

信息素及其在储粮害虫检测中的应用

左祥莉, 张玉荣, 符 杰, 岳纲冬

(河南工业大学 粮油食品学院, 粮食储藏与安全教育工程研究中心,
粮食储运国家工程实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:在粮食储藏过程中, 准确检测粮堆内害虫种类和密度是害虫综合防治的重要依据, 而传统检测方法存在工作量大、检测结果滞后等缺点, 因此寻找新的检测手段具有重要意义。研究发现, 昆虫信息素具有安全、绿色、微量、高效等特点, 可用于储粮害虫的检测与控制。概述了昆虫信息素的结构鉴定、人工合成、采集方法, 主要分析了信息素在储粮害虫监测诱捕检测法和信息素成分分析法中的应用研究, 并讨论了信息素在上述两种检测方法的应用中所存在的难题, 以期储粮害虫检测技术的发展提供参考。

关键词:储粮害虫; 信息素; 检测技术

中图分类号:S 379.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2016)04-0102-06

Pheromones and its application in detection of stored - grain pests

ZUO Xiang-li, ZHANG Yu-rong, FU Jie, YUE Gang-dong

(College of Food Science and Technology, Grain Storage and Security Engineering Research
Center of Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Grain Storage and Logistics,
Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001)

Abstract: In the process of grain storage, the accurate detection of pest species and density is the necessary basis in integrated pest management program. However, the traditional detection methods have some disadvantages, such as heavy workload and lagging of detecting results, so it is necessary to find a new detection method. Research shows that, insect pheromone has many characteristics, such as security, green, trace and high efficiency, which can be used to detect and control pests. The structure identification, artificial synthesis and collecting methods of insect pheromone were outlined. The application of pheromone in monitoring trap detection and pheromone components analysis were mainly analyzed. Also, the problems occurred in using the aforementioned detection methods were discussed in order to provide certain references in the development of detection technique.

Key words: stored - grain pests; pheromone; detection technique

粮食在收获、储藏、运输过程中的损失量十分惊人。据国家粮食局统计^[1], 我国粮食产后年损失超过1000亿斤, 相当于1.5亿亩良田产量。在储藏(尤其是长期储藏)过程中, 粮食不可避免地受到虫、霉、鼠、雀、自身陈化等影响^[2-3], 造成储粮数量的减少和品质的劣变, 是粮食产后损失中的主要环节。在此环节中, 由害虫造成的损失不容小觑。FAO初步估计, 粮食产后损失可达10%~15%, 其中仅由害虫造成的损失约占储粮损失的50%^[4]。

因此, 及早发现、准确估测害虫发生趋势、种群动态是安全储粮的一项重要内容^[5]。研究发现, 害虫在生命活动中产生的信息素具有高度专一性, 可对同种或同类害虫产生引诱、刺激, 或对其取食、产卵、交配、集合等功能产生影响, 能够应用于储粮害虫的检测、监控和诱捕等多方面, 且具有安全、绿色、微量、高效的特点^[6]。此外, 信息素可与其他挥发性物质如食物引诱剂等结合使用, 对储粮害虫进行监测诱捕, 达到检测与控制的双重目标, 还可通过对储粮中信息素成分进行采集与分析, 确定不同害虫的特征感染指示物, 进而确定储粮感染的害虫种类。作者在综合分析国内外研究文献的基础上, 主要论述了信息素在储粮害虫监测诱捕和成分分析法中的应

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(31371852)

作者简介: 左祥莉, 1990年出生, 女, 硕士研究生。

通讯作者: 张玉荣, 1967年出生, 女, 教授。

用,并分析了其应用中所存在的难题,同时概述了昆虫信息素的特点、结构鉴定与人工合成,以期为相关研究提供参考。

1 昆虫信息素

1.1 昆虫信息素的相关概念及特点

“信息素”的英文“pheromone”一词来源于希腊语 pherein(可携带)和 horman(能激起兴奋)的组合^[7],可译为昆虫本身释放的可引起兴奋的物质。昆虫信息素主要是指昆虫腺体向体外分泌的小分子物质(外激素),是有机体对外分泌以影响同种或不同种其他成员行为和生理活动的一种活性物质,其主要功能是进行同种个体或不同种个体之间的信息交流^[8]。信息素属于微量调控物质,具有微量高效、敏感专一、无毒无害、对环境友好、无残留等特点^[9],契合绿色生态的要求,从而越来越受到研究者的关注^[10]。

1.2 目前鉴定合成的信息素种类

昆虫信息素的成分和化学结构是人们对其进行人工合成的前提,也是人们进一步认识害虫和通过储粮害虫信息素对其进行种群鉴别和密度预测的基础。20世纪70到80年代,这一领域的研究比较热门,并取得了较为丰富的研究成果。最初是德国昆虫学家布特思特,以50万头雌蚕蛾为原料,分离提纯出12g纯粹物质,并鉴定其结构,取名蚕蛾醇(Bombykol),为蚕蛾的性信息素,由此开创了此方面研究的先河^[10-11]。随后,各个国家的研究人员开始对其他昆虫信息素进行大量研究,其中也包含对仓储害虫信息素的研究。如美国、英国和加拿大的多位研究人员^[12-14]曾报导了粉斑螟、印度谷螟、药材甲等仓储害虫的多种信息素,主要包括顺-9,反-12-十四碳烯醇醋酸酯、顺9-十四碳烯-1-醋酸酯、顺9,反12-十四碳二烯醇等性信息素和非性信息素。日本学者 Suzuki 等^[15]鉴定出赤拟谷盗的聚集信息素结构为4,8-二甲基葵醛。美国学者 Williams 等^[16]报导了谷蠹的两种信息素为1-甲基丁基(E)-2-甲基-2-戊烯酸酯和1-甲基丁基(E)-2,4-二甲基-2-戊烯酸酯,并发现这两种信息素很相似,只是后者第2位碳上比前者多个甲基;另一位学者^[17]研究发现危害储粮的重要害虫米象的信息素化学结构为4-甲基-5-羟基-3-庚酮。此外,其他储粮害虫如大谷长蠹、锈赤扁谷盗和锯谷盗等储粮害虫的多种信息素分子结构也相继被确定。这些研究成果为人们开发利用储粮害虫信息素奠定了重要基础,也为人们对其后续研究开辟了道路。

由于害虫本身释放的信息素量太少,若要大规

模利用必须进行人工合成。自20世纪70年代,我国高校和科研单位如中国科学院成都有机化学研究所、四川大学、南开大学等曾对印度谷螟、谷斑皮蠹、麦蛾等仓储害虫的信息素进行合成研究^[18]。随后,周斌等^[19]论述了以植物油为原料合成谷斑皮蠹的聚集信息素、赤拟谷盗的预警信息和杂拟谷盗的性信息素的基本过程,但是给出的都只是简单的合成反应过程,并没有给出具体的反应条件。孟岳等^[20]报道了在LiNH₂作用下,通过不保护羟基的10-葵炔醇-1直接与 ω -溴代羧酸酯反应引入羧酸基团来合成锈赤扁谷盗和长角扁谷盗的聚集信息素。麦蛾性信息素的主要成分(顺7,反11-十六碳二烯醇醋酸酯)在1974~1979年由Vick等人分离鉴定并合成成功,而另一种主要成分(反-9-十四碳烯-1-醇醋酸酯(10))则在1992年以四氢呋喃为起始原料制得^[21-22]。吴江等^[23]通过化学工艺的设计,以丙炔醇和D-苏氨酸为原料,成功合成了(2S,3R,(1R))-2,3,5-三甲基-6-(1-甲基-2-氧代丁基)-4-氧代-氧杂-5-环己烯(药材甲性信息素的另一种成分)。此外,陈家威^[24]、黄文芳^[25]、刘天麟^[26]等多位国内研究人员也对昆虫信息素的合成做了早期研究,但大多是针对农林昆虫信息素。近期,陈海滨等^[27]探究了烟草甲性信息素及其异构体的简易合成法,得到了另一种烟草甲性信息素及其异构体,即2,6-二乙基-3,5-二甲基-3,4-二氢呋喃;孙渐盛等^[7]对人工合成昆虫性信息素的方法做了总结,常用的是Witting反应、炔化物路线和Grignard试剂偶联法,还综述了昆虫性信息素微胶囊化的制备方法。

随着分析化学、分子生物学等学科以及气相色谱、质谱等近代超微量分析技术的飞速发展,近20年来,在已经鉴定出结构的2000多种昆虫信息素和合成的昆虫性信息素及其类似物中,国内外已有百余种昆虫性信息素已可商品化生产^[28-29],涉及储藏物害虫的有近30种,其中米象、玉米象、谷蠹、锯谷盗、赤拟谷盗、印度谷螟、谷斑皮蠹等十几种主要害虫的信息素现在已经能够进行人工合成^[30]。

2 昆虫信息素在储粮害虫检测中的应用

信息素包含了昆虫的大量信息,可在储粮害虫检测、监控和诱捕方面得到应用。一方面,将集合信息素或性信息素释放于储粮环境中的特定位置能够引诱害虫产生聚集效应,从而实现对其诱捕和检测,同时可对储粮害虫密度进行预测,这种方法属于间接检测;另一方面,由于不同昆虫信息素具有各自特点,其化学结构具有高度复杂性和特殊性,通过对储粮环境中的信息素进行采集和分析,人们可以得到

害虫种类、虫态、密度等信息,这种方法属于直接检测。因此,目前基于昆虫信息素的储粮害虫检测技术的研究有两个方向,一个是用信息素进行监测和诱捕相结合的害虫检测技术;另一个是直接采集储粮环境中的挥发性信息素,通过分析其成分和浓度进行储粮害虫种类和密度的检测。

2.1 诱捕检测法

2.1.1 监测诱捕器

害虫种群之间是通过信息素来相互交流,雌雄之间以性信息素联系完成交配并繁衍后代,据此可用信息素来诱集害虫或者干扰它们之间的交配^[31]。目前,信息素在监测诱捕器中的应用最为成功,也最为广泛。监测诱捕器由两部分组成,一是带有信息素散发器的诱芯,二是粘性表面的纸板或塑料板。害虫会将诱芯释放出的信息素误以为同类或同种害虫释放,从而进入诱捕器中,最终被粘结到粘板表面而无法逃离^[32]。诱捕器诱捕到害虫后,既能产生捕杀害虫的效果,还能反映出害虫种类和数量,从而为预测害虫的发生量、发生期、分布区和危害程度提供依据,也为划分局部熏蒸区域或其它防治提供参考,这对提高储粮管理水平意义重大。到目前为止,已有多家公司设计并制造了针对不同种类仓储害虫的监测诱捕器。首先是适用于粮堆表面诱捕的监测诱捕器,如针对多种仓储甲虫的 PC Floor Trap™ (Pitfallcone) 监测诱捕器;针对谷盗属害虫的 Storgard® 圆顶诱捕器;内含植物油与多种害虫信息素,可诱捕多种甲虫和蛾类的 Pantry Patrol™ 诱捕器等^[33]。其次是适用于粮堆内部的诱捕器,如探管(塑料)诱捕器,可将其埋进粮堆 50 mm 深的位置^[33]。此外,还有多种其他诱捕器,如适用于粉斑螟、印度谷螟等 7 种仓储害虫的 STORGRD 监测诱捕器;可用于诱捕谷斑皮蠹、烟草甲、印度谷螟等 9 种害虫的诱芯及成套诱捕器;可根据诱捕剂不同对印度谷螟、烟草螟、粉斑螟进行引诱的粘胶诱捕器^[30]。还有多家公司如 Russell IPM、Agrisense - BCS Ltd、Russell Fine Chemicals、Oecos 等也在从事监测诱捕器的研发生产^[34]。可见,监测诱捕器的生产应用已经成为储粮害虫检测与诱捕的一个重要方向。

2.1.2 信息素在监测诱捕中的应用

目前,应用于储粮害虫检测方面的信息素以性信息素和聚集信息素最为成功和广泛^[35],有些是单独使用,有些则是与食物有效成分等结合使用,且大部分是监测和诱捕相结合。

研究发现,麦蛾科、螟蛾科的蛾虫和豆象科、窃蠹科、皮蠹科的甲虫产生的性信息素,以及长蠹科、扁甲科、象甲科、锯谷盗科和拟步甲科的雄甲虫产生

的复合型信息素,都可作为监控害虫的目标物被用于各种监测诱捕器中^[32]。Fadamiro 等^[36]通过释放麦蛾信息素,发现每分钟释放量约 0.2 μg 时,可诱捕 40% 左右的雄蛾。Mullen 等^[37]使用信息素成功诱捕了印度谷螟,而 Dismate P E 性诱剂对印度谷螟具有较强的诱集作用,且捕杀效果要远远好于溴甲烷熏蒸法^[38]。Branco 等^[39]对信息素释放量与害虫诱捕量之间的关系进行研究,发现随着信息素剂量的增加,能够引诱害虫的半径增大;信息素剂量一定时,随着引诱区域半径的增大,可诱捕到的害虫数量减少;而半径一定时,信息素剂量越大,可诱捕到害虫的可能性越大。贺培欢等^[40]将瓦楞纸板诱捕器置于小麦、玉米、粳稻和籼稻等四种粮堆表面进行监测诱捕储粮昆虫(包括螨类)的试验,发现可诱捕到谷蠹、米象、米象小蜂、麦蛾、锈赤扁谷盗、嗜虫书虱、强壮肉食螨等 29 种储粮昆虫(包括螨类)。由此可知,监测诱捕器对我国多种主要储粮昆虫均可达到诱集作用,因此用其监测粮仓内感染的主要害虫种类,进而对其防治起到指导作用。

信息素结合食物引诱剂进行储粮害虫的监测和生物防治也一直是国内外储粮害虫研究领域的热点,人们发现植物中的挥发性物质对于昆虫信息素的引诱效果具有明显的增效作用^[41-42]。如,碎麦的挥发性物质能够提高人工合成聚集信息素对玉米象和米象诱导效果^[43];某些种类的小蠹虫可对受伤寄主释放出的萜烯化合物产生趋性,从而加强信息素的诱虫效果^[44];食物引诱剂结合信息素诱捕小蠹甲、锈赤扁谷盗、锯谷盗、杂拟谷盗等害虫产生的效果比单独使用信息素进行监测诱捕要好^[45]。Phillips 等^[46]研究发现,新鲜谷物中的挥发性物质如香草醛、麦芽酚、戊醛与合成信息素同时使用比两者单独使用时对米象的引诱效果好,由小麦胚芽油和大豆油组成的挥发性物质与 4,8-二甲基癸醛(信息素)混合使用时,对赤拟谷盗产生的引诱效果也超过两者单独使用时的效果。周刚等^[47]将碎麦挥发性物质和玉米象、米象、书虱信息素的化学成分按一定配方以多孔淀粉进行包埋制成引诱剂,在实仓中进行了诱捕效果测试,结果发现此引诱剂可有效预测出书虱的发生,且能够预测害虫发生位置,为储粮害虫的预测预报工作提供了一定的参考。锈赤扁谷盗是夏季粮仓常见的储粮害虫,也是中国最难防治的储粮害虫之一,黄子法等^[48]在稻谷粮仓内以昆虫信息素和食物引诱剂来诱捕检测锈赤扁谷盗,发现在平均粮温升高时,诱捕检测到的害虫数量增多。吕建华等^[49]发现全麦粉挥发物和烟草甲信息素提取物对烟草甲成虫的具有较强的引诱效果,且二者

适当剂量的混合物对烟草甲成虫的引诱作用与商品烟草甲信息素诱芯引诱作用相当。因此,粮食的挥发性物质或者气味浓缩物可用于监测诱捕器中,增强信息素的检测诱捕效果。

由上述可知,信息素在监测诱捕器中的应用研究比较普遍,且信息素和食物有效成分在植食性昆虫寄主选择中有重要作用,可为我们进行储粮害虫检测和防治提供一定的思路,但此方面的研究和应用仍存在一些问题和难点。首先是食物种类的筛选、活性物质的提取、有效成分的分离提纯等,不同种类、不同储藏期的粮食通常具有不同的挥发性物质,粮食中对害虫有引诱效果的活性成分的提取具有一定的难度,对其进行有效成分的分离提纯等多方面的研究尚不全面。其次是害虫自身信息素属于微量物质,对其进行收集提取分离等成本偏高。然后是挥发性物质在粮堆中的挥发能力有限,而害虫的活动具有一定的区域性,如果诱捕器位置选择的不好,则检测结果具有较大偏差。最后是研制高效食物成分和昆虫信息素的结合剂具有一定的难度,需要多方面(如昆虫学、化学和植物生理学等)的人才通力合作。

2.2 信息素成分分析法

信息素成分分析检测法是指通过采集粮堆生态系统中害虫所产生的特征性挥发信息素,分析其各项特征指标以掌握害虫种类、密度和发展趋势,进而评价其对粮食危害程度的一种综合技术。该方面的研究目前还处于实验研究阶段,国外已有不少研究,国内对其研究还比较少。

2.2.1 信息素的采集

信息素的采集是该项技术实施的前提,但其含量极微,造成收集工作非常困难。目前,信息素收集方法主要有溶剂浸泡法、空气收集法(连续气流收集法)和固相微萃取法三类。1989年,黄远达等^[50]对玉米象性信息素的收集方法做了研究,他们采用浸泡法、硅胶气流法、溶剂气流法、低温冷凝气流法等四种方法对玉米象的信息素进行采集,发现低温冷凝气流法的收集效果较好。邵颖等^[51]曾采用溶剂浸泡法和顶空气体法收集嗜虫书虱性信息素,通过生物活性测定发现顶空气体法收集到的信息素活性较高。刘俊杰等^[52]曾采用连续气流法收集米象和锯谷盗的聚集信息素进行诱捕效果研究,发现收集到的信息素对同种昆虫的引诱效果显著。黄翠虹等^[53]以吸附剂法和固相微萃取法收集挥发性样品,结果证实两种方法均可用于昆虫信息素的采集。

虽然几种收集方法都能收集到一定的信息素,但它们有各自特点。溶剂浸泡法往往是浸泡虫体或

者虫的器官,需要的虫量较大,对溶剂要求严格,且不适合于粮仓内对害虫信息素的收集。空气收集法是用冷捕法或固体吸附法捕集昆虫释放的挥发性成分,这种方法可用于对粮仓内害虫信息素的采集,但是对吸附剂的要求较高。近几年,固相微萃取法在昆虫信息素研究方面应用颇多,此方法无需有机溶剂、应用范围广、操作简单方便、时间短,且可与气相色谱仪连用,集采集、萃取、浓缩、分析于一体^[54]。

2.2.2 信息素成分分析法的应用

信息素在成分分析检测中的应用研究相比于在监测诱捕器中的应用研究较少,但也有广阔的前景。有研究表明,人们可以对采集到的信息素进行分析得出信息素的种类和浓度,进而判断出粮食受虫害感染的害虫种类、密度。在信息素浓度与害虫种群密度的关系方面,研究发现^[55-57]单头雄性谷蠹的浓度范围为 $0.3\ \mu\text{g} \sim 1.24\ \mu\text{g}/\text{单体雄虫}/\text{d}$,单头雄性赤拟谷盗的浓度范围大约是 $878\ \text{ng}/\text{单体雄虫}/\text{d}$ 。Laopongist等^[58]对特定储粮害虫的特征挥发性信息素的研究发现,在 $1\ \text{kg}$ 小麦粉中即可成功检出1头谷蠹或者赤拟谷盗,同时他们还证实了单头雄性谷蠹比单头雄性赤拟谷盗所释放的信息素更为强烈。粮仓中害虫的密度与许多因素有关,除环境因素外,害虫的性别比例也是影响其后代数量的一个重要因素,因此有研究者通过收集不同性别的虫子释放的信息素,确定性信息素类型,进而判断虫子的性别。2012年,Edde^[59]采用SPME法收集了谷蠹的挥发性成分,成功鉴别出了谷蠹的性别。此外,通过信息素检测小麦受害虫感染情况也是人们研究的一大热点。早在1993年,Stetter等^[60]将可识别害虫信息素的电子鼻用于区分正常、虫害、变质的小麦,结果发现分辨率达到83%。1999年时,Ridgway^[61]用电子鼻技术成功检测出经螨类感染的小麦样品。随后,蒋德云等^[62]采用Alpha MOS Fox3000型电子鼻,自行设计实验系统,分别对含有活的谷蠹、死的谷蠹和不含谷蠹的小麦样品的挥发性物质进行检测和比较,发现它们的气味与标准样品气味都有明显的差异,若采用主成分分析(PCA)模式对样品进行识别,可以快速判断粮食是否受害虫侵害。继而在2007年,张红梅等^[63]将害虫侵蚀的小麦和正常小麦按不同比例混合,得到不同危害程度的小麦样品,用德国生产的PEN2型电子鼻对其进行检测,结果发现无论虫子死活、虫量多少,其气体样本与标准样之间均有明显差异,这一发现有望为人们快速准确地检测粮食是否受害虫侵蚀提供一定的思路。2014年,Laopongist等^[58]利用顶空固相微萃取(SPME)技术检测受到谷蠹、米象、赤拟谷盗、锈赤扁谷盗和扁

谷盗等常见储粮害虫侵害的小麦样品中的挥发性成分,结果证明谷蠹最易被检测出来,其次是赤拟谷盗,并且在1 kg小麦饲料中单头雄性谷蠹释放的感染指示物就能被检测出来。

粮库中的挥发性物质来源广泛、成分复杂(如粮食本身和微生物散发的各种挥发性物质),如何确定各种储粮害虫的特征性挥发信息素就成为一个棘手的问题。目前国内外在这方面的研究并不充分,而且涉及的虫种和信息素比较单一,没有形成一个集多种害虫、多种信息素为基础的综合研究,尚不足以检测全国范围乃至世界范围内的储粮害虫种类。因此,若想推广这种检测方法,寻找特征挥发性信息素是必经之路。

2.3 信息素在储粮害虫检测中的应用前景

随着粮油储藏与检验技术的不断发展,粮仓及粮食温湿度已经实现了在线监测,而粮食害虫的自动检测与识别尚未实现^[64]。但“绿色、生态、智能、高效”的储粮理念已深入人心,储粮害虫的在线监测技术必将受到重视。信息素具有人畜安全、对环境无污染、仓虫无法产生抗药性、不伤天敌等优点^[65],且能够遍布整个粮仓,具有良好的发展前景。

对于监测诱捕法,如果能够合成出高效的储粮害虫信息素类似物,或者提取出高浓度的天然信息素,控制生产成本,那么监测诱捕器的应用将会大大提高储粮的安全性。对于信息素成分分析法,如果实现对储粮中各种害虫的信息素进行识别和浓度检测,有望通过采集粮仓中的特征挥发性信息素,检测出储粮害虫的种类和危害程度。若能进一步扩大数据量,形成系统的数据库,并在粮仓内安置气体收集装置和气敏传感器,与电脑终端连接,以软件分析气体成分和浓度等,即可对害虫种类和密度等进行预测和记录,完成储粮害虫的在线监测。因此,昆虫信息素在上述两种检测方法中都具有很大的应用前景。

3 结论与展望

由以上综述可知,人们已经在储粮害虫信息素的结构鉴定、人工合成和利用信息素确定虫子种类、密度,估测粮食危害级别等方面取得了一定成果,且已在储粮害虫检测方面得到部分应用。若能进一步对其进行多方面的应用研究,信息素必将在安全储粮工作中得到更充分的应用。

参考文献:

- [1] 刘慧. 粮食: 向节约要安全[N]. 经济日报, 2014-8-20 (13).
- [2] 黄淑霞, 蔡静平, 田海娟. 主要粮食品种储藏期间霉菌活动特性研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 99-102.
- [3] 蔡静平. 储粮微生物活性及其应用的研究[J]. 中国粮油学报,

- 2004, 19(4): 76-79.
- [4] 牟铎. 基于图像处理的储粮害虫检测方法研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009.
- [5] 白旭光. 储粮害虫检测技术评述[J]. 粮食储藏, 2010, 39(1): 6-9.
- [6] 王宝堂, 刘吉海, 于广威, 等. 引诱捕杀害虫的试验[J]. 粮食储藏, 2013(4): 8-10.
- [7] 孙渐盛, 魏辉, 林硕, 等. 昆虫性信息素人工合成与微胶囊制剂化的研究进展[J]. 福建农业学报, 2014, 29(7): 701-714.
- [8] Müller M, Buchbauer G. Essential Oil Components as Pheromones Areview[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2011, 26(6): 357-377.
- [9] 李兴奎, 张新伟. 用昆虫信息素和食物有效化学成分监控储粮害虫[J]. 粮食流通技术, 2013(4): 25-28.
- [10] 刘翠微. 昆虫信息素的发展现状与前景[J]. 农业技术与装备, 2011(2): 25-26.
- [11] 赵奇, 田本志. 国外应用人工合成信息素防治仓储物害虫的研究[J]. 中国粮油学报, 1999, 14(2): 52-55.
- [12] Kuwahara Y, Kitamura C, Takahashi S, et al. Sex Pheromone of The Almond moth and the Indian meal moth: Cis-9, trans-12, tetradecadienyl acetate[J]. Science, 1971(17): 801-802.
- [13] Brady U E. Isolation, identification and stimulatory activity of a second component of sex pheromone system (complex) of the female almond moth, *Cadra cautella* (walker) [J]. Life Science, 1973, (12): 227-235.
- [14] Read J S, Beevor P S. Analytical studies on the sex pheromone complex of *Ephestia cautella* (walker) (Lepidoptera: Phycitidae) [J]. Journal of Stored Products Research, 1976, 12(1): 55-57.
- [15] Suzuki T, Sugawara R. Isolation of an aggregation pheromone from the flour beetles, *Tribolium castaneum* and *T. confusum*. Journal of Applied Entomology, 1979, (14): 228-30.
- [16] Williams H J, Silverstein R M, Burkholder W E, et al. Dominica lure 1 and 2: Components of aggregation pheromone from male lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* (F) (Coleoptera: Bostrichidae). Journal of Chemical Ecology, 1981, 7(4): 59-780.
- [17] Schmuff N R, Phillips J K, Burkholder W E, et al. The chemical identification of the rice weevil and maize weevil aggregation pheromone [J]. Tetrahedron letters, 1984, 25: 1533-34.
- [18] 邓望喜, 张宏宇, 华红霞. 中国储藏物害虫生物防治的研究进展[J]. 粮食储藏, 2001, 30(2): 3-7.
- [19] 周斌, Mangold H K. 几种仓储害虫信息素的合成[J]. 中国粮油学报, 1990, 5(1): 26-27.
- [20] 孟岳, 冯留贵, 王树梅, 等. 仓库害虫集合信息素的合成—诱赤扁谷盗和长角扁谷盗. 有机化学, 1993, 13(1): 79-83.
- [21] 董晨晖, 黄钰森, 陈国华, 等. 麦蛾防治研究进展[J]. 粮食储藏, 2015, 44(3): 1-8.
- [22] 朱育林, 杨伟文, 潘鑫复. 昆虫性信息素的研究(I)—反-9-十四碳烯-1-醇醋酸酯的合成[J]. 自然科学进展, 1992(2): 173-174.
- [23] 吴江, 匡晓帆. 药材甲性信息素的合成[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2000(2): 17-22.
- [24] 陈家威. 应用聚合物试剂合成昆虫性信息素[J]. 化学试剂, 1991(6): 349-354.
- [25] 黄文芳, 邓彦能, 曾庆北. 光学活性昆虫性信息素类似物的新合成路线(英文)[J]. 有机化学, 1990(3): 230-232.

- [26] 刘天麟, 徐宝元, 李正名. 昆虫性信息素的研究 II. 顺-11-十六碳烯醛的合成[J]. 有机化学, 1988(02): 156-258.
- [27] 陈海滨, 胡武新, 杜永均. 烟草甲性信息素及其异构体的简易合成法[J]. 农药学报, 2015, 17(2): 225-229.
- [28] 范晓军, 李瑜, 李瑶. 昆虫性信息素研究进展[J]. 安徽农业科技, 2010, 38(9): 4636-4638.
- [29] 马涛, 温秀军, 李兴文. 昆虫性信息素人工合成技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(6): 46-51.
- [30] 李兴奎, 鲁玉杰, 仲建锋, 等. 储粮害虫检测技术研究现状及应用进展[J]. 粮食流通技术, 2007(3): 19-22.
- [31] 张蓝月, 邵小龙, 黄行健, 等. 储粮害虫检测技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2366-2371.
- [32] Hassan M N, 于广威, 王丽丽. 昆虫信息素在食品行业中的应用[J]. 粮油仓储科技通讯, 2012(2): 29-32.
- [33] 王争艳, 鲁玉杰. 几种诱捕器对储粮害虫诱捕效果的评价[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 36-48, 42.
- [34] 于广威, 陈洋洋. 食品领域虫害防治研究进展[J]. 粮油仓储科技通讯, 2015(5): 42-44.
- [35] 薛艳花, 陆俊娇. 昆虫性信息素生物学研究与应用进展[J]. 山西农业科学, 2009, 37(4): 80-83.
- [36] Fadamiro H Y, Baker T C. Pheromone puffs suppress mating by *Plodia interpunctella* and *Sitotroga cerealella* in an infested corn store[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2002, 102(3): 239-251.
- [37] Mullen M A, Dowdy A K. A pheromone-baited trap for monitoring the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(3): 231-235.
- [38] 于广威, 王丽丽. Dismate P E 对印度谷螟的防治效果[J]. 粮食储藏, 2013, 42(2): 3-4.
- [39] Branco M, Jactel H, Franco J C, et al. Modelling response of insect trap captures to pheromone dose[J]. Ecological Modelling, 2006(197): 247-257.
- [40] 贺培欢, 张涛, 李燕羽. 瓦楞纸板法诱捕粮库粮堆表层储粮昆虫(螨)种类研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 50-54.
- [41] Cox P D. Potential for using semiochemicals to protect stored products from insect infestation[J]. Journal of Stored Products Research, 2004(40): 1-25.
- [42] Mahroof R M, Phillips T W. Responses of stored-product Anobiidae to pheromone lures and plant-derived volatiles[J]. Journal of Applied Entomology, 2008, 132(2): 161-167.
- [43] Likhayo P W, Hodges R J. Field monitoring *Sitophilus zeamais* and *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) using refuge and flight traps baited with synthetic pheromone and cracked wheat[J]. Journal of Stored Products Research, 2000, 36: 341-353.
- [44] 蒋小龙. 仓储物昆虫化学信息物质的研究及应用新进展[J]. 粮食储藏, 1996(3): 15-20.
- [45] Collins L E, Chambers J. The I-Spy insect indicator: an effective trap for the detection of insect pests in empty stores and on flat surfaces in the cereal and food trades[J]. Journal of Stored Products Research, 2003, 39: 277-292.
- [46] Phillips T W, Jiang X L, Burkholder W E, et al. Behavioral response to food volatiles by two species of stored-product Coleoptera, *Sitophilus oryzae* (Curculionidae) and *Tribolium castaneum* (Tenebrionidae)[J]. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19: 723-734.
- [47] 周刚, 李心田, 鲁玉杰, 等. 新型高效引诱剂实仓诱捕储粮害虫效果研究[J]. 粮食储藏, 2009(5): 8-11.
- [48] 黄子法, 王殿轩, 汪灵广, 等. 诱捕检测控制锈赤扁谷盗生产试验[J]. 粮食储藏, 2014, 43(2): 1-4.
- [49] 吕建华, 袁良月, 张会娜, 等. 全麦粉和烟草甲信息素提取物对烟草甲的引诱效果研究[J]. 农业灾害研究, 2013, 3(08): 17-19.
- [50] 黄远达, 邓彦能, 沈恒胜, 等. 玉米象(*Sitophilus zeamais*)性信息素收集方法的研究[J]. 武汉粮食工业学院学报, 1989(04): 12-17.
- [51] 邵颖, 鲁玉杰, 魏宗烽. 嗜虫书虱性信息素的提取方法和生物活性测定方法[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2148-2153.
- [52] 刘俊杰, 鲁玉杰, 王殿轩. 米象和锯谷盗信息素收集物诱捕效果研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 47-50.
- [53] 黄翠虹, 李静静, 周琳, 等. 收集挥发性样品的吸附剂法和固相微萃取法[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(2): 573-578.
- [54] 刘俊杰. 储粮害虫信息素的提取及室内诱捕效果测试[D]. 郑州: 河南工业大学, 2006. 5.
- [55] Bashir T, Hodges R J, Birkinshaw L A, et al. Phenotypic plasticity of *Rhyzopertha dominica* pheromone signaling: the effects of different hosts and presence of conspecific females on male produced aggregation pheromone[J]. Chemical Ecology, 2003, 29(4): 945-959.
- [56] Edde P A, Phillips T W, Robertson J B, et al. Pheromone output by *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae), as affected by host plant and beetle size[J]. Entomological Society of America, 2007, 100(1): 83-90.
- [57] Yujie Lu, Beeman R W, Campbell J F, et al. Anatomical localization and stereoisomeric composition of *Tribolium castaneum* aggregation pheromones[J]. Naturwissenschaften, 2011, 98(9): 755-761.
- [58] Wathukan Laopongist, George Szrednicki, John Craske. 顶空固相微萃取法(SPME)检测小麦受害虫感染情况初步研究[J]. 粮食储藏, 2014, 43(6): 12-19.
- [59] Edde P A. A review of the biology and control of *Rhyzopertha dominica* (F.) the lesser grain borer[J]. Journal of Stored Products Research, 2012, 48: 1-18.
- [60] Stetter J R, Findlay Jr M W, Schroeder K M, et al. Quality classification of grain using a sensor array and pattern recognition[J]. Analytica Chimica Acta, 1993, 284(1): 1-11.
- [61] Christopher Ridgway, John Chambers, Elena Portero Larragueta, et al. Detection of mite infestation in wheat by electronic nose with transient flow sampling[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999(79): 2067-2074.
- [62] 蒋德云, 孔晓玲, 李宝筏, 等. 电子鼻在储粮害虫检测中的应用研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 254-257.
- [63] Hongmei Zhang, Jun Wang. Detection of age and insect damage incurred by wheat with an electronic nose[J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43: 489-495.
- [64] 王海修. 储粮害虫检测与识别技术研究进展[J]. 粮食仓储科技通讯, 2011(1): 20-23.
- [65] 汪中明, 齐艳梅, 李燕羽, 等. 储粮害虫诱集技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 111-116. 宗