



生物防治造福人类

张古忍¹, 张文庆¹, 周强^{1*}, 胡建², 徐卫华¹

1. 中山大学生命科学学院, 广州 510275;

2. 中山大学农学院, 深圳 518107

* 联系人, E-mail: lsszhou@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-15; 接受日期: 2024-03-13; 网络版发表日期: 2024-05-06

摘要 生物防治是植物保护绿色防控技术的核心组成部分, 是我国有效控制农药用量、保障农业生产和生态环境安全、提高农产品质量、促进农业可持续发展的重要手段。已故中国科学院院士蒲蛰龙教授及其带领的团队深耕害虫生物防治领域, 在多个方面作出卓越贡献。在天敌昆虫保育、挖掘与利用方面, 以蓖麻蚕卵作为大量繁殖赤眼蜂的中间寄主, 开创了大卵繁蜂的先例, 并广泛推广应用于甘蔗螟虫的防治; 繁殖释放平腹小蜂防治荔枝、龙眼害虫荔枝蜡, 沿用至今; 发掘利用黄猄蚁防治柑橘害虫的方法, 继承和弘扬了祖国的文化遗产; 挖掘稻虱缨小蜂种质资源, 建立了可以用于规模化繁育的四室繁蜂法。在引进天敌防治害虫方面, 先后完成了引进澳洲瓢虫和孟氏隐唇瓢虫防治介壳虫; 建议从松突圆蚧原产地引进花角蚜小蜂防治松林新入侵害虫松突圆蚧。在利用昆虫病原微生物防治害虫方面, 利用苏云金杆菌防治水稻害虫稻纵卷叶螟和三化螟以及卫生害虫致倦库蚊; 利用松毛虫核多角体病毒防治马尾松毛虫; 研制和商品化生产了斜纹夜蛾核多角体病毒杀虫剂“虫瘟一号”; 利用病毒基因组的突变, 构建了多株高效核多角体病毒株; 利用昆虫病原线虫防治花卉新入侵害虫蔗扁蛾。在害虫综合防治方面, 实施“以发挥害虫天敌效能为主的害虫综合防治”, 将水稻虫害控制在经济损失允许水平之下。在应用基础研究方面, 阐明了保护利用天敌、充分发挥天敌效能的群落生态学机制; 研究了腰带长体茧蜂与寄主的免疫互作机制; 研发了基于RNAi的害虫生物防治新技术; 系统研究了棉铃虫滞育的分子机制。害虫生物防治是一项系统工程, 在所涉及的政府、商业部门、技术研究者、农技推广部门、广大消费者、农民等社会各方面中, 农民是防治措施的最终执行者, 只有加大对农民的培训、让他们充分认识害虫生物防治的思想和技术体系, 才能确保生物防治这一造福人类的技术得到精准有效实施。

关键词 生物防治, 害虫天敌, 赤眼蜂, 昆虫病原微生物, 综合防治

生物防治是利用某些生物或生物的代谢产物去防治害虫或减轻其危害程度的方法。天敌昆虫、食虫蛛形动物、食虫脊椎动物、病原微生物、寄生线虫和一些高等植物, 在抑制害虫发生和调节自然种群平衡方面作用巨大, 都是害虫生物防治可利用的生物。作为

植物保护绿色防控技术的核心组成部分, 害虫生物防治是我国有效控制农药使用量, 保障农业生产安全、农产品质量和生态环境安全, 促进农业可持续发展的重要手段^[1~3]。

说到害虫生物防治, 自然会想起中山大学生物防

引用格式: 张古忍, 张文庆, 周强, 等. 生物防治造福人类. 中国科学: 生命科学, 2024, 54: 1626–1640

Zhang G, Zhang W, Zhou Q, et al. Biological control benefits mankind (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2024, 54: 1626–1640, doi: 10.1360/SSV-2024-0013

治学科的创始人、已故中国科学院院士蒲蛰龙教授(1912~1997)。新中国成立后, 西方国家对我国实行全面封锁, 农药及其生产技术也在禁运之列。蒲教授急农民、农业和国家之所急, 在20世纪50年代初, 着手研究和利用赤眼蜂防治甘蔗螟虫, 于1958年在广东顺德杏坛镇建立了国内第一个赤眼蜂站, 并在我国甘蔗产区广泛推广应用; 利用平腹小蜂*Anastatus fulloi*防控荔枝蝽*Tessaratoma papillosa*, 至今仍是荔枝、龙眼园防治荔枝蝽的重要方法; 发掘和弘扬了利用黄猄蚁*Oecophylla maragdina*防治柑橘害虫的祖国文化遗产; 主持完成了引进孟氏隐唇瓢虫*Cryptolaemus montrouzieri*和澳洲瓢虫*Rodolia cardinalis*防治介壳虫的项目, 并于20世纪80年代建议从原产地引进花角蚜小蜂*Coccobius azumai*防治松突圆蚧*Hemiberlesia pitysophila*; 同时, 促进了昆虫病原微生物在害虫生物防治中的研究与推广应用。1973年, 他提出“以发挥害虫天敌效能为主的害虫综合防治”, 并从1975年起在广东省四会市大沙建立了大面积水稻害虫综合防治示范点(图1)^[3,4]。正是因为其在害虫生物防治领域的突出贡献, 蒲蛰龙教授被国外同行誉为“南中国生物防治之父”。

“生物防治造福人类”, 是蒲蛰龙教授为第六届全国杀虫微生物学术讨论会(1995年4月, 广州)的题词^[5]。本文回顾和总结了他及其领导的团队在害虫生物防治领域所取得的成就, 包括害虫生物防治技术的研究与田间推广应用以及应用基础研究等方面。

1 天敌昆虫保育、挖掘与利用

1.1 利用赤眼蜂防治甘蔗螟虫

甘蔗是我国最主要的糖料作物, 岭南地区种植广泛, 甘蔗螟虫严重威胁甘蔗的安全生产。珠三角地区主要的甘蔗螟虫有条螟*Chilo sacchariphagus*、二点螟*Chilo infuscatellus*、黄螟*Argyroplote schistaceana*和大螟*Sesamia inferens*等。这些螟虫混合发生, 世代重叠, 防治难度极大。为防治甘蔗螟虫, 从17种鳞翅目昆虫卵中筛选出蓖麻蚕*Philosamia cynthia ricini*卵作为规模化育蜂的中间寄主, 为确保赤眼蜂的活力, 研究了控制复寄生和室内扩繁代数、冷藏保存、成蜂补充营养等问题, 开创了“大卵”繁蜂的先例^[6], 为利用蓖麻蚕和柞蚕*Antheraea pernyi*卵繁殖赤眼蜂提供了宝贵经验^[4]。

20世纪50~60年代, 经过多次办班培训传授赤眼蜂

规模化繁育和放蜂的知识和经验, 赤眼蜂防治甘蔗螟虫的技术很快在南方各省甘蔗产区推广应用。60年代末至70年代初, 广东的生物防治专家选用米蛾*Corcyra cephalonica*卵繁育稻螟赤眼蜂*Trichogramma japonicum*和螟黄赤眼蜂*T. chilonis*, 用于防治稻纵卷叶螟^[4,7]。

赤眼蜂种类多、分布广、寄主多样、生长周期短、易于大规模人工繁殖, 其对农林害虫防控效果显著, 契合可持续发展战略, 使之成为世界范围内迄今为止在农林害虫生物防治中应用面积最广、防治害虫种类和投入研究最多的一类卵寄生蜂^[8]。围绕赤眼蜂, 还开展了赤眼蜂胚胎^[9]和个体发育^[10]研究, 冷藏米蛾卵内微环境的变化^[11,12]及其对赤眼蜂发育的适合度^[13]和子代赤眼蜂发育的影响^[14]研究, 并就赤眼蜂发育和温度相关的热激蛋白^[15]、蛹期和预蛹期发育的转录组特征^[16]以及成虫化学感知的分子基础^[17~19]等进行了探讨。

1.2 利用平腹小蜂防治荔枝蝽

荔枝、龙眼是岭南佳果, 而荔枝蝽成虫和若虫取食韧皮部和嫩果的汁液, 可使荔枝、龙眼大幅减产, 是这类果树作物的重要害虫^[4]。

平腹小蜂*Anastatus*世界性分布, 目前已知148种, 中国14种。大多数平腹小蜂为卵寄生蜂, 主要寄主有半翅目和鳞翅目等, 国内分布广泛, 可寄生多种农林害虫。1962年, 对荔枝蝽、麻纹蝽平腹小蜂^[20,21]的生物学、生态学和平腹小蜂室内繁殖技术进行了研究, 随即在从广州市郊多个乡县的荔枝园进行了利用平腹小蜂防治荔枝蝽的大田示范和推广应用, 取得了显著成绩^[4,22]。

中山大学生物系组织师生于1969年冬季至1970年在东莞市举办“害虫生物防治培训班”, 在教学、科研和生产三结合的过程中, 根据当地农村具体情况, 提出土法繁殖平腹小蜂。在茶山、大良、附城、寮步、企石、樟木头、厚街、常平、横沥、东坑、桥头、篁村等地实施了释放平腹小蜂防治荔枝蝽, 防治效果明显, 深受农民喜爱, 使全市荔枝产区的群众逐渐认识到利用平腹小蜂防治荔枝蝽的优点, 为全面推广这一防治技术打下了基础^[4,23]。

平腹小蜂的规模化繁殖和推广应用方面, 主要由广东省农业科学院生物防治研究室负责实施。继用人工卵繁殖平腹小蜂获得了成功^[24]后, 又利用柞蚕卵繁

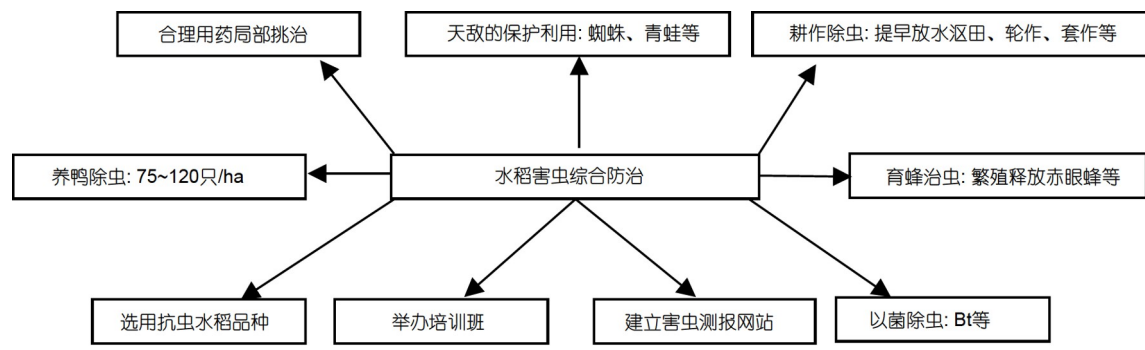


图 1 以发挥天敌效能为主要的水稻害虫综合防治措施(广东四会大沙)^[3]
Figure 1 Integrated pest control of rice based on the effectiveness of natural enemies (Dasha of Sihui, Guangdong)^[3]

殖平腹小蜂, 并推广应用. 推广的地区包括: 广东珠三角地区的广州、东莞、深圳和珠海, 以及惠州和茂名等地, 外省包括海南海口、三亚、儋州, 福建漳州, 广西玉林、北海, 四川泸州等地. 平腹小蜂防治荔枝蝽技术应用面积逐渐扩大, 仅 2017~2019年应用面积就累计超过667 hm², 对荔枝蝽防治效果达到80%以上, 且化学农药使用平均减少2次; 随着果农对生物防治产品认知和满意度提高, 平腹小蜂产品多次被纳入政府采购产品目录^[25]. 此外, 福建福州、莆田和涵江等9个地区亦大面积推广应用了平腹小蜂防治荔枝蝽, 其卵寄生率达94%~97.5%^[26].

为了提高平腹小蜂的生防效能, 对其个体发育、性比与寄主卵大小关系¹等生物学和生态学特征^[27~29]也进行了系统的研究.

1.3 利用黄猄蚁防治柑橘害虫

柑橘是我国南方栽培面积最大、经济价值最重要的果树. 利用黄猄蚁防治柑橘害虫, 是世界上以虫治虫生物防治的最早先例. 早在公元304年, 《南方草木状》一书就记载了广东果农用黄猄蚁防治柑橘害虫. 黄猄蚁能捕食柑橘灰象 *Sympiezomias cityi*、绿鳞象甲 *Hypomeces squamosus*、橘红潜叶甲 *Podagricomela nigricollis*、华脊头鳃角金龟 *Holitrichia sinensis*、白毛绿丽金龟 *Anomala albopilosa*、光绿桔天牛 *Chelidonium argentatum*、星天牛 *Anoplophora chinensis*、柑橘凤蝶 *Papilio xuthus* 幼虫、棱蝽 *Rhynchocoris humeralis*、柑橘小吉丁 *Agrilus auriiventris* 等20余种害虫. 在长期的生产实践中, 人们积累了不少关于黄猄蚁的繁殖和保护利用方面的经验. 20世纪70~80年代, 研究了

黄猄蚁的生物学特性^[30], 总结了果农采集和繁育蚁群的经验, 提出在果园中架设蚁桥, 在果树基部设置防疫圈, 既增加了其活动范围, 又确保种群数量, 显著提高了黄猄蚁治虫的效果^[31]. 为了继承和发展我国此项最早的生物防治技术的应用和推广, 协助上海科教电影制片厂拍摄了“柑橘卫士——黄猄蚁”科教片, 该片于1983年获华沙第23届短片节银龙奖^[4].

1.4 利用稻虱缨小蜂防治褐飞虱

中国是世界上最大的稻米生产国和消费国, 水稻事关国家安全和百姓福祉. 稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* 是控制水稻首要害虫稻飞虱的关键天敌因子, 广泛分布于各稻区. 为有效提高稻虱缨小蜂的控害能力, 建立了基于触角电位技术的挥发物刺激强度测量方法, 发现和验证了有潜在利用价值的反-石竹烯、水杨酸甲酯、橙花叔醇、十三烷和芳樟醇等多种水稻挥发物^[32]. 针对稻虱缨小蜂温度适应能力问题, 用长期热胁迫的方法, 驯化获得了一个高温下能保持正常寄生能力的耐热种群, 该种群在42 °C和50 °C高温环境中的寿命和耐热性均高于对照种群^[33]. 从增加种群密度入手, 通过正交试验优化了稻虱缨小蜂生长和繁殖的4个生态因子, 建立了以四室繁蜂法为基础的规模化繁蜂技术, 该技术能够进行连续饲养, 并提供相同发育阶段的产品^[34]. 为了进一步开发和利用缨小蜂资源, 通过测序、组装和校正, 得到总长度488.8 Mb的稻虱缨小蜂基因组序列, 检索和筛选得到178个感受基因和173个解毒酶相关基因, 发现CYP基因可能是稻虱缨小蜂适应杀虫剂胁迫的关键, 其中 *cyp6a1*、*cyp9ag6* 以及 *cyp9e2* 参与了对呋虫胺的解毒过程, 从化学感

受、机械感受以及解毒酶等多方面为揭示稻虱缨小蜂寄主搜寻、产卵识别和抵抗杀虫剂的分子机理提供了基础^[35,36].

2 引进天敌昆虫防治害虫

2.1 引进澳洲瓢虫、孟氏隐唇瓢虫防治蚧壳虫

澳洲瓢虫自1888年由大洋洲引入美国,到1889年底完全抑制了吹绵蚧的发生,引起了全世界的关注,之后被引入世界各地.蒲蛰龙教授主持了从前苏联引进澳洲瓢虫和孟氏隐唇瓢虫的繁殖利用研究^[37,38],组织有关单位对其生物学、生态学特征以及人工繁殖方法^[39]等进行了系统研究^[4].

澳洲瓢虫自1955年引进后,释放于广州市及其郊区,用于防治柑橘和木麻黄树上的吹绵蚧*Icerya purchasi*.1956年引入广东电白区博贺镇,挽救了沿海长20 km、宽100 m垂危的麻黄树防护林;60年代初助迁至重庆北碚防治柑橘吹绵蚧.后期的调查发现,澳洲瓢虫在上述释放和助迁地区已经建立了稳定的野外种群,有效地控制了吹绵蚧的扩散和危害^[4].

孟氏隐唇瓢虫引进后,曾在广东、福建、四川等地释放,对柑橘粉蚧、大红粉蚧、可可粉蚧、重阳木粉蚧、君子兰粉蚧等均有明显的防治效果.自1955年在广州地区释放后,由于种种原因,曾中断对其研究,直至1979年在广州和佛山等地的石栗树上发现其取食石栗粉蚧*Pseudococcus* sp.,说明孟氏隐唇瓢虫已在自然界定居,形成了自然种群^[40].同时发现,孟氏隐唇瓢虫可捕食入侵我国的松树害虫湿地松粉蚧*Oracella acuta*,对其具有良好的控制效果^[4,41].

2.2 引进花角蚜小蜂防治松突圆蚧

松突圆蚧是我国森林植物检疫对象,1980年左右传入广东省,至1990年已分布至27个县(区),发生面积达 $7.18 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[42].经实地考察并与国内有关专家讨论,蒲蛰龙教授建议从松突圆蚧原产地引进天敌^[4].

1986年7月,中国松树害虫考察团在冲绳首次发现了松突圆蚧雌虫的寄生蜂,即东氏花角蚜小蜂^[43],又称松突圆蚧花角蚜小蜂.1986~1989年共引进了16批次,深入地研究了其生物学特性,研发出二次放蜂法,在马尾松林中放养获得成功,并建立相对稳定的本地种群^[44].

1989年在广东省惠东县建立了林间大面积的蜂种基地,至1993年放蜂面积达60000 hm^2 .通过人工助迁和寄生蜂种群本身的繁殖和扩散,控制了松突圆蚧的危害^[4].

3 利用昆虫病原微生物防治害虫

3.1 以昆虫病原细菌防治害虫

20世纪40年代,蒲蛰龙教授在云南省澄江进行了利用细菌防治菜青虫的试验^[45].70年代初,进行了苏云金杆菌*Bacillus thuringiensis* (Bt)不同品系的血清学鉴别,提出以家蚕将孵卵作Bt的毒力测定的方法;采用固体浅盘培养和液体浅层培养等简易生产方法,实现了Bt的工业化生产;利用Bt产品防治水稻害虫稻纵卷叶螟*Cnaphalocrocis medinalis*,幼虫死亡率可达64%~95%;防治三化螟*Tryporyza incertulas*的效果为40%~70%^[4,46].

20世纪80年代,在广州、佛山和深圳等地进行了苏云金杆菌以色列变种*B. thuringiensis* var. *israelensis* (Bti)防治卫生害虫致倦库蚊*Culex pipiens fatigans*幼虫试验,虫口密度下降89%以上,并深入研究了蚊幼虫感染Bti后的病理变化以及Bti对脊椎动物的毒性机理^[4,47].目前已构建了多株高效广谱的Bt工程菌株,研究工作在该领域处于国际前沿水平^[4,48,49].

3.2 以昆虫病毒防治害虫

(1) 松毛虫质多角体病毒.20世纪70年代,发现了马尾松毛虫质多角体病毒*Dendrolimus punctatus cytoplasmic polyhedrosis virus*(DpCPV)^[50].该病毒主要感染幼虫的中肠细胞,而前肠、后肠以及其他组织不受感染且不发生病变.1978年利用DpCPV在广东斗门区防治马尾松毛虫*Dendrolimus punctatus*^[51],之后推广到广东10余个县,面积达2670 hm^2 ,杀虫率达70%以上,持效作用达5~6年^[52]。“七五”期间,广东茂名利用林间松毛虫高发区大量增殖DpCPV,取得了很好的效果^[4,53].

(2) 斜纹夜蛾核多角体病毒.开发了一种人工半合成饲料,可常年批量饲养斜纹夜蛾、甜菜夜蛾*Spodoptera exigua*、银纹夜蛾*Argyrogramma agnata*、粉纹夜蛾*Trichoplusia ni*等多种夜蛾科昆虫,为斜纹夜蛾核多角体病毒杀虫剂的规模化生产奠定了基础^[54],并与相

关单位合作, 以来自田间的斜纹夜蛾核多角体病毒 *Spodoptera litura multinucleocapsid nucleopolyhedrovirus* (SpltMNPV) 为基础进行产业化研究^[55], 注册并商品化生产了“虫瘟一号”病毒杀虫剂, 田间推广应用效果良好, 年产量50 t 以上^[4,56,57].

(3) 核多角体病毒基因组的突变和异源重组. 通过人工合成蝎子麻痹神经毒素 *AaIT* 基因及苜蓿丫纹夜蛾核多角体病毒 *Autographa californica nucleopolyhedrovirus* (*AcNPV*) 膜蛋白 gp64 信号肽编码序列, 构建了一株能表达该毒素且形成包涵体的重组粉纹夜蛾核多角体病毒 *Trichoplusia ni nuclear polyhedrosis virus* (*TnNPV*)vTn2AaIT3^[58]. 此外, 通过不同核多角体病毒的异源重组, 已得到多株具有广谱杀虫效果的杂交病毒^[59,60].

3.3 利用昆虫病原线虫防治花卉害虫蔗扁蛾

蔗扁蛾 *Opogona sacchari* 是新传入我国的钻蛀性害虫, 起源于非洲热带和亚热带地区. 目前, 该虫已扩散至除撒哈拉沙漠中心外的非洲、美洲、欧洲和地中海地区. 我国于1997年报道发现此虫, 之后迅速扩散分布至全国各地. 该虫主要为害巴西木、发财树等花卉植物, 也为害甘蔗、香蕉等经济作物, 以及棕榈等行道树种. 自1997年报道我国发现此虫以来, 已记载的寄主植物由22科49种增加至29科104种, 且寄主范围有不断扩大的趋势. 斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* A24 是对蔗扁蛾幼虫敏感的线虫品系. 在1:100(蔗扁蛾幼虫: 线虫) 条件下, 48 hrs后蔗扁蛾幼虫的死亡率为100%; 大田条件下, 3000条/mL线虫浓度溶液喷雾防治效果显著^[61,62].

4 害虫综合防治

4.1 理念的提出

前述的每一种害虫生物防治方法, 基本上只针对一种或一类害虫, 但同种作物往往面临多种害虫的危害. 以广东省四会市大沙镇为例, 三化螟、稻纵卷叶螟、褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 和白背飞虱 *Sogatella furcifera* 等是水稻的主要害虫. 1973年, 蒲蛰龙教授提出“以发挥害虫天敌效能为主的害虫综合防治”^[63], 即从农业生态系统总体出发, 根据水稻害虫和环境之间的相互关系, 充分发挥自然天敌的控制作用, 因地制宜、协调应用必要的措施, 将水稻虫害控制在经济损失允许水平之下, 以获得最佳的经济、生态和社会效益. 他带领中山大学昆虫学研究所的青年教师, 在广东肇庆市四会大沙镇开展水稻害虫综合防治^[64,65].

为使研究工作顺利进行, 首先成立了市、镇、研究单位组成的“综合防治领导小组”, 健全和加强了村级农技队伍和综合防治合作机制. 然后, 根据稻田生态系统各主要害虫的发生特点, 在做好害虫发生预测预报的基础上, 首选农业防治方法以恶化害虫发生环境, 然后根据实际情况选择不同的生物防治方法, 把主要害虫种群密度控制在经济损失允许范围内. 与此同时, 办好农民学校和农业技术员培训班, 利用各种手段广泛宣传, 让害虫综合防治理念深入人心.

项目分3个阶段实施^[64,65], 研究成果“以生物防治为主的水稻害虫综合防治研究”获得1985年度的国家科学技术进步奖三等奖^[5].

项目分3个阶段实施^[64,65], 研究成果“以生物防治为主的水稻害虫综合防治研究”获得1985年度的国家科学技术进步奖三等奖^[5].

4.2 第一阶段(1973~1978年)

此阶段为综合防治初期. 此阶段的特点是, 由于化学杀虫剂的滥用, 田间天敌多样性和种群密度下降, 完全失去了对害虫的控制作用. 此阶段的主要措施是以生物防治为主, 控制化学农药用量, 既要把害虫压下去, 又要逐步恢复和建立天敌在田间的优势地位.

(1) 农业防治措施. 改造害虫滋生环境. 1973~1974年, 全镇平整土地约667 hm², 提高农田排灌能力, 控制农田环境, 恶化病虫滋生的条件. 如, 提早在惊蛰前犁耙返田, 压低越冬三化螟种群的基数.

(2) 大力开展养鸭除虫、以菌治虫、育蜂治虫为主的生物防治. 在田间害虫的各天敌种群凋落的情况下, 养鸭除虫是一项十分有效的生物防治措施. 以菌治虫主要使用苏云金芽孢杆菌工业菌粉, 防治稻纵卷叶螟和直纹稻苞虫 *Parnara guttata* 幼虫, 效果达70%~90%. 育蜂治虫主要释放螟黄赤眼蜂和松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 防治稻纵卷叶螟, 放蜂面积从1973年的8 hm²增至1976年的395 hm², 稻纵卷叶螟卵被寄生率除1973年和1974年较低外, 其余年份均在67%~83%.

(3) 协调使用化学农药. 一是做好测报工作, 对达到防治标准的田块进行挑治; 二是抓好秧田用药, 尽量减少害虫随插植带入本田, 以减少大田农药使用量, 保护田间的天敌种类免遭农药杀伤; 三是控制施药面积,

规定 2 hm^2 以上由镇植保员鉴定, 2 hm^2 以下由村植保员鉴定, 0.67 hm^2 以下由村民小组植保员决定选用何种防治措施。

(4) 保护青蛙. 主要采用行政措施, 特别在青蛙繁殖季节, 镇政府出示保护青蛙的公告, 并在夜间安排民兵巡逻放哨, 禁捕蛙类。

4.3 第二阶段(1979~1983年)

经过几年大面积推广上述防治措施, 天敌多样性和种群明显提高, 害虫种群猖獗的局面受到控制. 1979年以后, 由于田间的寄生蜂、蜘蛛和青蛙等各种天敌种群数量基本恢复. 采用的措施主要着眼于保护和维持天敌在田间的多样性和密度优势, 充分发挥其对害虫的控制作用. 所坚持的主要技术措施包括以下几项。

(1) 农业防治. 包括继续提前返田, 压低越冬三化螟虫口基数; 早春推广安全期育秧, 以减轻稻蓟马为害; 抓好肥水管理, 减轻病虫发生和蔓延。

(2) 继续坚持合理协调使用农药. 与第一阶段基本相同, 但由于实行了农田包产到户, 农田的经营体制发生了变化, 在做法上进行了调整, 如村与村之间实行合作防治, 按面积统筹资金, 统一购买农药. 另外, 以镇农务员(每人负责 53.3 hm^2)指导农户的形式, 农务员定期到田头查害虫查天敌, 确定防治对象田, 凡达到防治标准的田块, 通知和指导农户进行针对性的挑治。

(3) 生物防治. 继续坚持保护青蛙等有益动物, 保护天敌昆虫及其越冬场所, 不搞四面光(铲除田块周围的所有杂草), 进一步促进田间天敌群落的重建和维持田间天敌群落稳定, 充分发挥天敌对害虫种群的调控作用。

4.4 第三阶段(1984~1998年)

经过长期大面积的以生物防治为主导的害虫综合治理, 早晚稻田逐步达到了少用或基本不用化学农药, 农田环境中的化学农药显著下降. 1994年测试, 除沙蚕毒(杀虫双)在禾秆和稻谷中的含量分别为 0.04 和 0.005 mg/kg 外, 其余化学农药均未检出. 1998年获绿色食品证书(证书号: LB-18-9801190913)^[4]。

4.5 推广应用

蒲蛰龙教授建立的“以发挥害虫天敌效能为主的

害虫综合防治”技术体系至今仍在水稻生产中广泛使用, 已扩展到我国各水稻主产区, 并进一步创新了稻田养鳖、养鱼、养螃蟹、养蛙等种养模式^[66]。

近年来, 研究了植物多样性在水稻害虫控制中的作用. 发现四个水稻品种混合种植显著降低了褐飞虱的种群数量, 同时期对比最大下降98%, 并在一定程度上增加了蜘蛛的数量^[67]。此外, 稻菜轮作模式也显著降低了褐飞虱的数量, 同时期对比下降50%以上, 但对蜘蛛数量的影响不明显^[68]。在广东省连山县永和镇上草村建立了广东省首个有机稻生产展示基地(33 hm^2), 该基地具有技术展示和观摩培训功能. 水稻害虫生物防治技术和无公害防治技术体系在广东海纳农业有限公司、广东田联种业有限公司、连山县农业科学研究所等单位的多个基地实现了成果转化, 累计推广面积 7660 hm^2 。

4.6 害虫综合防治效益

(1) 社会效益: 经过水稻害虫综合防治的长期实践, 广大农民自觉接受并实施以发挥天敌效能为主的害虫综合防治措施. 农民已经认识到: ① 稻田有一些害虫是正常的, 只要天敌较多, 害虫不会造成明显危害; ② 保护利用天敌可以增强对害虫的控制作用; ③ 使用杀虫剂不仅杀死害虫, 也杀死天敌, 并有可能造成害虫在水稻中后期暴发, 而且施用农药花钱费工, 有时发生中毒, 农药污染环境, 危害身体健康; ④ 稻米农药残留的显著降低和农田生态环境的改善, 有益于人们健康水平的提高. 害虫综合防治理念深入人心, 实施综合防治已成为农民的一种自觉行为。

(2) 经济效益: 经济效益包括实施害虫综合防治所产生的直接和间接经济效益. 直接经济效益是指项目实施所产生的直接经济收益, 包括两个方面: 一是农田生态环境改善所生产的绿色大米, 提高了所生产大米的附加值, 实实在在提高了农民的产出收益; 二是农药用量的显著减少, 降低了生产成本. 间接经济效益则是指通过项目实施, 显著改良了生态环境, 其他农副产品的附加值因此增加而产生的经济效益。

(3) 生态效益: ① 农药残留显著降低, 农田环境质量良性发展; ② 种库中天敌种类多样性增加, 促进稻田天敌群落重建与发挥控害作用; ③ 稻田天敌优势地位稳定, 持续控制三化螟、稻纵卷叶螟、褐飞虱和白背飞虱等主要害虫的发生. 保护利用天敌, 充分发挥

天敌对害虫种群的调控效能, 持续控制水稻害虫的发生, 是以发挥害虫天敌效能为主的水稻害虫综合防治的最主要生态效益。

5 应用基础研究

5.1 保护利用天敌防治害虫的群落生态学机制

(1) 保护利用天敌在害虫生物防治中的重要性. 害虫生物防治的基本原则, 一是增加自然界害虫天敌的数量, 二是改变本地昆虫的种群结构. 后者通过引进或移植天敌来实现, 而前者则包括人工规模化繁育和释放天敌, 以及自然天敌种群的保护与利用. 鉴于对生物材料的国际交流的严格限制, 引进有效生物防治资源变得非常困难, 目前80%以上的生物防治面积是通过天敌的保护利用来实现的. 农田生态系统中业已存在的天敌群落是抑制害虫发生的主要因子, 只是由于化学农药的滥用, 天敌群落的控害作用首先受到影响, 使得害虫问题日益突出. 因此, 恢复已凋落的天敌群落是农田害虫生物防治的根本. 当然, “恢复”不是简单重复化学农药大量使用以前的群落, 而是通过研究, 更好更快地促进天敌群落的重建, 显著提高其控害效能^[69,70].

(2) 天敌群落种库的作用. 种库是非作物生境中为作物生境节肢动物群落提供移居者的节肢动物集合. 种库储存了一个栖息地可以移居的种类, 同时也影响物种移居的时间和数量. 对天敌群落的种库进行适当的保护和调控, 有利于作物生境天敌群落的重新形成和发展. 例如, 在冬季和夏季休耕期, 杂草中的各种飞虱和叶蝉卵是缨小蜂和赤眼蜂的最主要寄主, 适当保留田埂或周边生境的一些杂草, 有利于卵寄生蜂的存在; 在春插期和双抢期, 抓好蜘蛛和蜘蛛卵块的转移工作对蜘蛛种库的保护非常重要^[71-74].

(3) 短期农作物生境节肢动物群落的重建. 短期农作物包括水稻、小麦、玉米等粮食作物和棉花、甘蔗等经济作物及蔬菜等, 主要特征是生长周期短, 需要不断种植和收割. 这种周期性的种植和收割使得其中的节肢动物群落处在不断变化之中, 当作物种植后, 田间存在的节肢动物和非作物生境中的部分节肢动物迁入作物生境, 形成作物生境的节肢动物群落, 这个过程就是短期农作物生境节肢动物群落的重建. 随着短期农作物周期性的种植和收割, 作物生境内的节肢动物

群落也周期性地呈现出群落重新形成、群落发展和群落瓦解3个阶段^[71,73,74].

(4) 天敌群落重建阶段的重要性. 害虫大发生时, 天敌食物资源丰富, 种群数量也随后增加, 并最终把害虫密度控制在一个较低的水平, 说明了天敌对害虫的控制作用. 但也容易产生天敌只是简单地跟随害虫发生的错觉. 事实上, 天敌常在害虫之前出现在作物田中, 其种群密度通常较小^[72,75]. 害虫的大发生常出现在繁殖1~2代以后, 因此害虫繁殖后代的这段时间是防止害虫大发生的关键时期. 在这段时间, 作物生境中的天敌群落正处在重建阶段. 如果重建阶段天敌多样性和种群密度较高, 能够成功控制害虫数量的增加, 害虫将不会造成明显危害. 所以, 应该强调害虫种群密度迅速增加之前天敌所起到的控制作用, 而不是在害虫大发生以后, 也就是说, 天敌群落的重建阶段在害虫生物防治中的作用非常重要^[69-71].

(5) 群落重建与天敌效能. 天敌与目标害虫间相互作用的时间、空间和营养生态位影响天敌的控害效能, 增加重要天敌种类和种群数量是提高天敌效能的主要途径之一. 结合天敌的数量及捕食或寄生能力, 可以确定控制目标害虫的重要天敌种类. 加快天敌群落的重建速度, 也能提高其效能. 调控天敌的食物, 使之集中控制目标害虫, 可提高天敌对目标害虫的控制功能. 例如, 相较于不烤田, 烤田使褐飞虱数量减少90%以上, 其原因是烤田切断了捕食性天敌水体中的猎物, 使得天敌集中捕食水稻植株上的稻飞虱^[69,70].

(6) 保护利用天敌的群落生态学基础. 保护利用天敌就是通过提供有利于天敌的栖息生境增强其效能. 由于农作物的周期性种植和收割, 天敌群落也周期性地栖息在作物生境和种库中. 因此, 不仅要保护作物生境中的天敌, 还要保护种库中的天敌. 前者涉及保护利用天敌与其他措施(如杀虫剂和作物抗虫品种)的协调, 后者涉及到非农田生境的设计和维持等^[3,69,70].

5.2 寄生蜂与寄主的免疫互动机制

腰带长体茧蜂*Macrocentrus cingulum*是世界性农业害虫亚洲玉米螟*Ostrinia furnacalis*的优势寄生蜂, 为多胚发育的幼虫内寄生蜂, 一粒卵可以发育出近百只基因型相同的后代, 同时还会产生母源性寄生因子假胚^[76]. 针对在寄主幼虫体内发育的腰带长体茧蜂如何抵御寄主的免疫反应的机制进行研究, 可为指导寄

生蜂在害虫生物防治上的应用提供理论依据。

(1) 寄主针对寄生蜂的免疫反应——包裹反应的发生机制. 在获得了亚洲玉米螟幼虫的免疫血细胞的细胞系及两个细胞亚系^[77,78]的基础上, 阐明了细胞因子Integrin^[79,80]及血浆因子Immulectins^[81]和EPPI^[82]在包裹反应过程中的功能。

(2) 寄生蜂在不同发育阶段采用不同的策略抵御寄主的免疫反应. 在卵及胚胎期, 该蜂利用卵及胚外膜表面表达的重糖基化跨膜蛋白Hemomucin被动逃避寄主的免疫反应^[83-85]. 而Hemomucin在蜂幼虫表面的表达量极低, 研究发现在蜂幼虫阶段, 该蜂采用了完全不同的策略, 它通过子代寄生因子假胚分泌的microRNAs抑制寄主免疫相关基因的表达, 从而主动抑制寄主的免疫反应(待发表)。

5.3 RNAi与害虫生物防治

为更有效地获得安全高效的褐飞虱RNA干扰(RNA interference, RNAi)靶标基因, 建立了一套安全高效RNAi靶基因的筛选流程^[86], 获得了多个具有自主知识产权的RNAi靶标基因, 包括几丁质合成酶基因A (*CHSA*)、转运必需内吞体分选复合物III亚基*Snf7*等^[87]. 金龟子绿僵菌*Metarhizium anisopliae*与褐飞虱*CHSA*的dsRNA混合使用, 可显著提高对褐飞虱的防治效果^[88]. 在绿僵菌中表达褐飞虱*CHSA*的dsRNA, 褐飞虱在喷施绿僵菌后6 d的累积死亡率比野生型菌株提高34.7%~40.0%, 致死中时间(LT₅₀)约为野生型菌株的50%^[89].

5.4 棉铃虫滞育的分子机制

棉铃虫*Helicoverpa armigera*是棉花的最主要害虫, 年发生4~5代, 在蛹期滞育越冬. 查明棉铃虫的越冬滞育机制, 鉴定、发现调节棉铃虫发育的关键调节基因, 可为开发新型化学农药奠定基础。

早期的研究只是证明棉铃虫蛹滞育是下调脑中的促前胸腺激素(PTTH)和蜕皮激素(ecdysone)导致滞育发生, 但其它方面都不清楚. 我们的研究发现了上游的脑激素信号下调后, 引发棉铃虫脂肪体产生的中间代谢物全面下调, 特别是血液中葡萄糖、丙酮酸和三羧酸循环的底物等显著下调, 进而抑制了脑的三羧酸循环的活性, 能量产生显著下降, 导致蛹脑的代谢活性显著下调, 最终诱导个体进入滞育状态^[90]. 其重要意

义是找到了衔接上游激素信号和最终滞育表型的中间环节, 即蛹滞育的核心机制是通过调节能量产生、控制代谢速度影响滞育的发生。

脑产生的上游激素信号如何传递到组织, 形成新的胞内信号而发生作用的呢? 原来下调的上游激素信号引发血液中的中间代谢物下调, 使得脑细胞中线粒体产生能量的过程出现异常, 导致活性氧(ROS)的产生和积累, ROS就是胞内信号^[91]. ROS作为信号分子, 调节相关的信号通路的改变, 如胰岛素、TOR、TGF- β 、HIF、c-Myc、JNK等信号路径, 最终引起昆虫滞育的发生^[92-97]. 其中, 胰岛素路径中的转录因子FoxO是最关键的基因, 引发下游系列基因的表达变化, 启动滞育^[98]. 同时, ROS还可以作为直接的作用因子, 它能够氧化脑细胞内的各种蛋白(包括酶), 导致代谢活性的直接下调, 诱导昆虫滞育的进入^[99,100].

对一些重要蛋白的修饰进行了调查, 如组蛋白的甲基化、代谢酶的去乙酰化等; 对滞育开始前的基因或蛋白变化也开展了工作, 如滞育激素基因表达的转录因子调控、滞育开始前的基因和蛋白的差异表达鉴定等. 这些蛋白的修饰和基因表达的调控等也对滞育都起着重要的作用^[101-107], 说明滞育是非常复杂的整体性生理性反应. 棉铃虫滞育的分子机制是目前国际上研究得最系统、最清楚的工作。

6 总结

生物防治利用的是生物体或生物的代谢产物, 优点是对环境友好, 可以避免对人畜的伤害和环境污染, 而且不少害虫天敌对一些害虫的发生有长期抑制作用, 可以持续控制害虫的发生. 但也正因为利用的是活体生物或代谢产物, 由于其本身的局限性或受各种环境条件的制约, 缺点也很明显. 一是见效较慢, 天敌对害虫的控制作用往往有一个滞后期, 不会立竿见影; 二是专一性太强, 一种天敌往往只对一种或少数几种害虫有效, 在某些情况下, 可单独使用一种或几种天敌去抑制一种或几种害虫的发生; 三是不能完全代替其他防治方法. 而生物农药在大田应用中还存在环境条件如光照、降雨、湿度、风速、风向等和施用时机、时间和方法等对防效的影响. 正是由于这些缺点的存在, 一定程度上制约了害虫生物防治技术的推广。

我国是农业大国, 害虫问题严重威胁农业生产的安全, 长期形成的“农药万能”观念导致化学杀虫剂的过量使用, 并形成恶性循环^[108]。好在这一问题已引起国家的高度重视, 农业部^[109]制定的《到2020年农药使用量零增长行动方案》, 确定了解决害虫防治问题的四大对策, 即构建病虫监测预警体系、推进科学用药、推进绿色防控和推进统防统治, 使我国有效减少农药使用量, 保障农业生产安全和生态环境安全, 促进农业可持续发展指明了方向。

作为绿色防控核心组成部分的害虫生物防治, 是

一项涉及政府、商业部门、技术研究者、农技推广部门、广大消费者、农民等社会各方面的系统工程, 需要各方的协调配合, 而农民则是防治措施的最终执行者。因此, 如何让农民树立生物防治的理念, 让害虫生物防治深入人心, 是应该重点关注的问题。在大沙实施的以发挥天敌效能的水稻害虫综合防治, 为解决这一问题提供了有效的方案, 即让农民对害虫生物防治的思想和技术体系要有正确的认识和理解, 明确为什么、做什么和怎么做, 这样才能确保生物防治这一造福人类的技术能在生产实践中准确实施。

参考文献

- 1 Pu Z L. Principles and Methods of Pest Biological Control (1st edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1978 [蒲蛰龙. 害虫生物防治的原理和方法(第一版). 北京: 科学出版社, 1978]
- 2 Pu Z L. Principles and Methods of Pest Biological Control (2nd edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984 [蒲蛰龙. 害虫生物防治的原理和方法(第二版). 北京: 科学出版社, 1984]
- 3 Zhang G R, Hu J, Pu Z L. Principles and Methods of Pest Biological Control (3rd edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [张古忍, 胡建, 蒲蛰龙. 害虫生物防治的原理和方法(第三版). 北京: 科学出版社, 2022]
- 4 Gu D X, Zhang G R, Zhang R J, et al. Review on fifty-years biological control of insect pests in southern China (in Chinese). Acta Entomol Sin, 2000, 43: 327–335 [古德祥, 张古忍, 张润杰, 等. 中国南方害虫生物防治50周年回顾. 昆虫学报, 2000, 43: 327–335]
- 5 Gu D X, Feng S. Academician Pu Zhelong, the Father of Biological Control in South China (in Chinese). Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 2012. 77 [古德祥, 冯双. 南中国生物防治之父——蒲蛰龙院士. 广州: 中山大学出版社, 2012]
- 6 Pu Z L, Deng D A, Liu Z C, et al. On the rearing of *Trichogramma evanescens* Westw. and its utilization for the control of sugar cane borers (in Chinese). Acta Entomol Sin, 1956, 6: 1–35 [蒲蛰龙, 邓德藻, 刘忠诚, 等. 甘蔗螟虫卵赤眼蜂繁殖利用的研究. 昆虫学报, 1956, 6: 1–35]
- 7 Collaborative Research Group of Biological Control of Rice Pests, Kwangtung Province. The control of rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee by *Trichogramma* egg parasites (in Chinese). Acta Entomol Sin, 1974, 17: 269–280 [广东省水稻害虫生物防治大会战工作队. 利用赤眼蜂防治稻纵卷叶螟. 昆虫学报, 1974, 17: 269–280]
- 8 Wang Z Y, He K L, Zhang F, et al. Mass rearing and release of *Trichogramma* for biological control of insect pests of corn in China. Biol Control, 2014, 68: 136–144
- 9 Lee T Y. The development of *Trichogramma evanescens* Westw. and its influence on the embryonic development of its host, *Attacus cyathia ricini* Boisd (in Chinese). Acta Entomol Sin, 1961, 10: 339–354 [利翠英. 赤眼蜂 *Trichogramma evanescens* Westw. 的个体发育及其对于寄主蓖麻蚕 *Attacus cyathia ricini* Boisd 胚胎发育的影响. 昆虫学报, 1961, 10: 339–354]
- 10 Huang Y C, Yi D W, Song Z W, et al. The individual development of *Trichogramma chilonis* on *Corcyra cephalonica* eggs (in Chinese). J Environ Entomol, 2016, 38: 457–462 [黄燕嫦, 易帝玮, 宋子伟, 等. 螟黄赤眼蜂的个体发育. 环境昆虫学报, 2016, 38: 457–462]
- 11 Huang Y C, Song Z W, Li D X, et al. Effects of cold storage on the free amino acids in *Corcyra cephalonica* eggs (in Chinese). J Environ Entomol, 2016, 38: 468–475 [黄燕嫦, 宋子伟, 李敦松, 等. 冷藏对米蛾卵液中游离氨基酸变化的影响. 环境昆虫学报, 2016, 38: 468–475]
- 12 Huang Y C, Wu H, Song Z W, et al. Effects of cold storage on the chemical composition of *Corcyra cephalonica* eggs by ¹H NMR spectroscopy. Biol Control, 2017, 110: 25–32
- 13 Wu H, Huang Y C, Guo J X, et al. Effect of cold storage of *Corcyra cephalonica* eggs on the fitness for *Trichogramma chilonis*. Biol Control, 2018, 124: 40–45
- 14 Yi D W, Xiao R, Zhao Y L, et al. Cold storage of *Corcyra cephalonica* eggs affects the quality of *Trichogramma chilonis* offspring (in Chinese). J Environ Entomol, 2014, 36: 565–571 [易帝玮, 肖榕, 赵云龙, 等. 冷藏米蛾卵对子代螟黄赤眼蜂质量的影响. 环境昆虫学报, 2014, 36: 565–571]

- 15 Yi J, Wu H, Liu J, et al. Molecular characterization and expression of six heat shock protein genes in relation to development and temperature in *Trichogramma chilonis*. *PLoS ONE*, 2018, 13: e0203904
- 16 Liu J, Yi J, Wu H, et al. Prepupae and pupae transcriptomic characterization of *Trichogramma chilonis*. *Genomics*, 2020, 112: 1651–1659
- 17 Liu J B, Wu H, Yi J Q, et al. Transcriptome characterization and gene expression analysis related to chemoreception in *Trichogramma chilonis*, an egg parasitoid. *Gene*, 2018, 678: 288–301
- 18 Liu J, Wu H, Yi J, et al. Identification and functional characterization of D-fructose receptor in an egg parasitoid, *Trichogramma chilonis*. *PLoS ONE*, 2019, 14: e0217493
- 19 Liu J, Wu H, Yi J, et al. Two gustatory receptors are necessary for sensing sucrose in an egg parasitoid, *Trichogramma chilonis*. *Chemoecology*, 2020, 30: 103–115
- 20 Tang L. Systematic studies of Chinese *Anastatus* (in Chinese). Master Thesis. Fuzhou: Fujian University of Agriculture and Forestry Technology, 2018 [唐璐. 中国平腹小蜂属系统分类研究. 硕士学位论文. 福州: 福建农林科技大学, 2018]
- 21 Peng L F, Gibson G A P, Tang L, et al. Review of the species of *Anastatus* (Hymenoptera: Eupelmidae) known from China, with description of two new species with brachypterous females. *Zootaxa*, 2020, 4767: 351–401
- 22 Pu Z L, Mai X H, Huang M D. Preliminary reports on the control of *Tessaratomia papillosa* by applying *Anastatus* sp. (in Chinese). *J Plant Protection*, 1962, 1: 301–306 [蒲蛰龙, 麦秀慧, 黄明度. 利用平腹小蜂防治荔枝蜡蚧试验初报. 植物保护学报, 1962, 1: 301–306]
- 23 Pu Z L. Control of *Tessaratomia papillosa* by applying *Anastatus* sp. In: Sun Yat-sen University and Guangdong Provincial Association of Science and Technology, eds. Selected Works of Puzhelong (in Chinese). Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1992. 135–169 [蒲蛰龙. 利用平腹小蜂防治荔枝蜡蚧. 见: 中山大学与广东省科学技术协会组编. 蒲蛰龙选集. 广州: 中山大学出版社, 1992. 135–169]
- 24 Liu Z C, Wang Z Y, Sun S R, et al. Mass reproduction of *Anastatus* sp., a parasitoid of *Lickee stink* bug, with artificial host eggs (in Chinese). *Chin J Biol Contr*, 1986, 2: 54–58 [刘志诚, 王志勇, 孙似纫, 等. 利用人工寄主卵繁殖平腹小蜂防治荔枝蜡. 生物防治通报, 1986, 2: 54–58]
- 25 Zhao C, Zhang B S, Yuan X, et al. Sixty years research on biological control of pests by Guangdong Academy of Agricultural Sciences: Achievements and Prospects (in Chinese). *Guangdong Agricult Sci*, 2020, 47: 93–102 [赵灿, 张宝鑫, 袁曦, 等. 广东省农业科学院害虫生物防治研究60年: 成就与展望. 广东农业科学, 2020, 47: 93–102]
- 26 She C R, Pang R Y, Gu D X, et al. Several technological problems of applying *Anastatus* sp. to control *Tessaratomia papillosa* (in Chinese). *J Fujian Agricult Univ*, 1997, 26: 441–445 [余春仁, 潘蓉英, 古德祥, 等. 利用平腹小蜂防治荔枝蜡蚧若干技术问题探讨. 福建农业大学学报, 1997, 26: 441–445]
- 27 Huang M D, Mai X H, Wu W N, et al. The biology of *Anastatus* sp. and its utilization for the control of *Lickee stink* bug *Tessaratomia papillosa* Drury (in Chinese). *Acta Entomol Sin*, 1974, 17: 362–375 [黄明度, 麦秀慧, 吴伟南, 等. 荔枝蜡蚧卵寄生蜂——平腹小蜂(*Anastatus* sp.)的生物学及其应用的研究. 昆虫学报, 1974, 17: 362–375]
- 28 Lu A P, Yang Q Y. Ontogeny of *Anastatus* sp (in Chinese). *Nat Enemies Insects*, 1983, 5: 215–221 [卢爱平, 杨球英. 平腹小蜂个体发育研究. 昆虫天敌, 1983, 5: 215–221]
- 29 Lu A P, Cui B Y, Yang L M. Effects of nutrition on the sexual differentiation of the parasitoids of Hymenoptera, I: effects of host eggs on the sex ratio of *Anastatus* sp. (in Chinese). *Nat Enemies Insects*, 1981, 3: 1–5 [卢爱平, 崔炳玉, 杨丽梅. 营养和寄生性膜翅目的性分化I. 寄主卵和平腹小蜂*Anastatus* sp. 性比关系. 昆虫天敌, 1981, 3: 1–5]
- 30 Yang P. *Oecophylla maragdina*. In: Wu F Z, ed. An Encyclopedia of Chinese Agriculture (in Chinese). Beijing: Agricultural Publishing House, 1992. 161–162 [杨沛. 黄猷蚁. 见: 吴福桢, 主编. 中国农业百科全书(昆虫卷). 北京: 农业出版社, 1992. 161–162]
- 31 Huang H T, Yang P. The ancient cultured citrus ant. *BioScience*, 1987, 37: 665–671
- 32 Huang T F, Ma Y, Tang B J, et al. Sexual differences in the response of the parasitoid wasp *Anagrus nilaparvatae* to rice volatiles (in Chinese). *Chin J Appl Entomol*, 2021, 58: 876–884 [黄庭发, 马莹, 汤冰洁, 等. 稻虱缨小蜂响应水稻挥发物的性二型性特征. 应用昆虫学报, 2021, 58: 876–884]
- 33 Wang B Y, Huang T F, Ma Y, et al. Biological and ecological characteristics of a thermotolerant strain of *Anagrus nilaparvatae* (in Chinese). *Chin J Biol Control*, 2021, 37: 692–700 [王冰洋, 黄庭发, 马莹, 等. 稻虱缨小蜂耐热品系的生物和生态学特征. 生物防治学报, 2021, 37: 692–700]
- 34 Wang B Y, Ma Y, Tang B J, et al. Optimization of mass rearing of *Anagrus nilaparvatae* Pang et Wang on natural hosts (in Chinese). *J Environ Entomol*, 2022, 44: 713–721 [王冰洋, 马莹, 汤冰洁, 等. 基于自然寄主的稻虱缨小蜂规模化饲养的条件优化. 环境昆虫学报, 2022, 44: 713–721]

- 35 Ma Y, Guo Z, Wang L, et al. The genome of the rice planthopper egg parasitoid wasps *Anagrus nilaparvatae* casts light on the chemo-and mechanosensation in parasitism. BMC Genomics, 2022, 23: 1–14
- 36 Ma Y, Huang T, Tang B, et al. Transcriptome analysis and molecular characterization of soluble chemical communication proteins in the parasitoid wasp *Anagrus nilaparvatae* (Hymenoptera: Mymaridae). Ecol Evol, 2022, 12: e8661
- 37 Pu Z L, Deng D A. Preliminary reports on the rearing, reproduction, and releasing of *Rodolia cardinalis* and *Cryptolaemus montrouzieri* introduced from Soviet Union (in Chinese). Agricult Sci Southern China, 1957, (1): 61–63 [蒲蛰龙, 邓德藻. 自苏联引进的澳洲瓢虫和孟氏隐唇瓢虫和饲养繁殖及田间散放初报. 华南农业科学, 1957, (1): 61–63]
- 38 Pu Z L, He D P, Deng D A. Reproduction and utilization of *Rodolia cardinalis* and *Cryptolaemus montrouzieri* (in Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1959, (2):1–8 [蒲蛰龙, 何等平, 邓德藻. 孟氏隐唇瓢虫和澳洲瓢虫的繁殖和利用. 中山大学学报(自然科学版), 1959, (2): 1–8]
- 39 Li L Y. The research on *Cryptolaemus montrouzieri* and the perspective of its utilization in China (in Chinese). Nat Enemies Insects, 1993, 15: 142–150 [李丽英. 我国孟氏隐唇瓢虫(*Cryptolaemus montrouzieri*)研究及应用展望. 昆虫天敌, 1993, 15: 142–150]
- 40 Pang X F, Li L Y. The population of *Cryptolaemus montrouzieri* in Guangzhou and its control on *Pseudococcus* sp (in Chinese). Nat Enemies Insects, 1979, 1: 50 [庞雄飞, 李丽英. 孟氏隐唇瓢虫在广州等地定居、控制石粟粉蚧的为害. 昆虫天敌, 1979, 1: 50]
- 41 Tang C, Pang H, Ren S X, et al. Studies on the *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant, feeding loblolly pine mealybug *Oracella acuta* (Lobdell) (in Chinese). Nat Enemies Insects, 17: 9–12 [汤才, 庞虹, 任顺祥, 等. 孟氏隐唇瓢虫捕食湿地松粉蚧的研究. 昆虫天敌, 1995, 17: 9–12]
- 42 Pan W Y, Tang Z Y, Xie G L, et al. Introduction and utilization of *Coccobius azumai* (in Chinese). Forest Pest Disease, 1993, 1: 15–18]潘务耀, 唐子颖, 谢国林, 等. 松突圆蚧花角蚜小蜂引进和利用的研究. 森林病虫通讯, 1993, 1: 15–18]
- 43 Tashikawa T. A new and economically species of *Coccobius* (Hymenoptera: Aphelinidae) parasite on *Hemiberlesia pitysophila* Takagi (Homoptera: Diaspididae) in Okinawa, Japan. Trans Shikoku Ent Soc, 1988, 19: 67–71
- 44 Ding D C, Pang W Y, Tang Z Y, et al. Biology of *Coccobius azumai* Tashikawa (Hymenoptera: Aphelinidae) (in Chinese). Acta Entomol Sin, 1995, 38: 46–52 [丁德诚, 潘务耀, 唐子颖, 等. 松突圆蚧花角蚜小蜂的生物学. 昆虫学报, 1995, 38: 46–52]
- 45 Pu Z L. Preliminary report on the control of *Pieris rapae* larvae by applying bacteria in Chengjiang of Yunnan (in Chinese). J Sun Yat-sen Univ, 1941, (2): 27–28 [蒲蛰龙. 云南澄江白粉蝶幼虫细菌防治初步试验. 中山学报, 1941, (2): 27–28]
- 46 Guangdong Institute of Microbiology. Investigation report on the control of rice pests by borelicide *Bacillus* (in Chinese). Microbiol China, 1975, 2: 5–7 [广东省微生物研究所. 用杀螟杆菌防水稻害虫的调查报告. 微生物学通报, 1975, 2: 5–7]
- 47 Pu Z L. Study on the control of mosquito larvae by *Bacillus thuringiensis* vat. *Israelensis* (in Chinese). Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1984 [蒲蛰龙. 苏云金杆菌以色列变种防治蚊幼虫的研究. 广州: 中山大学出版社, 1984]
- 48 Pang Y, Yu J X, Deng R Q, et al. Insecticidal engineering bacteria of *Bacillus thuringiensis* and its construction method. Chinese Invention Patent, Application No: 9812223115, Publication No: CN1224760A, 1998 [庞义, 余健秀, 邓日强, 等. 苏云金杆菌杀虫工程菌及其构建方法. 中国发明专利, 申请号: 9812223115, 公开号: CN1224760A, 1998]
- 49 Yu J X, Pang Y, Deng R Q. Molecular chaperone gene of insecticidal crystal protein of *Bacillus thuringiensis*, vector and strain containing the gene. Chinese Invention Patent, Application No: 981223017, Publication No: CN1234556A, 1999 [余健秀, 庞义. 苏云金杆菌杀虫晶体蛋白的分子伴侣基因、含有该基因的载体及菌株. 中国发明专利, 申请号: 981223017, 公开号: CN1234556A, 1999]
- 50 Electron Microscopy Lab in the Entomology, Department of Biology, Sun Yat-sen University. A brief report on the study of plasmotype polyhedrosis virus in larva of *Pinus massoniana* (in Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1976, 22: 11 [中山大学生物系昆虫专业电子显微镜室. 马尾松毛虫幼虫质型多角体病毒的研究简报. 中山大学学报(自然科学版), 1976, 22: 11]
- 51 Pu Z L, Ye Y C, Pang Y, et al. Research on Insect Viruses (in Chinese). Chongqing: Science and Technology Literature Press, 1982. 1–41 [蒲蛰龙, 叶育昌, 庞义, 等. 昆虫病毒的研究. 重庆: 科学技术文献出版社, 1982. 1–41]
- 52 Liu Q L, Wu R G, Zeng C X, et al. Application of plasmolytic polyhedrosis virus to control pine caterpillar in forest (in Chinese). Guangdong Forestry Science and Technology, 1985, (3): 13–30 [刘清浪, 吴若光, 曾陈湘, 等. 应用马尾松毛虫质型多角体病毒林间防治松毛虫试验. 广东林业科技通讯, 1985, (3): 13–30]
- 53 Chen C J. Integrated management of pine caterpillars (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 1990. 282–300 [陈昌洁. 松毛虫综合管理. 北京: 中国林业出版社, 1990. 282–300]
- 54 Li G H, Pang Y, Chen Q J, et al. Studies on the artificial diet for beet armyworm, *Spodoptera exigua* (in Chinese). Chin J Biol Control, 2002, 18: 132–134 [李广宏, 庞义, 陈其津, 等. 一种饲养效果更佳的甜菜夜蛾人工饲料. 中国生物防治, 2002, 18: 132–134]

- 55 Insect Virus Research Group of Entomology in the Department of Biology. Preliminary study on the nuclear polyhedrosis virus of *Spodoptera litura* (in Chinese). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1976, (3): 92–97 [生物学系昆虫学专业昆虫病毒研究小组. 斜纹夜蛾核多角体病毒的初步研究. 中山大学学报(自然科学版), 1976, (3): 92–97]
- 56 Chen Q J, Pang Y, Li G H. *Spodoptera litura* nuclear polyhedrovirus insecticides—Chongwen I. In: Abstracts of the symposium on biological pest control on both sides of the Taiwan Strait in 1998 (in Chinese). Biological Control Professional Committee of Chinese Plant Protection Society & Chinese Society of Entomology, Beijing, 1998. 56 [陈其津, 庞义, 李广宏. 斜纹夜蛾核多角体病毒杀虫剂——虫瘟一号. '98海峡两岸害虫生物防治学术研讨会论文摘要. 北京: 中国植物保护学会生物防治专业委员会、中华昆虫学会, 1998. 56]
- 57 Yang P. Insect virus insecticides—Chongwen I (in Chinese). *Pesticides*, 1999, 38: 33 [杨沛. 昆虫病毒杀虫剂——虫瘟一号. 农药, 1999, 38: 33]
- 58 Pang Y, Yao B, Fan YL, et al. Improvement of baculovirus as insecticide by using a scorpion toxin gene (in Chinese). *Nat Enemies Insects*, 1995, 17: 90–92 [庞义, 姚斌, 范云六, 等. 利用蝎毒基因改良杆状病毒杀虫剂. 昆虫天敌, 1995, 17: 90–92]
- 59 Liu Y W, Pang Y. A preliminary study on the heterologous recombination of baculovirus in insect cell lines (in Chinese). *J Sun Yat-sen University*, 1995, (Suppl 2): 89–92 [刘彦文, 庞义. 杆状病毒在细胞水平上异源重组规律初探. 中山大学学报论丛(昆虫学论文集), 1995, (2): 89–92]
- 60 Liu Y W, Pang Y, Pu Z L. Baculovirus heterogenic recombination causes DNA deletion and enlargement of insecticidal spectrum (in Chinese). Abstracts of National Biological Control Symposium, Beijing, 1995. 346 [刘彦文, 庞义, 蒲蛰龙. 杆状病毒异源重组引起DNA缺失和扩大杀虫谱. 全国生物防治学术讨论会论文摘要集, 北京, 1995. 346]
- 61 Liu N X, Liu X L, Li Q J, et al. Preliminary report on sensitivity test of entomopathogenic nematodes to *Opogona sacchari* (in Chinese). *Nat Enemies Insects*, 1998, 20: 143 [刘南欣, 刘秀玲, 李秋剑, 等. 昆虫病原线虫对蔗扁蛾敏感性试验初报. 昆虫天敌, 1998, 20: 143]
- 62 Zhang G R, Gu D X. Banana moth *Opogona sacchari* (Bojer). In: Wan F H, Zheng X P, Guo J Y, eds. *Biology and Management of Invasive Alien Species in Agriculture and Forestry* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005. 346–362 [张古忍, 古德祥. 蔗扁蛾. 见: 万方浩, 郑小波, 郭建英主编. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制, 北京: 科学出版社, 2005, pp.346–362]
- 63 Pu Z L. The integrated pest control by exerting the effectiveness of natural enemies of pests (in Chinese). *Guangdong Agricult Sci*, 1973, 9: 1–4 [蒲蛰龙. 提倡以发挥害虫天敌效能为主的害虫综合防治. 广东农业科学, 1973, 9: 1–4]
- 64 Pu Z L, Gu D X, Zhou H H, et al. Integrated control of rice pest insects in Dasha Township, Sihui County, Guangdong Province (in Chinese). *Sci Agricult Sin*, 1984, (4): 73–80 [蒲蛰龙, 古德祥, 周汉辉, 等. 大沙区水稻害虫综合防治研究. 中国农业科学, 1984, (4): 73–80]
- 65 Pu Z L, Gu D X, Zhang R J. The integrated control of rice pest insects in Dasha Township for 23 years. In: Zhang Z L, Piao Y C, Wu J W, eds. *Proceedings of integrated pest management in China* (in Chinese). Beijing: China Agricultural Sciences Press, 1996. 16–25 [蒲蛰龙, 古德祥, 张润杰. 大沙镇水稻害虫综合防治23周年. 见: 张芝利, 朴永成, 吴钜文主编. 中国有害生物综合治理论文集. 北京: 中国农业科学出版社, 1996. 16–25]
- 66 Yang H W. Review in utilization of insect natural enemies during the period from 1985 to 2015 in China (Part 2) (in Chinese). *Chin J Biol Control*, 2015, 31: 613–619 [杨怀文. 我国农业害虫天敌昆虫利用三十年回顾(下篇). 中国生物防治学报, 2015, 31: 613–619]
- 67 Shen J W, Liu Z C, Cai Y J et al. Effect of mixture cropping of multiple rice varieties on brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) and spiders (in Chinese). *Chin J Biol Control*, 2015, 31: 327–332 [沈嘉伟, 刘志超, 蔡尤俊, 等. 水稻品种多样性对褐飞虱及蜘蛛的影响. 中国生物防治学报, 2015, 31: 327–332]
- 68 Cai Y J, Shen J W, Diao S X, et al. The effect of rice-vegetable rotation cultivation on density of the brown planthopper and spiders in the fields (in Chinese). *J Environ Entomol*, 2015, 37: 548–550 [蔡尤俊, 沈嘉伟, 刁石新, 等. 稻菜轮作对稻田褐飞虱和蜘蛛数量的影响. 环境昆虫学报, 2015, 37: 548–550]
- 69 Zhang W Q, Zhang G R, Gu D X. Community reestablishment and biological control of rice insect pests (in Chinese). Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 2001 [张文庆, 张古忍, 古德祥. 群落重建与水稻害虫生物防治. 太原: 山西科技出版社, 2001]
- 70 Zhang W Q, Zhang G R, Gu D X. The reestablishment of the arthropod community in short-term crop fields III. Community reestablishment and conservation and utilization of natural enemies (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2001, 21: 1927–1931 [张文庆, 张古忍, 古德祥. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 III. 群落重建与天敌保护利用. 生态学报, 2001, 21: 1927–1931]
- 71 Zhang G R, Gu D X, Zhang W Q. Species pools of predatory arthropod communities and community rebuilding in paddy fields (in Chinese). *Chin J Biol Control*, 1997, 13: 65–68 [张古忍, 张文庆, 古德祥. 稻田捕食性节肢动物群落的种库与群落的重建. 中国生物防治, 1997, 13: 65–68]

- 72 Mao R Q, Gu D X, Zhang W Q et al. Egg parasitoids of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (in Chinese). *Nat Enemies Insects*, 1999, 21: 45–47 [毛润乾, 古德祥, 张文庆, 等. 稻田生态系统中褐飞虱卵寄生蜂的种类. *昆虫天敌*, 1999, 21: 45–47]
- 73 Zhang W Q, Gu D X, Zhang G R. The reestablishment of the arthropod community in short-term crop fields I. Concept and characteristics of the community reestablishment (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2000, 20: 1107–1112 [张文庆, 古德祥, 张古忍. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 I. 群落重建的概念及特性. *生态学报*, 2000, 20: 1107–1112]
- 74 Zhang W Q, Gu D X, Zhang G R. The reestablishment of the arthropod community in short-term crop fields II. Analysis and manipulation of the community reestablishment (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2001, 21: 1020–1024 [张文庆, 古德祥, 张古忍. 论短期农作物生境中节肢动物群落的重建 II. 群落重建的分析和调控. *生态学报*, 2001, 21: 1020–1024]
- 75 Wang L Y, Wu H X, He W. et al. Diversity of parasitoid wasps and comparison of sampling strategies in rice fields using metabarcoding. *Insects*, 2024, 15: 228
- 76 Hu J, Wang P, Zhang W. Two types of embryos with different functions are generated in the polyembryonic wasp *Macrocentrus cingulum* (Hymenoptera: Braconidae). *Arthropod Struct Dev*, 2015, 44: 677–687
- 77 Hu J, Feng X, Yang Z, et al. A continuous cell line, SYSU-OfHe-C, from hemocytes of *Ostrinia furnacalis* possesses immune ability depending on the presence of larval plasma. *Dev Compar Immunol*, 2014, 45: 10–20
- 78 Hu J, Du Y, Meng M, et al. Development of two continuous hemocyte cell sublines in the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* and the identification of molecular markers for hemocytes. *Insect Sci*, 2021, 28: 1382–1398
- 79 Hu J, Zhao H, Yu X, et al. Integrin $\beta 1$ subunit from *Ostrinia furnacalis* hemocytes: Molecular characterization, expression, and effects on the spreading of plasmatocytes. *J Insect Physiol*, 2010, 56: 1846–1856
- 80 Xu Q, Yu X, Liu J, et al. *Ostrinia furnacalis* integrin $\beta 1$ may be involved in polymerization of actin to modulate spreading and encapsulation of plasmatocytes. *Dev Compar Immunol*, 2012, 37: 438–445
- 81 Song Z, Tian M, Dong Y, et al. The C-type lectin IML-10 promotes hemocytic encapsulation by enhancing aggregation of hemocytes in the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis*. *Insect Biochem Mol Biol*, 2020, 118: 103314
- 82 Hu J, Feng X, Yao L, et al. A thermally stable protein EPP1 of corn borer *Ostrinia furnacalis* regulates hemocytic encapsulation. *J Innate Immun*, 2021, 13: 280–294
- 83 Hu J, Zhu X X, Fu W J. Passive evasion of encapsulation in *Macrocentrus cingulum* Brischke (Hymenoptera: Braconidae), a polyembryonic parasitoid of *Ostrinia furnacalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). *J Insect Physiol*, 2003, 49: 367–375
- 84 Hu J, Yu X, Fu W, et al. A Helix pomatia lectin binding protein on the extraembryonic membrane of the polyembryonic wasp *Macrocentrus cingulum* protects embryos from being encapsulated by hemocytes of host *Ostrinia furnacalis*. *Dev Compar Immunol*, 2008, 32: 356–364
- 85 Hu J, Xu Q, Hu S, et al. Hemomucin, an O-glycosylated protein on embryos of the wasp *Macrocentrus cingulum* That protects it against encapsulation by hemocytes of the host *Ostrinia furnacalis*. *J Innate Immun*, 2014, 6: 663–675
- 86 Li D, Mao J, Li C et al. Screening of safe and efficient RNAi target genes and the control effects of a Snf7 homologous gene in the brown planthopper (in Chinese). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2020, 59: 1–11 [黎丹, 毛婕, 李灿, 等. 褐飞虱安全高效RNAi靶基因的筛选及Snf7同源基因的控害效果. *中山大学学报(自然科学版)*, 2020, 59: 1–11]
- 87 Li T, Chen J, Fan X, et al. MicroRNA and dsRNA targeting chitin synthase A reveal a great potential for pest management of the hemipteran insect *Nilaparvata lugens*. *Pest Manag Sci*, 2017, 73: 1529–1537
- 88 Pan C Y, Cai Y J, Li T C et al., Control effect of *Metarhizium anisopliae* and its mixture with dsRNA on the brown planthopper (in Chinese). *J Environ Entomol*, 2016, 38: 1071–1077 [潘春艳, 蔡允俊, 李腾超, 等. 绿僵菌及其与dsRNA混合使用对褐飞虱的防治效果. *环境昆虫学报*, 2016, 38: 1071–1077]
- 89 Hu J, Cui H, Hong M, et al. The *Metarhizium anisopliae* strains expressing dsRNA of the *NICHSA* enhance virulence to the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Agriculture*, 2022, 12: 1393
- 90 Xu W H, Lu Y X, Denlinger D L. Cross-talk between the fat body and brain regulates insect developmental arrest. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 14687–14692
- 91 Zhang X S, Wang T, Lin X W, et al. Reactive oxygen species extend insect life span using components of the insulin-signaling pathway. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: E7832–E7840
- 92 Lin X W, Tang L, Yang J H, et al. HIF-1 regulates insect lifespan extension by inhibiting c-Myc-TFAM signaling and mitochondrial biogenesis. *Biochim Biophys Acta*, 2016, 1863: 2594–2603

- 93 Li H Y, Lin X W, Geng S L, et al. TGF- β and BMP signals regulate insect diapause through Smad1-POU-TFAM pathway. *Biochim Biophys Acta*, 2018, 1865: 1239–1249
- 94 Song Z, Yang Y P, Xu W H. PTEN expression responds to transcription factor POU and regulates p-AKT levels during diapause initiation in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Insect Biochem Mol Biol*, 2018, 100: 48–58
- 95 Wang X X, Geng S L, Zhang X S, et al. P-S6K is associated with insect diapause via the ROS/AKT/ S6K/CREB/HIF-1 pathway in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Insect Biochem Mol Biol*, 2020, 120: 103262
- 96 Su X, Su Z, Xu W. ROS elevate HIF-1 α phosphorylation for insect lifespan through the CK2-MKP3-p38 pathway. *Biochim Biophys Acta*, 2023, 1870: 119389
- 97 Zhang X S, Li W S, Xu W H. Activation of protein arginine methyltransferase 1 and subsequent extension of moth lifespan is effected by the ROS/JNK/CREB signaling axis. *J Biol Chem*, 2023, 299: 102950
- 98 Zhang X S, Wang Z H, Li W S, et al. FoxO induces pupal diapause by decreasing TGF β signaling. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2210404119
- 99 Geng S L, Zhang X S, Xu W H. COXIV and SIRT2-mediated G6PD deacetylation modulate ROS homeostasis to extend pupal lifespan. *FEBS J*, 2021, 288: 2436–2453
- 100 Geng S L, Li H Y, Zhang X S, et al. *CBR1* decreases protein carbonyl levels via the ROS/Akt/CREB pathway to extend lifespan in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *FEBS J*, 2023, 290: 2127–2145
- 101 Zhang T Y, Sun J S, Liu W Y, et al. Structural characterization and transcriptional regulation of the gene encoding diapause hormone and pheromone biosynthesis activating neuropeptide in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Biochim Biophys Acta (BBA)-Gene Structure Expression*, 2005, 1728: 44–52
- 102 Hong B, Zhang Z F, Tang S M, et al. Protein–DNA interactions in the promoter region of the gene encoding diapause hormone and pheromone biosynthesis activating neuropeptide of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Biochim Biophys Acta (BBA)-Gene Structure Expression*, 2006, 1759: 177–185
- 103 Lu Y X, Xu W H. Proteomic and phosphoproteomic analysis at diapause initiation in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *J Proteome Res*, 2010, 9: 5053–5064
- 104 Bao B, Xu W H. Identification of gene expression changes associated with the initiation of diapause in the brain of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *BMC Genomics*, 2011, 12: 1–14
- 105 Zhang Q, Lu Y X, Xu W H. Integrated proteomic and metabolomic analysis of larval brain associated with diapause induction and preparation in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *J Proteome Res*, 2012, 11: 1042–1053
- 106 Lu Y X, 吕 宇, Denlinger D L, et al. Polycomb repressive complex 2 (PRC2) protein ESC regulates insect developmental timing by mediating H3K27me3 and activating prothoracicotropic hormone gene expression. *J Biol Chem*, 2013, 288: 23554–23564
- 107 Wang T, Geng S L, Guan Y M, et al. Deacetylation of metabolic enzymes by Sirt2 modulates pyruvate homeostasis to extend insect lifespan. *Aging*, 2018, 10: 1053–1072
- 108 Liu S S. Opportunities, challenges and countermeasures of integrated pest management (in Chinese). *Plant Protect*, 2000, 26: 35–38 [刘树生. 害虫综合治理面临的机遇、挑战和对策. *植物保护*, 2000, 26: 35–38]
- 109 Department of Agriculture. Circular of the Ministry of agriculture on the issuance of the action programme on zero growth in fertilizer use by 2020 and the action programme on zero growth in pesticide use by 2020 (in Chinese). Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2015 [农业部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知. 北京: 中华人民共和国农业部, 2015]

Biological control benefits mankind

ZHANG Guren¹, ZHANG Wenqing¹, ZHOU Qiang¹, HU Jian² & XU Weihua¹

¹ State Key Laboratory of Biocontrol, School of Life Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

² School of Agriculture, Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518107, China

Biological control is an important part of green control technology for plant protection, and an important technical means to effectively control pesticide dosage, ensure agricultural production safety, agricultural product quality safety and ecological environment safety, and promote agricultural sustainable development. The late Professor Pu Zhelong, academician of the Chinese Academy of Sciences, and his team have made outstanding contributions in the field of biological control for pests. In terms of reproduction, release, protection and use of natural enemies to control pests, based on the fully investigation of host selection and reproduction of *Trichogramma*, and the eggs of *Philosamia cynthia ricini* were used as the intermediate host for mass reproduction of *Trichogramma*, which set a precedent and was widely applied to the control of sugarcane borers. Breeding and releasing the wasps of *Anastatus fulloi* to control *Tessaratoma papillosa*, the litchi and longan insect pests, which has been used till now; It excavated, inherited and promoted the cultural heritage of the motherland that used *Oecophylla maragdina* to control citrus pests. The technique of four-cell propagation for the large scale breeding of the *Anagrus nilaparvatae* was established. In the aspect of the introduction of natural enemies to control pests, the introduction of *Rodolia cardinalis* and *Cryptolaemus montrouzieri* to control scale insects had been completed. It was suggested to introduce *Coccobius azumai* from the origin to control *Hemiberlesia pitysophila*, the new invasive pest in pine forest. In the control of insect pests by entomopathogenic microorganisms, *Bacillus thuringiensis* was used to control rice pests such as *Cnaphalocrocis medinalis*, *Tryporyza incertulas* and the mosquito larvae of *Culex quinquefasciatus*. *Dendrolimus punctatus* cytoplasmic polyhedrosis virus was used to control *Dendrolimus punctatus*; The insecticide of nuclear polyhedrosis virus, "Chongwen I", was developed and commercialized. Through the mutation of the virus genome or the introduction of foreign genes into the genome that can interfere with the metabolism and accelerate the death of insects, multiple high-efficient nuclear polyhedrosis virus strains were constructed. The entomopathogenic nematodes were used to control the banana moth of *Opogona sacchari*, a new invasive flower pest. In the aspect of integrated pest management, "integrated pest management based on the effectiveness of natural enemies of pests" had been implemented, that is, starting from the overall agricultural ecosystem, according to the mutual relationship between rice pests and the environment, giving full play to the control role of natural enemies, adjusting to local conditions and coordinating the application of necessary measures to control rice pests below the allowable level of economic loss. In the aspect of applied basic research, the community ecological mechanism of protecting and utilizing natural enemies and giving full play to the effectiveness of natural enemies was expounded. The immune interaction between *Macrocentrus cingulum* and its host was studied. The application of RNAi in pest biological control was investigated. The molecular mechanism of diapause in cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, was studied systematically. Pest biological control is a systematic project involving the government, commercial departments, technical researchers, agricultural technology extension departments, consumers, farmers and other aspects of society, farmers are the final implementers of control measures, only let farmers fully understand the idea of pest biological control and technical system, in order to ensure that the biological control of the benefit of human technology to be accurate and effective implementation.

biological control, natural enemies of pests, *Trichogramma*, insect pathogenic microorganism, integrated pest management

doi: [10.1360/SSV-2024-0013](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0013)