应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2019, 56(6): 1193–1205. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2019.129

我国城市昆虫学研究的回顾与展望*

魏丹丹[1,2**] 苗泽青[1,2] 涂艳清[1,2] 何 旺[1,2]
王 磊[1,2] 豆 威[1,2] 王进军[1,2***]

（1. 昆虫学与害虫控制工程重庆市重点实验室，西南大学植物保护学院，重庆 400715；2. 西南大学农业科学研究院，重庆 400715）

摘 要 我国城市昆虫学的研究兴起于 20 世纪 80 年代中期，此后，该领域的研究获得了长足的进展。城市生态系统不同于自然或农业生态系统，特别是城市化的进程对城市昆虫的生物学特性造成显著影响，致使城市害虫拥有自身的特点，其综合治理的理念和措施也相应有所变化。城市害虫主要包括卫生害虫、仓储害虫、园林害虫等，相关领域的研究也日益成为昆虫学家关注的焦点。本文从城市昆虫在城市化作用下的生物生态学基础、城市害虫群落发生特点、基因组测序概况、抗性分子机制以及城市害虫综合治理体系等方面入手，阐述城市害虫暴发成灾的内因及其抗性综合治理策略的制定原则。同时，本文对城市昆虫学未来研究方向和防控策略进行了展望，以期为我国城市害虫生物学特性及其防控策略的制定提供依据。此外，文中还讨论了基于分子生物学或昆虫不相容技术的具有应用前景的几种防控策略。

关键词 城市害虫；抗性机制；害虫综合治理；仓储害虫；园林害虫

Advances in, and future prospects for, urban entomology in China

WEI Dan-Dan[1,2**] MIAO Ze-Qing[1,2] TU Yan-Qing[1,2] HE Wang[1,2]
WANG Lei[1,2] DOU Wei[1,2] WANG Jin-Jun[1,2***]

(1. Key Laboratory of Entomology and Pest Control Engineering, College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract The study of urban entomology in China began in the mid-1980s and great progress has since been made in this field. Urban ecosystems differ from natural or agricultural ecosystems because urbanization has a significant impact on the biology of urban insects. Urban pests have their own characteristics, and the concepts and methods of integrated pest management therefore need to be modified to suit urban environments. Urban pests mainly include health pests, storage product pests and garden pests. Research on urban pests has increasingly become of interest to entomologists. In this review, we mainly focus on the ecological traits of urban insects, the characteristics of the urban pest community, the status of genome sequencing, molecular mechanisms of resistance and integrated pest management in urban ecosystems. We also describe the internal causes of urban pest outbreaks and the principles for formulating integrated pest control strategies. Meanwhile, future research directions and prospects for new control methods for urban pests are discussed to provide a basis for developing new control strategies for these pests in China. Finally, we also discuss several control strategies based on molecular, or insect incompatibility, technology that could be promising additions to future urban IPM programs.

Key words urban insect pest; resistance mechanism; integrated pest management; stored product pest; garden pest insects

现代化城市是一个以人为中心的自然、人文和经济生态系统，并具不同层次结构、封闭或半封闭的特殊生态环境。昆虫是城市生态环境中最为重要的生物群落成员之一。从 20 世纪 60 年代

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31972276）；西南大学中央高校基本科研业务费（XDJK2018B041）；重庆市基础与前沿研究计划（cstc2015jcyjA80009）

**第一作者 First author，E-mail：weidandande@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：wangjinjun@swu.edu.cn

收稿日期 Received：2019-10-03；接受日期 Accepted：2019-10-08

开始，“城市生态学”作为一门新的学科在西方发达国家应运而生。随着城市科学研究范围的不断扩大，20 世纪 70 年代中后期出现了“城市昆虫学”的概念，其业已成为昆虫学的一个新的领域。1978 年，美国加州大学 Walter Ebeling 教授编著的《城市昆虫学》（Urban Entomology）专著问世，标志着城市昆虫学研究的兴起。我国城市昆虫学的相关研究起步较晚，虽然之前已有关于城市相关昆虫的生态、行为以及防治技术的研究报道，但并未上升到“城市昆虫学”的学科层次（王铨铭，1992）。如柳支英（1950）撰文介绍建筑设计可采用有抗力的木材来预防白蚁的危害；张祯祥（1956）指出白蚁生物学规律的研究是其物理或化学防治措施的基础，而针对农业害虫防治的方法对白蚁防控难以达到良好的效果（任庆伟等，2016）。直到 20 世纪 80 年底中后期，城市昆虫学研究在我国才受到重视并系统开展。1985 年，在重庆成立了“城市害虫控制中心及财贸系统的仓虫联合治理组”；1987 年，中国昆虫学会增设了“城市昆虫专业委员会”，以引导我国城市昆虫学的研究与发展（封昌远，1992）。

我国昆虫学者对城市昆虫学的定义是“在城市生态环境中，以昆虫为研究对象，具体研究城市生态系统中昆虫区系的组成和演变，城市环境与城市昆虫之间相互作用机制以及城市昆虫与人类的利害关系，从而掌握其生理、生态，开展综合利用与控制的一门新兴的综合性边缘学科”（张有森等，2000）。城市化对昆虫群落的影响显而易见。城市昆虫物种多样性与城市环境的异质性紧密相关，如城市环境为昆虫提供了多样的栖息地（往往是不连续的）和丰富的食物资源（Frankie and Ehler，1978）。如水资源管理设施的利用，为蚊虫提供了良好的栖息环境；住房、空调等生活设施，为害虫提供了更多的栖息场所以及越冬环境；生活垃圾等为蜚蠊（蟑螂）、蚂蚁等提供了充足的食物；而人口的频繁流动，进一步加速了害虫的分布与扩散。

2000 年，世界上 52%的人口生活于城市之中；预计到 2050 年，这一比例预计将达到 70%（约 63 亿人生活于城市地区）。据统计，2018 年我国城镇人口占人口总比例的 59.6%，具有城市化速度快、变化大、要求高的特点。为了改善城市居住地的生态环境，保障人民的健康和居住安全，提高人民的生活质量，我国城市昆虫学的研究迎来了新的机遇和挑战，尤其是在我国城市基础建设和管理与城市化快速发展步伐不十分协调的情况下，城市害虫频繁暴发已成常态，严重影响人们的生活质量和健康。如何制定可持续的城市害虫控制策略以保障人类的健康和生活质量成为当代昆虫学家的首要任务之一。目前，我国关于城市昆虫学的研究主要涵盖城市森林昆虫、卫生昆虫、仓储害虫、园林害虫以及资源昆虫等，内容涉及城市昆虫生态学、生化毒理、种群遗传与进化生物学、害虫鉴定与综合防控等。其中，研究主要集中在城市害虫的防治层面。本文较为全面地综述了我国城市昆虫学各研究领域的进展，包括城市昆虫的生态学基础、城市害虫的群落特点，城市害虫分子生物学研究及其综合治理的理念和具体措施。同时，本文对城市昆虫学基础研究和防控的发展方向进行了展望，以期为我国未来城市昆虫学的研究和防控对策提供参考。

1 城市化对城市昆虫影响的生态学基础

城市生态系统是脆弱的生态系统，是以人为核心的次生生态系统。由于人类活动形式多样，其子系统众多，情况复杂，如可分为城市仓储子系统、园林子系统、卫生子系统等（蒋书楠，2001）。目前，我国虽有一些关于特定城市生态子系统中害虫基础生物学的研究，但是比较不同城市生态子系统中害虫多样性分布规律的研究相对较少，特别是关于城市生境对非有害昆虫的研究少之又少。事实上，影响城市昆虫存亡的生态因子与农业和其他自然环境中的因子较为类似，但城市昆虫受到人类活动的直接或间接影响更多。在城市生态中，一些昆虫的种群密度会比其在自然生境中更高，这种现象就可能与人类的

活动有关。如使用农药灭杀蚊虫的同时，造成蚧类昆虫天敌大量死亡，从而致使蚧类的种群密度在城市生境中远高于自然生态系统。如埃及伊蚊 *Aedes aegpti* 已高度适应城市的生态环境，其遗传多样性在不同城市栖境中发生了分化，可形成不同的生态型。可见，昆虫对城市环境的适应既是一个过程也是一种条件，许多昆虫可能预先适应了城市环境，这种现象也称为预适应性（Preadaptation）。

城市化也会导致一些本地昆虫种群的衰退，并在沿郊区至城市中心梯度的景观环境中，其丰富度明显下降，部分种类甚至灭绝。一般而言，单食性昆虫种群数量下降，而多食性昆虫如蟑螂、白蚁、蚜虫等种群数量反而上升。就城市昆虫的生态系统服务功能而言，植食性、寄生性、腐食性和访花性昆虫对城市化的负面响应更为明显，因此其功能会有所下降（叶水送等，2013）。此外，城市化造成的生境破碎化、均质化、环境污染以及植物引种等诸多环境问题远比城市热岛效应对昆虫的影响更深刻和长远。如环境污染（大气污染、水体污染、光污染、生境破碎化、重金属、粉尘颗粒等）和入侵植物等因素影响昆虫的生长发育或繁殖，且大多表现为种群数量下降；雾霾对鳞翅目昆虫的生长发育、生存以及成虫体型大小等有一定的危害（Tan *et al.*，2018）；二氧化硫对蜜蜂等传粉昆虫有害，但对刺吸式口器害虫（如蚜虫和粉虱等）的繁殖有利。

在了解城市化对昆虫影响规律的基础上，关于城市化与昆虫多样性之间关系的科学假设有：1）昆虫物种多样性与城市污染存在负相关性，即污染加重会导致昆虫种类减少；2）昆虫在适应栖息地缺失或高度分散的环境后，往往会具有更高的生态适合度；3）新近实现城市化的地区往往具有相对较多的“预适应性”强的昆虫类群（如蚁类和蜚蠊等）；4）随着城市年龄的增长，昆虫多样性会增加且外来物种的多样性也会增加；5）与市中心相比，位于未开发的城市边缘地区往往拥有更高的昆虫多样性。就城市害虫而言，体型较小、运动能力弱且世代重叠的刺吸式害虫（如介壳虫、叶螨、蚜虫等）种群数量一般会随着城市景观格局梯度的增加而增加，且易暴发成灾（Raupp *et al.*，2010）。总之，城市昆虫的发生与种群动态变化与昆虫所处环境的小气候、寄主、食物、天敌以及人类活动等物理、生物和人为因素密切相关。并且，城市化对昆虫的丰富度、空间分布、食性及生态系统服务功能等方面也会产生影响。

2　城市害虫种群的特点及其危害

城市害虫的来源主要有引入、扩大和聚集等途径。在城市化过程中，原有自然生境的变化导致一些昆虫因丧失栖境而迁离或消亡，少数昆虫却在适应城市生境后扩大其种群。加之，城市生境中缺乏自然屏障的阻隔，极易造成昆虫主动或被动的迁移或扩散，进一步加剧城市昆虫群落发生变化。整体而言，城市害虫群落具有数量变动剧烈、岛屿性分布、演替速度快、人为因素影响大等特点（武正成等，2008）。

现代化城市设施及建筑物结构防护较好，看似不易遭受害虫侵入，其实不然，因为空调等为害虫创造了更优越的栖息繁衍环境。城市害虫与市民的生产和生活息息相关，对人类健康、食品、建筑、家具、储藏物造成重大的危害和损失，因而备受研究者的重视。城市害虫危害有愈演愈烈之势，几类常见城市害虫及其危害如下：1）白蚁类。目前，我国已记载的白蚁有 470 余种，危害严重的有 20 余种（万春晖，2017）。如黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus*、黄翅大白蚁 *Macrotermes barneyi*、台湾乳白蚁 *Coptotermes formosanus*、黄胸散白蚁 *Reticulitermes flaviceps* 等既能危害房屋建筑和江河堤坝，对农林作物和园林绿化的危害也十分严重。白蚁甚至能危害地下通讯电缆等的塑料保护材料。2）蜚蠊。世界上已记录有 5 000 多种蜚蠊，我国有 252 种（Zhang and Zhang，2018）。室内为害的蜚蠊不仅啃食生活用品，污染食品，还可携带和传播人类疾病。此外，蜚蠊还可钻入现代化通讯设备或自动控制设备，造成事故。蜚蠊已取代臭虫和虱

子成为新四害之首，未来会更加猖獗。3）仓储害虫。仓储害虫是威胁人类粮食和食品安全的一类重要害虫，已记录有 600 多种（张宏宇，2006）。据统计，全世界每年因仓储害虫造成的经济损失约达 1.2 亿到 2.4 亿美元。我国国家粮库储藏中的粮食损失约为 0.2%，每年储粮损失高达 10 多亿元。4）园林害虫。我国园林害虫种类约有 1 800 余种，危害严重的近 100 余种，如湖南省城市园林植物害虫种类就超过 300 种（李尚志，1996；朱巽，2014）。园林害虫受城市化进程的影响较为明显，且由于绿化树种结构单一、大气污染加重、化学农药的不合理使用以及外来种入侵等因素，园林害虫暴发成灾已成常态。

3 城市害虫的分子生物学研究

分子生物学技术或方法不仅为城市昆虫的分类鉴定和种群进化提供强有力的工具，还为基因功能分析、抗性分子机制解析以及控害新靶标发掘等提供丰富的信息资源。

3.1 分子鉴定与遗传进化

分子标记技术被广泛应用于城市害虫的分子鉴定、亲缘地理学、病原菌检测以及遗传进化等领域。随机扩增 DNA 多态性分析（RAPD）和限制性片段长度多态性技术（RFLP）适用于蜚蠊和按蚊种团的鉴定和分子系统发育研究（郭燕等，2013）。2005 年，利用 *cox1* 序列，我国率先建立基于 qPCR 技术的红火蚁分子鉴定技术，解决了红火蚁与其近缘种热带火蚁种类鉴别的问题（陈岩等，2005）。我国储粮害虫 DNA 条形码鉴定系统提供近 40 种储粮昆虫和螨类线粒体 *cox1* 的比对鉴定、系统发育分析以及基础信息查询等功能（吴志刚等，2017）。基于 *ITS2* 的多重 PCR 技术可快速而准确鉴定 6 种常见仓储书虱，为后续书虱 DNA 芯片的开发和应用提供了借鉴（Wei *et al.*，2011）。病原菌的检测研究多应用于卫生害虫中，如利用 16S rRNA 基因序列，针对江苏 16 个口岸截获的蜚蠊，共分离鉴定出 15 属 23 种细菌，为控制传染病的发生和流行提供基础理论依据（朱临等，2011）。

部分城市害虫与人类关系密切，易随人类活动而扩散，成为入侵物种。其中，基于分子标记的红火蚁种群遗传进化和扩散途径的研究是较为成功的一个案例。原产于南美洲潘塔纳尔地区的红火蚁，于 20 世纪 20 年代引入美国南部，并以此作为入侵其他地区的桥头堡，通过多重入侵的方式，已在澳大利亚和中国成功建立种群（董慧和杨定，2005）。采用 *Cytb* 基因解析不同生殖模式书虱种群遗传多样性发现，孤雌生殖比两性生殖的书虱具有更高的遗传多样性，且地理隔离不是书虱种群间遗传分化的主要原因（Wei *et al.*，2012）。针对乳白蚁属的 6 个种，基于线粒体 16S 的系统发育分析表明，马来西亚、澳大利亚和缅甸的乳白蚁与我国的台湾乳白蚁亲缘关系更近，而非洲和南美的乳白蚁聚为一支，这为阐释乳白蚁的入侵路径和传播历史提供支持（张卫东等，2010）。

3.2 城市昆虫基因组测序与分析

目前，世界上已测序获得 30 余种城市昆虫（如白蚁、蜚蠊、家蝇、床虱、蚊子、书虱等）的基因组信息（表 1）。已完成基因组测序的城市昆虫多集中在双翅目，其次是膜翅目；基因组最小的为人类体虱（110 M），最大的为德国小蠊（1 916 M）。城市昆虫基因组学研究涵盖基因的鉴定与分析、昆虫与寄主协同进化分析，昆虫演化和比较基因学，昆虫功能基因组学等方面（侯丽等，2017）。显然，昆虫基因组学的研究将为更好地揭示昆虫抗性机制、发掘药剂靶标以及制定城市害虫综合治理策略提供丰富的分子数据资源。

3.3 城市害虫抗药性分子机制

根据节肢动物杀虫剂抗性数据库的统计发现，有 8 种城市害虫抗药性排名位列前 30 位（表 2）。抗药性的产生将直接威胁到全球城市害虫防治的持效性。为了设计可持续的 IPM 策略，必须明确害虫产生抗药性的内在分子机制。昆虫抗药性机制主要包括代谢抗性、靶标抗性、表皮抗性和行为抗性 4 个层面，其中代谢抗性与靶标抗

表 1　代表性城市昆虫的基因组组装信息

Table 1　Representative urban insect genome assembly's information

昆虫目 Order	物种 Species	基因组大小 Genome size (Mb)	Contig N50 (bp)	GC 含量 GC content (%)	基因预测数 Gene number
双翅目 Diptera	家蝇 *Musca domestica*	636	11 807	34.7	21 309
	铜绿蝇 *Lucilia cuprina*	406	94 823	31.3	16 692
	黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*	138	21 435 538	42.1	30 559
	拟暗果蝇 *D. pseudoobscura*	158	26 005 465	45.1	23 456
	拟果蝇 *D. simulans*	105	451 931	42.8	19 773
	黑果蝇 *D. virilis*	197	120 091	40.5	20 548
	淡色按蚊 *Anopheles albimanus*	173	200 121	49.2	NA
	小五斑按蚊 *A. atroparvus*	224	53 613	46.8	NA
	库态按蚊 *A. culicifacies*	203	13 414	43.1	NA
	达氏按蚊 *A. darlingi*	137	115 072	48.3	10 947
	大劣按蚊 *A. dirus*	216	76 300	46.4	NA
	冈比亚按蚊 *A. gambiae*	251	85 548	42.2	15 423
	多斑按蚊 *A. maculatus*	302	38 030	44.2	NA
	微小按蚊 *A. minimus*	201	123 292	43.2	NA
	中华按蚊 *A. sinensis*	298	30 137	45.3	19 352
	斯氏按蚊 *A. stephensi*	207	44 910	45.5	13 787
	致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus*	579	28 546	38.1	19 389
	埃及伊蚊 *Aedes aegypti*	1 278	11 758 062	38.2	22 858
网翅目 Dictyoptera	德国小蠊 *Blattella germanica*	1 916	12 125	31.9	29 581
	湿木白蚁 *Zootermopsis nevadensis*	485	22 794	38.6	30 187
鞘翅目 Coleoptera	赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*	166	73 049	35.2	22 611
	咖啡果小蠹 *Hypothenemus hampei*	151	10 499	27.8	19 222
半翅目 Hemiptera	温带臭虫 *Cimex lectularius*	604	552 423	29.9	24 194
	棉蚜 *Aphis gossypii*	294	17 818	28.5	18 497
膜翅目 Hymenoptera	西方蜜蜂 *Apis mellifera*	235	5 382 476	32.5	23 471
	榕小蜂 *Ceratosolen solmsi*	277	74 702	30.4	13 200
	小黄家蚁 *Monomorium pharaonis*	259	21 277	36.6	23 236
	红火蚁 *Solenopsis invicta*	399	21 161	37.4	25 238
啮虫目[a] Psocoptera	嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophila*	298	5 035 368	33.5	15 763
虱目 Phthiraptera	体虱 *Pediculus humanus*	110	34 097	27.9	10 775

数据来自 i5K（http://i5k.github.io/arthropod_genomes_at_ncbi）和 Insect Base (http://www.insect- genome.com/)；a 指本课题组未发表数据；NA：无数据。

The data are derived from i5K and Insect Base; a indicates the unpublished data in our laboratory; NA indicates no data available.

表 2　农业和城市生态系统中节肢动物抗药性排名（前 30 位）
Table 2　Top 30 resistant arthropods in agricultural and urban ecosystems

物种 Species	目：科 Order: Family	生态系统 Ecosystem	药剂种类 [a] Number	案例数 Cases
二斑叶螨 *Tetranychus urticae*	蜱螨亚纲：叶螨科 Acari: Tetranychidae	农业 Agricultural	96	517
小菜蛾 *Plutella xylostella*	鳞翅目：菜蛾科 Lepidoptera: Plutellidae	农业 Agricultural	95	866
桃蚜 *Myzus persicae*	半翅目：蚜科 Hemiptera: Aphididae	农业 Agricultural	80	469
烟粉虱 *Bemisia tabaci*	半翅目：粉虱科 Hemiptera: Aleyrodidae	农业 Agricultural	64	631
家蝇 *Musca domestica*	双翅目：蝇科 Diptera: Muscidae	城市 Urban	64	398
马铃薯叶甲 *Leptinotarsa decemlineata*	鞘翅目：金花虫科 Coleoptera: Chrysomelidae	农业 Agricultural	56	300
微小扇头蜱 *Rhipicephalus microplus*	真蜱目：硬蜱科 Ixodida: Ixodidae	农业 Agricultural	50	562
棉蚜 *Aphis gossypii*	半翅目：蚜科 Hemiptera: Aphididae	农业 Agricultural	50	281
棉铃虫 *Helicoverpa armigera*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	48	856
苹果全爪螨 *Panonychus ulmi*	蜱螨亚纲：叶螨科 Acari: Tetranychidae	农业 Agricultural	47	196
德国小蠊 *Blattella germanica*	蜚蠊目：姬蜚蠊科 Blattodea: Ectobiidae	城市 Urban	43	279
致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus*	双翅目：蚊科 Diptera: Culicidae	城市 Urban	41	298
草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	41	143
斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	40	677
甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	40	576
尖音库蚊 *Culex pipiens pipiens*	双翅目：蚊科 Diptera: Culicidae	城市 Urban	36	161
埃及伊蚊 *Aedes aegypti*	双翅目：蚊科 Diptera: Culicidae	城市 Urban	35	572
烟芽夜蛾 *Heliothis virescens*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	35	120
忽布疣额蚜 *Phorodon humuli*	半翅目：蚜科 Hemiptera: Aphididae	农业 Agricultural	34	72
褐飞虱 *Nilaparvata lugens*	半翅目：飞虱科 Hemiptera: Delphacidae	农业 Agricultural	33	419
赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*	鞘翅目：拟步甲科 Coleoptera: Tenebrionidae	城市 Urban	33	134

续表 2 (Table 2 continued)

物种 Species	目：科 Order: Family	生态系统 Ecosystem	药剂种类 [a] Number	案例数 Cases
二化螟 *Chilo suppressalis*	鳞翅目：螟蛾科 Lepidoptera: Pyralidae	农业 Agricultural	31	150
海灰翅夜蛾 *Spodoptera littoralis*	鳞翅目：夜蛾科 Lepidoptera: Noctuidae	农业 Agricultural	31	51
西花蓟马 *Frankliniella occidentalis*	缨翅目：蓟马科 Thysanoptera: Thripidae	农业 Agricultural	30	175
淡色库蚊 *Culex pipiens pallens*	双翅目：蚊科 Diptera: Culicidae	城市 Urban	29	136
温室粉虱 *Trialeurodes vaporariorum*	半翅目：粉虱科 Hemiptera: Aleyrodidae	农业 Agricultural	28	112
柑橘全爪螨 *Panonychus citri*	蜱螨亚纲：叶螨科 Acari: Tetranychidae	农业 Agricultural	28	74
油菜露尾甲 *Meligethes aeneus*	鞘翅目：露尾甲科 Coleoptera: Nitidulidae	农业 Agricultural	27	518
铜绿蝇 *Lucilia cuprina*	双翅目：丽蝇科 Diptera: Calliphoridae	城市 Urban	25	95
扶桑绵粉蚧 *Phenacoccus solenopsis*	半翅目：粉蚧科 Hemiptera: Pseudococcidae	农业 Agricultural	24	194

基于节肢动物杀虫剂抗性数据库，截止 2019 年 7 月；a 指该节肢动物产生抗药性所对应的农药活性成分数目。
Data are obtained from the Arthropod Pesticide Resistance Database (Up to July 2019); a indicates number of active ingredients to which the pest has exhibited documented resistance.

性在昆虫中普遍存在且尤为重要。代谢抗性所涉及的酶系主要涉及三大解毒酶系（P450s、GSTs 以及 ESTs），其活性增强是造成昆虫对杀虫剂代谢加速而产生抗药性的重要机制之一。靶标抗性是由于杀虫剂作用的靶标位点的敏感度降低而引起的昆虫抗性（如 AChE、VGSC 和 GABA 受体）。

在卫生害虫中，家蝇几乎对所有杀虫剂都产生了抗药性，其不仅对有机磷和氨基甲酸酯类农药产生较高的抗性（62.5-290 倍），还对昆虫生长调节剂和菊酯类农药的抗性达到了高抗水平（1 000-18 400 倍）（Naqqash *et al.*，2016）。在城市害虫中，家蝇抗药性排名第 1 位（表 2）。家蝇抗性分子机制的研究也较为深入，如研究表明 P450s 高表达介导的抗药性是家蝇对杀虫剂产生抗药性的最为常见机制之一（宋晓等，2018）。这种现象在其他卫生昆虫的抗性品系体内也有报道，如在致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus* 抗性种群中（Gong *et al.*，2017）。同时，在家蝇多杀菌素抗性机理的研究中发现，P450s 参与家蝇抗性产生的过程中存在着性别差异性（Zhang *et al.*，2019）。家蝇羧酸酯酶基因（MdaE7）的多重突变和转录水平过表达，是雄虫产生马拉硫磷抗性的重要原因（Zhang *et al.*，2018）。在我国，家蝇溴氰菊酯抗性的产生与 VGSC 的两个突变和 CYP6D1 基因 5′端非编码区 15 bp 的插入序列密切相关（Qiu *et al.*，2007）。家蝇 AChE 的 5 个氨基酸突变（单独或联合，Val→Leu，Gly→Ala，Gly→Val，Phe→Tyr，Gly→Ala）会导致其对有机磷杀虫剂产生不同程度的抗药性；AChE 单个或多个氨基酸的联合突变介导的抗性机制在库蚊中也有所报道（Zhao *et al.*，2014）。

德国小蠊在城市昆虫抗药性排名中位列第 2 位，其已对 43 种不同杀虫剂活性成分产生了抗药性（表 2）。德国小蠊对拟除虫菊酯的击倒抗性（kdr）主要是由钠离子通道 IIS6 结构域上 1 个氨基酸突变（L→F）和其他结构域上的 4 个

突变共同介导（Liu *et al.*，2000）。此外，CYP4G19 的过表达也参与了德国小蠊对拟除虫菊酯的抗性形成过程。德国小蠊对诱饵中药剂抗性的报道也日益增多，如对氟虫腈的抗性高达 36 倍，其主要是由 P450 的代谢活性增强及其点突变（A302S）所引起的。值得一提的是，内共生菌也可介导蜚蠊产生抗药性，这种现象在其他昆虫中的报道亦越来越多（Zhang *et al.*，2018）。

赤拟谷盗是一种重要的储粮害虫，常作为模式昆虫进行研究，其在城市害虫抗药性的排名为第 6 位。在仓储害虫中，以磷化氢抗性机制研究最为深入。赤拟谷盗和谷蠹 *Rhizopertha dominica* 磷化氢抗性的产生是由二氢硫辛酰胺脱氢酶（Dihydrolipoamide dehydrogenase，DLD）氨基酸突变所介导（Schlipalius *et al.*，2012）。在我国，赤拟谷盗部分地理种群对磷化氢抗性高达 160 倍以上，而 P450 酶活性的增强与 CYP345A 亚家族基因的过表达直接参与了这一过程（Huang *et al.*，2019）。其他仓储害虫抗性机制的研究表明，三大解毒代谢酶（P450s、ESTs 和 GSTs）在害虫抵抗外界胁迫和抗性的形成起到重要的作用，如书虱经不同药剂诱导后，其体内大部分代谢酶基因对有机磷、菊酯类和氨基甲酸酯类杀虫剂的诱导响应较为明显（景田兴等，2017）。

4 城市害虫综合治理

城市害虫综合治理是一个复杂的过程，既要考虑灭杀威胁人类健康和财产的害虫，也要保护对人类生活质量有益的昆虫。城市害虫综合治理措施应建立在城市规划和城市管理的现代化基础之上，然而，由于我国城市化的快速发展，当前城市规划与城市管理成为害虫治理基础的薄弱点。同时，我国城市害虫治理仍存在人才缺乏、部门联系不畅、市民防治意识薄弱等诸多问题。目前，城市害虫防治仍然严重依赖于化学药剂，这对城市环境和人类健康造成负面影响。事实上，城市害虫防治与农林害虫防治相比，具有以下特殊性。第一，农业害虫综合治理的理念无法完全适用于城市害虫，这是因为就部分城市害虫而言，无法准确预估经济阀值。重要卫生害虫往往实行“零容忍”态度，有时可以忽略防治成本。第二，必须考虑人类安全和环境污染的问题。同时，还要考虑各生态子系统的服务功能，如园林昆虫不能一扫而光，要适当考虑对给园林增添景色的蝶、蛾、蝉等昆虫提供适当保护。第三，城市害虫防控应考虑城市害虫管理法规的制定与完善，进一步加强城市昆虫的基础理论研究。

可见，城市 IPM 体系应鼓励减量使用化学农药，克服理论与实践相脱节和害虫生物生态学知识匮乏的障碍，兼顾不同城市利益相关者的利益，为所有城市利益相关者提供具有针对性的可持续害虫管理方案（图 1）（Lowe *et al.*，2019）。在过去的几十年里，城市害虫生态防控也有一些成功的案例，如增加边缘作物的植物多样性可减少杀虫剂的使用量，同时也为可持续利用城市生态系统中的相关生态系统服务做出重要贡献（Wan *et al.*，2018）。本部分将针对不同类型的城市害虫的防治措施进行概述，同时对未来具有广阔应用潜力的基于分子遗传改造和 RNAi 技术的害虫防控策略做简要介绍。

4.1 白蚁类害虫

由于灭蚁灵、氯丹等有机氯类白蚁杀虫剂的禁用，以白蚁监测控制技术为核心，开展环保、持久、高效的白蚁饵剂的研究以及研发白蚁入侵自动检测技术和智能监控诱杀装置成为白蚁综合治理的重要方向。自 2001 年起，在我国进行的白蚁 IPM 项目取得了较好的效果。此项目在全球环境基金（GEF）资助下，主要开展“灭蚁灵、氯丹替代品控制白蚁”的研究示范工作，以减少和禁止使用灭蚁灵和氯丹。该计划将低毒、高效的诱饵系统（几丁质合成酶抑制剂）作为核心技术，通过群体消除以大面积控制白蚁种群。2008-2011 年间，此项目在湖南、江苏和安徽等地大约有 83 万个诱饵站投入使用，减少了大约 372 吨的白蚁药剂的使用量（Su，2019）。我国白蚁诱剂的研究已有不少报道，有学者对此有专门描述（胡寅等，2018），这里不再累述。如基

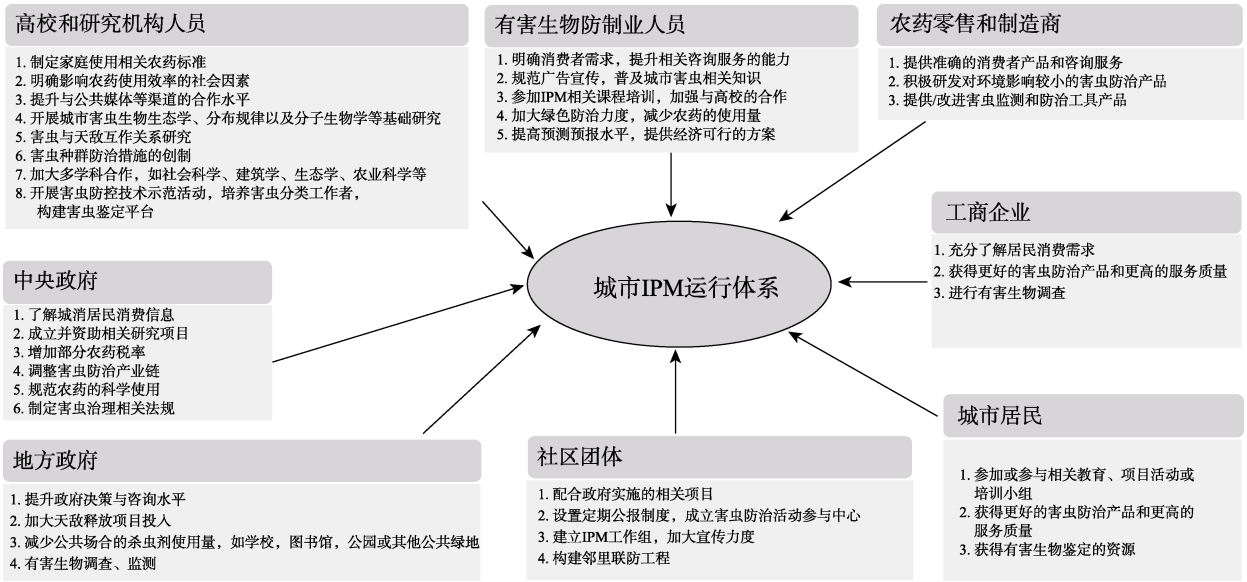

图 1　基于城市利益共同体的害虫综合治理运行体系

Fig. 1　Strategies and systems of IPM by urban stakeholders

于 50%聚乙烯醇、100%聚乙烯醇、100%三聚氰胺甲醛树脂的白蚁纤维素粉饵料成型技术具有较好的应用潜力，而细辛粉对黄胸散白蚁有较好防效和较强的驱避活性，可作为优秀的阻杀剂（莫建初等，2003；殷学杰等，2019）。在天敌防治方面，蒲螨被证实对圆唇散白蚁 *Reticulitermes labralis* 具有很好的种群控制作用，当释放蒲螨 3 d 后，虫口减退率可达到 100%。然而，对于部分室内城市害虫（如蜚蠊等）而言，天敌防治有很大的限制（如捕食性或寄生性天敌），一方面是由于其作用效果慢，另一方面要考量天敌生物的室内引入对人们生活的影响。值得一提的是，我国当前已有数百家白蚁防治机构，从事白蚁预防处理和灭治，有些机构也开展其他城市害虫的治理业务，但数量甚少。

4.2　仓储害虫

国内储藏物害虫的防治仍以化学防治为主，主要体现在熏蒸、趋避、触杀、抑制等方面。磷化氢作为优异的熏蒸剂，其使用始于我国 20 世纪 60 年代，对仓储害虫的防治起到至关重要的作用。但是，磷化铝等高毒农药的禁用，造成磷化氢的应用将受一定的限制，化学熏蒸的替代防控技术亟需解决。气调储藏技术是指改变气密储藏环境中的气体组成，从而实现灭杀储藏物害虫的防治技术。气调技术在我国仓储害虫防控的应用中成效明显。20 世纪 60 年代，我国开始开展气调储粮的相关研究。21 世纪初，分别在绵阳、上海等地建设了二氧化碳气调仓。相比于二氧化碳气调，充氮气调技术成本更低，2008 年后，该技术得到了更为广泛的研究和应用示范，并规模化推广。气调技术可以有效解决储粮害虫对磷化氢抗药性的问题，极大促进我国绿色储粮水平的提升。结合利用信息素与诱捕器可对储粮害虫进行预测预报、干扰交配和大面积诱杀，这对未来的安全储粮和绿色储粮也具有重要意义。目前，已有 18 种仓储昆虫的信息素获得了商业应用（鲁玉杰等，2003）。此外，“双低”、“三低”储粮技术也是实现仓储害虫防治的有效方法之一，如采用机械制冷法、通风制冷法或自然低温法等途径实现低温控害。

4.3　园林害虫

不同于卫生害虫和建筑害虫的“零容忍”，园林害虫防控要考虑园林昆虫多样性，以人与环境和谐发展为基准，只需将园林害虫的数量控制在一定的范围内。园林害虫防控一方面可以通过丰富园林植物多样性，形成较为稳定健康的园林

生态，发挥植物群落的抗逆性功能和天敌昆虫的抑制功能。另一方面，在提高城市园林害虫预测预报及时性和准确性的基础上，科学合理使用化学农药，加强多学科多部门的合作，做好城市合理长远规划，强化植物检疫在苗木调运中的作用。园林害虫的生物防治有很多成功的事例可供借鉴。例如应用较多的寄生性天敌周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* 和管氏肿腿蜂 *Sclerodermus guani*，前者在防治美国白蛾 *Hyphandria cunea* 等鳞翅目害虫时发挥了重要作用；而后者针对天牛等钻蛀性害虫具有很好的防控效果（刘永如等，2012）。园林害虫的治理应坚持“预防为主，综合防治”的植保方针，根据园林害虫的发生规律，综合各种防治措施，开展生物防治，充分发挥自然因素对害虫的控制作用，为我国园林绿化建设，保驾护航。

4.4 卫生害虫

我国常见的家庭卫生害虫有蜚蠊、蝇类、蚊虫、衣鱼、书虱等。一般而言，家庭卫生害虫要以预防为主，做好清洁卫生工作，保持居室环境整洁、干燥，不久存食物和积水，做好与外界的隔离措施。针对蜚蠊，可用毒饵诱杀，气雾剂喷杀，人工捕杀等措施。自 20 世纪 80 年代中期，杀虫诱饵已被应用于德国小蠊的防控，相比于药剂喷洒的施用方式，杀虫剂使用量可减少 275%（Zhu *et al.*，2016）。值得一提的是，一些室内卫生害虫（如蜚蠊等），其分布具有隐蔽和分散性，可充分利用推拉策略（Push-pull strategy），以便利用化学药剂集中进行灭杀。德国小蠊的信息素（性信息素和聚集信息素）在推拉策略中具有很大的应用潜力。在我国，用于家庭卫生害虫的杀虫剂种类主要有氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类，而有机氯和有机磷类多已被禁用。其中，大多数卫生害虫杀虫剂属于拟除虫菊酯类，主要有丙烯菊酯及其系列，但抗性的产生使得卫生害虫的药剂防治效果日益下降（杨华林，2012）。

4.5 其他防治策略

近年来，生物杀虫剂的不断发展为化学药剂的减量使用和城市害虫的有效控制提供了新的机遇。昆虫病原菌如苏云金杆菌、球孢白僵菌、球形芽孢杆菌、线虫、核多角体病毒等亦被越来越多的应用于城市害虫的防治。我国应用的卫生害虫微生物杀虫剂主要有球形芽孢杆菌和苏云金杆菌，针对蚊幼虫的灭杀效果较好。黑胸大蠊 *Periplaneta fuliginosa* 浓核病毒（Densovirus，PfDNV），已成功地应用于蜚蠊的防治。利用病原微生物如苏云金杆菌、绿僵菌防治白蚁也可以取得较好的效果。苏云金杆菌制剂还可用来防治仓储害虫，如粉斑螟蛾 *Ephestia cautella*、地中海螟蛾 *E. kuehniella*、印度谷螟 *Plodia interpunctella*、麦蛾 *Sitotroga cerealella* 等鳞翅目害虫。但是，对于蜚蠊、家蝇、蜱类等害虫的病原微生物，由于受到生产成本高、储存稳定性差以及相对较低的致死率等原因的影响，限制了它们作为有效控制剂的广泛使用。昆虫生长调节剂在我国城市害虫防治中的应用较少，主要用于蜚蠊的防治。

RNAi 技术作为一种新的杀虫策略，与其他害虫防治方法相结合，可为害虫抗性防治提供新的思路。事实上，RNAi 害虫防治作为生物农药的一种外延，dsRNA 高效、便捷的传递方式在很大程度上决定了其防治的效率（田宏刚等，2019）。基于 RNAi 技术的害虫控制策略已在多种城市昆虫（如蚂蚁、蜚蠊、头虱、蚊虫、白蚁等）中被证实具有很大的应用潜力（Zhu *et al.*，2016）。最近，利用纳米载体介导的 dsRNA 传递系统，经喷洒的方式对大豆蚜 *Aphis glycines* 的致死率可高达 81.67%（Yan *et al.*，2019）。

昆虫不育技术（Sterile insect technique，SIT）是昆虫遗传改造的经典案例代表。迄今为止，基于辐射形成的昆虫雄性不育技术已被成功应用于几种重要的农业或城市害虫种群的抑制或局部消灭。随着现代分子和遗传技术的发展，基于基因编辑技术的转基因昆虫品系的构建，可大大提高 SIT 的效率和准确性。这种策略主要是将携带显性致死基因或自私基因元件的转基因昆虫品系释放到田间与野生型杂交，以减少某一性别

昆虫的数量，从而达到控制害虫群体数量的目的（Gantz and Akbari，2018）。目前，基于 CRISPR/Cas9 系统的控制有害昆虫数量的基因驱动技术（gene drive）在蚊虫防控中的研究最具代表性。最近，具有里程碑式的昆虫不相容技术（Incompatible insect technique，IIT）的出现，将为城市害虫或其他农业害虫防控提供新的借鉴思路。本技术通过释放携带与野生雌蚊不同 *Wolbachia* 菌型的雄蚊，与野生型雌蚊交配，由于胞质不相容，卵会大量死亡。IIT 的优势在于共生菌对于雄蚊的竞争交配力和生存力基本没有影响。在我国广州，基于 *Wolabchia* 策略控制蚊虫的现场试验证明 IIT-SIT 技术对蚊虫种群进行区域性控制的可行性，并已获得初步成功（Zheng *et al.*，2019）。

5 展望

随着城市化建设进程的加快和物流贸易的频繁，外来入侵害虫会大量增加，白蚁的为害仍然严峻，蜚蠊、蝇类、蚊虫、书虱、螨类等家庭卫生害虫以及园林绿化害虫的发生日趋严重（尹兵等，2004）。城市害虫综合治理应有效借鉴和吸收相关研究机构的害虫防治新技术，政府参与制定相关害虫防治技术规程或标准，形成一套完整的害虫监测控制技术体系，为促进城市害虫防治方式的转型升级提供基础。未来城市害虫防制业将进一步商业化，家庭将成为杀虫公司的重要市场之一，科研机构将进一步增强服务咨询的能力。因此，城市害虫综合治理是一个主体包括政府、社区、公司企业、研究人员、居民在内的基于多学科联合，采用多种防治措施协调运作的系统工程，应充分发挥生物控制和自然环境控制的作用，最终达到经济、生态和社会效益的统一（图 1）。在我国，有害生物防制业（Pest control operations，PCO）是一个新兴的产业，拥有着大量客户。然而，我国城市害虫综合防制业却存在起步晚，地区间发展不平衡，针对的害虫种类少、专业技术人员或防治技术缺乏等缺点。未来应着手构建多部门多学科联合的 PCO 服务企业，整合和提升我国有害生物防治药剂、器械生产、防治服务以及销售等资源，从而打造基于互联网技术的高效、便捷的现代化服务平台。

未来城市昆虫学的基础研究可从以下几个方面展开：1）城市化对昆虫影响的内在机制，昆虫群落随植物演替的变化规律及其机理；2）昆虫对城市胁迫因子和城市管理模式的响应规律及生态策略；3）城市外来害虫是否利用了缺乏进化防御的本地植物寄主；4）自下而上（Bottom-up）和自上而下（Top-down）的因子对城市生态中植食性昆虫种群动态的影响规律及其机制。总之，未来城市害虫的防治，应以生态调控为主，将城市害虫的防控统一纳入城市生态系统的规划之中，在政府相关部门的牵头和协调下，组织不同学科领域专家的协作，研究城市化与昆虫之间的互作机制，并注重监测城市昆虫的动态演变规律，健全城市害虫治理服务体系，加强研发基于互联网技术的害虫治理信息系统和移动终端的城市害虫鉴定平台。此外，分子遗传学技术的发展，也必将继续推动城市昆虫学的发展，为害虫综合治理策略的制定提供新的靶标和工具。

参考文献 (References)

Chen Y, Chen NZ, Zhu SF, Chen HJ, 2005. Molecular detection of *Solenopsis invicta* based on real-time PCR. *Plant Quarantine*, 19(4): 204–206. [陈岩, 陈乃中, 朱水芳, 陈洪俊, 2005. 红火蚁实时荧光分子检测方法. 植物检疫, 19(4): 204–206.]

Dong H, Yang D, 2005. Advances in molecular biology of red fire ants. *Plant Quarantine*, 19(6): 351–354. [董慧, 杨定, 2005. 红火蚁分子生物学研究进展. 植物检疫, 19(6): 351–354.]

Feng CY, 1992. The progress of urban entomology in China. *Entomological Knowledge*, 29(4): 252. [封昌远, 1992. 关于城市昆虫学近年在国内的进展. 昆虫知识, 29(4): 252.]

Frankie GW, Ehler LE, 1978. Ecology of insects in urban environments. *Annual Review of Entomology*, 23: 367–387.

Gantz VM, Akbari OS, 2018. Gene editing technologies and applications for insects. *Current Opinion in Insect Science*, 28: 66–72.

Gong Y, Li T, Feng Y, Liu N, 2017. The function of two P450s, CYP9M10 and CYP6AA7, in the permethrin resistance of *Culex quinquefasciatus*. *Scientific Reports*, doi: 10. 1038/s41598-017-00486-0.

Guo Y, Liu XQ, Ma HM, Chen HY, 2013. Application of molecular

biological techniques in biological vectors research. *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(9): 155–158. [郭燕, 柳小青, 马红梅, 陈海婴, 2013. 分子生物学在媒介生物研究中的应用. 广东农业科学, 40(9): 155–158.]

Hou L, Zhan S, Zhou X, Li F, Wang XH, 2017. Advances in research on insect genomics in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(5): 693–704. [侯丽, 詹帅, 周欣, 李飞, 王宪辉, 2017. 中国昆虫基因组学的研究进展. 应用昆虫学报, 54(5): 693–704.]

Hu Y, Yu BT, Yin XJ, Song XG, 2018. Advance in the development of attractive lignocelluloses materials of termite in China. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 24(4): 396–399. [胡寅, 于保庭, 殷学杰, 宋晓钢, 2018. 我国白蚁饵料研究进展. 中华卫生杀虫药械, 24(4): 396–399.]

Huang Y, Li F, Liu M, Wang Y, Shen F, Tang P, 2019. Susceptibility of *Tribolium castaneum* to phosphine in China and functions of cytochrome P450s in phosphine resistance. *Journal of Pest Science*, 92(3): 1239–1248.

Jiang SN, 2001. Review and prospect of urban entomology in China. The 6th National Symposium on Urban Insects. Zhejiang. 8. [蒋书楠, 2001. 我国城市昆虫学的回顾和展望. 全国第六届城市昆虫学术讨论会. 浙江. 8.]

Jing TX, Lang N, Dou W, Wei DD, Wang JJ, 2017. Advances in metabolic resistance to insecticides in psocids (Psocoptera: Liposcelididae). *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 32(10): 191–196. [景田兴, 郎宁, 豆威, 魏丹丹, 王进军, 2017. 书虱代谢抗性研究进展. 中国粮油学报, 32(10): 191–196.]

Li SZ, 1996. Discussion on pest management and strategies in urban gardens. *Journal of Guangdong Landscape Architecture*, (1): 46–47. [李尚志, 1996. 城市园林害虫的治理及策略探讨. 广东园林, (1): 46–47.]

Liu YR, Wang WH, Chen JH, 2012. Current status and prospect of biological control in garden pest. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (5): 51–53. [刘永如, 王文辉, 陈江海, 2012. 园林害虫的生物防治现状与展望. 河北林业科技, (5): 51–53.]

Liu Z, Valles SM, Dong K, 2000. Novel point mutations in the German cockroach para sodium channel gene are associated with knockdown resistance (kdr) to pyrethroid insecticides. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 30(10): 991–997.

Lowe EC, Latty T, Webb CE, Whitehouse MEA, Saunders ME, 2019. Engaging urban stakeholders in the sustainable management of arthropod pests. *Journal of Pest Science*, 92(3): 987–1002.

Lu YJ, Wang ZY, Shao Y, 2003. Phermones for monitoring and control of stored-product pests. Proceedings of 2003-IFBBE. Beijing: 326–330. [鲁玉杰, 王争艳, 邵颖, 2003. 信息素在储藏物害虫综合治理中的应用. 2003 国际农业生物环境与能源工程论坛. 北京. 326–330.]

Liu ZY, 1950. Termite control. *Da Zhong Nong Ye*, 4(4): 129–134. [柳支英, 1950. 白蚁的防治. 大众农业, 4(4): 129–134.]

Mo JC, Zhang SM, Teng L, Chen JA, 2003. Study on the toxic effects of *Asarum sieboldii* against *Reticulitermes flaviceps*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 5(4): 80–84. [莫建初, 张时妙, 滕立, 程家安, 2003. 细辛对黄胸散白蚁的毒效. 农药学学报, 5(4): 80–84.]

Naqqash MN, Gökçe A, Bakhsh A, Salim M, 2016. Insecticide resistance and its molecular basis in urban insect pests. *Parasitology Research*, 115(4): 1363–1373.

Qiu X, Li M, Luo H, Fu T, 2007. Molecular analysis of resistance in a deltamethrin-resistant strain of *Musca domestica* from China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 89(2): 146–150.

Raupp MJ, Shrewsbury PM, Herms DA, 2010. Ecology of herbivorous arthropods in urban landscapes. *Annual Review of Entomology*, 55: 19–38.

Ren QW, Ruan GH, Song XG, 2016. Current situation and prospect of ecological termite control. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 22(3): 300–303. [任庆伟, 阮冠华, 宋晓钢, 2016. 白蚁生态防治技术的现状与展望. 中华卫生杀虫药械, 22(3): 300–303.]

Schlipalius DI, Valmas N, Tuck AG, Jagadeesan R, Ma L, Kaur R, Goldinger A, Anderson C, Kuang J, Zuryn S, Mau YS, Cheng Q, Collins PJ, Nayak MK, Schirra HJ, Hilliard MA, Ebert PR, 2012. A core metabolic enzyme mediates resistance to phosphine gas. *Science*, 338(6108): 807–810.

Song X, Shi QQ, Chen P, Gong MQ, 2018. Research progress in molecular mechanisms of vector insect's resistance to insecticides. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 29(6): 113–117. [宋晓, 史琦琪, 程鹏, 公茂庆, 2018. 病媒昆虫的抗药性分子机制研究进展. 中国媒介生物学及控制杂志, 29(6): 113–117.]

Su NY, 2019. Development of baits for population management of subterranean termites. *Annual Review of Entomology*, 64: 115–130.

Tan YQ, Dion E, Monteiro A, 2018. Haze smoke impacts survival and development of butterflies. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/s41598-018-34043-0.

Tian HG, Liu TX, Zhang WQ, 2019. Progress in RNAi technology, and prospects for its application, in entomological research in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 605–616. [田宏刚, 刘同先, 张文庆, 2019. RNAi 技术在中国昆虫学研究中的发展、应用与展望. 应用昆虫学报, 56(4): 605–616.]

Wan CH, 2017. The damage and prevention of the termites. *Popular Science and Technology*, 19(211): 115–116. [万春晖, 2017. 白蚁危害情况及其防治方法. 大众科技, 19(211): 115–116.]

Wan NF, Cai YM, Shen YJ, Ji XY, Wu XW, Zheng XR, Cheng W, Li J, Jiang YP, Chen X, Weiner J, Jiang JX, Nie M, Ju RT, Yuan T, Tang JJ, Tian WD, Zhang H, Li B, 2018. Increasing plant diversity with border crops reduces insecticide use and increases crop yield in urban agriculture. *eLife*, 7: e35103.

Wang QM, 1992. Brief discussion on the rise of urban entomology and the research trend of stored grain pests. *LiangYou CangChu KeJi TongXun*, (4): 32–33. [王铨铭, 1992. 浅谈城市昆虫学的

兴起与储粮害虫研究趋势. 粮油仓储科技通讯, (4): 32–33.]

Wei DD, Yuan ML, Wang BJ, Zhou AW, Dou W, Wang JJ, 2012. Population genetics of two asexually and sexually reproducing psocids species inferred by the analysis of mitochondrial and nuclear DNA sequences. *PLoS ONE*, 7(3): e33883.

Wei DD, Yuan ML, Wang ZY, Wang D, Wang BJ, Dou W, Wang JJ, 2011. Sequence analysis of the ribosomal internal transcribed spacers region in psocids (Psocoptera: Liposcelididae) for phylogenetic inference and species discrimination. *Journal of Economic Entomology*, 104(5): 1720–1729.

Wu ZC, Wu WQ, Li C, 2008. Insect ecology in urbanized process. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 36(2): 35–37. [武正成, 武文卿, 李川, 2008. 城市化过程中的昆虫生态. 山西农业科学, 36(2): 35–37.]

Wu ZG, Li WX, Zhao ZH, Wu W, Zhang T, Cao Y, Li FJ, Li ZH, 2017. Development and primary application of the DNA barcode identification system of grain pests. *Journal of China Agricultural University*, 22(5): 82–89. [吴志刚, 李文欣, 赵紫华, 伍祎, 张涛, 曹阳, 李福君, 李志红, 2017. 中国储粮害虫 DNA 条形码鉴定系统研究. 中国农业大学学报, 22(5): 82–89.]

Yan S, Qian J, Cai C, Ma Z, Li J, Yin M, Ren B, Shen J, 2019. Spray method application of transdermal dsRNA delivery system for efficient gene silencing and pest control on soybean aphid *Aphis glycines*. *Journal of Pest Science*, doi: org/10. 1007/s10340-019-01157-x.

Yang HL, 2012. Current situation and trade guide of hygienic insecticides in China. Chinese *Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 18(5): 433–439. [杨华林, 2012. 我国卫生杀虫剂应用现状和行业导向. 中华卫生杀虫药械, 18(5): 433–439.]

Ye SS, Fang Y, Li K, 2013. Impacts of urbanization process on insect diversity. *Biodiversity Science*, 21(3): 260–268. [叶水送, 方燕, 李恺, 2013. 城市化对昆虫多样性的影响. 生物多样性, 21(3): 260–268.]

Yi B, Pang ZP, Wang XM, Wu JG, 2004. Occurrence trend of urban pests and it's control measures and suggestions for management. *Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 10(2): 111–113. [尹兵, 庞正平, 王秀梅, 吴建国, 2004. 城市害虫发生趋势及综合治理措施与建议. 中华卫生杀虫药械, 10(2): 111–113.]

Yin XJ, Liang SY, Wang CP, Li T, Mo JC, 2019. Study on the shaping technology of termite cellulose bait. *Journal of Environmental Entomology*, http: //kns. cnki. net/kcms/detail/44. 1640. Q. 20190701. 2253. 006. html. [殷学杰, 梁世优, 王成盼, 李婷, 莫建初, 2019. 白蚁纤维素粉饵料成型技术研究. 环境昆虫学报, http: //kns. cnki. net/kcms/detail/44. 1640. Q. 20190701. 2253. 006. html.]

Zhang HY, 2006. Ecological control of stored grain insect pests. *Grain Storage*, 35(4): 3–7. [张宏宇, 2006. 论储粮害虫的生态调控. 粮食储藏, 35(4): 3–7.]

Zhang WD, Xu MF, Liao L, Le HY, Chen QW, Chi YL, 2010. Phylogenetic analysis of genus *Coptotermes* (Isoptera: Rhinotermitidae) based on 16S RNA gene. *Entomotaxonomia*, 32(2): 93–99. [张卫东, 徐淼锋, 廖力, 乐海洋, 陈其文, 迟远丽, 2010. 乳白蚁属部分种类 16S rRNA 的分子系统发育关系(等翅目: 鼻白蚁科). 昆虫分类学报, 32(2): 93–99.]

Zhang XC, Zhang F, 2018. The potential control strategies based on the interaction between indoor cockroaches and their symbionts in China. *Advances in Insect Physiology*, 55: 55–122.

Zhang Y, Li J, Ma Z, Shan C, Gao X, 2018. Multiple mutations and overexpression of the MdaE7 carboxylesterase gene associated with male-linked malathion resistance in housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Scientific Reports*, doi: 10. 1038/s41598-017-17325-x.

Zhang Y, Wang Y, Ma Z, Zhai D, Gao X, Shi X, 2019. Cytochrome P450 monooxygenases-mediated sex-differential spinosad resistance in house flies *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 157(7): 178–185.

Zhang YS, Hu XL, Yao LQ, 2000. Urban insects community characteristic and control strategy. *Science and Technology of Termites*, 17(2): 22–25. [张有森, 胡学亮, 姚力群, 2000. 城市昆虫的群落特点及控制策略. 白蚁科技, 17(2): 22–25.]

Zhang ZX, 1956. A prelminary study on the behavior and control of subteranean termite, *Coptotermes formosanus* Shiraki (Isoptera: Rhinotermitidae). *Acta Entomologica Sinica*, 6(4): 513–528. [张祯祥, 1956. 家白蚁的生活习性及其防治方法的研讨 (白蚁目, 鼻白蚁科). 昆虫学报, 6(4): 513–528.]

Zhao M, Dong Y, Ran X, Wu Z, Guo X, Zhang Y, Xing D, Yan T, Wang G, Zhu X, Zhang H, Li C, Zhao T, 2014. Point mutations associated with organophosphate and carbamate resistance in chinese strains of *Culex pipiens quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). *PLoS ONE*, 9(5): e95260.

Zheng X, Zhang D, Li Y, Yang C, Wu Y, Liang X, Liang Y, Pan X, Hu L, Sun Q, Wang X, Wei Y, Zhu J, Qian W, Yan Z, Parker AG, Gilles JRL, Bourtzis K, Bouyer J, Tang M, Zheng B, Yu J, Liu J, Zhuang J, Hu Z, Zhang M, Gong JT, Hong XY, Zhang Z, Lin L, Liu Q, Hu Z, Wu Z, Baton LA, Hoffmann AA, Xi ZY, 2019. Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes. *Nature*, 572(7767): 56–61.

Zhu F, Lavine L, O'Neal S, Lavine M, Foss C, Walsh D, 2016. Insecticide resistance and management strategies in urban ecosystems. *Insects*, 7(1): 2.

Zhu L, Sun LX, Hu HX, Ye S, Zhu GQ, Yang QG, 2011. Application of 16S rRNA gene sequences on cockroach-carried pathogens detection. *Chinese Journal of Frontier Health and Quarantine*, 34(3): 158–161. [朱临, 孙立新, 胡红霞, 叶松, 朱国强, 杨庆贵, 2011. 16S rRNA 基因序列分析法在输入性蜚蠊携带病原菌检测中的应用研究. 中国国境卫生检疫杂志, 34(3): 158–161.]

Zhu X, 2014. Main insect pests for urban landscaping plants in hunan province and its control strategies. *Hunan Agricultural Sciences*, (10): 45–50. [朱巽, 2014. 湖南省城市园林植物的主要虫害及其防控对策. 湖南农业科学, (10): 45–50.]