

转基因抗虫作物对捕食性瓢虫的安全性研究进展

李东阳, 朱香镇, 张开心, 王 丽, 姬继超, 牛 林, 高雪珂, 雒珺瑜*, 崔金杰*

中国农业科学院棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室, 河南 安阳 455000

摘要: 转基因抗虫作物的商业化种植带来了显著的经济、生态和社会效益,对转基因抗虫作物的安全性评价也一直是国内外学者研究的热点。对生物非靶标效应的研究是转基因抗虫作物安全性评价的重要组成部分,农田天敌类生物是其中的重点内容之一。瓢虫是农田生态系统重要的捕食性天敌,评价其在转基因抗虫作物田间是否能通过捕食猎物或取食花粉而接触到杀虫蛋白并富集于体内,进而对自身产生一定的非靶标效应,这对捕食性瓢虫的安全性研究具有重要的意义。本文从捕食性天敌瓢虫的生命表参数、行为功能参数、田间群落参数及体内微环境指标等方面综述了转基因抗虫作物对瓢虫的安全性研究进展,并对后期转基因抗虫作物对田间捕食性天敌的研究方向提出了建议,以期对转基因抗虫作物的环境安全性研究提供理论指导和为进一步完善转基因抗虫作物对瓢虫安全性评价的技术体系提供系统的数据资料。

关键词: 转基因抗虫作物; 瓢虫; 安全性研究



开放科学标识码
(OSID 码)

Progress in assessing the ecological effects of insect-resistant genetically modified crops on predatory ladybugs

LI Dongyang, ZHU Xiangzhen, ZHANG Kaixin, WANG Li, JI Jichao,
NIU Lin, GAO Xueke, LUO Junyu*, CUI Jinjie*

Institute of Cotton Research of CAAS/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China

Abstract: The commercial planting of insect-resistant genetically modified (IRGM) crops has greatly benefited the economy, ecology and society. Risk assessment of IRGM crops has been a focus of researchers worldwide. A new IRGM variety must be subjected to a rigorous pre-market risk assessment before it is commercially grown, and an evaluation of potential adverse effects on valued non-target organisms is an important part of the risk assessment process. Ladybugs are dominant non-target predators in agroecosystems, and their chronic exposure to Bt proteins when feeding on pollen or preying on other insects in IRGM crops can lead to environmental risk. Thus, evaluating the potential adverse effects of IRGM crops on ladybugs is of great importance. Here, we reviewed the progress on assessing the ecological effects of IRGM crops on predatory ladybugs based on life table, behavioral function, field community, and internal microenvironment parameters. We have put forward suggestions for future research on assessing the risk of IRGM crops on the predators. Our paper could provide technical support and an experimental basis for developing a risk assessment of IRGM crops.

Key words: insect-resistant genetically modified crops; ladybug; risk assessment

转基因作物的商业化种植,有效控制了靶标害虫的发生和危害,取得了显著的经济、生态和社会效益(Lu *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2008)。转基因抗虫作物的环境安全性长期以来一直是国内外学者关注的热点和焦点,且环境安全性评价是转基因抗

虫作物在生产应用前的重要环节,其中农田天敌类生物是环境安全评价的重点内容之一。

瓢虫是农业生态系统中一种重要的捕食性天敌。农田常见的捕食性瓢虫有龟纹瓢虫 *Propylea japonica* Thunberg、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* Pallas、

收稿日期(Received): 2021-10-07 接受日期(Accepted): 2022-01-20

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程

作者简介: 李东阳,男,助理研究员。研究方向:转基因植物环境安全评价。E-mail: hzaulidongyang@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 雒珺瑜, E-mail: luojunyu1818@126.com; 崔金杰, E-mail: cuijinjie@126.com

七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* L. 等 (潘洪生, 2015; Zhou *et al.*, 2016)。大多数捕食性瓢虫的幼虫和成虫为捕食性, 主要以蚜虫、叶螨、粉虱、飞虱及鳞翅目害虫的卵或幼虫为食, 食物匮乏时也以作物花粉为食 (潘洪生, 2015; Zhang *et al.*, 2006)。因此, 农田瓢虫可能通过食物链富集到转基因抗虫作物中的外源 Bt 蛋白, 而富集到体内的外源 Bt 蛋白能否对其的生长发育及其他代谢产生影响也成为众多学者研究的方向。

本文从瓢虫的生命表参数、行为功能参数、田间群落参数及体内微环境指标等方面综述了转基因抗虫作物对瓢虫的安全性研究进展, 以期为转基因抗虫作物的环境安全性研究提供理论指导和为进一步完善转基因抗虫作物对瓢虫安全性评价的技术体系提供系统的数据资料。

1 对捕食性瓢虫生命表参数的影响

对生物影响的研究, 最直接的方法就是对其生长发育等生命表参数进行研究, 而生命表参数一般包括幼虫死亡率、幼虫历期、化蛹率、羽化率、新羽化成虫体重、成虫死亡率、产卵前期、总产卵量、体重、卵孵化率等。

1.1 外源 Bt 蛋白对捕食性瓢虫的影响

前人研究表明, 以鳞翅目为靶标害虫的外源 Bt 蛋白 Cry1Ab、Cry1Ac、Cry1Ah、Cry1C、Cry1Ca、Cry1F、Cry1Ie、Cry2A、Cry2Ab、Cry3Bb1、Vip3Aa 等对捕食性瓢虫的生命表参数没有不利影响。Zhang *et al.* (2014) 分别以混有 $500 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cry1Ab、Cry1Ac、Cry1F 蛋白的油菜 *Brassica napus* L. 花粉饲料饲喂龟纹瓢虫初孵幼虫, 结果发现: 龟纹瓢虫的化蛹率、羽化率、幼虫到蛹发育历期、成虫鲜重等与对照相比均无显著差异。Li *et al.* (2017a) 将 $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry1Ie 蛋白混在油菜花粉饲料中饲喂龟纹瓢虫初孵幼虫后发现, 化蛹率、羽化率、幼虫总生育期、成虫体重、总产卵量等与 Zhang *et al.* (2014) 得到了基本一致的结论。Li *et al.* (2015) 分别以 $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry1C 蛋白和 $500 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry2A 蛋白喂食龟纹瓢虫初孵幼虫, 发现其化蛹率、羽化率、幼虫总生育期、成虫体重、总产卵量等均没有受到显著影响。Zhou *et al.* (2016) 分别以 $150 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry1Ab 蛋白和 $120 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry1Ac 蛋白喂食稻红瓢虫 *Micraspis discolor* Fabricius 成虫后发现, 稻红瓢虫的生存率、产卵前历期、繁殖率、成虫体重等均没有受到

显著影响。Ali *et al.* (2017) 分别以 $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 Cry1Ac、Cry1Fa、Cry1Ca、Cry2Ab、Vip3Aa 蛋白喂食异色瓢虫初孵幼虫, 结果发现, 异色瓢虫的化蛹率、7 日龄幼虫体重、羽化率、幼虫发育历期、成虫体重等均没有受到显著不利影响。Álvarez-Alfageme *et al.* (2011) 采用类似的方法研究了以鞘翅目为靶标的 Cry3 系列蛋白对双斑瓢虫 *Adalia bipunctata* L. 的影响, 结果表明: 幼虫存活率、1~3 龄幼虫的发育历期、蛹死亡率、蛹期、雄成虫体重、雌成虫体重等参数与对照相比均没有显著差异。

1.2 转基因抗虫作物花粉对捕食性瓢虫的影响

在一定环境和条件下, 捕食性天敌瓢虫可取食花粉, 故 Bt 蛋白也可通过转基因抗虫作物的花粉传递到瓢虫体内并进一步富集。体内富集的外源 Bt 蛋白能否会对瓢虫产生影响也成为转基因生物安全研究的热门方向。转 Cry1Ab 基因水稻 *Oryza sativa* L. KMD1 和 KMD2、转 Cry1C 基因水稻 T1C-19、转 Cry2A 基因水稻 T2A-1、转 Cry1Ie 基因玉米 *Zea mays* L. IE09S034、转 Cry1Ab/Cry1Ac 基因玉米 ZMZ030 等的花粉对龟纹瓢虫的生存率、幼虫发育历期、繁殖率等均没有显著的影响 (Bai *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2015, 2017a; Xie *et al.*, 2019)。转 Cry1Ac/Cry1Ab 基因水稻华恢 1 号花粉对稻红瓢虫成虫生存率、产卵前历期、产卵量、成虫干重也没有明显影响 (Zhou *et al.*, 2016)。转 Cry1Ab/Cry2Aj 基因玉米对异色瓢虫或龟纹瓢虫的生存率、成虫体重、产卵前历期、产卵量、卵孵化率等参数没有影响 (Chang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2016)。

前人采用表达 Cry3 系列蛋白的转基因作物对捕食性瓢虫的影响进行了研究。如以含有 0、25%、50%、75% 或 100% 转基因玉米花粉配合蚜虫喂养瓢虫 *Coleomegilla maculata* DeGeer 幼虫, 结果发现: 转 Cry3Bb 基因玉米 (转化事件 MON863) 花粉对瓢虫的生存率、幼虫发育历期、成虫体重、成虫产卵前期、成虫产卵量等没有影响 (Ahmad *et al.*, 2006; Lundgren & Wiedenmann, 2002)。Ferry *et al.* (2007) 以表达 Cry3A 蛋白的马铃薯 *Solanum tuberosum* L. 花药和花粉饲喂异色瓢虫成虫, 结果发现: Cry3A 蛋白对其生存率、体重、繁殖率同样没有表现出不利影响。此外, 以表达 Cry34Ab1、Cry35Ab1、Cry3Bb1、Cry1F、Cry1A.105、Cry2Ab2 蛋白的转基因玉米 SmartStax 的花粉为食的异色瓢虫的 2、3 龄幼虫质量, 孵化到 2、3

龄时间,死亡率等参数在 Bt 和对照之间没有显著差异 (Svobodová *et al.*, 2017)。

1.3 转基因抗虫作物田间食物链上的外源 Bt 蛋白对捕食性瓢虫的影响

植食性害虫如蚜虫、叶螨、粉虱、飞虱及鳞翅目害虫的卵或幼虫等可从转基因抗虫作物中获取到外源 Bt 蛋白,而作为农田生态系统的重要捕食者,捕食性瓢虫可以通过捕食取食转基因抗虫作物的猎物而接触到 Bt 蛋白 (Chang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017b; Svobodová *et al.*, 2017)。而这种通过自然三级食物链接触的外源 Bt 蛋白是否会对捕食性天敌产生影响也是人们研究的热点。

大量研究表明,当猎物对 Bt 蛋白不敏感时,捕食性瓢虫取食以转基因植物或 Bt 蛋白为食的猎物不会产生不利影响。取食转 *Cry1Ab* 基因玉米 DKc3421Bt 和转 *Cry3Bb1* 基因玉米 DKc5143Bt 的二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch 对双斑瓢虫 1~3 龄幼虫的幼虫发育历期、重量、死亡率均没有明显的影响 (Álvarez-Alfageme *et al.*, 2011)。取食转 *Cry1Ab* 基因水稻 KMD1、KMD2 的褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 对龟纹瓢虫的发育历期、化蛹率、羽化率、蛹重、成虫体重等没有显著影响 (Bai *et al.*, 2006)。取食转 *Cry1Ac/Cry1Ab* 基因水稻华恢 1 号的褐飞虱对稻红瓢虫成虫的产卵前历期、存活率、体重、繁殖率没有显著影响 (Zhou *et al.*, 2016)。异色瓢虫取食以表达 *Cry34Ab1*、*Cry35Ab1*、*Cry3Bb1*、*Cry1F*、*Cry1A.105*、*Cry2Ab2* 蛋白的转基因玉米 Smart-Stax 为食的蚜虫或二斑叶螨后,异色瓢虫的 2、3 龄幼虫质量、孵化到 2、3 龄时间,死亡率等参数没有受到显著影响 (Svobodová *et al.*, 2017)。有研究者还使用对 Bt 蛋白具有一定抗性的靶标害虫进行试验,如 Tian *et al.* (2012) 以对 *Cry1F* 蛋白有一定抗性的草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* J.E. Smith 幼虫作为瓢虫 *C. maculata* 的食物,将瓢虫 *C. maculata* 连续 2 代以取食转基因玉米 Mycogen 2A517 (表达 *Cry1F* 蛋白) 的草地贪夜蛾幼虫为食物进行饲养,结果表明:2 代瓢虫各龄期 (1~4 龄、蛹、成虫) 发育历期、成虫体重、繁殖率、卵孵化率等均没有受到明显的影响。Liu *et al.* (2015) 将对 *Cry1Ac* 有一定抗性的小菜蛾 *Plutella xylostella* Linnaeus 幼虫 (以表达 *Cry1Ac* 蛋白的转基因花椰菜 *Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L. 为食) 饲喂给瓢虫 *C. maculata*, 结果表明:连续 2 代的瓢虫

的幼虫体重、幼虫历期、蛹期、成虫重、产卵量、卵孵化率等也未发生显著变化。

2 对捕食性瓢虫行为功能的影响

作为捕食性天敌,外源性 Bt 蛋白对捕食性瓢虫的捕食行为及其功能的影响研究也较多。如异色瓢虫取食以转 *Cry1Ac/1Ab* 基因棉花 *Gossypium* spp. 喂食的棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner 时,异色瓢虫的捕食功能没有受到显著影响 (朱香镇等, 2019)。雒珺瑜等 (2015) 研究表明,转 *Cry1Ac* + *Cry2Ab* 基因棉花 639020 和对照棉花田间生存的龟纹瓢虫的捕食功能参数没有显著差异,这表明转基因棉花的小规模种植对龟纹瓢虫的捕食功能没有产生不利影响。李海强等 (2014) 以转 *Cry1Ac* + *CP4EPS* 基因棉花 639017 和对照棉花田间生存的棉蚜分别喂食多异瓢虫 *Hippodamia variegata* Goeze, 结果显示:瓢虫 1~4 龄幼虫、成虫的捕食功能反应参数 (捕食效应直线回归方程斜率和截距、处理时间、瞬时攻击率、日最大捕食量) 在转基因棉花和对照之间也没有显著差异。在捕食选择性方面, Dutra *et al.* (2012) 研究发现:异色瓢虫对取食转基因玉米 (转 *Cry1Ab* 基因玉米 DKC-5048 RR2) 和非转基因玉米的 1、2、3 日龄的草地贪夜蛾均没有取食偏好性。

除捕食功能外,也有研究者对捕食性瓢虫的其他行为功能进行评价分析。如 Lundgren & Wiedemann (2002) 以瓢虫翻转时间和爬行速度为评价指标,评价了转 *Cry3Bb* 基因玉米对瓢虫 *C. maculata* 的影响,结果表明:取食不同含量的转基因玉米花粉后,瓢虫成虫的翻转时间和爬行速度在 Bt 和对照之间无显著差异。Ferry *et al.* (2007) 通过摄像机记录表达 *Cry3A* 的马铃薯对异色瓢虫整个生育期内成虫的 1 h 活动时间、不活动时间、平均移动速度、移动总距离、移动持续时间等,结果表明:异色瓢虫取食表达 *Cry3A* 的马铃薯花粉后这些指标没有受到显著影响。

3 对捕食性瓢虫田间群落的影响

大量的田间调查数据显示,转基因植物对捕食性瓢虫的田间群落没有不利的影响。Xing *et al.* (2019) 通过 3 年的田间调查发现:转 *Cry1Ac* 基因玉米 Bt38 与对照玉米田的瓢虫科昆虫数量没有显著性差异。雒珺瑜等 (2018) 通过在山东、河北两地

的 2 年田间调查试验发现:转 *Bt* 基因棉花中棉所 79 和对照棉花田间之间的龟纹瓢虫种群数量没有显著差异。刘慧等(2012)通过系统调查结合吸尘器方法调查转 *Cry1Ab* 基因玉米对田间瓢虫科天敌的影响,结果表明:转基因玉米对瓢虫科天敌的丰富度、优势度、种群数量没有不良影响。Pilcher *et al.* (1997, 2005) 通过田间调查(调查时间为花粉散落前、花粉散落期、花粉散落后)发现:转 *Cry1Ab* 基因玉米和对照玉米田间的瓢虫种群数量没有显著性差异。转 *Cry3Bb1* 基因玉米对瓢虫科昆虫和瓢虫种群数量也没有明显影响(Ahmad *et al.*, 2006; Rauschen *et al.*, 2010)。Lu *et al.* (2012) 通过对 1990—2010 年间中国北方 36 个转 *Bt* 基因棉试验点的大规模田间调查发现:转 *Bt* 基因棉田的种植大大减少了化学农药的使用,有效保护了天敌昆虫龟纹瓢虫、异色瓢虫、七星瓢虫、多异瓢虫等天敌昆虫的种群密度逐渐上升,田间的生物控制能力也得到了提升。

4 对捕食性瓢虫体内微环境的影响

随着研究的不断深入和系统化,对捕食性瓢虫体内微环境如相关基因的表达水平、相关酶活性、小分子如氨基酸或脂肪酸含量、共生微生物、营养利用参数等的研究也逐步增多。

4.1 对瓢虫相关酶及基因的影响

昆虫体内相关蛋白酶的活性是转基因抗虫作物非靶标效应评价的参数之一,昆虫体内分泌的多种蛋白酶和解毒酶是昆虫消化吸收的重要机制,也是杀虫蛋白起作用的关键因素(王园园等,2016)。如取食转 *Cry1Ab* 基因玉米 MON810 的花粉对异色瓢虫的体内的 α -乙酸萘酯酶活性、乙酰胆碱酯酶活性和谷胱甘肽-S-转移酶活性没有产生显著影响(张永军等,2005)。取食转 *Cry1Ah* 基因玉米花粉的龟纹瓢虫体内的 α -乙酸萘酯酶活性、乙酰胆碱酯酶活性、谷胱甘肽-S-转移酶活性以及中肠内的总蛋白酶、强碱性类胰蛋白酶活性、弱碱性类胰凝蛋白酶、类胰凝乳蛋白酶活性等与对照相比也没有显著差异(崔蕾等,2011)。有研究表明:*Cry1Ac* 和 *Cry2Ab* 蛋白对龟纹瓢虫的解毒和消化相关基因没有明显的影响,如羧酸酯酶基因、谷胱甘肽巯基转移酶基因、细胞色素 P450 酶基因、羧基/胆碱酯酶基因、氨基肽酶 N 基因、羧肽酶基因、胰蛋白酶基因、保幼激素酯酶基因、 α 酯酶基因等均没受到明显的影响

(Zhao *et al.*, 2016, 2020)。而路献勇等(2013)以 1.0 和 10.0 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 *Cry1Ah* 蛋白饲喂棉铃虫初孵幼虫,结果发现:龟纹瓢虫幼虫取食此棉铃虫幼虫后,存活率、幼虫虫体质量、幼虫发育时间、化蛹率等均没有受到影响,但龟纹瓢虫体内的解毒酶、保护酶的酶活有所降低,推测可能是当捕食性瓢虫以转基因植物的靶标害虫如鳞翅目幼虫为食物时,由于靶标害虫取食 *Bt* 蛋白或转基因植物后生长发育等营养状况会受到影响,从而在食物可提供给瓢虫的营养等功能上有所变化,从而引起其某些防御酶的变化。

4.2 对瓢虫体内营养代谢的影响

有研究通过瓢虫的营养代谢指标评价了转基因植物对捕食性瓢虫的安全性。如李亚荣等(2019)采用测定昆虫体内氨基酸含量的方法证明 *Cry2Ab* 蛋白(0.005 和 0.05 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)对龟纹瓢虫的体内氨基酸(缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、组氨酸、赖氨酸、精氨酸等)含量没有影响。Zhu *et al.* (2006)以取食转 *Cry1Ac* 基因棉花的蚜虫喂食龟纹瓢虫后,龟纹瓢虫体内游离脂肪酸含量没有显著变化。Zhao *et al.* (2016)研究表明:以 *Cry1Ah* 和 *Cry2Ab* 蛋白喂食龟纹瓢虫,对龟纹瓢虫的相对生长量、摄入食物转化效率、消化食物转化效率、近似消化率、相对取食量等营养利用参数没有不利影响。

4.3 对瓢虫体内微生物的影响

微生物是参与生态功能的重要介质,昆虫共生菌对昆虫有着至关重要的意义(Douglas, 2015),这些不同的微生物群落以多种方式为昆虫宿主提供重要的生理功能,包括提供营养补充、促进消化、调节宿主免疫稳态、保护宿主免受寄生虫和病原体的侵害、昆虫交配和繁殖、宿主代谢和解毒(张云骅等,2019; Kikuchi *et al.*, 2012)。Zhang *et al.* (2019)以含有 *Cry2Ab* 蛋白的蔗糖溶液辅以豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 喂食龟纹瓢虫后发现:*Cry2Ab* 蛋白对龟纹瓢虫的共生微生物群落整体上没有显著影响,仅有一些细菌拷贝数有所变化,但需要进一步的研究拷贝数变化对龟纹瓢虫的影响。Zhao *et al.* (2020)研究了 *Cry1Ac* 和 *Cry2Ab* 蛋白对龟纹瓢虫共生微生物的影响,结果表明:*Bt* 蛋白对微生物的多样性、微生物种类、微生物群落结构等没有影响。

5 小结与展望

捕食性瓢虫是农田生态系统重要的天敌昆虫,具有重要的生态价值,转基因抗虫作物对捕食性瓢虫的安全性研究具有重要的意义。转基因抗虫作物种植的20余年,国内外学者从生命表参数、行为功能参数、田间群落参数及体内微环境指标等方面对捕食性瓢虫的安全评价进行了多层次的研究,积累了大量的安全评价数据和相关经验技术,加深了人类对转基因植物安全问题的科学认识,促进了转基因产业的健康发展。

但在取得一定成果的基础上,也要认识到转基因抗虫作物对捕食性瓢虫安全评价研究的诸多不足之处。首先,大多数研究以报道现象为主,整体上停留在现象或证明效应的层次上,对非靶标生物的非靶标效应产生的机制探讨较少;其次,对捕食性瓢虫内部微环境方面的安全评价研究较少,虽然有少部分研究对捕食性瓢虫营养代谢、基因表达及体内微生物等进行了探讨,但适合于安全评价用途的微环境指标、分子标记物、特定微生物种类等仍然比较缺乏;再次,目前的田间群落研究大多数是短期、小规模研究,缺乏大规模的长期数据(刘标,2016),转基因抗虫作物的长期、大规模种植可能会改变现有的农业管理措施,降低化学农药的使用量,可能会跨不同气候条件的区域种植,可能会对自然生态系统中的天敌昆虫产生影响,但目前相关的研究数据较为缺乏,有待进行更加完善的研究。

目前,生物育种技术已经成为国际科技竞争和经济竞争的关键领域,是现代农业科技创新的重点,我国已将生物育种列为未来需要加强原创性、引领性科技攻关的前沿领域。随着生物育种技术的飞速发展和转基因植物新品种研发速度的不断提升,转基因抗虫作物对非靶标生物安全风险的有效评价将变得越来越重要,为了使评价的结果稳定、科学、可靠,亟待发展更完善、更快捷、易操作且能适应长期监测需求的非靶标生物安全评价技术。

捕食性瓢虫作为农田食物链上重要的天敌资源昆虫、转基因抗虫作物安全评价研究中的重要非靶标生物,有必要以其为重点长期开展转基因抗虫作物的安全评价研究。为更深刻的理解转基因作物对捕食性瓢虫的影响,有效评价转基因抗虫作物对捕食性瓢虫的安全性,今后还需要进一步开展研究、评价、监测等工作:一是非靶标效应产生的机制

研究,在研究转基因抗虫作物非靶标效应的同时,深入研究非靶标效应产生的机制,如对杀虫蛋白在昆虫体内的消化路径与结合行为的探讨等;二是新型安全评价指标的发掘,深入研究捕食性瓢虫的体内微环境、基因表达、共生微生物等,不断发掘适合于安全评价用途的微环境指标、分子标记物、特定微生物种类等;三是对转基因抗虫作物环境影响进行长期监测,以捕食性瓢虫为重点对转基因抗虫作物环境影响进行长期、大规模、系统的监测。

参考文献

- 崔蕾,王振营,何康来,白树雄,2011.转*Bt-cry1A_h*基因玉米花粉对龟纹瓢虫解毒酶和中肠蛋白酶活性的影响.生物安全学报,20(1):64-68.
- 李海强,王冬梅,李号宾,徐遥,丁瑞丰,汪飞,阿克旦·吾外土,刘建,2014.转基因抗虫抗除草剂棉花对多异瓢虫捕食棉蚜功能的影响.新疆农业科学,51(11):2020-2024.
- 李亚荣,张帅,雒珺瑜,朱香镇,王丽,崔金杰,2019. Cry2Ab蛋白对龟纹瓢虫的安全性研究.生物安全学报,28(3):195-199.
- 刘标,2016.抗虫转*Bt*基因植物的环境安全研究进展.南京师大学报(自然科学版),39(3):1-9.
- 刘慧,何康来,白树雄,王振营,2012.转*cry1Ab*基因玉米对瓢虫科天敌种群动态的影响.生物安全学报,21(2):130-134.
- 路献勇,张帅,吕丽敏,雒珺瑜,王春义,崔金杰,2013. Cry1Ah蛋白通过三级食物链对龟纹瓢虫幼虫的影响.棉花学报,25(4):283-290.
- 雒珺瑜,张帅,吕丽敏,王春义,朱香镇,崔金杰,2015.转*Cry1Ac+Cry2Ab*棉对棉铃虫的控制作用及对天敌捕食烟粉虱功能反应的影响.遗传,37(6):575-581.
- 雒珺瑜,张帅,吕丽敏,朱香镇,王春义,张利娟,王丽,李春花,崔金杰,2018.盐碱旱地转*Bt*基因抗虫棉田主要害虫及其天敌种群消长动态.生物安全学报,27(1):50-58.
- 潘洪生,2015.华北农田系统中捕食性瓢虫的生境搜索行为.博士后研究报告.北京:中国农业科学院.
- 王园园,李云河,彭于发,2016.转*Bt*基因植物对蜜蜂的安全性研究进展.中国科学:生命科学,46(5):584-595.
- 张永军,孙毅,袁海滨,吴孔明,彭于发,郭予元,2005.转*Bt-cry1Ab*玉米花粉对异色瓢虫生长发育及体内三种代谢酶活性的影响.昆虫学报,48(6):898-902.
- 张云骅,李建洪,万虎,2019.昆虫共生菌与宿主的解毒代

- 谢关系研究进展. 农药学报, 21(5/6): 729-735.
- 朱香镇, 雒珺瑜, 李笠坤, 吴益东, 李春花, 崔金杰, 2019. 转 *Cry1Ac/1Ab* 基因棉花对异色瓢虫生长发育及其捕食功能的影响. 生物安全学报, 28(1): 19-23.
- AHMAD A, WILDE G E, WHITWORTH R J, ZOLNEROWICH G, 2006. Effect of corn hybrids expressing the coleopteran-specific cry3Bb1 protein for corn rootworm control on aboveground insect predators. *Journal of Economic Entomology*, 99(4): 1085-1095.
- ALI I, ZHANG S, CUI J J, 2017. Bio-safety evaluation of Cry1Ac, Cry2Ab, Cry1Ca, Cry1F and Vip3Aa on *Harmonia axyridis* larvae. *Journal of Applied Entomology*, 141(1/2): 53-60.
- ÁLVAREZ-ALFAGEME F, BIGLER F, ROMEIS J, 2011. Laboratory toxicity studies demonstrate no adverse effects of Cry1Ab and Cry3Bb1 to larvae of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae): the importance of study design. *Transgenic Research*, 20(3): 467-479.
- BAI Y Y, JIANG M X, CHENG J A, 2005. Effects of transgenic cry1Ab rice pollen on fitness of *Propylea japonica* (Thunberg). *Journal of Pest Science*, 78(3): 123-128.
- BAI Y Y, JIANG M X, CHENG J A, WANG D, 2006. Effects of Cry1Ab toxin on *Propylea japonica* (Thunberg) (Coleoptera: Coccinellidae) through its prey, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae), feeding on transgenic *Bt* rice. *Environmental Entomology*, 35(4): 1130-1136.
- CHANG X, LU Z, SHEN Z, PENG Y, YE G, 2017. Bitrophic and tritrophic effects of transgenic *cry1Ab/cry2Aj* maize on the beneficial, nontarget *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 46(5): 1171-1176.
- DOUGLAS A E, 2015. Multiorganismal insects: diversity and function of resident microorganisms. *Annual Review of Entomology*, 60(1): 17-34.
- DUTRA C C, KOCH R L, BURKNESS E C, MEISSLE M, ROMEIS J, HUTCHISON W D, FERNANDES M G, 2012. *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) exhibits no preference between *Bt* and non-*Bt* maize fed *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *PLoS ONE*, 7(9): e44867.
- FERRY N, MULLIGAN E A, MAJERUS M E N, GATEHOUSE A M R, 2007. Bitrophic and tritrophic effects of *Bt* Cry3A transgenic potato on beneficial, non-target, beetles. *Transgenic Research*, 16(6): 795-812.
- KIKUCHI Y, HAYATSU M, HOSOKAWA T, NAGAYAMA A, TAGO K, FUKATSU T, 2012. Symbiont-mediated insecticide resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22): 8618-8622.
- LI Y, LIU Y, YIN X, ROMEIS J, SONG X, CHEN X, GENG L, PENG Y, LI Y, 2017a. Consumption of *Bt* Maize pollen containing CryIIe does not negatively affect *Propylea japonica* (Thunberg) (Coleoptera: Coccinellidae). *Toxins*, 9(3): 108.
- LI Y, ZHANG Q, LIU Q, MEISSLE M, YANG Y, WANG Y, HUA H, CHEN X, PENG Y, ROMEIS J, 2017b. *Bt* rice in China—Focusing the nontarget risk assessment. *Plant Biotechnology Journal*, 15(10): 1340-1345.
- LI Y, ZHANG X, CHEN X, ROMEIS J, YIN X, PENG Y, 2015. Consumption of *Bt* rice pollen containing Cry1C or Cry2A does not pose a risk to *Propylea japonica* (Thunberg) (Coleoptera: Coccinellidae). *Scientific Reports*, 5(1): 7679.
- LIU X, ABRO G H, HAN F, TIAN J, CHEN M, ONSTAD D, ROUSH R, ZHANG Q, SHELTON A M, 2015. Effect of *Bt* broccoli and resistant genotype of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) on life history and prey acceptance of the predator *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Biological Control*, 91: 55-61.
- LIU Y, LIU Q, WANG Y, CHEN X, SONG X, ROMEIS J, LI Y, PENG Y, 2016. Ingestion of *Bt* corn pollen containing Cry1Ab/2Aj or Cry1Ac does not harm *Propylea japonica* larvae. *Scientific Reports*, 6(1): 23507.
- LU Y, WU K, JIANG Y, GUO Y, DESNEUX N, 2012. Widespread adoption of *Bt* cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services. *Nature*, 487: 362-365.
- LUNDGREN J G, WIEDENMANN R N, 2002. Coleopteran-specific Cry3Bb toxin from transgenic corn pollen does not affect the fitness of a nontarget species, *Coleomegilla maculata* DeGeer (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 31(6): 1213-1218.
- PILCHER C D, OBRYCKI J J, RICE M E, LEWIS L C, 1997. Preimaginal development, survival, and field abundance of insect predators on transgenic *Bacillus thuringiensis* corn. *Environmental Entomology*, 26(2): 446-454.
- PILCHER C D, RICE M E, OBRYCKI J J, 2005. Impact of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn and crop phenology on five nontarget arthropods. *Environmental Entomology*, 34(5): 1302-1316.
- RAUSCHEN S, SCHAARSCHMIDT F, GATHMANN A, 2010. Occurrence and field densities of Coleoptera in the maize herb layer: implications for environmental risk assessment of genetically modified *Bt*-maize. *Transgenic Research*, 19(5): 727-744.

- SVOBODOVÁ Z, SHU Y, SKOKOVÁ H O, ROMEIS J, MEISSLE M, 2017. Stacked Bt maize and arthropod predators: exposure to insecticidal Cry proteins and potential hazards. *Proceedings Biological Sciences*, 284: 20170440.
- TIAN J, COLLINS H L, ROMEIS J, NARANJO S E, HELLMICH R L, SHELTON A M, 2012. Using field-evolved resistance to Cry1F maize in a lepidopteran pest to demonstrate no adverse effects of Cry1F on one of its major predators. *Transgenic Research*, 21 (6): 1303–1310.
- WU K M, LU Y H, FENG H Q, JIANG Y Y, ZHAO J Z, 2008. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with *Bt* toxin-containing cotton. *Science*, 321: 1676–1678.
- XIE X, CUI Z, WANG Y, WANG Y, CAO F, ROMEIS J, PENG Y, LI Y, 2019. *Bacillus thuringiensis* maize expressing a fusion gene *Cry1Ab/Cry1AcZM* does not harm valued pollen feeders. *Toxins*, 11(1): 8.
- XING Y, QIN Z, FENG M, LI A, ZHANG L, WANG Y, DONG X, ZHANG Y, TAN S, SHI W, 2019. The impact of *Bt* maize expressing the Cry1Ac protein on non-target arthropods. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6): 5814–5819.
- ZHANG S Y, LI D M, CUI J, XIE B Y, 2006. Effects of *Bt*-toxin Cry1Ac on *Propylaea japonica* Thunberg (Col., Coccinellidae) by feeding on *Bt*-treated *Bt*-resistant *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lep., Noctuidae) larvae. *Journal of Applied Entomology*, 130 (4): 206–212.
- ZHANG S, LUO J, JIANG W, WU L, ZHANG L, JI J, WANG L, MA Y, CUI J, 2019. Response of the bacterial community of *Propylea japonica* (Thunberg) to Cry2Ab protein. *Environmental Pollution*, 254 (Part B): 113063.
- ZHANG X, LI Y, ROMEIS J, YIN X, WU K, PENG Y, 2014. Use of a pollen-based diet to expose the ladybird beetle *Propylea japonica* to insecticidal proteins. *PLoS ONE*, 9(1): e85395.
- ZHAO C, WU L, LUO J, NIU L, WANG C, ZHU X, WANG L, ZHAO P, ZHANG S, CUI J, 2020. Bt, not a threat to *Propylea japonica*. *Frontiers in Physiology*, 11: 758.
- ZHAO Y, ZHANG S, LUO J, WANG C, LV L, WANG X, CUI J, LEI C, 2016. Bt proteins Cry1Ah and Cry2Ab do not affect cotton aphid *Aphis gossypii* and ladybeetle *Propylea japonica*. *Scientific Reports*, 6(1): 20368.
- ZHOU X, GUO Y, KONG H, ZUO J, HUANG Q, JIA R, GUO A, XU L, 2016. A comprehensive assessment of the effects of transgenic Cry1Ac/Cry1Ab rice Huahui 1 on adult *Micraspis discolor* (Fabricius) (Coleoptera: Coccinellidae). *PLoS ONE*, 11 (2): e142714.
- ZHU S R, SU J W, LIU X H, DU L, YARDIM E N, GE F, 2006. Development and reproduction of *Propylaea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae) raised on *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae) fed transgenic cotton. *Zoological Studies*, 45(1): 98–103.

(责任编辑: 郑姗姗)