

中图分类号：S532；S435.32 文献标识码：A 文章编号：1672-3635(2023)04-0347-06
DOI：10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.04.006

综 述

马铃薯块茎蛾绿色防控：进展，机遇与挑战

马心雨，闫俊杰，高玉林*

(中国农业科学院植物保护研究所/植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193)

摘 要：马铃薯块茎蛾是危害马铃薯的重大害虫，对中国马铃薯产业存在严重影响。化学防治的不合理使用导致马铃薯块茎蛾抗药性不断增加，开发新型绿色防治技术迫在眉睫。文章综述了马铃薯块茎蛾物理防治、生物防治及理化诱控等绿色防控技术研究进展，讨论了马铃薯块茎蛾绿色防控技术存在作用机制不明确、田间应用研究少及防控技术集成应用模式缺乏等问题，为进一步优化马铃薯块茎蛾绿色防控技术提供参考。

关键词：马铃薯块茎蛾；绿色防控；物理防治；生物防治；理化诱控

Advances, Opportunities and Challenges for Green Control of Potato Tuber Moth [*Phthorimaea operculella* (Zeller)]

MA Xinyu, YAN Junjie, GAO Yulin*

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory for Biology of Plant Disease and Insect Pests, Beijing 100193, China)

Abstract: The potato tuber moth is an important insect pest of potatoes, which has a serious impact on the potato industry in China. The unreasonable use of chemical control has led to increasing resistance of potato tuber moth, and it is urgent to develop new green control technologies. The domestic and international research progress of potato tuber moth physical control, biological control, physical and chemical lure control, and other green control technologies were reviewed, and the problems of potato tuber moth green control technologies such as unclear mechanism of action, few field application studies and lack of integrated application mode of control technology were discussed, which would provide reference for further optimization of potato tuber moth green control technologies.

Key Words: potato tuber moth; green control; physical control; biological control; physical and chemical lure control

1 马铃薯的重要地位

栽培种马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)为一年生茄科植物，原产于南美安第斯山区^[1]，因其耐寒、

耐旱、适应性强等特点，已被广泛种植于世界各地。马铃薯兼有粮食、蔬菜、饲料、加工功能，全球约有2/3人口将其作为主粮^[2]。2015年，农业部正式提出“马铃薯主粮化”战略。马铃薯成为中国继

收稿日期：2023-07-10

基金项目：广东省基础与应用基础研究重大专项(2021B0301030004)；国家重点研发项目(2018YFD0200802)。

作者简介：马心雨(2000-)，女，硕士研究生，研究方向为农业昆虫与害虫防治(昆虫生态学方向)。

*通信作者(Corresponding author)：高玉林，研究员，博士生导师，研究方向为马铃薯害虫综合治理，E-mail: gaoyulin@caas.cn。

玉米(*Zea mays* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)后的第四大粮食作物,在保障粮食安全方面发挥着至关重要的作用。

中国为重要的马铃薯生产国,年均产量7 247.55万t,位列全球第一。但中国马铃薯平均单产水平仅为16.4 t/hm²,远低于美国的46.4 t/hm²^[3]。在中国,虫害是严重制约马铃薯单产水平提高的重要因素之一。其中,马铃薯块茎蛾[*Phthorimaea operculella* (Zeller)]是马铃薯生产上的重要害虫^[3]。

2 马铃薯块茎蛾的危害

马铃薯块茎蛾又称马铃薯麦蛾或烟潜叶蛾等,属鳞翅目(Lepidoptera)麦蛾科(Gelechiidae),为一种寡食性害虫,可取食马铃薯、烟草及番茄等多种茄科作物。该害虫主要以幼虫为害马铃薯,既可取食叶片,也可钻蛀块茎形成孔道,导致块茎发霉腐烂。在田间,致使马铃薯减产20%~30%;在无冷藏条件仓库中,马铃薯块茎蛾危害率高达100%^[3],严重影响马铃薯产量和品质。马铃薯块茎蛾既可两性繁殖,又可孤雌生殖,卵单产或多产,单雌一生可产卵38~290粒^[4]。马铃薯块茎蛾在中国西南混作区普遍发生,在云南、四川及贵州等省发生严重。目前,随种薯调运已扩散至14个省(地区),且存在继续向其他地区扩散趋势^[5]。

3 马铃薯块茎蛾绿色防控研究进展

目前,对于马铃薯块茎蛾治理仍以化学防治为主。但化学农药的不合理施用不仅导致马铃薯块茎蛾产生抗药性,还影响蜜蜂、家蚕等非靶标生物生存,甚至危害人畜安全^[6,7]。因此,为延缓害虫抗药性发展、保障生态安全和食品安全,马铃薯块茎蛾绿色防控关键技术的开发与应用研究迫在眉睫。

3.1 物理防治

物理防治是害虫绿色防控技术的重要组成部分,是指利用光、热、电、温、辐射等物理因素和机械设备进行虫害防治的技术方法,包括灯光诱控、色板诱控、辐照不育等。在农作物害虫防治中,物理防治具有安全环保、无残留及害虫无抗药性产生等优点,对保障食品安全具有重要意义。

研究发现,单独应用黑光灯无法有效控制马铃薯块茎蛾对储存期马铃薯块茎的危害。Kirisik等^[8]利用20 W LED灯(UV-A, 350~400 nm)设计出一种新型紫外光诱捕器,该诱捕器可捕获更多数量成虫,且雌虫数量高于雄虫,有助于防控储存期马铃薯块茎蛾种群数量。Hashemi^[9]测试了粘虫板颜色(黄色、红色和绿色)对雄虫诱捕效果的影响,结果表明马铃薯块茎蛾对绿色粘虫板具有更强趋性。

辐照不育技术是指利用高能射线对害虫(主要是雄成虫)进行辐照处理,引起生殖细胞产生显性致死突变,再释放不育雄虫与野外种群竞争交配,导致后代死亡或无法产生后代,从而实现害虫防治的一种物理防治方法^[10]。利用 γ 射线在种薯调运和交易前进行辐照处理,既可抑制种薯发芽,又可防治马铃薯块茎蛾。但不同剂量的 γ 射线对马铃薯块茎蛾影响存在显著差异。当 γ 射线剂量为150 Gy,卵孵化时间延长,孵化率降低,且低日龄虫卵对辐照处理更加敏感。当 γ 射线剂量为200 Gy,可使雌虫完全不育。当 γ 射线剂量为450 Gy,雄性不育率达91%,经辐照处理雄虫交配竞争力降低;辐射剂量达1 000 Gy,能够杀死块茎蛾卵^[11]。

3.2 生物防治

目前,已发现有160余种自然天敌和病原微生物对马铃薯块茎蛾具有控制作用^[6]。控害效果评价是害虫生物防治措施推广应用的重要依据。

马铃薯块茎蛾天敌昆虫多达11目67种,不同种类天敌在防治中存在生态位差异^[6]。寄生性天敌多胚跳小蜂(*Copidosoma desantisi*)偏好块茎蛾虫卵,绒茧蜂(*Apanteles subandinus*)和怒茧蜂(*Orgilus lepidus*)偏好产卵于低龄幼虫^[12,13];捕食性天敌草蛉幼虫^[14]和斯氏小盲绥螨(*Typhlodromips swirskii*)^[15]可取食马铃薯块茎蛾卵粒,浅白翅小花蝽(*Orius albidipennis*)和蚂蚁可取食低龄幼虫^[16]。目前,多胚跳小蜂、绒茧蜂、怒茧蜂和茧蜂已被成功应用于马铃薯块茎蛾防治^[17]。杀虫剂的使用和蜜源植物种植均影响天敌种群建立,从而影响天敌控害效果。马铃薯田施用杀虫剂超过8次后,会使绒茧蜂和怒茧蜂寄生率降低22%~37%^[18];块茎蛾寄生性天敌多胚跳小蜂(*Copidosoma koehleri*)靠近蜜源植物时,

产卵量增加、寿命延长, 马铃薯块茎蛾幼虫寄生率显著提高^[19]。

昆虫病原微生物包括细菌、真菌、病毒、线虫、微孢子虫等。目前, 研究人员已开发了细菌、真菌、病毒制剂用于防治马铃薯块茎蛾。2005年, Carmen等^[20]成功分离出高毒力的苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, Bt), 其对马铃薯块茎蛾的毒力高于标准菌株, 可作为苏云金芽孢杆菌新制剂的候选菌株。金龟子绿僵菌(*Metarhizium anisopliae*)、莱氏野村菌(*Nomuraea rileyi*)、细脚拟青霉(*Paecilomyces tenuipes*)、球孢白僵菌(*Beauveria bassiana*)等虫生真菌被证实对马铃薯块茎蛾也有一定防效^[21]。马铃薯块茎蛾颗粒体病毒(*Phthorimaea operculella granulovirus*, PoGV)对马铃薯块茎蛾防效较好^[22,23]。研究发现, 一些病毒株系会潜伏感染而不造成马铃薯块茎蛾直接死亡。Larem等^[24]发现潜伏在马铃薯块茎蛾体内的PoGV-R可与PhopGV-CR3株系互作混合感染马铃薯块茎蛾, 这为开发对马铃薯块茎蛾更高效的病毒制剂提供了新思路。

现已报道有5种可用于防治马铃薯块茎蛾的昆虫病原线虫^[17,25], 分别为小卷蛾斯氏线虫(*Steinernema carpocapsae*)、夜蛾斯氏线虫(*S. feltiae*)、毛蚊线虫(*S. bibionis*)、异小杆线虫(*Heterorhabditis bacteriophora*)和斯氏线虫属(*S. cholashanense*)。线虫对不同龄期块茎蛾幼虫的致病力存在较大差异。Yan等^[26]在实验室条件下利用小卷蛾斯氏线虫对马铃薯块茎蛾2~4龄幼虫进行了敏感性测定试验, 证实4龄幼虫最易遭受侵染。马铃薯块茎蛾幼虫中已分离出*Nosema destructor* n.sp. 和*Pistophora californica* n.sp. 两种微孢子虫。马铃薯块茎蛾幼虫感染微孢子虫后, 食欲减退、行动迟缓, 化蛹前常出现死亡^[27]。微孢子虫和病毒互作对马铃薯块茎蛾种群产生影响, 证实马铃薯块茎蛾被微孢子虫侵染后对病毒PoGV-GR1.1更敏感^[28]。微生物也可以产生具有杀虫活性的挥发性有机化合物。Lacey和Neven^[29]利用桂树内生真菌*Muscodor albus*的发酵液熏蒸贮藏期马铃薯, 马铃薯块茎蛾成虫死亡率达85%~91%, 初孵幼虫死亡率达62%~73%。由此表明, 该菌具有作为马铃薯块茎蛾生物防治制剂的潜力。

3.3 理化诱控

在昆虫与植物协同进化过程中, 植物产生的信息化合物对昆虫行为具有调控作用, 影响昆虫寄主选择、取食、产卵等行为, 可用于开发昆虫引诱剂和趋避剂^[30]。 α -蒎烯、 β -蒎烯、 α -石竹烯、 β -石竹烯、*P*-聚伞花素、柠檬烯、壬醛、月桂烯、 α -松油烯和烟碱均对雌虫产卵有引诱作用^[31], 印楝素、坡柳皂苷、滇杨提取物(水杨酸甲酯、丁香酚等)对产卵有显著抑制作用^[32,33]。昆虫生理状态不同, 对挥发物的行为反应存在差异。李祥等^[34]利用触角电位技术(Electroantennography, EAG)测定了马铃薯块茎蛾未交配雌蛾、交配雌蛾及未交配雄蛾对马铃薯植株释放的16种挥发物的反应, 结果表明交配雌蛾较未交配雌蛾对庚醛反应更为敏感。研究发现, 庚醛具有双重作用, 在低浓度下吸引雌虫产卵, 高浓度下趋避产卵^[35]。趋避剂和引诱剂联合使用对马铃薯块茎蛾产卵行为调控效果更加显著。庚醛与桉叶油醇联合使用可形成“推—拉”策略, 浓度分别在12和3 mg/L时防效最佳^[36]。植物挥发物对天敌昆虫的行为也具有调控作用。高温条件下, 马铃薯植株产生的挥发物 β -石竹烯具有趋避块茎蛾雌成虫并吸引寄生性天敌螟黄赤眼蜂(*Trichogramma chilonis*)的双重作用, 可同时调控害虫和天敌的趋向行为^[37]。

昆虫信息素是指昆虫分泌的在种内或种间起到通讯交流作用的化学信息物质, 包括性信息素、聚集信息素、报警信息素等。昆虫信息素具有高效无毒、对环境友好、专一性强且害虫不易产生抗性等优点, 应用昆虫信息素开展害虫绿色防控已受到学者高度关注。其中, 性信息素研究与应用较为广泛。马铃薯块茎蛾性信息素主要化学成分为4*E*,7*Z*-十三碳二烯-1-醇乙酸酯(PTM1)和4*E*,7*Z*,10*Z*-十三碳三烯-1-醇乙酸酯(PTM2)。目前, 有关马铃薯块茎蛾性信息素合成报道极少, 且存在合成路线复杂、合成效率低及操作烦琐等问题^[38]。Pan等^[39]对合成路线进行了优化, 提出了一种更为高效的合成方法。性信息素配比、分散介质、诱捕器形状、使用密度等因素均影响性信息素在田间对害虫的捕获量^[17,40]。PTM1和PTM2在

1:4~1:7混合时,对马铃薯块茎蛾诱捕效果最佳^[40]。含有粘板的诱捕器比其他类型的诱捕器诱虫效果更佳^[41]。

4 机遇与挑战

4.1 机遇

2006年4月,中华人民共和国农业部(现农业农村部)提出了“公共植保、绿色植保”理念。绿色防控的植保发展战略正式确定,害虫防控进入了新阶段。高新技术,特别是生物技术与信息技术的迅速发展及在害虫综合防治中的广泛应用,将推动传统害虫综合防治进入一个新阶段。

4.1.1 开发绿色防控新产品

分子生物学和遗传学的发展为开发绿色防控新产品提供了新方法。目前,孟山都公司已成功利用dsRNA控制虫害,这为未来生物农药发展提供了新方向^[42]。Zhang等^[43]破译了马铃薯块茎蛾高质量基因组,这为认识该害虫生物学、生态学现象提供了遗传学基础,也为对该害虫发生、危害及综合治理研究提供了理论支撑。RNA农药是指利用RNAi技术靶向有害生物致死基因,可实现高效基因沉默,具有靶向性高、易降解、靶点丰富、可灵活设计、绿色无污染等优点。以RNAi为核心的病虫害防控技术被誉为农药史“第三次革命”,其在马铃薯块茎蛾防治领域同样被寄予厚望,有望为马铃薯块茎蛾综合治理提供新思路和新视角。

4.1.2 集成绿色防控技术新模式

信息技术的迅速发展,为集成绿色防控技术新模式提供了便捷。利用遥感技术、地理信息系统、全球定位系统等现代化技术建立农业害虫数字化监测预警平台,进行长期监测,实现马铃薯块茎蛾区域化治理。同时,建立合理的农业耕作制度,规范物理防治技术田间应用,重视生物多样性保护,充分发挥天敌控制作用,将害虫种群密度控制在较低水平。在明确“植物—害虫—天敌昆虫”协同进化的化学通讯机制基础上,利用“推—拉”策略进行害虫诱杀,降低其种群密度。综合运用农业、物理及生物防治方法,集成马铃薯块茎蛾绿色防控技术新模式。

4.2 挑战

4.2.1 作用机制不明确

无论是利用昆虫视觉的灯光诱捕和色板诱杀,还是借助昆虫嗅觉进行防治的植物挥发物和性信息素,皆基于昆虫行为进行调控。然而,关于马铃薯块茎蛾趋光、趋色行为及机理研究仍处于空白。嗅觉识别机制是农业害虫研究热门方向,科研人员已开展了关于马铃薯块茎蛾嗅觉受体功能及气味识别蛋白研究,为明确其嗅觉识别机制奠定了基础^[44,45]。目前研究重点为昆虫外周嗅觉系统如何识别单一气味分子,但植物挥发物及性信息素为一定比例组合混合物,昆虫神经系统如何识别多种气味分子并将其整合至神经的相关机制尚不明确。因此,开展马铃薯块茎蛾趋光趋色行为机制研究工作、加强气味识别相关基因的功能研究,可为未来合理利用视觉、嗅觉防控马铃薯块茎蛾奠定基础。

4.2.2 田间应用研究少

目前,马铃薯块茎蛾天敌的田间应用在国内外研究较少,生防制剂相关研究多限于室内生物测定,物理防治也多针对贮藏条件下的马铃薯块茎蛾,与田间应用仍有较大距离^[7]。大田环境复杂多变,控害效果受多种环境条件的影响。例如,杀虫剂的不当使用会影响天敌昆虫的种类及种群数量,从而降低控害效果^[11];田间紫外线辐射和降雨强度影响PoGV的杀虫效率^[46];地形或物体会阻挡诱捕器灯光,易造成诱捕盲区^[10]。同时,植物挥发物性质不稳定,持效期短,其浓度、比例及组分均影响昆虫行为。现阶段的研究主要集中于在室内条件下对马铃薯块茎蛾具有行为调控的挥发物组分鉴定和筛选。因此,加强田间应用研究可有效推进上述防控技术的应用和推广。

4.2.3 防控技术集成应用模式缺乏

单一绿色防控技术存在不同缺陷,集成应用则具有良好增效。例如,球孢白僵菌可侵染马铃薯块茎蛾幼虫,而杀虫灯和性诱剂则针对成虫发挥作用。研究发现,将球孢白僵菌、性诱剂及频振式杀虫灯3种绿色防控技术两两集成,其中以性诱剂诱捕器结合频振式杀虫灯的集成方法效果最好且可创造最大收益。在马铃薯块茎蛾成虫高峰期可联合使用

杀虫灯和性诱剂，幼虫高峰期可联合使用杀虫灯和球孢白僵菌^[47]。当前，中国马铃薯块茎蛾防控技术集成应用模式缺乏，集成与开发块茎蛾绿色防控技术模式仍为该虫治理重点和难点。

参 考 文 献

- [1] 魏延安. 世界马铃薯产业发展现状及特点 [J]. 世界农业, 2005 (3): 29–32.
- [2] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议 [J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2015(3): 1–7.
- [3] 徐进, 朱杰华, 杨艳丽, 等. 中国马铃薯病虫害发生情况与农药使用现状 [J]. 中国农业科学, 2019, 52(16): 2800–2808.
- [4] Rondon S I, Gao Y L. The journey of the potato tuberworm around the world [C]//Perveen F K. Moths—pests of potato, maize, and sugar beet. London: Intechopen, 2018: 17–52.
- [5] 高玉林. 马铃薯块茎蛾绿色防控技术 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 533–535.
- [6] 闫俊杰, 张梦迪, 高玉林. 马铃薯块茎蛾生物学、生态学与综合治理 [J]. 昆虫学报, 2019, 62(12): 1469–1482.
- [7] 杜连涛, 李正跃, 周丽梅, 等. 3类5种农药对马铃薯块茎蛾幼虫防治效果的对比试验 [J]. 中国马铃薯, 2006, 20(2): 92–93.
- [8] Kirisik M, Erler F, Kahraman T. A new—designed light trap for the control of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera: Gelechiidae), in stored potatoes [J]. Potato Research, 2023, 66(1): 245–254.
- [9] Hashemi S M. Influence of pheromone trap color and placement on catch of male potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller, 1873) [J]. Ecologia Balkanica, 2015, 7(1): 45–50.
- [10] 桑文, 高俏, 张长禹, 等. 我国农业害虫物理防治研究与应用进展 [J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 173–183.
- [11] Aryal S. IPM tactics of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera: Gelechiidae): literature study [J]. Korean Journal of Soil Zoology, 2015, 19(1–2): 42–51.
- [12] Watmough R H, Broodryk S W, Annecke D P. The establishment of two imported parasitoids of potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) in South Africa [J]. Entomophaga, 1973, 18(3): 237–249.
- [13] Platner G R, Oatman E R. Techniques for culturing and mass producing parasites of the potato tuberworm [J]. Journal of Economic Entomology, 1972, 65(5): 1336–1338.
- [14] El-Gawad H A, Sayed A M, Ahmed S A. Functional response of *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae) larvae to *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae) eggs [J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, 4(8): 2182–2187.
- [15] El-Sawi S A, Momen F M. Biology of some phytoseiid predators (Acari: Phytoseiidae) on eggs of *Phthorimaea operculella* and *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Gelechiidae and Noctuidae) [J]. Acarologia, 2005, 45(1): 23–30.
- [16] Coll M, Gavish S, Dori I. Population biology of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae), in two potato cropping systems in Israel [J]. Bulletin of Entomological Research, 2000, 90(4): 309–315.
- [17] 杜霞, 刘霞, 周文武, 等. 马铃薯块茎蛾生物防治研究进展与展望 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(1): 60–69.
- [18] Whiteside E F. Biological control of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) in South Africa by two introduced parasites (*Copidosoma koehleri* and *Apanteles subandinus*) [J]. Journal of the Entomological Society of Southern Africa, 1980, 43 (2): 239–255.
- [19] Baggen L R, Gurr G M. The influence of food on *Copidosoma koehleri* (Hymenoptera: Encyrtidae), and the use of flowering plants as a habitat management tool to enhance biological control of potato moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Biological Control, 1998, 11(1): 9–17.
- [20] Carmen S H, René A, Bel Y, et al. Isolation and toxicity of *Bacillus thuringiensis* from potato—growing areas in Bolivia [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2005, 88(1): 8–16.
- [21] Zhang M D, Wu S Y, Yan J J, et al. Establishment of *Beauveria bassiana* as a fungal endophyte in potato plants and its virulence against potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Insect Science, 2023, 30(1): 197–207.
- [22] Espinel-Correal C, Léry X, Villamizar L, et al. Genetic and biological analysis of Colombian *Phthorimaea operculella* Granulovirus isolated from *Tecia solanivora* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(22): 7617–7625.
- [23] Arthurs S P, Lacey L A, Francisco D L. Evaluation of a Granulovirus

- (PoGV) and *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* for control of the potato tuberworm (Lepidoptera: Gelechiidae) in stored tubers [J]. Journal of Economic Entomology, 2008, 101(5): 1540–1546.
- [24] Larem A, Tiba S B, Fritsch E, *et al.* Effects of a covert infection with *Phthorimaea operculella* Granulovirus in insect populations of *Phthorimaea operculella* [J]. Viruses, 2019, 11(4): 337.
- [25] Mhatre P H, Patil J, Rangasamy V, *et al.* Biocontrol potential of *Steinernema cholanense* (Nguyen) on larval and pupal stages of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) [J]. Journal of Helminthology, 2020, 94: 1–5.
- [26] Yan J J, Sarkar S C, Meng R X, *et al.* Potential of *Steinernema carpocapsae* (Weiser) as a biological control agent against potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(2): 389–393.
- [27] Hughes S K. Two newly described species of Microsporidia from the potato tuberworm, *Gnorimoschema operculella* (Zeller) (Lepidoptera, Gelechiidae) [J]. Journal of Parasitology, 1949, 35 (1): 67–75.
- [28] Larem A, Fritsch E, Undorf–Spahn K, *et al.* Interaction of *Phthorimaea operculella* granulovirus with a *Nosema* sp. *microsporidium* in larvae of *Phthorimaea operculella* [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2019, 160: 76–86.
- [29] Lacey L A, Neven L G. The potential of the fungus, *Muscodor albus*, as a microbial control agent of potato tuber moth (Lepidoptera: Gelechiidae) in stored potatoes [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2006, 91(3): 195–198.
- [30] 严善春, 张丹丹, 迟德富. 植物挥发性物质对昆虫作用的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 310–313.
- [31] 马艳粉, 胥勇, 肖春. 10种寄主植物挥发物对马铃薯块茎蛾产卵的引诱作用 [J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(3): 448–452.
- [32] 谢春霞. 马铃薯块茎蛾综合防治技术 [J]. 中国马铃薯, 2014, 28(4): 235–237.
- [33] 马艳粉, 张晓梅, 胥勇, 等. 滇杨挥发物成分对马铃薯块茎蛾产卵选择的影响 [J]. 植物保护, 2016, 42(2): 99–103.
- [34] 李祥, 张小娇, 肖春, 等. 不同性别和交配状态的马铃薯块茎蛾对马铃薯挥发物的触角电位反应 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (3): 547–555.
- [35] Ma Y F, Xiao C. Push–pull effects of three plant secondary metabolites on oviposition of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* [J]. Journal of Insect Science, 2013, 13(128): 1–7.
- [36] 刘燕, 谢冬生, 熊焰, 等. 庚醛与桉叶油醇组合对马铃薯块茎蛾产卵选择的影响 [J]. 植物保护, 2016, 42(3): 99–103.
- [37] Munawar A, Zhang Y D, Zhong J, *et al.* Heat stress affects potato's volatile emissions that mediate agronomically important trophic interactions [J]. Plant, Cell and Environment, 2022, 45(10): 3036–3051.
- [38] 陈洋, 赵红怡, 闫俊杰, 等. 马铃薯块茎蛾性信息素化学合成研究现状 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 556–572.
- [39] Pan H H, Zhao H Y, Ai L K, *et al.* Sex pheromones of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) [J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 289–300.
- [40] Yan J J, Zhang M D, Ali A, *et al.* Optimization and field evaluation of sex–pheromone of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. Pest Management Science, 2021, 78(9): 3903–3911.
- [41] 闫俊杰. 马铃薯块茎蛾性信息素及其添加物生物活性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [42] 张蜀敏, 邓可宣, 熊方杰, 等. 马铃薯虫害绿色防控和药物创新 [C]//屈冬玉, 陈伊里. 马铃薯产业与中国式主食. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2016.
- [43] Zhang M D, Cheng X Y, Lin R Z. *et al.* Chromosomal–level genome assembly of potato tuberworm, *Phthorimaea operculella*: a pest of Solanaceous crops [J]. Scientific Data, 2022, 9(748): 1–11.
- [44] Li J, Yin J, Yan J J, *et al.* Expression and functional analysis of an odorant binding protein PopeOBP16 from *Phthorimaea operculella* (Zeller) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124939.
- [45] He X L, Cai Y J, Zhu J L, *et al.* Identification and functional characterization of two putative pheromone receptors in the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* [J]. Frontiers in Physiology, 2021, 11: 618983.
- [46] Arthurs S P, Lacey L A, Pruneda J N, *et al.* Semi–field evaluation of a granulovirus and *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* for season–long control of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2010, 129: 276–285.
- [47] 袁慧果. 球孢白僵菌对马铃薯块茎蛾的致病性菌株筛选与效果评价 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.