: 343-351.
- Li X, et al. 2002. Jasmonate and salicylate induce expression of herbivore cytochrome P450 genes [J]. Nature 419: 712-715.
- Mao W, et al. 2006. Remarkable substrate-specificity of CYP6AB3 in *Depressaria pastinacella*, a highly specialized caterpillar [J]. Insect Mol. Biol. 15: 169-179.
- Moon J, et al. 2004. Transcriptional regulation in cowpea bruchid guts during adaptation to a plant defence protease inhibitor [J]. Insect Mol. Biol. 13: 283-291.
- Musser R O, et al. 2002. Herbivory: Caterpillar saliva beats plant defences - a new weapon emerges in the evolutionary arms race between plants and herbivores [J]. Nature 416: 599-600.
- Naumann C, et al. 2002. Evolutionary recruitment of a flavin-dependent monooxygenase for the detoxification of host plant-acquired pyrrolizidine alkaloids in the alkaloid-defended arctiid moth *Tyria jacobaeae* [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. 99: 6 085-6 090.
- Nealis V G, Nault J R. 2005. Seasonal changes in foliar terpenes indicate suitability of Douglas-fir buds for western spruce budworm [J]. J. Chem. Ecol. 31: 683-696.
- Nishida R. 2002. Sequestration of defensive substances from plants by Lepidoptera [J]. Annu. Rev. Entomol. 47: 57-92.
- Nyman T, Julkunen-Tiitto R. 2000. Manipulation of the phenolic chemistry of willows by gall-inducing sawflies [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. 97: 13 184-13 187.
- Ode P J. 2006. Plant chemistry and natural enemy fitness: effects on herbivore and natural enemy interactions [J]. Annu. Rev. Entomol. 51: 163-185.
- Ratzka A, et al. 2002. Disarming the mustard oil bomb [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. 99: 11 223-11 228.
- Raymond M, et al. 2001. Insecticide resistance in the mosquito *Culex pipiens*: what have we learned about adaptation? [J]. Genetica 112-113: 287-296.
- Sadek Mm. 2011. Complementary behaviors of maternal and offspring *Spodoptera littoralis*: oviposition site selection and larval movement together maximize performance [J]. J Insect Behav, 24: 67-82.
- Stevens J L, et al. 2000. Inducible P450s of the CYP9 family from larval *Manduca sexta* midgut [J]. Insect Biochem. Mol. Biol. 30: 559-568.
- Termonia A, et al. 2001. Feeding specialization and host-derived chemical defense in Chrysomelid leaf beetles did not lead to an evolutionary dead end [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. 98: 3 909-3 914.
- Usmani K A, Knowles C O. 2001. DEF sensitive esterases in homogenates of larval and adult *Helicoverpa zea*, *Spodoptera frugiperda*, and *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. J. Econ. Entomol. 94: 884-891.
- Vanhaelen N, et al. 2001. Hoverfly glutathione S-Transferases and effect of Brassicaceae secondary metabolites [J]. Pestic. Biochem. Physiol. 71: 170-177.
- Wen Z, et al. 2005. Ile115Leu mutation in the SRS1 region of an insect cytochrome P450 (CYP6B1) compromises substrate turnover via changes in a predicted product release channel [J]. Protein Eng. Des. Sel. 18: 191-199.

- Willinger G, Dobler S. 2001. Selective sequestration of iridoidglycosides from their host plants in Longitarsus flea beetles [J]. Biochem. Syst. Ecol. 29: 335-346.
- Wittstock U, et al. 2004. Successful herbivore attack due to metabolic diversion of a plant chemical defense [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. 101: 4 859-4 864
- Yang Z, et al. 2005. Molecular dynamics of detoxification and toxin-tolerance genes in brown planthopper (Nilaparvata lugens Stal, Homoptera: Delphacidae) feeding on resistant rice plants [J]. Arch. InsectBiochem. Physiol. 59: 59-66.
- Yu S J and Abo-Elghar G E. 2000. Allelochemicals as inhibitors of glutathione S-transferases in the fall armyworm [J]. Pestic. Biochem. Physiol. 68: 173-183.
- Yu S J. 1996. Insect glutathione S-transferases [J]. Zool. Stud. 35: 9-19.
- Yu, S J. and Ing, R T. 1984. Microsomal biphenyl hydroxylase of fall armyworm larvae and its induction by allelochemicals and host plants [J]. Comp. Biochem. Physiol. C 78: 145-152.
- Zagrobelny M, et al. 2004. Cyanogenic glucosides and plant-insect interactions [J]. Phytochemistry. 65: 293-306.