



张国庆. 信息素在文物害虫防治中的应用与展望 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 869–879.

信息素在文物害虫防治中的应用与展望

张国庆

(故宫博物院, 北京 100009)

摘要: 文物害虫会对文物古建筑造成不可逆的破坏, 因此害虫防治是文物保护的重要工作。随着博物馆引入有害生物综合防治 (Integrated Pest Management, IPM) 策略, 博物馆的害虫防治也开始遵循“预防为主, 防治结合”理念。昆虫体外信息素是 IPM 中重要的技术手段。该技术可对害虫进行监测与诱杀, 有利于对害虫发生规律的研究与数量控制。且信息素具有用量少, 不接触文物等优点。本文概述信息素的发展、种类与功能, 整理了文物害虫信息素及其应用中的遇到的问题, 并展望信息素的应用前景。

关键词: 文物; 昆虫信息素; 预防性保护; 诱捕; 监测

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 04-0869-11

Application and prospect of pheromones in pest control of cultural relics

ZHANG Guo-Qing (The Palace Museum, Beijing 100009, China)

Abstract: Pest control of cultural relics has always been an essential work for cultural relics protection, which can cause irreversible damage to ancient buildings. With the introduction of Integrated Pest Management (IPM) in the museum, the concept of “prevention first, prevention combined with control” has gained more attention. The discovery of pheromones provided a new method for pest control. Pheromones could monitor and trap pests, master the occurrence regularity of pests and control the number of pests, and had the advantages of less consumption, no contact with cultural relics. This paper summarized the development, types and functions of pheromones, summarized the problems and solutions in the application of pheromones, and looked forward to the future application.

Key words: Cultural relics; insect pheromones; preventive conservation; trap; monitor

文物是中华文化的物质载体, 是中华民族灿烂历史文明的见证, 保护好文物是利在千秋的大事。文物害虫是文物安全的重要威胁, 会造成无法挽回的严重后果。例如皮蠹、衣蛾等害虫会将皮毛、丝织品等文物蛀食得破烂不堪, 粉蠹、白蚁、天牛和木蜂等能蛀食木建筑构件, 使得古木结构建筑物变的岌岌可危。害虫的防治方法在不断更新迭代, 但针对文物害虫的防治方法却较为单一。这主要是因为文物是珍贵、易损, 且不可

再生的, 而文物害虫又具有隐蔽性强、个体小、数量多、繁殖快、危害大等特点。通常在破坏被发现时, 形势已经非常严重。鉴于此, 具有灭生性的熏蒸方法因渗透性强、见效快、对文物伤害小, 成为了文物杀虫的主流方法。但该方法是在滞后的抢救止损措施, 不能挽回已经造成的损失, 亦无预防作用。

有害生物综合治理 (Integrated Pest Management, IPM) 是一种旨在采用综合的、预防的保护手段,

基金项目: 故宫博物院养心殿研究性保护项目科研课题 (KTYXD 2016-14)

作者简介: 张国庆, 男, 硕士, 馆员, 研究方向为文物预防性保护, E-mail: zhangguoqing@dpm.org.cn

收稿日期 Received: 2021-05-11; 接受日期 Accepted: 2021-07-09

在减少化学药剂使用的同时,降低有害生物侵染的理念。自 1980s 开始被欧美国家引入博物馆 (Story, 1985; Linnie, 1987), 现已被越来越多的博物馆所采纳。害虫诱捕监测是害虫综合治理的重要内容, 及早发现害虫活动对于保护文物而言显得尤为重要。昆虫信息素的高灵敏性使其在众多害虫监测技术中胜出, 并广泛应用于害虫的种群监测和大面积综合治理中。信息素无色无味、无腐蚀性、用量甚微, 这些特点也非常适用于古建筑及文物库房内害虫监测与防治。使用昆虫信息素监测、诱捕文物害虫, 是当下欧美博物馆 IPM 的重要技术手段 (Pinniger, 2010; Brimblecombe *et al.*, 2013; Gilberg and Roach, 2013; Pinniger *et al.*, 2014)。但目前国内尚未见信息素在文物保护领域的应用报道。本文旨在概述文物害虫信息素及其作用, 并展望其应用前景。

1 昆虫信息素的发展与文物害虫信息素

1.1 昆虫信息素的发展

昆虫信息素是昆虫个体向外界释放的, 能够在个体间传递信息、引起同种个体间或种间产生生理或行为反应的微量化学物质, 又称为体外信息素或外激素。信息素的报道最早可追溯至 1932 年, 雄性舞毒蛾 *Lymantria dispar* Linnaeus 对雌性溶剂提取物的趋向性试验, 首次证实信息化学物质的存在, 并被称为“Vernachlässigte Hormone, 被忽略的荷尔蒙” (Bethe, 1932)。1959 年, Butenandt 成功地分离和鉴定第一个信息素, 命名为蚕蛾醇, 随后的人工合成证实了蚕蛾醇的化学结构和功能 (Butenandt *et al.*, 1959)。同年, Karlson 和 Luscher 共同在 Nature 发表文章, 将这种分泌到体外、服务于个体间交流的化学物质称为“Pheromone”, 即信息素 (Karlson and Luscher, 1959)。昆虫信息素中性信息素、聚集信息素、报警信息素是最为常见的, 研究与应用也较多。

1) 性信息素 (sex pheromone)

性信息素往往是雌性个体分泌的、用以吸引同种雄性个体的微量有机化合物。雄性个体的触角具有极其敏锐的性信息素分子受体, 能在数十米外接受到性信息素分子, 然后接近雌性, 进行交配。某些昆虫种类可分泌雄性性信息素。

2) 聚集信息素 (aggregation pheromone)

不同于性信息素只能吸引同种异性个体, 聚集信息素是单一个体释放到体外, 大量引诱同种的两性个体, 聚集取食的信息物质。聚集信息素多存在于昆虫排出的粪便中。林木害虫小蠹 (戴华国等, 2004; 张永宏等, 2008)、红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier (张炯森, 2011) 以及卫生害虫德国小蠊 *Blattella germanica* Linnaeus (杨惠和张金桐, 2005) 等都有商品化的聚集信息素用于检疫与防治。

3) 报警信息素 (alarm pheromone)

报警信息素是群居性昆虫在遇到威胁时, 个体释放到外界, 用以提醒其他个体逃离或者反抗保卫的信息素类物质。例如报警信息素能在很大程度上诱导中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* Fabricius 的防卫行为 (李新宇等, 2016), 蚜虫受到惊吓时会从腹管分泌出报警信息素, 作用于周围其他的蚜虫迅速逃逸 (游越和张钟究, 2005)。

1.2 文物害虫信息素

自信息素分离成功后, 昆虫信息素研究成为了学界热潮。经过半个多世纪的努力, 已鉴定的昆虫信息素达 3 500 多种, 涵盖的昆虫种类达 7 000 种以上 (林强, 2015)。皮蠹、衣鱼、书虱、衣蛾等文物害虫, 因同属于重要的储藏物害虫, 其信息素成分研究亦有报道。表 1 中对部分文物害虫的信息素成分进行了整理。

昆虫信息素多数是易于挥发的有机化合物, 若直接放置于空气中会很快挥发, 而无法起到诱集的目的。因此信息素使用时常搭配起缓释作用的载体。文物害虫种类多, 信息素类物质多样, 搭配的缓释载体形式也比较多。如图 1 所示为本实验室的各种类型的信息素诱芯。

诱捕器对信息素的效力也十分重要。信息素的作用是实现对害虫“拉”过来, 而诱捕器则实现对害虫“定”住, 使其不再对文物造成威胁, 同时实现虫情监测。文物害虫种类繁多, 生活习性差异大, 因此在诱捕器上也有很大差异 (图 2)。按照材质分, 有纸质的、合成塑料的; 按照形状分, 有屋脊型、三角形等; 按照功能分, 有单一害虫诱捕器与多种害虫诱捕器; 按照使用方法, 又可分为悬挂和平放两种。随着物联网技术与移动通信的发展, 同时实现害虫监测与种类识别的诱捕器也得到了开发与应用 (Miller, 2015; Sciarretta and Calabrese, 2019), 例如图 2-F。

表 1 部分文物害虫信息素及其主要成分
Table 1 Pheromones and their main components of pests

文物害虫 Spieces	英文名 English name	危害 Damage	信息素类型 Types of pheromones	主要成分 Main components
鞘翅目 Coleoptera				
花斑皮蠹 <i>Trogoderma variabile</i> Ballion	Warehouse beetle	皮蠹科害虫可取食其他动物残留的食物、动物尸体以及毛和羽毛。Capet beetles feed on the remains of other animals food, carcasses, hair and feathers.	性信息素 Sex pheromone	顺-14-甲基-8-十六碳烯醛,反-14-甲基-8-十六碳烯醛 (Z)-14-methyl-8-hexadecenal, (E)-14-methyl-8-hexadecenal (Cross <i>et al.</i> , 1976)
小圆皮蠹 <i>Anthrenus verbasci</i> Linnaeus	Varied carpet beetle		性信息素 Sex pheromone	顺-5-十一碳烯酸,反-5-十一碳烯酸 (Z)-5-undecenoic acid, (E)-5-undecenoic acid (Kuwahara and Nakamura, 1985)
黑毛皮蠹 <i>Attagenus unicolor japonicus</i> Reitter	Black carpet beetle		性信息素 Sex pheromone	(3E, 5Z)-十四碳二烯酸 (3E, 5Z)-tetradecadienoic acid (Silverstein <i>et al.</i> , 1967)
谷斑皮蠹 <i>Trogoderma granarium</i> Everts	The khapra beetle		性信息素 Sex pheromone	顺-14-甲基-8-十六碳烯醛,反-14-甲基-8-十六碳烯醛 (Z)-14-methyl-8-hexadecenal, (E)-14-methyl-8-hexadecenal (Rossi <i>et al.</i> , 1979)
丽黄圆皮蠹(家具皮蠹) <i>Anthrenus flavipes</i> LeConte	Furniture carpet beetle		性信息素 Sex pheromone	顺-3-癸烯酸 Cis-3-decanoic acid (Fukui <i>et al.</i> , 1974)
钩纹皮蠹 <i>Dermestes haemorrhoidalis</i> Kuster	Black larder beetle		聚集信息素 Aggregation pheromone	异丙基 (Z)-9-十二碳烯酸酯,异丙基 (Z)-9-十四碳烯酸酯, 十三烷酸异丙酯,十四酸异丙酯 isopropyl (Z)-9-dodecenoate, isopropyl (Z)-9-tetradecenoate, isopropyl dodecanoate, isopropyl tetradecanoate (Korada and Griepink, 2009)
粉蠹 <i>Lyctus africanus</i> Lesne	Powder post beetle	喜食淀粉较为丰富的木材,对古建木构件构成破坏。 They like the wood with rich starch, which damages the ancient wooden structures.	聚集信息素 Aggregation pheromone	3-pentyl dodecanoate, 2-propyl dodecanoate, 3-pentyl tetradecanoate (Kartika <i>et al.</i> , 2015)
烟草甲 <i>Lasioderma serricorne</i> Fabricius	Cigarette beetle	食性杂,可危害档案、图书等。 They are omnivorous pests, and can damage files, books, <i>etc.</i>	性信息素 Sex pheromone	(2S,3R,1S,2S)-serricorole, (2S,3R,1R)-serricorone (Chuman <i>et al.</i> , 2014; Ebata and Mori, 2016)
药材甲 <i>Stegobium paniceum</i> Linnaeus	Drugstore beetle	食性杂,可危害档案、图书等。 They are omnivorous pests, and can damage files, books, <i>etc.</i>	性信息素 Sex pheromone	2,3-氢-2,3,5-三甲基-6-(1-甲基-2-氧丁基)-4H-吡喃-4-酮 2,3-dihydro-2,3,5-trimethyl-6-(1-methyl-2-oxobutyl)-4H-pyran-4-one (Kuwahara <i>et al.</i> , 1978)

续表 1 Continued table 1

文物害虫 Species	英文名 English name	危害 Damage	信息素类型 Types of pheromones	主要成分 Main components
家具窃蠹 <i>Anobium punctatum</i> Degeer	Furniture beetle	危害木器、家具等。 They can damage woodwork, furniture, etc.	性信息素 Sex pheromone	2,3-二氢-2,3,5-三甲基-6-(1-甲基-2-氧丁基)-4H-吡喃-4-酮 2,3-dihydro-2,3,5-trimethyl-6-(1-methyl-2-oxobutyl)-4H-pyran-4-one (stegobinone) (White and Birch, 1987)
南部松小蠹 <i>Dendroctonus frontalis</i> Zimmermann	Bark beetle	蛀食松柏类木建筑构件。 They infest wood building components of pine and cypress.	性信息素 Sex pheromone	(1S,5R)-二甲基-6,8-二氧双环[3.2.1]辛烷 (1S,5R)-dimethyl-6,8-dioxabicyclo[3.2.1]octane (Kinzer <i>et al.</i> , 1969; Wood <i>et al.</i> , 1976)
膜翅目 Hymenoptera				
木蜂 <i>Xylocopa hirtissima</i> Moidl	Carpenter bee	蛀食木建筑构件及家具。 They infest wood building components and furniture.	聚集抑制剂 Aggregation inhibitor	马鞭草烯酮, 4-烯丙基甲醚 Verbenone, 4-allyl methyl ether (Berisford <i>et al.</i> , 2007)
鳞翅目 Lepidoptera				
结网衣蛾 <i>Tineola bisselliella</i> Hummel	Webbing clothes moth	羊毛、毛皮、地毯、毛毯、棉混纺织物等衣蛾幼虫均可取食。 The larvae fed on wool, fur, carpets, blankets, and blended cotton fabrics.	性信息素 Sex pheromone	(2R,5S)-2-甲基-5-羟基己酸内酯 (2R,5S)-2-methyl-5-hydroxycaproate lactone (Mori and Senda, 1985; Pirkle and Adams, 1978)
幕衣蛾 <i>Tinea pellionella</i> Linnaeus	Case making clothes moth		性信息素 Sex pheromone	(E)-2-十八碳醛, (E,Z)-2,13-十八碳二烯醛 (E)-2-octadecarboxaldehyde, (E,Z)-2,13-octadecadienal (Van Ryckeghem, 2011)
缨尾目 Thysanura				
毛衣鱼 <i>Ctenolepisma villosa</i> Fabricius	Silverfish	衣鱼的食性很杂,可蛀食纸张、浆糊、棉布、动物皮毛、丝绸纤维等。更喜含糖丰富的食物。 Silverfish fed on paper, paste, cotton cloth, animal fur, silk fiber, etc. And they prefer foods rich in sugar.	聚集信息素 Aggregation pheromones	粪便、鳞片等中的大分子不易挥发的化学物质 Macromolecular, non-volatile chemicals found in excrement, scales (Woodbury and Gries, 2007)
斑衣鱼 <i>Thermobia domestica</i> Zygentoma	Firebrats		聚集信息素 Aggregation pheromones	琥珀色粪便中的大分子不易挥发的化学物质 Macromolecular, non-volatile chemicals found in amber excrement (Woodbury and Gries, 2008)
啮目 Psocoptera				
嗜虫书虱 <i>Liposcelis entomophila</i> Enderlein	Booklice	对图书、档案造成破坏。 Damage to books and files.	性信息素 Sex pheromone	邻苯二甲酸二辛酯 Diocetyl phthalate (邵颖和鲁玉杰, 2005)

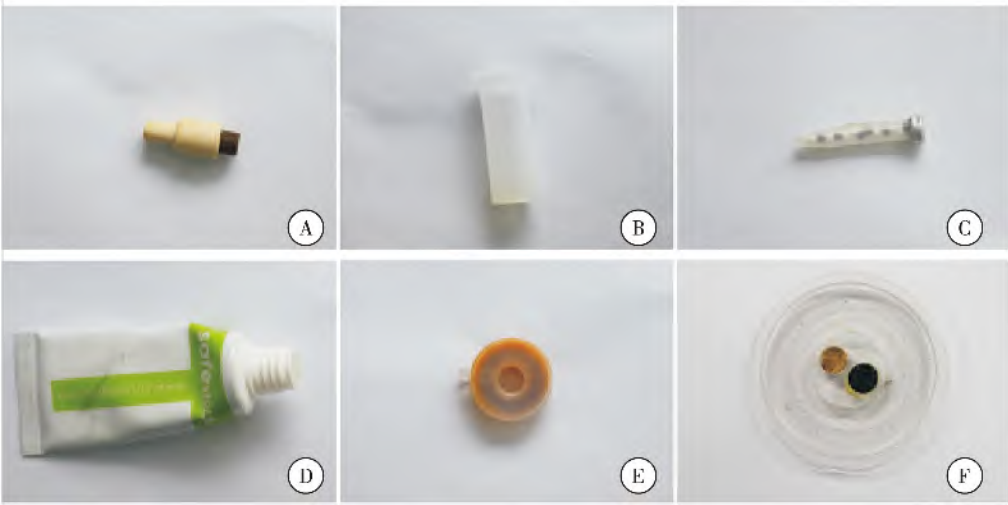


图1 商品化信息素与诱芯

Fig. 1 Commercialize pheromones and lure core

注：A，硅胶塞诱芯；B，聚乙烯管诱芯；C，颗粒 + 聚乙烯管诱芯；D，信息素膏剂；E，信息素膏剂 + 聚乙烯管诱芯；F，信息素膏剂 + 硅胶塞。Note: A, Silica gel lure core; B, Polyethylene tube lure core; C, Particle + polyethylene tube lure core; D, Pheromone paste; E, Pheromone paste + polyethylene tube lure core; F, Pheromone paste + silica gel stopper.

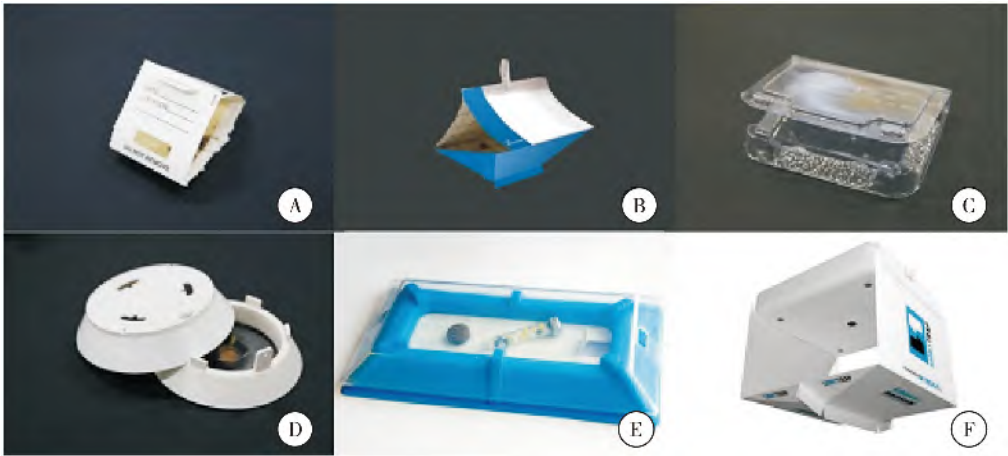


图2 诱捕器类型

Fig. 2 Trap type

注：A，三角形诱捕器；B，悬挂式诱捕器；C，塑料泡式诱捕器；D和E，多种害虫诱捕套装；F，远程监测诱捕器。图片A、C和D来自实验室拍摄；B、E和F来源于美国Insects Limited公司官网。Note: A, Triangle trap; B, Suspended trap; C, Plastic bubble trap; D & E, Trap suit of various pests; F, Remote monitoring trap. A, C and D were taken in the laboratory. B, E and F were from the official website of Insects Limited.

2 信息素与文物害虫防治

2.1 信息素在文物害虫防治中的作用

随着IPM理念的引入和储藏物害虫信息素的研究推进，20世纪80年代开始，陆续出现了利用信息素防治文物害虫的报道。防治对象有烟草甲 *L. serricorne* (Levinson and Buchelos, 1988; Gilberg

and Roach, 2013)、白腹皮蠹 *Dermestes maculatus* (Abdel-Kader and Barak, 1979)、*Anthrenus sarnicus* Mroczkowski (Finnegan and Chambers, 1993)、家具窃蠹 *A. punctatum* (White and Birch, 1987)、衣蛾 *T. bisselliella*, *T. pellionella* (Brimblecombe *et al.*, 2013) 等。相对于其它的害虫捕集方式，信息素表现出了显著的优势，主要表现在于监测虫情、诱捕和迷向三个方面。

1) 虫情监测

作为虫情监测手段,信息素特异性更强,尤其是在虫口密度较低或者害虫刚发生时(孟宪佐,1997; Reddy and Guerrero, 2001; 王香萍等,2004)。在虫口密度大时,会因释放信息素的个体增加,环境中信息素浓度变大,而导致诱集效果降低。信息素虫情监测可以估计害虫密度,还可以更深入地了解害虫的发生期、发生量、分布区和危害程度,为确定防治区域、防治时间和防治方法提供依据(杜家伟,1988),还可以预测害虫发展趋势(Brimblecombe and Brimblecombe, 2015)。

2) 诱杀

信息素的诱杀作用主要表现在两个方面:第一,信息素诱捕效果更好。研究表明,在有信息素诱捕的条件下,诱捕到的害虫数量接近对照组的6倍(Child and Pinniger, 2013)。第二,实现虫害的治理。通过诱杀能够减少繁殖下一代的基数,显著减少下一代发生的虫量。尤其适用于雌雄比例接近1:1,且雌雄均为单次交配的害虫(于宝生等,2006)。

3) 迷向

早在1960年,Beroza就提出迷向的设想(Beroza, 1960),即通过在目标地域充分喷洒人工信息素,使雄性昆虫无法准确找到雌性交配,延迟交配时间或者降低交配机率。迷向可显著减少下代基数,减轻其危害。迷向技术有两种干扰方式:竞争干扰和非竞争干扰。竞争干扰是使雄性无法找到正确的方向。非竞争干扰通常是通过掩盖昆虫自身的信息素来扰乱雄性昆虫的方向感,阻止或延迟昆虫交配。迷向需要使用大量的人工信息素,成本较高,通常在杀虫剂产生抗性或在一些环境敏感地区使用。

2.2 现阶段应用中的问题

现阶段我国将昆虫信息素应用于文物害虫监测还不广泛,而且通常引进应用的博物馆或者库房管理人员并没有很强的专业背景。加上文物害虫种类多,文物库房环境复杂,常常在利用过程中产生一些问题。

2.2.1 诱捕器选择与放置问题

诱捕器是实现害虫捕集与监测的关键,使用正确的诱捕器可以得到更好的诱捕效果。目前市场上诱捕器多种多样,有的是功能上的区别,有的是放置位置的不同,还有的主要体现在形状、

颜色上的不同。选择诱捕器要根据害虫的生活习性,例如飞行的衣蛾,使用悬挂式诱捕器最佳;衣鱼、书虱、皮蠹幼虫主要是爬行,诱捕器则不需要悬挂。

诱捕器放置要结合环境条件,纸质粘虫板是最常用的诱捕器,放置时应尽量放置在干燥的地方,因为潮湿的环境容易引起霉变。灰尘、碎屑较多的地方要使用塑料泡式,因为纸质诱捕器会粘到太多灰尘、碎屑而失去捕集作用(Brimblecombe *et al.*, 2013)。

2.2.2 检查与更换问题

在文物库房与展厅中常见到放置时间久远的诱捕器,粘满了灰尘与被蛀食的虫体。其实害虫的信息素诱芯的持效期一般在1~2个月,持效期过后,其诱捕效果会消失,因此应该在持效期结束前及时更换。但文物害虫与环境较为复杂,若出现以下情况时,应缩短放置时间:

第一,诱捕器表面粘附虫体较多时,要避免皮蠹、蜚蠊等害虫取食诱捕器上的昆虫尸体,导致害虫滋生。

第二,开放性的诱捕器放置在皮蠹发生区时,因为皮蠹的耐饥饿能力强,如不及时更换,幼虫会通过蜕皮逃逸,继续对文物造成危害。

第三,灰尘较大的地方要勤更换,避免灰尘覆盖粘虫胶,而降低诱捕效率。

第四,环境潮湿时,因为衣鱼、蜚蠊的诱芯及纸质诱捕器在潮湿的环境下容易发生霉变。

2.3 信息素与其它技术联合应用

2.3.1 信息素与寄主植物挥发物联用

寄主植物挥发物是昆虫寄主植物释放的挥发性物质,包括其自身主动释放和虫害诱导之后被动释放的挥发物。这些挥发物对昆虫的取食、交配、聚集、产卵、栖息等行为具有诱导作用。例如圆皮蠹、木蜂等会在寄主植物挥发物的作用下寻找蜜源。

信息素同寄主植物挥发物联用,可增强对害虫的诱捕效果。因为寄主植物挥发物能够刺激昆虫信息素的合成,并提高释放速率(巩雪芳等,2018)。而且寄主植物挥发物还可以增强昆虫对性、聚集、示踪、报警等多种信息素的反应(杜永均和严福顺,1994)。所以性信息素与寄主植物挥发物混合的诱芯可有效引诱昆虫聚集取食和选择交配地点(Xu and Turlings, 2018),而且可以同时雌、雄两性个体都有引诱作用(Gregg *et al.*, 2018)。

针对文物害虫防治,则以具有驱避作用的植物挥发物应用较多,例如樟木 *Cinnamomum longepaniculatum*、芸香 *Ruta graveolens* L. 等都常用于驱避害虫,而寄主植物挥发物研究较少。仅有部分以保护储藏物为目的的害虫寄主植物挥发物有所研究,如小麦麦芽油对黑斑皮蠹 *Togoderma glabrum* Herbst 有引诱聚集作用 (Nara *et al.*, 2002)。辣椒挥发物对烟草甲 *L. serricorne* 具有引诱作用 (Guarino *et al.*, 2020), 将信息素与辣椒果粉联合使用可以显著增加诱捕效果 (Mahroof and Phillips, 2007)。

2.3.2 增加信息素与昆虫病原微生物联用

昆虫病原微生物包括真菌、细菌、病毒、立克次氏体、原生动物和线虫等。利用病原微生物防治害虫有着很长的研究历史。最早的记录可以追溯到 1879 年,俄罗斯生物学家 Metchnikoff 利用金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* Sorokin 防治金龟子幼虫 (Zimmermann *et al.*, 2010)。现在利用昆虫病原微生物开发的微生物药剂是重要的害虫生物防治方法之一。其中苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*、白僵菌 *Beauveria* sp.、绿僵菌 *Metarhizium* sp. 应用较为广泛。该方法具有对环境友好,特异性强,不伤害天敌等优点。

若信息素与病原微生物联合使用,可利用被引诱个体,将病原微生物传染给种群其他个体,实现控制虫害的目的。早在 1966 年,黑斑皮蠹 *T. glabrum* 信息素研究时, Burkholder 等便提出这一设想 (Burkholder and Dicke, 1966)。之后试验也证明了该方法的可行性,例如皮蠹多房簇虫 *Mattesia trogodrmae* Canning 可以寄生多种斑皮蠹, Shapas 在模拟仓库条件下,将其与黑斑皮蠹信息素联用,起到了显著的控制效果 (Shapas *et al.*, 1977); 4, 6-二甲基-7-羟基壬烷-3 酮与蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* Frankland *et* Frankland 配合,可防治烟草甲 *L. serricorne* (沈兆鹏, 1997); 白僵菌防治花斑皮蠹 *T. variabile* 也取得了较好的效果 (浦冠勤和毛建萍, 2006)。

尽管昆虫病原微生物有着很强的特异性,对文物相对安全,但是在应用时仍然面临着种种问题。最重要的是昆虫病原微生物喜高湿环境。例如,在相对湿度不足 90% 时使用,锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* Linnaeus 感染球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill 概率低,无法实现控制目的 (Searle and Doberski, 1984)。而高湿环

境并不利于文物资源的保护。此外,病原微生物作用慢,也制约其应用到文物杀虫。

2.3.3 信息素与光诱技术联用

光诱技术是利用昆虫趋光特性引诱捕获害虫的技术。尽管昆虫趋光性的具体原因尚不清楚,但随着相关研究的不断深入,灯诱技术开始应用于农田、林业、果园、茶园的害虫监测。该技术具有高效、环保、无残留、不产生抗性、诱集范围和诱虫谱广的优点。诱虫灯的分类比较多,针对不同害虫对光线频率趋性差异的不同波段的诱虫灯;因光源不同,又可分为汞灯、白炽灯、LED 等;按照击杀害虫的方式可分为电击式、水溺式、粘连式、毒瓶式等。

光诱技术与信息素都是有效的害虫监测技术,两种技术联合可以显著增加诱捕效果。性信息素诱捕搭配诱虫灯可以解决性信息素只对单性害虫具有吸引力问题。Takahisa 曾证实 UV-LED 灯结合性信息素是监测和控制烟草甲 *L. serricorne* 的最佳方案 (Takahisa *et al.*, 2016)。诱虫灯还可以弥补害虫虫口密度大时,信息素诱捕效率低下问题 (王守宝等, 2018)。近年来,结合光、波、色 (各种颜色的粘虫板)、味 (信息素) 4 种诱杀方式的频振式杀虫灯,因诱杀害虫种类多,数量大而得到了开发与推广 (王守宝等, 2018)。

文物害虫多数对光线具有负趋性,如衣鱼、衣蛾 (Cox and Pinniger, 2007) 等;只有部分文物害虫成虫具有明显的趋光性,如烟草甲 *L. serricorne*、药材甲 *S. paniceum* 对紫外具有趋向性 (Hironaka *et al.*, 2017)。但紫外线会加速有机质文物的老化。皮蠹比较特殊,早期对 *Trogoderma tarsale* Mels、地毯圆皮蠹 *Anthrenus scrophularia* Linnaeus 和黑皮蠹 *Attagenus piceus* Olivier 3 种皮蠹的研究表明,它们多数对光线具有负趋性。但产卵后,对光的趋性产生了逆转 (Woodsdalek, 1913)。可见,光诱技术在文物害虫的防治中应用前景有限。综合光、波、色、味的频振灯技术应用价值较高,但会带来用电安全问题,光的存在也会对文物造成一定的影响。

2.3.4 “Push-Pull”策略

“Push-Pull”策略,即“推-拉”策略,是 IPM 的重要措施。其原理是将驱避剂、抑制剂和驱避色等作为 Push 力量,将引诱剂、刺激剂和诱集色等作为 Pull 力量,根据害虫种类及保护对象进行技术模型的组合,将害虫控制在特定的区域,

或采取其他措施进一步控制害虫数量或繁殖,以减轻害虫对目标的为害(林强,2015)。

该策略最早出现在 20 世纪 80 年代,Pyke 等同时利用棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner 趋避剂和引诱剂对其进行行为控制,收到了很好的控制效果,并命名为“Push-Pull”(Pyke *et al.*, 1987)。1990 年,Miller 和 Cowles 将“Push-Pull”策略命名为引诱—排斥牵制(Stimulo-Deterrent Diversionary, SDD)策略(Miller and Cowles, 1990)。因“Push-Pull”更加简洁形象,之后便被推广开来(Cook *et al.*, 2007)。

信息素是“Push-Pull”模型中的最佳的调控物质。报警信息素、抑制聚集信息素有 Push 作用,聚集信息素和性信息素具有 Pull 力量。早期研究中,将马鞭草烯酮作为抑制聚集信息素,构成

Push 作用;将反式-马鞭草烯醇、性信息素、月桂烯组合作为聚集信息素,构成 Pull 作用,有效控制中欧山松大小蠹 *Dendroctonus ponderosae* Hopkins 的危害(Gillette *et al.*, 2012)。

“Push-Pull”策略在实施时,通常是将可释放不同作用物质的粘虫板、植物或者装置相互间隔放置(图 3-A),Push 力迫使害虫远离被保护对象,而 Pull 力作用则可以吸引害虫,实现诱集捕杀。一推一拉,诱捕更多的害虫,以实现更好的害虫防治。若在文物旁或古建筑内放置 Push 调节物质,而在不远处放置 Pull 调节物质,便可构成文物古建筑“Push-Pull”模型(图 3-B),使防治效率更高,文物更加安全。同时也可以避免在害虫群体较大时,吸引和排斥作用因个体较多产生干扰,效力减弱的问题。

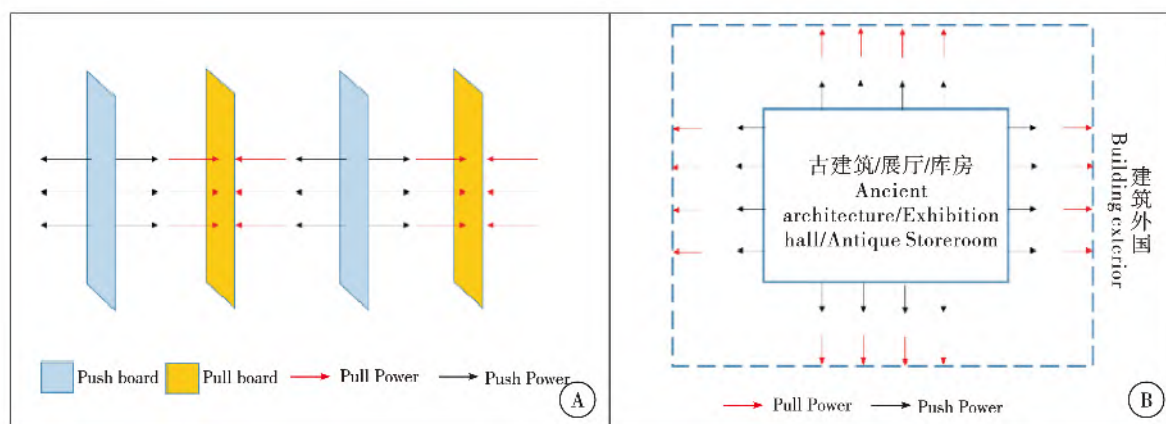


图 3 “Push-Pull” 害虫防治模型

Fig. 3 “Push-Pull” pest control model

注: A, 基本模型; B, 文物害虫防治模型。Note: A, Basic model; B, Control model of pests of culture relics.

3 问题与展望

文物是向后人展示文化演变传承的重要媒介,保护好文物,对建设文化强国,增强文化自信至关重要。实现“让文物活起来”的任务,首要任务是保护好文物。信息素是高效的害虫监测手段,可以帮助我们及早地发现害虫,及时控制害虫隐患。其绿色、环保、高效的特性,亦可将对人与环境的伤害降到最低。经过多年的努力,多数文物害虫的信息素类物质的主要成分已经得到证实,且成为了欧美国家博物馆内害虫监测控制的主要技术手段。但该技术在我国文物害虫防治的广泛应用中面临着以下两个问题:

第一,成本问题。现阶段我国并没有用于防治文物害虫的商业化信息素产品,这些产品被欧美垄断,以美国的 Insects Limited 和英国的 Russell IPM 为主。单一害虫品种的信息素产品价格是国产农林害虫信息素诱芯的几十倍。而且信息素需要频繁更换,自然就增加了管理成本。

第二,信息素的监测能力强,但害虫防治周期长。信息素的诱捕能力强,比黑光灯更为灵敏(盛承发等,2001;汪诗凯等,2018)。但在灭杀害虫,控制害虫数量方面,往往到下一代时才能显现(马涛等,2018)。而且农林害虫防治适用的经济阈值对于不可再生的珍贵文物资源而言并不适用。所以在相对较长的控制周期中,依然对文物资源存在着威胁。

尽管信息素防治文物害虫存在一定的问题,但依然有着很强的应用价值。对于隐蔽性极强的文物害虫,信息素是一种优秀的监测手段。在探寻害虫分布与发生规律方面的优势便于更好地寻找灭杀方法与灭杀时机。近些年,基于图像的害虫自动计数与识别技术和基于红外传感的计数技术都得到了发展(陈梅香等,2015),美国 Insects Limited 公司已经推出结合信息素与远程传输技术的文物害虫诱捕器,实现了实时远程的害虫监测。加强文物害虫寄主植物挥发物研究,配合信息素共同使用,可以增强监测的效果。此外,“Push-Pull”模型可以实现将害虫驱离文物,更大限度降低害虫为害,有着很好的应用前景。

参考文献 (References)

- Abdel-Kader MM, Barak AV. Evidence for a sex pheromone in the hide beetle, *Dermestes maculatus* (De Geer) (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1979, 5 (5): 805–813.
- Berisford CW, Wakarchuk D, Dalusky MJ, et al. Field evaluations of potential aggregation inhibitors for the southern pine beetle, *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. *Journal of Entomological Science*, 2007, 42 (2): 139–149.
- Beroza M. Insect attractants are taking hold [J]. *Agricultural and Chemistry*, 1960, 15 (7): 37.
- Bethe A. Vernachlässigte hormone [J]. *Die Naturwissenschaften*, 1932, 20 (11): 177–181.
- Brimblecombe P, Brimblecombe CT. Trends in insect catch at historic properties [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2015, 16 (2): 127–133.
- Brimblecombe P, Brimblecombe CT, Thickett D, et al. Statistics of insect catch within historic properties [J]. *Heritage Science*, 2013, 1 (1): 34.
- Burkholder WE, Dicke RJ. Evidence of sex pheromones in females of several species of Dermestidae [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1966, 59 (3): 540–543.
- Butenandt A, Beckmann R, Stamm D, et al. On the sex pheromone of the silkworm moth *Bombyx mori* isolation and structure [J]. *Zeitschrift Fur Naturforschung Section B – A Journal of Chemical Sciences*, 1959, 14: 283–284.
- Chen MX, Yang XT, Shi BC, et al. Research progress and prospect of technologies for automatic identifying and counting of pests [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2015, 37 (1): 176–183.
- 陈梅香, 杨信廷, 石宝才, 等. 害虫自动识别与计数技术研究进展与展望 [J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37 (1): 176–183.
- Child RE, Pinniger DB. Insect trapping in museums and historic houses [J]. *Studies in Conservation*, 2013, 39 (Suppl. 2): 129–131.
- Chuman T, Mochizuki K, Mochizuki K, et al. Serricorone and serricorole, new sex pheromone components of cigarette beetle [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 2014, 47 (6): 1413–1415.
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA. The use of push – pull strategies in integrated pest management [J]. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52 (1): 375–400.
- Cox PD, Pinniger DB. Biology, behaviour and environmentally sustainable control of *Tineola bisselliella* (Hummel) (Lepidoptera: Tineidae) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (1): 2–32.
- Cross JH, Byler RC, Cassidy RF, et al. Porapak – Q collection of pheromone components and isolation of (Z) – and (E) – 14 – methyl – 8 – hexadecenal, sex pheromone components, from the females of four species of *Trogoderma* (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1976, 2 (4): 457–468.
- Dai HG, Shi XF, Li YX. Application of aggregation pheromone in quarantine of bark beetles [J]. *Plant Quarantine*, 2004, 5: 294–296.
- 戴华国, 史晓芳, 李元喜. 聚集信息素在小蠹虫检疫中的应用 [J]. *植物检疫*, 2004, 5: 294–296.
- Du JW. Insect Pheromones and Their Applications [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1988: 133–136.
- 杜家伟. 昆虫信息素及其应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1988: 133–136.
- Du YJ, Yan FS. The role of plant volatiles in tritrophic interaction among phytophagous insects, their host plants and natural enemies [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 1994, 2: 233–250.
- 杜永均, 严福顺. 植物挥发性次生物质在植食性昆虫、寄生植物和昆虫天敌关系中的作用机理 [J]. *昆虫学报*, 1994, 2: 233–250.
- Ebata T, Mori K. Synthesis and absolute configuration of serricorole and serricorone, sex pheromone components of cigarette beetle [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 2016, 51 (11): 2925–2928.
- Finnegan DE, Chambers J. Identification of the sex pheromone of the guernsey carpet beetle, *Anthrenus sarnicus* Mroczkowski (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19 (5): 971–983.
- Fukui H, Matsumura F, Ma MC, et al. Identification of the sex pheromone of the furniture carpet beetle, *Anthrenus flavipes* LeConte [J]. *Tetrahedron Letters*, 1974, 15 (40): 3563–3566.
- Gilberg M, Roach A. The use of a commercial pheromone trap for monitoring *Lasioderma serricorne* (F.) infestations in museum collections [J]. *Studies in Conservation*, 2013, 36 (4): 243–247.
- Gillette NE, Mehmehl CJ, Mori SR, et al. The push – pull tactic for mitigation of mountain pine beetle (Coleoptera: Curculionidae) damage in lodgepole and whitebark pines [J]. *Environmental Entomology*, 2012, 41 (6): 1575–1586.
- Gong XF, Xie SA, Che XR, et al. Relationship between insect pheromone and host volatiles in green control and research progress review [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2018, 46 (5): 91–98.
- 巩雪芳, 谢寿安, 车显荣, 等. 昆虫信息素与寄主挥发物在绿色防控中的关系及研究进展 [J]. *陕西林业科技*, 2018, 46 (5): 91–98.

- Gregg PC, Del Socorro AP, Landolt PJ. Advances in attract-and-kill for agricultural pests: Beyond pheromones [J]. *Annual Review of Entomology*, 2018, 63: 453 – 470.
- Guarino S, Basile S, Caimi M, *et al.* Insect pests of the herbarium of the Palermo Botanical Garden and evaluation of semiochemicals for the control of the key pest *Lasioderma serricorne* F. (Coleoptera: Anobiidae) [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2020, 43: 37 – 44.
- Hironaka M, Kamura T, Osada M, *et al.* Adults of *Lasioderma serricorne* and *Stegobium paniceum* (Anobiidae: Coleoptera) are attracted to ultraviolet (UV) over blue light LEDs [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (4): 1911 – 1915.
- Karlson P, Luscher M. Pheromones? A new term for a class of biologically active substances [J]. *Nature*, 1959, 183 (4653): 55 – 56.
- Kartika T, Shimizu N, Yoshimura T. Identification of esters as novel aggregation pheromone components produced by the male powder – post beetle, *Lyctus africanus* Lesne (Coleoptera: Lyctinae) [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10 (11): e0141799.
- Kinzer GW, Fentiman AF, Page TF, *et al.* Bark beetle attractants: Identification, synthesis and field bioassay of a new compound isolated from *Dendroctonus* [J]. *Nature*, 1969, 221 (5179): 477 – 478.
- Korada RR, Griepink FC. Aggregation pheromone compounds of the black larder beetle *Dermestes haemorrhoidalis* Kuster (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Chemoecology*, 2009, 19 (3): 177 – 184.
- Kuwahara Y, Fukami H, Howard R, *et al.* Chemical studies on the anobiidae: Sex pheromone of the drugstore beetle, *Stegobium paniceum* (L.) (Coleoptera) [J]. *Tetrahedron*, 1978, 34 (12): 1769 – 1774.
- Kuwahara Y, Nakamura S. (Z) – 5 – and (E) – 5 – undecenoic acid: Identification of the sex pheromone of the varied carpet beetle, *Anthrenus verbasci* L. (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1985, 20 (3): 354 – 356.
- Levinson AR, Buchelos CT. Population dynamics of *Lasioderma serricorne* F. (Col., Anobiidae) in tobacco stores with and without insecticidal treatments: A three year – survey by pheromone and unbaited traps [J]. *Journal of Applied Entomology*, 1988, 106 (1 – 5): 201 – 211.
- Li XY, Dong SH, Tan K. The biological activity test of the *Apis cerana* alarm pheromones [J]. *Apiculture of China*, 2016, 67 (4): 17 – 19. [李新宇, 董诗浩, 谭垦. 中华蜜蜂报警信息素的生物活性检测 [J]. *中国蜂业*, 2016, 67 (4): 17 – 19]
- Lin Q. Insect semiochemicals and the prospects of their applications in pest insect integrated management [J]. *Forest Pest and Disease*, 2015, 34 (1): 38 – 42. [林强. 昆虫信息化学物质及其在综合治理中应用的前景 [J]. *中国森林病虫*, 2015, 34 (1): 38 – 42]
- Linnie M. Pest control: A survey of natural history museums in Great Britain and Ireland [J]. *Museum Management and Curatorship*, 1987, 6 (3): 277 – 290.
- Ma T, Lin N, Zhou LL, *et al.* Research progress and application prospect of insect sex pheromone mating disruption [J]. *Forest Research*, 2018, 31 (4): 172 – 182. [马涛, 林娜, 周丽丽, 等. 性信息素迷向干扰防控害虫的研究进展及应用前景 [J]. *林业科学研究*, 2018, 31 (4): 172 – 182]
- Mahroof RM, Phillips TW. Orientation of the cigarette beetle, *Lasioderma serricorne* (F.) (Coleoptera: Anobiidae) to plant – derived volatiles [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2007, 20 (1): 99 – 115.
- Meng XZ. Application of insect sex pheromones [J]. *Bulletin of Biology*, 1997, 3: 46 – 47. [孟宪佐. 昆虫性信息素的应用 [J]. *生物学通报*, 1997, 3: 46 – 47]
- Miller JR, Adams CG, Weston PA. *et al.* Trapping of Small Organisms Moving Randomly: Principles and Applications to Pest Monitoring and Management [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 103 – 109.
- Miller JR, Cowles RS. Stimulo – deterrent diversion: A concept and its possible application to onion maggot control [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16 (11): 3197 – 3212.
- Mori K, Senda S. Synthesis of the enantiomers of cis – 2 – methyl – 5 – hexanolide, the major component of the sex pheromone of the carpenter bee [J]. *Tetrahedron*, 1985, 41 (3): 541 – 546.
- Nara JM, Lindsay RC, Burkholder WE. Analysis of volatile compounds in wheat germ oil responsible for an aggregation response in *Trogoderma glabrum* larvae [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 29 (1): 68 – 72.
- Pinniger D. Saving our heritage – pest management in museums and historic houses [J]. *Outlooks on Pest Management*, 2010, 21 (5): 239 – 241.
- Pinniger DB, Child RE, Chambers J. Attractant pheromones of museum insect pests [J]. *AICCM Bulletin*, 2014, 28 (1): 4 – 10.
- Pirkle WH, Adams PE. Synthesis of the carpenter bee pheromone. Chiral 2-methyl-5-hydroxyhexanoic acid lactones [J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1978, 43 (2): 378 – 379.
- Pu GQ, Mao JP. List of Chinese silk storage pests and comprehensive management – list of silk storage pests [J]. *Journal of Silk*, 2006, 4: 36 – 39. [蒲冠勤, 毛建萍. 中国蚕丝仓储害虫名录及综合治理——蚕丝仓储害虫名录 [J]. *丝绸*, 2006, 4: 36 – 39]
- Pyke B, Rice M, Sabine B, *et al.* The push-pull strategy-behavioural control of *Heliothis* [J]. *Australian Cotton Grower*, 1987, 9 (1): 7 – 9.
- Reddy GVP, Guerrero A. Optimum timing of insecticide applications against diamondback moth *Plutella xylostella* in cole crops using threshold catches in sex pheromone traps [J]. *Pest Management Science*, 2001, 57 (1): 90 – 94.
- Rossi R, Salvadori PA, Carpita A, *et al.* Synthesis of the (r) (–) enantiomers of the pheromone components of several species of *Trogoderma* (Coleoptera: Dermestidae) [J]. *Tetrahedron*, 1979, 35 (17): 2039 – 2042.
- Ryohei Y. Structure elucidation of Koiganal I and 2, the sex pheromones of the webbing clothes moth, using capillary GC/MS [J]. *Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan*, 1985, 33 (3): 189 – 195.
- Sciarretta A, Calabrese P. Development of automated devices for the

- monitoring of insect pests [J]. *Current Agriculture Research Journal*, 2019, 7 (1): 19–25.
- Searle T, Doberski J. An investigation of the entomogenous fungus *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. as a potential biological control agent for *Oryzaephilus surinamensis* (L.) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1984, 20 (1): 17–23.
- Shao Y, Lu YJ. The confirmation and components identification of sex pheromone of female *Leposcelis entomophila* [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 26 (5): 43–46, 50. 邵颖, 鲁玉杰. 嗜虫书虱雌性信息素的确定和主要成分的鉴定 [J]. *河南工业大学学报 (自然科学版)*, 2005, 26 (5): 43–46, 50
- Shapas TJ, Burkholder WE, Mallory BG. Population suppression of *Trogoderma glabrum* by using pheromone luring for protozoan pathogen dissemination [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1977, 70 (4): 469–474.
- Shen ZP. The new method for control stored-product insects-biological control [J]. *Grain Storage*, 1997, 2: 26–30. 沈兆鹏. 储粮害虫防治新方法——生物防治法 [J]. *粮食储藏*, 1997, 2: 26–30
- Sheng CF, Xuan WJ, Su JW, et al. Comparison of numbers of cotton bollworm moths caught in water traps baited with pheromone vs blacklight traps [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 5: 5–7. 盛承发, 宣维健, 苏建伟, 等. 性信息素水盆诱捕器和黑光灯诱捕棉铃虫成虫数量的比较 [J]. *生态学杂志*, 2001, 5: 5–7
- Silverstein RM, Rodin JO, Burkholder WE, et al. Sex attractant of the black carpet beetle [J]. *Science*, 1967, 157 (3784): 85–87.
- Story KO. Approaches to Pest Management in Museums [M]. Suitland: Smithsonian Institution, 1985: 65–68.
- Takahisa M, Tomoyuki Y, Taro F, et al. Monitoring and detecting the cigarette beetle (Coleoptera: Anobiidae) using ultraviolet (LED) direct and reflected lights and/or pheromone traps in a laboratory and a storehouse [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109 (6): 2551–2560.
- Van RA. Pheromones: A resourceful tool in modern urban pest management. In: Dhang P, ed. *Urban Pest Management: An Environmental Perspective* [C]. Wallingford: International, 2011: 169–186.
- Wang SB, Xu YW, Zhang YH, et al. Study on the monitoring effect of sex pheromone and pest forecast lamp on the adult of *Conogethes punctiferalis* (Guenée) in corn field [J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2018, 6 (12): 35–37. 王守宝, 徐永伟, 张玉华, 等. 性信息素和虫情测报灯对玉米田桃蛀螟成虫的监测效果研究 [J]. *基层农技推广*, 2018, 6 (12): 35–37
- Wang SK, Zhang JH, Zhou P, et al. Application of optics, acoustics and pheromone in insect monitoring [J]. *Plant Quarantine*, 2018, 32 (4): 10–17. 汪诗凯, 张俊华, 周萍, 等. 光、声和信息素在昆虫监测中的应用 [J]. *植物检疫*, 2018, 32 (4): 10–17
- Wang XP, Zhang ZN, Lei CL, et al. Mass trapping and control efficacy on the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) with synthetic sex pheromone lures at high altitudes in Hubei [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2004, 1: 135–140. 汪香萍, 张钟宁, 雷朝亮, 等. 湖北高海拔地区性信息素对小菜蛾的诱捕和防治效果 [J]. *昆虫学报*, 2004, 1: 135–140
- White PR, Birch MC. Female sex pheromone of the common furniture beetle *Anobium punctatum* (Coleoptera: Anobiidae): Extraction, identification, and bioassays [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1987, 13 (7): 1695–1706.
- Woodsdalek JE. The reactions of certain dermestidae to light in different periods of their life history [J]. *Journal of Animal Behavior*, 1913, 3 (1): 61–64.
- Wood DL, Browne LE, Ewing B, et al. Western pine beetle: Specificity among enantiomers of male and female components of an attractant pheromone [J]. *Science*, 1976, 192 (4242): 896–898.
- Woodbury N, Gries G. Pheromone-based arrestment behavior in the common silverfish, *Lepisma saccharina*, and giant silverfish, *Ctenolepisma longicaudata* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33 (7): 1351–1358.
- Woodbury N, Gries G. Amber-colored excreta: A source of arrestment pheromone in firebrats, *Thermobia domestica* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2008, 127 (2): 100–107.
- Xu H, Turlings TCJ. Plant volatiles as mate-finding cues for insects [J]. *Trends Plant Science*, 2018, 23 (2): 100–111.
- Yang H, Zhang JT. Study on the biological activity and application of aggregation pheromone of *Blattella germanica* [J]. *Acta Parasitologica et Medica Entomologica Sinica*, 2005, 1: 31–36. 杨惠, 张金桐. 德国小蠊聚集信息素的生物活性与应用研究 [J]. *寄生虫与医学昆虫学报*, 2005, 1: 31–36
- You Y, Zhang ZX. Progress on the research of aphid alarm pheromone [J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2005, 32 (6): 57–59. 游越, 张钟究. 蚜虫报警信息素的合成及研究进展 [J]. *云南化工*, 2005, 32 (6): 57–59
- Yu BS, Liu HW, Nie DD, et al. Principle of control aspen clear wings with sex pheromone [J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2006, 3: 72–73. 于宝生, 刘宏伟, 聂丹丹, 等. 性信息素防治白杨透翅蛾的原理及取得成功原因研究 [J]. *黑龙江环境通报*, 2006, 3: 72–73
- Zhang GX, Zheng G, Li XJ, et al. Discussion of using frequency trembler grid lamps from angle of protecting biodiversity [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2004, 6: 532–535. 张广学, 郑国, 李学军, 等. 从保护生物多样性角度谈频振式杀虫灯的应用 [J]. *昆虫知识*, 2004, 6: 532–535
- Zhang JS. Red palm weevil aggregation pheromone trap and kill a large number of control techniques [J]. *Hunan Agricultural Machinery*, 2011, 38 (5): 219–220. 张炯森. 红棕象甲聚集信息素大量诱杀防治技术研究 [J]. *湖南农机*, 2011, 38 (5): 219–220
- Zhang YH, Li KB, Kong LQ, et al. Application test of pheromone in quarantine of imported wood [J]. *Plant Quarantine*, 2008, 3: 161–162. 张永宏, 李凯兵, 孔令清, 等. 信息素在进口木材检疫中的应用试验 [J]. *植物检疫*, 2008, 3: 161–162