



# 化学生态学前沿

## Frontiers of Chemical Ecology

主编 孔垂华 娄永根



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

Q149-53  
K742



现代生态学前沿

# 化学生态学前沿

## Frontiers of Chemical Ecology

主编 孔垂华 姜永根

HUAXUE SHENGTAIXUE QIANYAN



Q149-53  
K742



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

化学生态学是一个多学科相互融合的交叉学科,主要针对生物种间、种内以次生代谢物质为媒介的化学关系,探讨生物间的化学联系及其作用机制,为减轻农药污染、有害生物治理、生物多样性保护、生物资源合理利用和其他生态环境问题提供新视野和途径。本书以从分子到生态系统的尺度介绍植物、动物和微生物的化学生态学基础知识和研究进展。本书作者在掌握国内外研究动态的基础上,通过具体的研究实例和对自然现象的剖析,综述了化学生态学在生态系统中的功能意义及其应用潜力,提出各自研究领域的科学问题和发展方向。本书特别适合生物学、生态学、资源环境和植物保护学等相关专业的学生和学者学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化学生态学前沿/孔垂华,娄永根主编. —北京:高等教育出版社,2010.7

ISBN 978-7-04-028825-4

I. ①化… II. ①孔…②娄… III. ①化学:生态学-研究生-教材 IV. ①Q149

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 060625 号

|      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 李冰祥 | 责任编辑 | 张晓晶 | 封面设计 | 王凌波 |
| 责任绘图 | 尹莉  | 版式设计 | 张岚  | 责任校对 | 金辉  |
| 责任印制 | 毛斯璐 |      |     |      |     |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 38.5  
字 数 780 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 7 月第 1 版  
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 69.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28825-00

# 序

## 化学生态学是现代生态学的一个重要分支学科

---

生态学经过 100 多年的发展目前已突破传统生态学的学科界限。现代生态学正以多维视野尺度与多学科融合交叉,并成为支撑 21 世纪可持续发展的核心学科之一。探讨、揭示生物种间、种内以化学物质为媒介的相互关系的化学生态学正是生态学与化学融合交叉的学科,是现代生态学的一个重要分支学科。

从 1959 年昆虫信息素的发现,至近来适宜化学分析工具的发展,化学生态学不断取得重要进展。尽管在这个学科中昆虫方面的研究一直是走在前面,但是随之而来的是越来越多的学者将研究伸向那些化学信息起着相当重要作用的所有生态系统。研究的范围涉及微生物、藻类、高等植物、鱼类、两栖动物、爬行动物,甚至人类本身。如此复杂的研究对象,相似的规律出现于完全不同的生物门类之间,它们能够通过化学信息进行联系并实施化学防护。随着化学生态学基础研究的深入,应用技术也得到相应的发展,早在 20 世纪 80 年代昆虫信息素应用技术就已成熟并商业化,目前对农业昆虫的预测、预报以及通过诱捕调节昆虫种群数量等应用技术都十分引人注目。

生物之间的化学关系是自然界的普遍关系,甚至有一种说法,生物间的关系,其实就是化学关系。各种生态要素相互作用关系,直接或间接地也是一种化学作用关系。化学生态作用体现在生物的各个组织层次,包括个体、种群、群落和生态系统。而生物个体之间化学生态作用是目前研究最为详尽的。如昆虫通过释放微量的化学物质,招引异性、告警、标记路径和巢穴,并能影响其他同种个体的发育和行为。在种群尺度上,植物种间、种内通过向环境中释放次生代谢物质产生化感作用,一个植物种的代谢产物影响草食者的取食强度,这些都是十分常见的生态学现象。虽然经典的种群生态学将生物物种间的相互作用类型划分成中性、竞争、偏害、捕食、寄生、偏利和互利等,但这些关系都是依据物种间相互作用的结果划分,而它们之间的相互作用的过程和实质并没有涉及,很多情况下人们还不能理解某个特定物种组合之间通过什么样的纽带产生相互作用。为什么一些昆虫只取食某一种或几种植物,而对其他植物很少光顾?一些昆虫取食的植物和它们所在产卵的植物为什么会全然不一样?尤其是在某些物种之间的竞争关系并不是永恒的,而是随着时间、空间或环境条件发生变化,为什么会产生这些变化?而它们之间的本质联系又是什么?对于这些问题我们都可以通过化学生态学的研究给予实质性

回答。

群落生态学所讨论的种间关联、物种分布、群落演替过程、群落多样性的形成同样包含化学生态过程。群落演替的早期阶段演替基质的 N 含量较低,先锋植物种或早期植物种一般都是对 N 需求较低的种,后期演替种入侵的速率取决于土壤 N 积累的速率。根据现代植物化感作用先驱 Rice 教授等在美国俄克拉何马和堪萨斯的研究,弃耕地演替的第一阶段是先锋杂草,从第二阶段起演替各阶段植物种之间的更替顺序就是 N 需求增加的顺序。早期植物产生的酚酸对第一阶段植物种产生抑制,但对第二阶段植物种没有影响甚至有促进作用;更重要的是早期植物种的根系分泌物、叶的渗滤液和腐解物对固氮菌 (*Azotobacter*) 和根瘤菌 (*Rhizobium*) 产生抑制,阻碍了土壤 N 的积累速率。进一步研究发现,这些毒性物质的作用机理是抑制根瘤菌的发育和血红蛋白的形成,这对于固 N 共生体的固 N 功能来说是至关重要的,这些早期植物种通过化感物质限制立地土壤的 N 积累延缓了后期植物种的演替进程。

生态系统尺度的化学生态过程体现在生产者、消费者和分解者以及功能组分之间的相互作用。生产者植物与植物之间通过次生代谢物质产生相互影响,如种间的化感抑制作用,种内的自毒作用以及专性寄生植物与寄主植物之间的相互促进作用等。生产者植物还通过次生代谢产物与消费者之间产生化学生态关系,或防御昆虫取食,或招引传媒传粉受精。同样,消费者动物之间也通过信息素产生相互作用。许多作物受到取食伤害后释放挥发物吸引捕食性天敌,这种次生代谢物质在三级营养关系中的作用是生态系统中的化学生态关系的最佳体现。

其实化学生态学现象和原理很早就被认识并付诸实践,贾思勰的《齐民要术》就记载了我们的祖先 3 000 多年以前就开始使用植物性的杀虫剂。这些实用技术的形成原本是通过偶然的观察和实践总结出来的,然而自然界的现象是纷繁复杂的,人们对自然界不同领域的认识也是不均衡的。赤松林下的雨水和露珠对生长在林下的作物有害,胡桃树之所以毒害其树冠下的植物,是化感物质胡桃醌作用的缘故。苜蓿连作产量下降,是因为水溶性的自毒物质的存在,类似的还发现苹果树和桃树等果树也存在连作产量下降的问题。凡此种种,在与人类生存发展相关的各类生态系统中化学生态关系纷繁复杂,而这些化学生态关系的基础研究和技术开发对于生态系统的管理是十分重要的。

生物多样性是自然界生物种间长期以来相互竞争、相互依赖、协同进化的结果,也是生态系统的基本功能之一。随着化学生态学的发展,我们有必要进一步探索物种间的化学生态关系,了解生态系统各主要功能组分间化学关系的本质,阐明导致组分间化学生态物质的组成、结构、转化的过程及其作用方式等,通过人工合成这些化学生态物质对受损生态系统进行调控,重建种间的相互依存或相互制约的关系,恢复生态系统的多样性功能。同时,对于人工生态系统,特别是那些组成相对单一的农、林生态系统,化学生态学原理的实践则可以避免化学合成农药所带来的负面生态效应和环境影响。特别是植物种间化感作用或自毒作用的研究将有

助于作物或树种间关系的认知,并用于指导作物混作、树种混交以及农林复合生态系统的经营与管理。早在 20 世纪 50 年代末 60 年代初,我们在湖南会同林区总结群众营造杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook] 人工林速生丰产经验时发现:杉木人工纯林连作导致退化的三耕土中,香草醛的氧化代谢能力比头耕土高,推测土壤中存在香草醛类毒性物质积累,并做了大量土壤毒性的生物测定,结果显示,杉木人工纯林连栽的土壤对杉木和其他作物种子发芽以及幼苗的生长产生抑制作用,因此提出了杉木人工纯林地力衰退的毒性机理假说。这一研究发现在当时国内生态学研究领域中是最早的,但由于当时的历史条件、研究手段的限制,没有能够从土壤当中直接分离鉴定出产生自毒作用的次生代谢物质,并对种类组成和物质结构进行分析。可喜的是,最近孔垂华教授率其团队从中国科学院湖南会同森林生态实验站的 2 000 kg 杉木连栽土壤中成功地分离鉴定了新的环二肽毒素,这为进一步阐明杉木人工纯林连栽后林地土壤地力衰退的化学生态学关系奠定了有利的基础。

化学作为一门基础学科,曾经在 20 世纪 50—60 年代,通过无机化肥和合成农药,在农业生产中发挥了显赫一时的威力,但它给环境造成的危害却是如此严重,以致卡尔逊在她的《寂静的春天》一书中,向人们描述了一种肃杀凄凉的景象。然而这并不是化学本身的过错,生态学当时的发展也没有预见到这种严重的后果,主要是这两个学科在当时并没有产生实质性的交叉或融合。现在回过头来,这种由化学本身发展所造成的环境的破坏,还有赖于化学与生态学的学科交叉来解决,从这一点来看我们可以获得一些启示,也是我给大家的几点建议:

(1) 加强学科之间的交流,在生态学研究充分发挥化学这一基础学科的作用,与此同时加强化学生态学与其他相关学科的交流,如植物生理学、微生物学和动物学等。

(2) 在与农、林生态系统相关的化学生态学研究方面,一个很重要的领域就是地下土壤中的化学生态学过程。很多植物、微生物,也可能包括一部分昆虫或土壤动物,它们释放的次生代谢物质经过土壤迁移转化,其性质或作用可能发生改变,也许作用会增强,也许会减弱或消失,这些过程受到土壤本身矿物组成的物理性质、化学性质、有机质组成、土壤微生物以及土壤动物的影响。土壤是农、林生态系统生长发育必不可少的基质,又是化学生态物质迁移转化的主要载体,而要有效地解决这些相关的问题,也需要相关学科专业人员的共同参与、合作研究,除了上述相关专业外,还应包括土壤化学和土壤物理等学科。

(3) 学科的发展离不开人才,人才的培养特别是交叉学科的发展,需要不同学科的专家、导师共同合作,在这方面也需要重视和加强。

孔垂华和娄永根两位教授长期致力于植物和昆虫化学生态学的研究,在各自研究领域取得了不少成果,此次应邀组织同行专家编写了《化学生态学前沿》,这是一件非常有意义的工作,值得鼓励支持。书中各章内容基本反映了国内外化学生态学的前沿动态,也提出了一些有价值的科学问题和观点,本书的出版无疑会推

动化学生态学这一现代生态学重要分支学科的发展壮大,值得祝贺,更期待中国化学生态学研究不断取得突破性成果。

值此《化学生态学前沿》付梓之际,特抛砖引玉,是为序。

中国工程院院士、《生态学报》主编

Handwritten signature of Ma Zhiwei in black ink.

2009年6月12日于中国科学院生态环境研究中心

# 目录

---

|        |                                  |                  |
|--------|----------------------------------|------------------|
| 序      | 化学生态学是现代生态学的一个重要分支学科             | 冯宗炜( I )         |
| 第 1 章  | 昆虫信息素研究进展                        | 王四宝 相辉 黄勇平( 1 )  |
| 第 2 章  | 昆虫的化学感觉机理                        | 周国鑫 纪锐 娄永根( 39 ) |
| 第 3 章  | 天敌昆虫的化学信息识别及行为调控                 | 张永军 陆宴辉( 58 )    |
| 第 4 章  | 动物信息素和行为                         | 李绍文( 83 )        |
| 第 5 章  | 虫害诱导植物挥发物的生态功能及应用                | 孙晓玲 陈宗懋(110)     |
| 第 6 章  | 植食性昆虫对寄主植物的选择                    | 王琛柱 黄玲巧(143)     |
| 第 7 章  | 植食性昆虫取食行为的化学生态学机理                | 张茂新 李文波(174)     |
| 第 8 章  | 植物诱导抗虫性的化学与分子机理                  | 王祺 吕静 娄永根(201)   |
| 第 9 章  | 植物与昆虫之间化学和光通讯效应                  | 韩宝瑜(234)         |
| 第 10 章 | 植物化感作用:问题与思考                     | 孔垂华(262)         |
| 第 11 章 | 外来有害植物入侵扩张的化感作用                  | 万方浩 杨国庆(292)     |
| 第 12 章 | 药用植物化感作用:连作障碍及资源保护               | 高微微(313)         |
| 第 13 章 | 寄生植物与寄主植物种间的化学识别                 | 胡飞 孔垂华(330)      |
| 第 14 章 | 植物根分泌物与根际化学作用                    | 孔垂华(357)         |
| 第 15 章 | 根寄生植物的萌发刺激物质研究进展                 | 马永清(383)         |
| 第 16 章 | 植物次生代谢产物化学生态学                    | 黎胜红 罗倩(410)      |
| 第 17 章 | 植物对病虫害化学防御的物质基础                  | 徐效华 孔垂华(454)     |
| 第 18 章 | 微生物毒素与诱导植物抗性                     | 余柳青(491)         |
| 第 19 章 | 微生物群体感应信号物质及其在植物-微生物<br>相互关系中的作用 | 王朋 孔垂华(513)      |
| 第 20 章 | 森林生态系统化学生态学                      | 杨立学 张真(540)      |
| 第 21 章 | 水生生态系统化学生态学                      | 李锋民(570)         |
| 后记     | 十年一瞬间                            | 孔垂华(601)         |

# 昆虫信息素研究进展

王四宝<sup>①</sup> 相辉<sup>①</sup> 黄勇平<sup>①</sup>

## 第 1 章

### 摘 要

昆虫在长期进化过程中,发展演变了复杂的化学信息感受机制,在觅食、寻偶、产卵和躲避灾难等行为中,能通过视觉信号、听觉信号以及嗅觉(化学)信号来获取信息,进行精巧的化学通讯,适应环境选择,保持种群繁衍。利用昆虫的这一特性,人们发展了一系列的方法对目标昆虫实施监测和防治,在害虫综合治理中发挥了巨大的作用。本章系统介绍鳞翅目、双翅目、鞘翅目、半翅目、同翅目、膜翅目和蜚蠊目昆虫信息素的种类和结构,并从生理功能、研究方法及其在害虫防治中的应用等角度综述昆虫信息素的研究进展。

---

① 中国科学院植物生理生态研究所,上海 200032, E-mail: yphuang@sibs.ac.cn(黄勇平)

## 前言

化学信息对昆虫的定向、召唤、交尾、产卵、聚集、追踪、告警、防御以及种间识别等行为均具有重要的作用。其中,昆虫信息素的研究利用尤为突出。昆虫信息素的化学研究始于1932年,当初由于受实验条件的限制,一直没有突破性的进展。直到1959年,德国化学家 Butenandt 成功地从50万头家蚕(*Bombyx mori*)雌蛾腹端粗提物中分离并鉴定出第一个昆虫性信息素的化学结构,命名为蚕蛾醇(bombykol),昆虫性信息素的化学结构研究才进入了一个新时代。到20世纪70年代,昆虫信息素化学的研究有了重大的进展,成为当时生物科学的一个热点,人们开始对雌蛾性信息素腺体释放的完整化学组分进行详尽研究,试图揭开昆虫间化学信息通讯的奥秘。到目前为止,已有9个目90余科1600多种昆虫性信息素得到研究,其中已有500多种昆虫性信息素的化学结构得到鉴定,其中40余种昆虫性信息素已商品化(杜家纬,1988;Voerman,1988;Arn *et al.*,1992)。

我国对昆虫信息素化学结构的研究始于20世纪60年代末,40多年来,我国已经鉴定和合成了鳞翅目和其他目的昆虫信息素百余种,尤其在鳞翅目昆虫性信息素的化学结构鉴定和多元组分精确比例的测定上获得了长足进展。自20世纪80年代中期,我国已经可以采用单个腺体的超微量化学结构鉴定技术,并选用一系列标准化合物,利用触角电位技术来筛选目标害虫的有效候选化合物,再于田间进行诱捕试验确认。除此之外,可根据从目标昆虫性信息素腺体中鉴定的结果,将性信息素组分按照不同的比例进行搭配组合,采用风洞中的行为测定技术寻找最适于异性个体反应的比例和浓度。本章从昆虫信息素的种类结构、生理功能和研究方法等方面综述国内外昆虫信息素的研究进展。

## 一、昆虫信息素的化学结构

### 1. 鳞翅目昆虫

鳞翅目是昆虫信息素研究中最最为详尽的一个目。在鳞翅目昆虫化学通信系统中,大多数雄蛾通过雌蛾释放的性信息素来寻找交配的对象,一部分雌蛾是利用雄性性信息素来确定配偶。蝶类多采用视觉定位的方法,当雄蝶接近雌体后,释放一种催欲剂,但对这类性信息素在性行为上的作用仍知之甚少。迄今为止,已鉴定出400余种蛾类昆虫的性信息素,主要分属于卷蛾科、夜蛾科、螟蛾科、灯蛾科等夜行性蛾类。但组成这些性信息素的成分只有100余种(Arn *et al.*,1992),有些昆虫甚至具有完全相同的性信息素成分,只是比例有所不同。

雌蛾性信息素虽具有多种多样的化学结构,但大多数具有以下几个特点:  
① 大都是由10~18个偶数碳原子组成的脂族化合物;碳链最短的是桃枝麦蛾(*Anarsia lineatella*)的性信息素反-5-十碳烯醇醋酸酯和反-5-十碳烯醇,而碳链最长的是黄杉毒蛾(*Orgyia pseudotsugata*)的性信息素顺-6-二十一碳烯-11-酮。其中,碳链长度为十二、十四、十六碳的约占总数的90%。  
② 末端功能团

大都以醋酸酯、醇和醛为基团,少数种类利用环氧、丙酸酯作为功能团。在灯蛾科中,还有以烷类作功能团。③ 有 1~3 个双键,有 *Z,E* (顺,反)异构体,由于存在不对称碳原子,因而有不同的 *R* 或 *S* 旋光异构体。双键构型多为顺式异构型,常位于第 5、7、9 或 11 碳位上。双键数目多为 1 个,部分种类为 2 个,在美丽灯蛾、黎豆夜蛾等少数种类性信息素成分甚至具有 3 个双键。上述蛾类性信息素的结构特征与植物体内存在的脂肪酸有共同之处,均由偶数碳原子直链化合物组成。它们的不同之处在于性信息素分子的碳原子数较常见的脂肪酸少;性信息素分子末端的功能团较脂肪酸更具还原态,性信息素分子中双键位置更加特殊,更具多样性(杜家纬,1988;2004;王荫长,2001)。表 1.1 列出了主要鳞翅目雌虫的性信息素组分。

表 1.1 鳞翅目雌虫性信息素

| 昆虫名称  | 学名                             | 信息素组分                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 邻菜蛾科  | <b>Acrolepiidae</b>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 葱邻菜蛾  | <i>Acrolepopsis assectella</i> | (11 <i>Z</i> ) - 14; Ald                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 透翅蛾科  | <b>Aegerillidae</b>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 桃透翅蛾  | <i>Sanninoidea exitiosa</i>    | (3 <i>Z</i> ,13 <i>Z</i> ) - 18; OAc                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 桃小透翅蛾 | <i>Synanthedon pietipes</i>    | (3 <i>E</i> ,13 <i>Z</i> ) - 18; OAc                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 灯蛾科   | <b>Arctiidae</b>               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 橘灯蛾   | <i>Holomelina aurantiace</i>   | 2 - 甲基十七烷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|       |                                | (9 <i>Z</i> ,12 <i>Z</i> ) - 十八碳二烯醛; (9 <i>Z</i> ,12 <i>Z</i> ,15 <i>Z</i> ) - 十八碳三烯醛; (3 <i>Z</i> ,6 <i>Z</i> ,9 <i>S</i> ,10 <i>R</i> ) - 9,10 - 环氧 - 1,3,6 - 二十一碳三烯; (3 <i>Z</i> ,6 <i>Z</i> ,9 <i>S</i> ,10 <i>R</i> ) - 9,10 - 环氧 - 3,6 - 二十一碳双烯; (3 <i>Z</i> ,6 <i>Z</i> ,9 <i>S</i> ,10 <i>R</i> ) - 环氧 - 1,3,6 - 二十碳三烯 |
| 美国白蛾  | <i>Hyphantria cunea</i>        | (9 <i>Z</i> ,12 <i>Z</i> ) - 18; Ald; (9 <i>Z</i> ,12 <i>Z</i> ,15 <i>Z</i> ) - 18; Ald; (3 <i>Z</i> ,6 <i>Z</i> ,9 <i>Z</i> ) - 环氧 - 二十 - 二十一碳三烯(1:6:27)                                                                                                                                                                      |
| 盐泽灯蛾  | <i>Estigmene acraea</i>        | 2 - 甲基十七烷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 具带灯蛾  | <i>Isia isaebella</i>          | (3 <i>Z</i> ,6 <i>Z</i> ,9 <i>Z</i> ) - 二十一碳三烯                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 美丽灯蛾  | <i>Utetheisa ornatrix</i>      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 蚕蛾科   | <b>Bombycidae</b>              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 家蚕    | <i>Bombyx mori</i>             | (10 <i>E</i> ,12 <i>Z</i> ) - 16; OH; (10 <i>E</i> ,12 <i>Z</i> ) - 16; Ald                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 野蚕    | <i>Bombyx mandarina</i>        | (10 <i>E</i> ,12 <i>Z</i> ) - 16; OH                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 桑蛱    | <i>Rondotia menciiana</i>      | (10 <i>E</i> ,12 <i>Z</i> ,16 <i>Z</i> ): OAc; (10 <i>E</i> ,12 <i>E</i> ,16 <i>E</i> ): OAc; (12 <i>E</i> ,16 <i>E</i> ): OAc                                                                                                                                                                                                 |
| 果蛀蛾科  | <b>Carposinidae</b>            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 桃小食心虫 | <i>Carposina niponensis</i>    | (7 <i>Z</i> ) - 二十碳 - 11 - 烯醇; (7 <i>Z</i> ,7 <i>E</i> ) - 十九碳 - 11 - 烯醇                                                                                                                                                                                                                                                       |

| 昆虫名称        | 学名                              | 信息素组分                                                          |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>木蠹蛾科</b> | <b>Cossidae</b>                 |                                                                |
| 蒙古木蠹蛾       | <i>Cossus mongolicua</i>        | (5Z) - 12; Ac                                                  |
| 芳香木蠹蛾       | <i>Cossus cossus</i>            | (5Z) - 12; Ac; (3Z) - 10; OAc(8:2)                             |
| <b>麦蛾科</b>  | <b>Gelechiidae</b>              |                                                                |
| 马铃薯麦蛾       | <i>Phthorimaea operculella</i>  | (4E,7Z,10Z) - 13; OAc; (4E,7Z) - 13; Ac(1:1)                   |
| 棉红铃虫        | <i>Pectinophora gossypiella</i> | (7Z,11E) - 16; OAc                                             |
| 甘薯暖地麦蛾      | <i>Brachmia macroscopa</i>      | (11E) - 16; OAc                                                |
| 桃枝麦蛾        | <i>Anarsia lineatella</i>       | (5E) - 10; Ac; (1E) - 10; OH(5:1)                              |
| 麦蛾          | <i>Sitotroga cerealella</i>     | (7Z,11E) - 16; OAc                                             |
| <b>鞘蛾科</b>  | <b>Coleophoridae</b>            |                                                                |
| 华北落叶松鞘蛾     | <i>Coleophora sinensis</i>      | (5Z) - 10; OH                                                  |
| 兴安落叶松鞘蛾     | <i>Coleophora dahurica</i>      | (5Z) - 10; OH                                                  |
| <b>尺蛾科</b>  | <b>Geometridae</b>              |                                                                |
| 冬尺蛾         | <i>Operophtera brumata</i>      | (3E,6Z,9Z) - 19; OAc                                           |
| <b>细蛾科</b>  | <b>Gracillariidae</b>           |                                                                |
| 茶叶细蛾        | <i>Calophrilia theivora</i>     | (11E) - 16; Ald                                                |
| <b>枯叶蛾科</b> | <b>Lasiocampidae</b>            |                                                                |
| 马尾松毛虫       | <i>Dendrolimus punctatus</i>    | (5Z,7E) - 12; OAc; (5Z,7E) - 12; OH                            |
| 赤松毛虫        | <i>Dendrolimus spectabilis</i>  | (5Z,7E) - 12; OH                                               |
| 落叶松毛虫       | <i>Dendrolimus superans</i>     | (5Z,7E) - 12; Ald; (5Z,7E) - 12; OH                            |
| 思茅松毛虫       | <i>Dendrolimus kikuchii</i>     | (5Z,7E) - 12; OAc; (5Z,7E) - 12; OH                            |
| 加州天幕毛虫      | <i>Malacosoma californicus</i>  | (5E,7Z) - 12; Ald                                              |
| 森林天幕毛虫      | <i>Malacosoma disstria</i>      | (5E,7Z) - 12; Ald; (5E,7Z) - 12; OH(1:10)                      |
| <b>毒蛾科</b>  | <b>Lymantriidae</b>             |                                                                |
| 桑毛虫         | <i>Euproctis xanthocampa</i>    | (6Z,18Z):Pe; (6Z,18Z):iso-Pe; (7Z,18Z):iso-Pe; (9Z,18Z):iso-Pe |
| 舞毒蛾         | <i>Lymantria dispar</i>         | (7Z) - 8 - 环氧 - 2 - 甲基十八烷                                      |
| 模毒蛾         | <i>Lymantria monacha</i>        | (7Z) - 8 - 环氧 - 2 - 甲基十八烷                                      |
| 黄杉毒蛾        | <i>Orgyia pseudotsugata</i>     | (6Z) - 二十一烯 - 11 - 酮; (Z) - 1,6 - 二十一碳二烯 - 11 - 酮              |

| 昆虫名称    | 学名                           | 信息素组分                                                                                      |
|---------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 夜蛾科     | Noctuidae                    |                                                                                            |
| 稻螟蛉     | <i>Naranga aenescens</i>     | (9Z) - 14:OAc; (9Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OAc(1:1:4)                                        |
| 玉米楷夜蛾   | <i>Busseola fusca</i>        | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc(10:2:2)                                      |
| 展叶松夜蛾   | <i>Diparopsis castanes</i>   | E9. 11 - 12:OAc; 11 - 12:OAc(16:5)                                                         |
| 蚕夜蛾     | <i>Gortyna xanthenes</i>     | (11Z) - 16:OAc                                                                             |
| 大螟      | <i>Sesamia inferens</i>      | (9Z) - 14:OAc; (9Z,12E) - 14:OAc(4:1)                                                      |
| 亚热带黏虫   | <i>Spodoptera eridamia</i>   | (9Z) - 14:OAc; (9Z,12E) - 14:OAc                                                           |
| 莎草黏虫    | <i>Spodoptera exempta</i>    | (9Z,12E) - 14:OAc; (9Z) - 14:OH                                                            |
| 甜菜夜蛾    | <i>Spodoptera exigua</i>     | (9Z,12Z) - 14:OAc                                                                          |
| 草地贪夜蛾   | <i>Spodoptera frugiperda</i> | (9Z) - 12:OAc; (9Z) - 14:OAc(9:1)                                                          |
| 黎豆夜蛾    | <i>Anticarsia gemmatalis</i> | (3Z,6Z,9Z) - 二十一碳三烯; (3Z,6Z,9Z) - 二十碳三烯(5:3)                                               |
| 劳氏黏虫    | <i>Leucania loreyi</i>       | (11Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OH(8:1)                                                         |
| 甘蓝夜蛾    | <i>Mamestra brassica</i>     | (11Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OH                                                              |
| 蓓带夜蛾    | <i>Mamestra configurata</i>  | (11Z) - 16:OAc; (9Z) - 14:OAc(19:1)                                                        |
| 菜园灰夜蛾   | <i>Mamestra oleracea</i>     | (11Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OH(1:1)                                                         |
| 豌豆灰夜蛾   | <i>Mamestra pisi</i>         | (11Z) - 16:OAc; (9Z) - 14:OAc(1:3)                                                         |
| 殊异灰夜蛾   | <i>Mamestra suasa</i>        | (11Z) - 16:Ald                                                                             |
| 一点黏虫    | <i>Pseudaletia unipuncta</i> | (11Z) - 16:OAc                                                                             |
| 车轴草切根夜蛾 | <i>Scotogramma trifolii</i>  | (11Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OH(19:1)                                                        |
| 棉铃虫     | <i>Helicoverpa armigera</i>  | 16:Ald; (9Z) - 16:Ald; (11Z) - 16:Ald                                                      |
| 美洲棉铃虫   | <i>Helicoverpa zea</i>       | 16:Ald; (9Z) - 16:Ald; (11Z) - 16:Ald; (7Z) - 16:Ald                                       |
| 烟芽夜蛾    | <i>Heliothis virescens</i>   | 16:Ald; (9Z) - 16:Ald; (11Z) - 16:Ald; (7Z) - 16:Ald; 14:Ald; (9Z) - 14:Ald; (11Z) - 16:OH |
| 小地老虎    | <i>Agrotis ypsilon</i>       | (7Z) - 12:OAc; (9Z) - 14:OAc(5:1)                                                          |
| 黄地老虎    | <i>Agrotis segetum</i>       | (5Z) - 10:OAc; (7Z) - 12:OAc; (9Z) - 14:OAc                                                |
| 八字地老虎   | <i>Amathes cnigrum</i>       | (7Z) - 14:OAc; (5Z) - 12:OAc                                                               |

| 昆虫名称   | 学名                               | 信息素组分                                                                           |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 红背地老虎  | <i>Euxoa ochrogaster</i>         | (5Z) - 12:OAc; (7Z) - 12:OAc; (9Z) - 12:OAc                                     |
| 枣黏虫    | <i>Ancylis sativa</i>            | (9E) - 12:OAc; (9Z) - 12:OAc(8:2)                                               |
| 警纹地老虎  | <i>Scotia exclamationis</i>      | (5Z) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc                                                    |
| 苜蓿银纹夜蛾 | <i>Autographa californica</i>    | (7Z) - 12:OAc                                                                   |
| 烟草金翅夜蛾 | <i>Plusia chalcites</i>          | (7Z) - 12:OAc; (9Z) - 14:OAc                                                    |
| 大豆夜蛾   | <i>Pseudoplusia includens</i>    | (7Z) - 12:OAc                                                                   |
| 粉纹夜蛾   | <i>Trichoplusia ni</i>           | 12:OAc; (5Z) - 12:OAc; (7Z) - 12:OAc; 11 - 12:OAc; (7Z) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc |
| 埃及金刚钻  | <i>Earias insulana</i>           | (10E,12E) - 16:Ald                                                              |
| 舟蛾科    | <b>Motodontidae</b>              |                                                                                 |
| 松异舟蛾   | <i>Thaumetopoea pityocampa</i>   | (13Z) - hexadecen - 11 - ynyl 醋酸酯                                               |
| 羽蛾科    | <b>Pterophoridae</b>             |                                                                                 |
| 洋葱羽蛾   | <i>Platyptilia carduidactyla</i> | (11Z) - 16:OAc                                                                  |
| 螟蛾科    | <b>Pyralidae</b>                 |                                                                                 |
| 桑蛀螟    | <i>Paradoxecia pieli</i>         | (3E,13Z,18Z):OAc                                                                |
| 二化螟    | <i>Chilo suppressalis</i>        | (11Z) - 16:Ald; (13Z) - 18:Ald(5:1)                                             |
| 甘蔗二点螟  | <i>Chilo infuscatellus</i>       | (11Z) - 16:OH                                                                   |
| 高粱条螟   | <i>Chilo venosatus</i>           | (13Z) - 18:OAc; (13Z) - 18:OH; (11Z) - 16:OAc(4:2:4)                            |
| 甘蔗条螟   | <i>Chilo sacchariphagus</i>      | (13Z) - 18:Ald; (13Z) - 18:OAc(7:1)                                             |
| 玉米茎螟   | <i>Chilo partellus</i>           | (11Z) - 16:Ald                                                                  |
| 酸模蔓苞螟  | <i>Chrysoteuchia topiaria</i>    | (11Z) - 16:Ald                                                                  |
| 粟灰螟    | <i>Chilo infuscatellus</i>       | (11Z,16Z):OH                                                                    |
| 地中海粉螟  | <i>Anagasta kuehniella</i>       | (9Z,12E) - 14:OAc                                                               |
| 粉斑螟    | <i>Cadra cautella</i>            | (9Z,12E) - 14:OAc                                                               |
| 烟草粉斑螟  | <i>Ephestia elutella</i>         | (9Z,12E) - 14:OAc                                                               |
| 向日葵斑螟  | <i>Homoeosona electellum</i>     | (9Z,12E) - 14:OH; (9Z) - 14:OH                                                  |
| 印度谷螟   | <i>Plodia interpunctella</i>     | (9Z,12E) - 14:OAc                                                               |
| 桃蛀螟    | <i>Dichocrocis punctiferalis</i> | (10E) - 16:OAc; (10Z) - 16:Ald(9:1)                                             |
| 菜心野螟   | <i>Hellula undalis</i>           | (11E,13E) - 16:Ald                                                              |

| 昆虫名称     | 学名                              | 信息素组分                                                              |
|----------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 亚洲玉米螟    | <i>Ostrinia furnacalis</i>      | (12Z) - 14:OAc; (12E) - 14:OAc; 14:OAc                             |
| 欧洲玉米螟    | <i>Ostrinia nubilalis</i>       | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:Ald                                     |
| 三化螟      | <i>Tryporyza incertulas</i>     | 16:Ald; (9Z) - 16:Ald; (11Z) - 16:Ald                              |
| 草地螟      | <i>Loxostege sticticalis</i>    | (11E) - 14:OAc                                                     |
| 稻显纹纵卷水螟  | <i>Susumia exigna</i>           | (7Z, 11Z) - 16:OAc; (7Z, 11E) - 16:OAc                             |
| 天蚕蛾科     | <b>Saturniidae</b>              |                                                                    |
| 多音柞蚕     | <i>Antheraea polyphemus</i>     | (6E, 11Z) - 16:OAc; (6E, 11Z) - 16:Ald(9:1)                        |
| 透翅蛾科     | <b>Sesiidae</b>                 |                                                                    |
| 杨树透翅蛾    | <i>Paranthrene tabaniformis</i> | (3E, 13Z) - 18:OH                                                  |
| 天蛾科      | <b>Sphingidae</b>               |                                                                    |
| 烟草天蛾     | <i>Manaduca sexta</i>           | (10E, 12Z) - 16:Ald                                                |
| 谷蛾科      | <b>Tineidae</b>                 |                                                                    |
| 大袋蛾      | <i>Clania variegata</i>         | 一个支链十七烷酸叔己醇酯                                                       |
| 幕衣蛾      | <i>Tineola bisselliella</i>     | (2E) - 18:Ald; (2E, 13E) - 18:Ald(1:2)                             |
| 卷蛾科      | <b>Tortricidae</b>              |                                                                    |
| 苹异形小卷蛾   | <i>Cryptophlebia leucotreta</i> | (8E) - 12:Ald; (8Z) - 12:Ald(1:1)                                  |
| 油松球果小卷蛾  | <i>Cravarmata margarotana</i>   | (9E, 12Z):OAc; (9Z, 12Z):OAc; (9E, 14Z):OAc; (9Z, 14Z):OAc; 12:OAc |
| 豆荚小卷蛾    | <i>Cydia nigricana</i>          | (8E, 10E) - 12:Ald                                                 |
| 梨小食心虫    | <i>Grapholitha molesta</i>      | (8Z) - 12:OAc; (8E) - 12:OAc; (8E) - 12:OH; 12:OH                  |
| 广翅小卷蛾    | <i>Hedya nubiferana</i>         | 12:OH; (8Z) - 12:OAc; (8E, 10E) - 12:OAc                           |
| 小木蠹蛾     | <i>Holcocerus insularis</i>     | (3Z, 14Z):OAc; (3E, 14E):OH; (3Z, 14Z):OH                          |
| 苹果蠹蛾     | <i>Laspeyresia pomonella</i>    | (8E, 10E) - 12:OAc                                                 |
| 花翅小卷蛾    | <i>Lobesia botrana</i>          | (7E, 9Z) - 12:OAc                                                  |
| 葡萄小卷蛾    | <i>Pralobesia viteana</i>       | (9Z) - 12:OAc                                                      |
| 欧洲松梢小卷蛾  | <i>Rhyacionia buoliana</i>      | (9E) - 12:OAc                                                      |
| 二三针松小卷蛾  | <i>Rhyacionia frustrana</i>     | (9E) - 12:OAc                                                      |
| 脂松梢小卷蛾   | <i>Rhyacionia rigidana</i>      | (8E, 10E) - 12:OAc                                                 |
| 加勒比松梢小卷蛾 | <i>Rhyacionia subtropica</i>    | (9E) - 12:OAc                                                      |

| 昆虫名称    | 学名                                | 信息素组分                                                                             |
|---------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 苹白小卷蛾   | <i>Spilonota ocellana</i>         | (8Z) - 14:OAc                                                                     |
| 落叶松线小卷蛾 | <i>Zeiraphera diniana</i>         | (11E) - 14:OAc                                                                    |
| 长须卷蛾    | <i>Sparganothis directana</i>     | (9E, 11E) - 12:OAc; (11E) - 14:OAc; (11Z) - 14:OAc (35:19:28)                     |
| 黄头长翅卷蛾  | <i>Acleris minuta</i>             | (11E, 13E) - 14:Ald                                                               |
| 茶小卷蛾    | <i>Adoxophyes orana</i>           | (9Z) - 14:OAc; (11Z) - 14:OAc (9:1)                                               |
| 棉褐带卷蛾   | <i>Adoxophyes fasciata</i>        | (9Z) - 14:OAc; (11Z) - 14:OAc (9:1)                                               |
| 西卷蛾     | <i>Amorbia cuneana</i>            | (10E, 12E) - 14:OAc; (10E, 12Z) - 14:OAc                                          |
| 果树卷蛾    | <i>Archips argyrospilus</i>       | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc; 12:OAc                                            |
| 樱桃丑巢卷蛾  | <i>Archips cerasivoranus</i>      | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc                                                    |
| 栎黄卷蛾    | <i>Archips semiferranus</i>       | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc                                                    |
| 亚麻黄卷蛾   | <i>Archips podnus</i>             | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc (1:1)                                              |
| 蔷薇黄卷蛾   | <i>Archips rosanus</i>            | (11Z) - 14:OH; (11Z) - 14:OAc (1:9)                                               |
| 红带卷蛾    | <i>Argyrotaenia velutinana</i>    | 14:OAc; (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc; 11 - 12:OAc; (9Z) - 12:OAc; (9E) - 12:OAc |
| 甘蔗条小卷蛾  | <i>Argyroploce schistaceyana</i>  | (9Z) - 12:OAc                                                                     |
| 栎小卷蛾    | <i>Argyroploce citrana</i>        | (11Z) - 14:Ald; (11Z) - 14:OAc (1:100)                                            |
| 枞色卷蛾    | <i>Choristoneura fumiferana</i>   | (11Z) - 14:Ald; (11E) - 14:Ald (4:96)                                             |
| 紫色卷蛾    | <i>Choristoneura murinana</i>     | (9Z) - 12:OAc                                                                     |
| 西枞色卷蛾   | <i>Choristoneura occidentalis</i> | (11Z) - 14:Ald; (11E) - 14:Ald (8:92)                                             |
| 蔷薇斜条卷蛾  | <i>Choristoneura rosaceana</i>    | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc; (11E) - 14:OH                                     |
| 双斜卷蛾    | <i>Clepsis spectrana</i>          | (11Z) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc (90:10)                                             |
| 云卷蛾     | <i>Cnephasia pumicana</i>         | (9E) - 12:OAc; (9Z) - 12:OAc (1:1)                                                |
| 咖啡黄卷蛾   | <i>Homona coffearia</i>           | (9E) - 12:OAc; 12:OAc; 12:OH (36:49:15)                                           |
| 茶黄卷蛾    | <i>Homona maganima</i>            | (11Z) - 14:OAc; (9Z) - 12:OAc; 11 - 12:OAc (30:3:1)                               |
| 苹褐卷蛾    | <i>Pandemis heparana</i>          | (11Z) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc; (11Z) - 14:OH; 12:OAc (90:5:5:1)                   |
| 三线卷蛾    | <i>Pandemis limitana</i>          | (11Z) - 14:OAc; (9Z) - 14:OAc                                                     |

| 昆虫名称                     | 学名                           | 信息素组分                                                                                      |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 葡萄褐卷蛾                    | <i>Pandemis cerasana</i>     | (11Z) - 14:OAc; (11E) - 14:OAc (64:21)                                                     |
| 欧洲栎卷蛾                    | <i>Croesia semipurpurana</i> | (11E) - 14:Ald; (11Z) - 14:Ald (85:15)                                                     |
| 张翅卷蛾                     | <i>Croesia curcalan</i>      | (11E) - 14:Ald; (11Z) - 14:Ald (85:15); (11E) - 14:OAc; (11Z) - 14:OAc (76.5:13.5:8.5:1.5) |
| <b>巢蛾科 Yponomeutidae</b> |                              |                                                                                            |
| 油橄榄巢蛾                    | <i>Prays oleae</i>           | (7Z) - 14:Ald                                                                              |
| 苹果巢蛾                     | <i>Yponomeuta padella</i>    | 16:OAc; (9Z) - 16:OAc; (11Z) - 16:OAc; 14:OAc; (11E) - 14:OAc; (11Z) - 14:OAc              |
| 小菜蛾                      | <i>Plutella xylostella</i>   | (11Z) - 16:Ald; (11Z) - 16:OAc (2:3)                                                       |

注:表中 E(反式), Z(顺式), Ac(醋酸酯), OH(醇), Ald(醛)。左起数字为双键位置, 右边数字为碳原子数, 例: (11Z) - 14:OAc 为顺-11-十四碳烯醇醋酸酯。

在昆虫类群中, 许多种类都拥有能够释放雄性信息素的味刷。它们的类型众多, 结构复杂。雄蛾味刷由上皮毛原细胞以及与其相连的鳞片组成。早期的报道中, 由鳞片、毛构成的味刷仅被用于分类, 它们的不同结构作为区分种类的特征之一。像其他的外部特征一样, 味刷结构从低级向高级也存在着进化的趋势。由于组成味刷的腺体细胞通常群生, 因此由腺体细胞上生长出的鳞片也都成簇生长。根据雄性味刷在昆虫身体上的着生部位、组成味刷鳞片的类型等可将雄性味刷分成六种类型。迄今为止, 已从数十种雄蛾和雄蝶味刷中鉴定出雄性信息素组分。昆虫雄性信息素的生物学功能主要是对雌性产生引诱作用、激欲作用, 对同种雄蛾产生抑制作用, 以及种间隔离和防御作用等。

从灯蛾科味刷中鉴定出的化合物主要是二氢吡嗪羧醛和羟基二氢吡嗪羧醛。相对于其他类群, 灯蛾雄蛾味刷中的化合物成分比较单一。然而, 在形成种类特异方面该科的雄蛾仍有多种方式。首先在化合物成分方面有的是两种化合物, 也有的是一种化合物。如果在味刷中只有一种化合物时, 该化合物就是羟基二氢吡嗪羧醛。羟基二氢吡嗪羧醛的旋光异构也具有种类特异性, *C. transiens* 和 *C. gangis* 的味刷中就以 (R) - (-) - 羟基二氢吡嗪羧醛为雄性性激素组分。另外, 味刷中化合物的含量变化是形成灯蛾种类特异的另一显著特征。黑条灰灯蛾味刷中含有高达 500  $\mu\text{g}$  的 (R) - (-) - 羟基二氢吡嗪羧醛, 这种含量高出雌性信息素几个数量级。除此之外, 有的种类在同一种雄蛾味刷中采用两种浓度分度方式。 *P. isabell* 雄蛾味刷中羟基二氢吡嗪羧醛的含量为 0 ~ 10 ng 和 1 ~ 10  $\mu\text{g}$  两个范围, 二氢吡嗪羧醛的含量很少。而亚麻灯蛾雄蛾味刷中所含二氢吡嗪羧醛的量为 0 ~ 30 ng 和 0.3 ~ 3  $\mu\text{g}$  两种类型。虽然以上提到的两种化合物都能诱导雌蛾的性行为反应, 但上述两种雌蛾均对各自雄蛾所含比例较高的化合物产生更加强烈的反应。