



转 Bt 抗虫稻对地上非靶标节肢动物的生态风险性*

刘雨芳**

(湖南科技大学生命科学学院, 园艺作物病虫害治理湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

摘 要 通过转入 Bt 基因使作物获得抗虫性, 减少杀虫剂施用量, 为害虫管理开辟了一条重要途径。但公众关注与担忧其环境释放可能存在生物安全与生态风险。本文在系统评述转基因抗虫水稻的生态风险、安全性评价研究内容与方法基础上, 重点分析了转基因抗虫水稻对非靶标害虫、捕食性天敌、寄生蜂、中性昆虫及其在食物链上传递的生态风险与安全性, 提出了未来研究发展的方向。

关键词 转基因水稻, 抗虫水稻, Bt, 非靶标生物, 害虫, 天敌, 风险评估

An overview of the potential ecological risk of insect-resistant transgenic Bt rice on non-target arthropods aboveground in fields

LIU Yu-Fang**

(College of Life Science, Hunan University of Science and Technology, Hunan Province Key Laboratory for Integrated Management of the Pests and Diseases on Horticultural Crops, Xiangtan 411201, China)

Abstract Insect-resistance in some crop plants has been achieved via the introduction of genes from the bacterium *Bacillus thuringiensis* (Bt). The technology for genetic modification of plants has reduced the usage of insecticides and provided a new tool and method for insect management. However, there is public concern regarding the potential ecological risks associated with the release of Bt rice into the environment. In this paper we systematically review the ecological risks, and methods used to create insect-resistant transgenic Bt rice, focusing on the ecological risk and biosafety of transgenic Bt rice with respect to non-target pests, natural enemies (both predators and parasitoids), neutral insects and the transmission of Bt toxic protein via the food chain. We also make some suggestions for future research.

Key words transgenic rice, insect-resistance, Bt, non-target organism, insect pest, natural enemy, risk evaluation

水稻 *Oryza sativa* 是世界上最重要的粮食作物之一, 为全球一半的人口提供粮食 (Lu and Snow, 2005), 我国是农业人口大国, 是全世界最大的水稻生产国和消费国 (卢宝荣等, 2008; 朱桢, 2010; 朱桢等, 2010; 张青玲等, 2013)。我国水稻种植面积占世界水稻种植总面积的 20%, 水稻总产量占世界稻谷产量的 34%~36%,

占我国粮食总产 40%以上, 其中杂交水稻的种植面积在 55%以上, 为我国水稻增产 15%~20% (Cheng *et al.*, 2007; 张磊和朱桢, 2011)。因此, 水稻安全生产在维持我国粮食安全方面占有极重要的地位。然而水稻常受到螟虫 (主要包括二化螟 *Chilo suppressalis*、三化螟 *Tryporyza incertulas*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*

* 资助项目: 国家转基因生物新品种培育重大专项 (2012ZX08011002)

**E-mail: yfliu2011@126.com

收稿日期: 2014-08-22, 接受日期: 2014-09-01

和大螟 *Sesamia inferens* 等) 及稻飞虱 (主要为褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 与白背飞虱 *Sogatella furcifera*) 等害虫及各种水稻病害的严重危害, 不施杀虫剂可能造成大面积减产, 而大量喷施杀虫剂, 因产生抗性而不能根本控制害虫危害, 还严重污染环境、食物和水资源。因此, 寻求既减少病虫害的损失、持续提高粮食产量, 又减少杀虫剂使用量, 保护环境与人类健康的途径与方法, 成为农业可持续发展中非常重要的课题。

植物的遗传修饰改良技术为作物育种提供了工具与方法, 已被广泛应用于为作物获得不同的新的改良性状, 通过转入从土壤细菌苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* 获得的 Bt 基因使作物获得抗虫性, 已成为水稻继获得抗除草剂耐性后再成功获得的第两个显著优良性状 (Kostov *et al.*, 2014)。转 Bt 抗虫水稻通过靶标害虫取食被转入的外源基因所表达的杀虫晶体蛋白, 在昆虫碱性肠道内溶解, 与中肠膜受体结合, 引起细胞溶解, 导致昆虫停止进食而致死的方式 (Bravo *et al.*, 2007), 对二化螟、三化螟和稻纵卷叶螟等鳞翅目害虫具有高度特异抗性 (刘雨芳等, 2005a), 能有效降低这些害虫对水稻的侵袭危害, 在转基因水稻研发中应用广泛 (Cohen *et al.*, 2000; Xu *et al.*, 2011; 李志毅等, 2012), 这为培育抗虫水稻新品系, 减少杀虫剂施用量、提高水稻品质、解决我国食品安全与水稻虫害防治问题、实现农业可持续发展开辟了一条重要途径 (刘雨芳等, 2005b)。

然而, 我们今天习见的植物是通过自然选择与数百万年的进化自然发生的结果, 近年来人类的选择介入, 使某些植物种类进化的步伐得以加速, 以期获得人类期望的性状 (Akhond and Machray, 2009), 由此而获得的很多现代的作物品种, 即转基因作物并非自然进化的物种, 是改变了某些生物学特性、代谢产物甚至某些生命活动的过程而产生的、在自然界暂不存在的新品种, 可能给人类和环境带来一定的危险和长期的负面影响 (刘雨芳, 2004a; 2004b); 其大规模环境释放在带来巨大利益的同时, 其可能存在的生物安全与生态风险问题成为公众关注的焦点

(Domingo and Bordonaba, 2011; 卢宝荣和夏辉, 2011)。因此, 我国在致力于发展利用转基因生物开展作物新品种培育的同时, 十分重视转基因作物的环境生物安全评价和研究, 尤其在转基因抗虫水稻的生态风险评价和研究方面已取得较大进展 (Ye *et al.*, 2001; 刘雨芳, 2004b; 刘雨芳等, 2005a, 2005b, 2006, 2007)。本文拟就转 Bt 基因抗虫水稻对环境地地上非靶标生物种群的潜在影响与生态风险的研究进展进行综述。

1 转 Bt 基因抗虫水稻的研究进展

世界各地都非常重视发展转基因水稻研究, 已培育出大量的转基因水稻植株或品系 (Stark, 1997; Cheng *et al.*, 1998; Datta, 1998; Shu *et al.*, 2000; Zhang, 2007; Akiyama *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009), 目前, 全球已有数百例转基因水稻获准田间试验, 涉及抗虫、抗病、抗除草剂、品质和农艺性状改良等多方面内容 (朱桢, 2010)。近年来, 转基因抗虫作物在全世界 23 个国家被种植, 种植面积以每年 12% 的速度增长, 至 2007 年全球种植面积达到 $114.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (Akhond and Machray, 2009)。2010 年种植面积比 2009 年增加 10% (Eric, 2011)。美国取消了对转基因水稻品系 LLRICE62 与 LLRICE601 的限制 (Ralf and Lutz, 2010), 于 2001 年和 2006 年分别批准药用型转基因水稻和抗除草剂转基因水稻的商业化种植; 伊朗于 2004 年批准 Bt 抗虫转基因水稻的商业化种植, 面积从开始的 $2\,000 \text{ hm}^2$ 现已增加数倍 (朱桢, 2010)。

我国转基因水稻研发与世界同步, 其中在培育转基因抗虫水稻品种方面处于世界领先水平 (朱桢, 2010)。近 20 年来, 我国已培育出多个表达不同 Bt 蛋白的抗虫水稻品系 (Chen *et al.*, 2011)。以中国科学院遗传与发育生物学研究所朱桢和福建农业科学院王锋为主的研究团队开展双价转抗虫基因水稻的研究, 获得了无选择标记高抗鳞翅目害虫的转基因抗虫水稻株系 (刘雨芳等, 2005a; 朱桢, 2010)。此外, 国

内其他研究组均也先后获得转抗虫基因水稻株系或品种(卫剑文等, 2000; 翟文学等, 2000; 于恒秀等, 2007; 张启军等, 2011)。2014 年又获得 Cry1Ca 蛋白表达量高的高抗稻纵卷叶螟与抗除草剂的双抗转基因水稻 B1C893(邓力华等, 2014)。2005 年, 我国转基因水稻进入大田试验的共有 173 项, 其中抗鳞翅目害虫、抗白叶枯病和抗除草剂等 5 个转基因水稻已进入生产性试验阶段(朱桢, 2010)。两个表达 Cry1Ab/Cry1Ac 融合蛋白的转基因抗虫水稻品种“华恢 1 号”和“Bt 汕优 63”于 2009 年获得了我国农业部颁发的安全证书(农基安证字(2009)第 072 号), 获准其在湖北省进行为期 5 年的生产性试验(张青玲等, 2013)。这一举措被誉为具有里程碑意义, 对转基因作物在中国、亚洲乃至全世界的应用产生重大影响(James, 2010)。

2 转基因抗虫水稻的生态风险与安全性评价研究内容与方法

2.1 评价的研究内容

对转基因植物的环境和生态安全风险评价研究内容十分广博, 目前研究主要包括: 对靶标生物的抗性检测(刘雨芳等, 2005a; Kim *et al.*, 2008); 对环境中非靶标生物种群的可能伤害(Bernal *et al.*, 2002; Shelton *et al.*, 2002; Wendy *et al.*, 2008; Bai *et al.*, 2012); 对生物多样性可能产生的直接和间接影响(Shelton *et al.*, 2002; 刘雨芳, 2004a; Yao *et al.*, 2008; Janet, 2011; Xu *et al.*, 2011); 对土壤生物群落(种群)与微生物的影响(徐晓宇等, 2004; Wu *et al.*, 2004; 祝向钰等, 2012); 基因表达蛋白的时空动态、规律与生态适应性(华桦, 2012); 靶标生物的抗性进化风险与抗性管理策略等(McGaughey *et al.*, 1998; 刘雨芳, 2004b; Kumar *et al.*, 2010; 卢宝荣和夏辉, 2011); 基因流的生态风险(Noman, 2003; Yao *et al.*, 2008); 转 Bt 水稻残留物的分解风险等(Wu *et al.*, 2009)及食品安全性分析(Park *et al.*, 2012)。

2.2 转基因抗虫水稻非靶标生物的范畴

理论上, 除了转基因抗虫水稻的靶标害虫以外存在于稻田生态系统内以及可能直接或间接暴露或接触到转基因抗虫水稻的所有生物(包括人类)均应看作转基因抗虫水稻的非靶标生物。按照其在稻田生态系统中的功能与作用, 非靶标生物可分为非靶标害虫(包括种植期非靶标植食性有害生物与贮藏期的仓贮害虫)、捕食性天敌(包括蜘蛛、捕食性昆虫、两栖类、鸟类等)、寄生性天敌(寄生蜂、寄生蝇等)、中性昆虫(主要为摇蚊与跳虫)、资源昆虫(传粉昆虫、桑蚕等经济昆虫等)、浮游动植物类群、土壤线虫类与微生物、其他生物类群(软体动物如杂食性的田螺、植食性的福寿螺等、鱼类如泥鳅等), 以及其他通过食物链可接触到转基因抗虫水稻及其残留物的生物类群, 包括人类。因此转基因抗虫水稻安全评价涉及的生物类群十分广泛。本文将重点关注转基因抗虫水稻对植食性非靶标害虫、捕食性天敌(包括蜘蛛、捕食性昆虫)、寄生蜂、中性昆虫等地上非靶标节肢动物的安全性影响及 Bt 蛋白在食物链上的传递等方面的研究成果。

2.3 评价的方法

转基因抗虫水稻与其它转基因作物一样, 也可能带来由于转基因环境释放所造成的环境风险问题, 如可能会发生如基因漂移而导致杂草化(Temnykh *et al.*, 2001; Noman, 2003)。靶标害虫对转基因作物产生抗性(McGaughey *et al.*, 1998; Bates *et al.*, 2005)。对非靶标害虫(Felke *et al.*, 2002)与生物多样性产生影响、对土壤生态环境产生影响(Sims and Martin, 1997; 徐晓宇等, 2004)及食品安全性等。因此全球都非常重视对转基因作物的安全评价工作。为减轻或避免产生环境安全问题, 转 Bt 基因作物在环境释放前, 都必须进行风险评估。

中国对转基因生物的安全性管理与评价方法有一系列的严格管理办法与规定, 整套程序严谨, 明确要求在进行基因工程实验、中间试

验、环境释放和商品化生产前,必须在农业转基因生物及其产品安全性评价的基础上,确定其安全性等级,制定相应的安全控制措施。而安全性评价则是生物安全管理的前提和中心内容,有利于对生物技术进行安全管理并提供科学决策、保障人类健康和环境安全、回答社会公众对生物技术安全性的疑问、促进国际贸易和维护国家权益、保证与促进生物技术的可持续发展(刘雨芳和尤民生,2002)。

对非靶标生物的安全性评价内容主要从转抗虫基因水稻对非靶标生物的抗性(陈茂等,2004)、生理活性(陈文滨等,2007)、取食与产卵影响(陈茂等,2004)、存活率(傅强等,2003;陈文滨等,2007)、种群发生量、群落结构与组成(傅强等,2003;刘雨芳,2004a;刘雨芳等,2005c)、生态功能影响(邱慧敏等,2005)、Bt蛋白含量检测与传递(李芳芳,2006;张青玲等,2013)、非靶标害虫的灾变可能性分析评价(陈茂等,2003;刘雨芳等,2007)与迁飞(陈茂等,2003;隋贺等,2011)等方面开展。

根据评价的目标与取向,评价的生物层次既有重点考虑对种群发展的时空动态、数量等的影响评价,也有从群落水平开展物种组成、结构、多样性、生物量的影响评价(刘雨芳,2004a;刘雨芳等,2005a,2007),规模与设计分室内、室内扩展、半田间、田间四个层次逐渐推进(傅强等,2013)。

3 转基因抗虫水稻对非靶标节肢动物的生态风险评价

3.1 对非靶标害虫的生态风险评价

转 *cry1Ab* 基因籼稻纯合系 B1 和 B6 对非靶标害虫褐飞虱的抗性高于相应的对照,但褐飞虱着落于转基因抗虫水稻材料及其对照上取食或产卵的机率是均等的,均无显著的偏向性(陈茂等,2004)。连续取食转 *cry1Ab* 基因水稻克螟稻 KMD1 后,褐飞虱与稻蚜 *Sitobion avenae* 体内、稻眼蝶 *Mycalesis gotama* 幼虫体内及其粪便中均检测到较高浓度的 *cry1Ab* (姜永厚等,2004)。

KMD 田间蓟马种群数量上升,KMD2 上的黑尾叶蝉 *Nephotetix cincticeps* 的种群数量明显高于对照非转基因秀水 11,主要原因是黑尾叶蝉的雌成虫寿命延长,产卵持续时间延长,产卵量增加,使内禀增长力增大。以克螟稻为食的黑尾叶蝉的净生殖率为以秀水 11 为食的黑尾叶蝉的 4~8 倍(周霞等,2005)。但同样表达 *cry1Ab* 的 Bt 基因水稻 KMD2 不会刺激非靶标害虫褐飞虱的爆发(Chen *et al.*, 2012)。

转 *cry1Ac/sck* 双价基因抗虫水稻及其杂交后代对非靶标水稻害虫群落组成与结构没有产生明显影响(刘雨芳等,2007),转 *cry1Ac/sck* 双基因抗虫水稻株系 MSA、MSB、21S/MSB、II-32A/MSB 对稻飞虱产卵与种群数量没有明显影响,21S/MSB、II-32A/MSB 上的叶蝉数量显著或极显著高于其对照,但叶蝉数量很低,单种叶蝉的种群数量更低,且 MSA、MSB、MSA4 与 KF6-304 没有引起稻田叶蝉数量的明显变化。在成熟收割前,MSA、MSB 有增加无效分蘖上葱管数的态势,但在水稻生长中期都对稻瘿蚊有高的抗性,能减少葱管的形成,降低标葱率。在同期水稻生产中 MSA 与 MSB 不会加重稻瘿蚊的危害。短期研究结果表明引起关键非靶标害虫发生数量灾变的可能性很小(刘雨芳等,2007)。MSA 对两种飞虱若虫发育历期、初羽化成虫鲜重、羽化率、短翅率、成虫产卵量、卵受精率、单雌子代数及发育进度等生物学指标均无明显影响,而 MSB 虽然对多数指标影响不明显,但可以引起白背飞虱初羽化雌虫鲜重与短翅率显著下降,还引起褐飞虱初羽化雄虫鲜重明显减轻。在近距离寄主选择实验中,褐飞虱对 MSA 和 MSB 无明显选择性,而白背飞虱若虫和成虫均明显趋向两种转基因水稻(傅强等,2003)。

笼罩实验表明在非靶标害虫褐飞虱虫量很低时,转 *cry1Ab* 基因抗虫水稻 B4b92 比非转基因水稻 MH86 的单穗总粒数和实粒数、总穗数、总产量都高,不同虫量的褐飞虱对转基因抗虫水稻与非转基因水稻的产量性状的影响没有差异。随着褐飞虱虫量的递增,转基因抗虫水稻 B4b92 与非转基因抗虫水稻 MH86 的单穗总粒

数和实粒数、总穗数、总产量都在降低(王阳阳等, 2014)。种植含 *cry1Ab+cry1Ac* 杂合基因的 Bt 水稻纯合品系 R7 代的 TT9-3 和 TT9-4, 由 Bt 稻区向对照稻区扩散的白背飞虱、褐飞虱、黑尾叶蝉、白翅叶蝉 *Erythroneura subrufa* 和电光叶蝉 *Deltapcephalus dorsalis* 的量明显高于对照稻区向 Bt 稻区扩散的量, 即以上 5 种同翅目昆虫对 Bt 水稻没有偏好性, Bt 水稻不会引起田间非靶标类群同翅目害虫数量的上升, 相反, Bt 水稻对这类害虫更有一定的驱避作用(陈茂等, 2003)。对非靶标害虫白背飞虱而言, 转 *cry1Ac/cry1Ab* 融合基因型水稻华恢 1 号(HH1)对白背飞虱的若虫和成虫发生量的影响在大部分的调查时间里均不显著, 但在发生高峰期, HH1 水稻上若虫发生量要明显高于对照亲本明恢 63(MH63)。在白背飞虱重发生年份, HH1 水稻上白背飞虱将有加重危害的可能。但在长翅型成虫发生高峰期, 对照亲本上的长翅型成虫发生量明显高于转 Bt 水稻, 转 Bt 水稻上的短翅型成虫显著高于对照亲本。当成虫发生高峰期, 转 Bt 水稻上的若虫发生量也达到峰值, 且明显高于对照亲本。表明在白背飞虱高虫口密度下转 Bt 水稻更利于其短翅型成虫与若虫的发生, 进而面临受害加重的趋势。但 HH1 水稻生育后期白背飞虱长翅型成虫雌性比的降低对其种群发展不利, 又使得大田虫量降低。HH1 水稻大面积推广种植下, 非靶标害虫白背飞虱的发生危害变得更为复杂(隋贺等, 2011)。

3.2 对捕食性天敌的生态风险评价

为期 3 年的田间实验表明, 转 Bt 水稻对稻纵卷叶螟重要捕食者拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 的种群密度没有显著影响; 以取食转 *cry1Ab* 基因水稻的稻纵卷叶螟幼虫为猎物, *cry1Ab* 的存在对拟水狼蛛的捕食率没有显著影响; 转 *cry1Ac/cry1Ab* 基因稻田中的 5 种优势捕食性天敌锥腹肖蛸 *Tetragnatha maxillosa*, 蜘蛛 *Dyschiriognatha quadrimaculata*, 食虫瘤胸蛛 *Ummeliata insecticeps*, 拟环纹豹蛛 *Pardosa pseudoannulata* 和拟水狼蛛的种群动态与种群

密度与对照非转基因稻田相似。表达 *Cry1Ac/Cry1Ab* 蛋白的转 Bt 基因水稻株系 TT51、表达 *Cry2A* 蛋白的转 Bt 基因水稻株系 T2A-1 与表达 *Cry1C* 蛋白的转 Bt 基因水稻株系 T1C-19 对稻田 4 种捕食者草间钻头蛛 *Hylyphantes graminicola*、拟环纹豹蛛、食虫瘤胸蛛与青翅蚁隐翅虫 *Paederus fuscipes* 的种群发生没有显著影响(Xu et al., 2011)。

转 *cry1Ac/sck* 双基因抗虫水稻株系 MSA 与 MSB 能提高稻田中捕食性节肢动物的发生数量, 对其物种丰富度变化趋势、物种组成、优势种组成、优势种发生动态没有显著不良影响(刘雨芳, 2004a, 2005c)。转 *sck* 基因抗虫恢复系 RBS、II-32/RBS 杂交 F₁ 代、转 *cry1Ab* 基因抗虫水稻克螟稻 1 号对拟水狼蛛和食虫瘤胸蛛的体重增长率、生长发育、生存率与捕食功能反应没有显著影响(邱慧敏等, 2005)。尖钩宽尾蛛 *Microvelia horvathi* 成虫捕食用 Bt 水稻 KMD1 或 KMD2 残体饲养的灰橄榄长角跳虫 *Entomobrya griseoolivata* (Packard) 时, 单头捕食和 3 头协同捕食, 其捕食量、瞬时攻击率(*a*)和处理时间(*Th*)与对照组均无显著差异(白耀宇等, 2005)。在转 Bt 水稻生长发育的不同时期采集的捕食性节肢动物体内的 Bt 蛋白含量有差异, 如在转 *cry2Aa* 基因水稻花期采集到的捕食性节肢动物拟水狼蛛、纵条蝇狮 *Marpiss amagister*、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 和青翅蚁隐翅甲体内的 *Cry2Aa* 蛋白含量明显高于花期后采集的样品中 *Cry2Aa* 蛋白的含量, 研究者认为这些昆虫天敌在水稻开花期可能不仅以昆虫为食, 还以水稻花粉为食, 或者其取食的猎物取食花粉(张青玲等, 2013)。

3.3 对寄生蜂的生态风险评价

转 *cry1Ac+sck* 基因抗虫水稻 MSA、MSB、MSA4 及杂交稻 KF6-304 对稻田寄生蜂的物种丰富度、多样性指数、均匀性指数和优势集中性指数的总体情况与时间动态以及个体总数无明显负面影响, 但在转基因稻生长中期可降低稻田寄生蜂的个体数量, 而在水稻生长发育的后期初

始,提高卵寄生蜂的数量。MSA、MSB、MSA4 及杂交稻 KF6-304 显著降低以靶标害虫稻纵卷叶螟为寄主的寄生蜂种群的个体数量,对其他寄生蜂无明显负面影响。即在群落水平上,对稻田寄生蜂没有产生明显不良影响,但明显降低以靶标害虫为寄主的寄生蜂的种群数量(刘雨芳等,2006)。暴露于转 *cry2Aa* 基因抗虫水稻田中的 6 种寄生蜂:稻小潜蝇茧蜂 *Opius* sp、螟蛉瘤姬蜂 *Itoplectis naranyae*、拟螟蛉绒茧蜂 *Apanteles* sp、三化螟绒茧蜂 *Apanteles schoenobii*、稻虱红螯蜂 *Haplogonatopus japonica*、纵卷叶螟绒茧蜂 *Apanteles cypris* 体内均未检测到相应的 Cry 蛋白(张青玲等,2013)。含 *cry1Ab+cry1Ac* 杂合基因的 Bt 水稻纯合品系 R7 代的 TT9-3 和 TT9-4,对飞虱与叶蝉的卵寄生蜂稻虱缨小蜂 *Anagrus* spp.和叶蝉柄翅小蜂 *Lynaenon longicrus* 的迁移扩散规律没有影响(陈茂等,2003)。

二化螟绒茧蜂 *Apanteles chilonis* 以取食转 Bt 基因(*cry1Ab*)水稻 KMD1 的 3 龄、4 龄和 5 龄二化螟作为寄主,结果发现二化螟 3 个龄期幼虫的寄生率都显著下降,其中 4 龄和 5 龄达极显著水平;3 龄和 4 龄上的结茧率显著低于对照;蜂蛹历期均短于对照,其中 3 龄差异显著;从 5 龄幼虫所羽化的雄蜂寿命显著短于对照;蜂茧长显著短于对照;而对卵+幼虫期、茧块茧数、蜂羽化率及性比均无显著影响(姜永厚等,2004)。

3.4 对中性昆虫的生态风险评价

通过取食或土壤暴露,不同的转 Bt 基因品种对非靶标中性昆虫弹尾目跳虫 *Folsomia candida* L. (Collembola: Isotomidae) 没有明显的不利影响(Yuan *et al.*, 2013)。Bt 水稻及其植株残体中的 Bt 杀虫蛋白对土壤跳虫具有潜在的生态风险。表达 Cry1Ab 蛋白的抗虫 Bt 杂交稻东龙(DL),其秸秆还田未对采后季节稻田土表发生量大的灰橄榄长角跳虫种群数量产生显著影响(闫瑞红等,2009)。在室内用转 Bt *cry1Ab* 基因水稻残体饲养的灰橄榄长角跳虫虫体中可检测到杀虫蛋白 Cry1Ab,田间条件下此类 Bt 稻田

的跳虫密度显著高于对照稻田,但这对其种群数量的增长并无不良影响(白耀宇等,2005)。转 Bt 水稻恢复系“克螟稻”(*cry1Ab* 纯合基因型)和“华恢 1 号”(*cry1Ab+cry1Ac* 融合基因型)以及融合基因型转 Bt 水稻杂交系“Bt 汕优 63”水稻种植导致土壤跳虫个别稀有类群的消失,并显著影响半土生和真土生类群以及土壤跳虫总量,但对群落多样性、均匀度和种类丰富度等影响不显著。*cry1Ab* 转 Bt 稻田半土生类群和土壤跳虫总量及其种类丰富度指标显著增加;*cry1Ab+cry1Ac* 转 Bt 杂交稻田球角跳属百分比和真土生跳虫数量显著增加(祝向钰等,2012)。

3.5 转基因抗虫水稻中 Bt 蛋白在食物链上的传递

转基因水稻 Bt 蛋白能随着食物链传递,并有积累效应。饲喂取食过转 *cry1Ab* 的 Bt 基因水稻 KMD1 的二化螟或稻眼蝶幼虫后,拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 体内都含有一定浓度的 *cry1Ab*,其中,拟水狼蛛体内的 *cry1Ab* 含量以饲喂取食 KMD1 稻眼蝶幼虫的含量最高,约为饲喂取食 KMD1 二化螟幼虫的 60 倍。这些结果表明 *cry1Ab* 可以沿水稻-害虫-天敌食物链传递(姜永厚等,2004)。张巍(2009)认为 Cry1Ab 蛋白可以通过“转 Bt 基因水稻-稻纵卷叶螟-拟水狼蛛”食物链转移到次级消费者拟水狼蛛体内,转移过程中 Cry1Ab 蛋白浓度沿着“转 Bt 基因水稻叶片-稻纵卷叶螟幼虫-拟水狼蛛”食物链,呈逐级递减的趋势,且存在累积效应。刘立军(2010)研究表明转基因水稻表达的 Bt 杀虫蛋白可以沿捕食性食物链经稻纵卷叶螟传递给拟环纹豹蛛 *Pardosa pseudoannulata*,并出现逐级富集现象。陈文滨等(2007)用转双价基因 *cry1Ac+sck* 抗虫杂交稻(II 优科丰 6 号)饲喂稻纵卷叶螟一定时间后,再饲喂华丽肖蛸 *Tetragnatha nitens*,结果表明,华丽肖蛸连续 7、14、21 d 取食经 II 优科丰 6 号饲喂后的稻纵卷叶螟,死亡率和平均产卵量较对照无显著差异;第 1 周的体重增长率明显高于对照,而第 2 周的体重增长率明显低于对照,到了第 3 周则差

异不显著; 7 d 后的捕食量明显减少, 其 7 d 和 14 d 的乙酰胆碱酯酶比活力显著高于对照, 而 21 d 的无显著差异, 羧酸脂酶比活力则在 7、14、21 d 时均显著高于对照。

4 展望

风险评估的目的, 就是确定或评价转基因作物及其产品潜在的不利影响, 包括直接的与间接, 即时的与延时的, 对环境、人类与动物健康的不利影响。目前, 转基因抗虫水稻安全性评价, 已从单一的功能团评价, 深入到更加重视三级营养关系, 从食物链或食物网上传递产生的直接或间接影响的评估 (Ferry *et al.*, 2007; Thomas *et al.*, 2008)。同时, 这种评价已从数量结构动态深入到生理生化、生态功能的影响评价, 以及基因流在不同有机体或物种中综合与连续的表达所造成的影响。

对于不同的转基因品种与作物, 安全评价的研究结果不完全一致。有些研究报道转 Bt 基因作物对非靶标生物表现了一些不利影响。如转 Bt 基因玉米显著降低模式生物水蚤 *Daphnia magna* 的适合度, 使雌性个体达到性成熟的比例很低, 而且产卵总量也明显低于取食非转 Bt 玉米的, 作为水蚤 *D. magna* 的食物, 转 Bt 基因玉米与同基因的非转 Bt 基因玉米不具备同质性, 不仅仅是转 Bt 基因玉米较低的营养价值而是转 Bt 基因玉米表达的毒性 (Thomas *et al.*, 2008)。Zangerl 等 (2001) 发现 Bt 玉米 “176” 花粉对香芹黑凤蝶 *Papilio polyxenes* 幼虫有亚致死作用, 尽管雨水冲掉了寄主叶片上的部分花粉, 但幼虫生长发育显著受到影响, 研究指出 Bt 玉米品种的选择对非靶标昆虫的影响十分重要。Bt 基因 *cry1Ab* 的不利影响主要表现在引起猎物质量的下降而不是直接的数量减少 (Thomas *et al.*, 2008)。而 Schmidt (2009) 的研究报道: 与对照比较, 对鳞翅目害虫有活性的 *cry1Ab* 与对鞘翅目害虫有活性的 *cry3Bb* 毒蛋白对瓢虫 *Adalia bipunctata* 的幼虫与蛹均有较高的致死率的研究报道, 遭到了同行研究者 Stefan 的强烈质疑与批

评 (Stefan, 2010)。Stefan (2010) 认为 Schmidt (2009) 的研究报道是一个伪科学的例子 (A case of “pseudo science”), 他批评 Schmidt 的研究存在方法上的错误、前后矛盾以及对数据的判读缺少生态学认知, 从而导致得出错误的结论。该文还指出另一例研究转 Bt 玉米表达的 *Cry1Ab* 毒蛋白对绿草蛉 *Chrysoperla carnea* 有潜在不利影响的研究结果, 在约 10 年后, 人类认识到那是个错误的结论, 检测到的不利影响应归于猎物质量的低劣而不是 *Cry1Ab* 蛋白的作用 (Shelton *et al.*, 2009; Stefan, 2010)。尽管目前在转基因抗虫水稻安全性评价方面未见到这种存在明显不利影响的典型例子, 但这些研究结果与争议对于评价转 Bt 基因抗虫水稻的生态安全性与食品安全性具有重要的借鉴与参考价值, 同时提醒我们在进行实验设计时要考虑科学全面, 在数据的判读与分析时要科学理性。

由于转基因作物生物安全和生态风险评价是一个新的研究领域, 没有现成的经验与知识可借鉴, 涉及的环境生态因子与生物因子复杂多样, 生物物种适合度具有个案性, 技术性强, 致使我国转基因作物生物安全和生态风险评价和研究的步伐还明显落后于转基因技术发展和转基因作物培育的速度, 极大地影响了转基因作物的商品化应用和推广。同时, 因为转基因材料的不同和生态环境条件的差异可能产生重要的不同的影响, 因此生态风险评估必须是在逐项基础上 (On case-by-case basis) 的评估 (Wendy *et al.*, 2008), 因为各地气候环境条件的不同, 风险评估还应该实施在逐项基础上的逐地评估与执行适时、适地的个案评价原则。

参考文献 (References)

- Akhond MAY, Machray GC, 2009. Biotech crops: technologies, achievements and prospects. *Euphytica*, 166(1): 47–59.
- Akiyama H, Sasaki N, Sasaki K, Ohmori K, Toyota A, Watanabe T, Furui S, Kitta K, Maitani T, 2007. Indicated detection of two unapproved transgenic rice lines contaminating vermicelli products. *J Agric Food Chem*, 55(15): 5942–5947.
- Bai YY, Yan RH, Ye GY, Huang FN, Wangila DS, Wang JJ, Cheng

- JA, 2012. Field response of aboveground non-target arthropod community to transgenic Bt-Cry1Ab rice plant residues in postharvest seasons. *Transgenic Res.*, 21(5): 1023–1032.
- Bates SL, Zhao JZ, Roush RT, Shelton AM, 2005. Insect resistance management in GM crops: past, present and future. *Nature Biotechnology*, 23: 57–62.
- Bernal CC, Remedios MA, Michael BC, 2002. Effect of rice lines transformed with *Bacillus thuringiensis* toxin genes on the brown planthopper and its predator *Cyrtorhinus lividipennis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 102(1): 21–28.
- Bravo A, Gill SS, Soberón M, 2007. Mode of action of *Bacillus thuringiensis* Cry and Cyt toxin and their potential for insect control. *Toxicon*, 49(4): 423–435.
- Chen M, Shelton A, Ye GY, 2011. Insect-resistant genetically modified rice in China: From research to commercialization. *Annu. Rev. Entomol.*, 56: 81–101.
- Chen Y, Tian JC, Wang W, Fang Q, Akhtar ZR, Peng YF, Cui H, Guo YY, Song QS, Ye GY, 2012. Bt rice expressing Cry1Ab does not stimulate an outbreak of its non-target herbivore, *Nilaparvata lugens*. *Transgenic Res.*, 21: 279–291.
- Cheng SH, Zhuang JY, Fan YY, Du JH, Cao LY, 2007. Progress in research and development on hybrid rice: a super-domesticated in China. *Annals of Botany*, 100(5): 959–966.
- Cheng XY, Sardana R, Kaplan H, Altosaar I, 1998. Agrobacterium-transformed rice plants expressing synthetic Cry1A(b) and Cry1A(c) genes are highly toxic to striped stem borer and yellow stem borer, in Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. *Applied Biological Sciences*, 95(6): 2767–2772.
- Cohen MB, Gould F, Bentur JS, 2000. Bt rice: practical steps to sustainable use. *International Rice Research*, 25(2): 4–10.
- Datta K, Vasquez A, Tu J, Torrizo L, Alam MF, Oliva N, Abrigo E, Khush GS, Datta SK, 1998. Constitutive and tissue-specific differential expression of the *cry1A(b)* gene in transgenic rice plants conferring resistance to rice insect pest. *Theoretical and Applied Genetics*, 97(1/2): 20–30.
- Domingo JL, Bordonaba JG, 2011. A literature review on the safety assessment of genetically modified plants. *Environ. Inter.*, 37: 734–742.
- Eric S, 2011. Global bioengineered crops increase. *World Grain*, 29(5): 80–82.
- Felke M, Lorenz N, Langenbruch GA, 2002. Laboratory studies on the effects of pollen from Bt-maize on larvae of some butterfly species. *J. Appl. Entomol.*, 126: 320–325.
- Ferry N, Mulligan EA, Majerus MEN, Gatehouse AMR, 2007. Biotrophic and tritrophic effects of Bt *Cry3A* transgenic potato on beneficial, non-target, beetles. *Transgenic Res.*, 16(6): 795–812.
- James C, 2010. 2009 年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势. *生物工程学报*, 30(2): 1–22.
- Janet EC, 2011. Impact of GM crops on biodiversity. *GM Crops*, 2(1): 7–23.
- Kim SJ, Kim C, Li W, Kim T, Li YS, Zaidi MA, Altosaar I, 2008. Inheritance and field performance of transgenic Korean Bt rice lines resistant to rice yellow stem borer. *Euphytica*, 164: 829–839.
- Kostov K, Christian FD, Niels BH, Jeremy BS, Paul HK, 2014. Are population abundances and biomasses of soil invertebrates changed by Bt crops compared with conventional crops? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 3: 10. (<http://www.environmentalevidencejournal.org/content/3/1/10>).
- Kumar S, Arul L, Talwar D, 2010. Generation of marker-free Bt transgenic indica rice and evaluation of its yellow stem borer resistance. *J. Appl. Genet.*, 51(3): 243–257.
- Lee KR, Shin KS, Suh SC, Kim KY, Jeon YH, Park BS, Kim JK, Kweon SJ, Lee YH, 2009. Molecular characterization of lepidopteran pest-resistant transgenic rice events expressing synthetic *Cry1Ac*. *Plant Biotechnol. Rep.*, 3: 317–324.
- Lu BR, Snow AA, 2005. Gene flow from genetically modified rice and its environmental consequences. *BioScience*, 55: 669–678.
- McGaughey WH, Gould F, Gelernter W, 1998. Bt resistance management. *Nature Biotechnology*, 16: 144–146.
- Noman CE, 2003. Current knowledge of gene flow in plants: implications for transgene flow. *Philos. Trans. R. Soc. Lond B Biol. Sci.*, 358(1434): 1163–1170.
- Park SY, Lee SM, Lee JH, Ko HS, Kweon SJ, Suh SC, Shin KS, Kim JK, 2012. Compositional comparative analysis between insect-resistant rice (*Oryza sativa* L.) with a synthetic *cry1Ac* gene and its non-transgenic counterpart. *Plant Biotech. Rep.*, 6(1): 29–37.
- Ralf R, Lutz G, 2010. A testing cascade for the detection of genetically modified rice by real-time PCR in food and its application for detection of an unauthorized rice line similar to KeFeng6. *J. Verbr. Lebensm.*, 5(2): 185–188.
- Schmidt JEU, Braun CU, Whitehouse LP, Hilbeck A, 2009. Effects of activated Bt transgene products (*Cry1Ab*, *Cry3Bb*) on immature stages of the ladybird *Adalia bipunctata* in laboratory ecotoxicity testing. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 56(2): 221–228.
- Shelton AM, Naranjo SE, Romeis J, Hellmich RL, Wolt JD, Federici BA, Albajes R, Bigler F, Burgess EPI, Dively GP, Gatehouse AMR, Malone LA, Roush R, Sears M, Sehnal F, 2009. Setting

- the record straight: a rebuttal to an erroneous analysis on transgenic insecticidal crops and natural enemies. *Transgenic Res.*, 18(3): 317–322.
- Shelton AM, Zhao JZ, Roush RT, 2002. Economic, ecological, food safety, and social consequences of the deployment of Bt transgenic plants. *Annu. Rev. Entomol.*, 47: 845–881.
- Shu QY, Ye GY, Cui HR, Cheng XY, Xiang YB, Wu DX, Gao MW, Xia YW, Hu C, Sardana R, Altosaar I, 2000. Transgenic rice plants with a synthetic *cry1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* were highly resistant to eight lepidopteran rice pest species. *Molecular Breeding*, 6(4): 433–439.
- Sims SR, Martin JW, 1997. Effects of the *Bacillus thuringiensis* insecticidal proteins *CryIA(b)*, *CryIA(c)*, *CryIIA*, and *CryIIIa* on *Folsomia candida* and *Xenylla grisea* (Insecta: Collembola). *Pedobiologia*, 41(5): 412–416.
- Stark LP, Nelke B, Hänßler G, Mühlbach HP, Thomzik JE, 1997. Transfer of a grapevine stilbene synthase gene to rice (*Oryza sativa*). *Plant Cell Reports*, 16(10): 668–673.
- Stefan R, 2010. A case of “pseudo science”? A study claiming effects of the *Cry1Ab* protein on larvae of the two-spotted ladybird is reminiscent of the case of the green lacewing. *Transgenic Res.*, 19: 13–16.
- Temnykh S, Declerck G, Lukashova A, Lipovich L, Cartinhour S, McCouch S, 2001. Computational and experimental analysis of microsatellites in rice (*Oryza sativa* L.): frequency, length variation, transposon association, and genetic marker potential. *Genome Research*, 11(8): 1441–1452.
- Thomas B, Primicerio R, Hessen DO, Traavik T, 2008. Reduced fitness of daphnia magna fed a t-transgenic maize variety. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 55(4): 584–592.
- Wei YP, Yao FY, Zhu CX, Jiang MS, Li GX, Song YZ, Wen FJ, 2008. Breeding of transgenic rice restorer line for multiple resistance against bacterial blight, striped stem borer and herbicide. *Euphytica*, 163: 177–184.
- Wendy C, Mark T, Giuliano D, Decio R, 2008. An overview of general features of risk assessments of genetically modified crops. *Euphytica*, 164: 853–880.
- Wu WX, Lu HH, Liu W, Devare M, Thies JE, Chen YX, 2009. Decomposition of *Bacillus thuringiensis* (Bt) transgenic rice residues (straw and roots) in paddy fields. *J. Soils Sediments*, 9: 457–467.
- Wu WX, Ye QF, Min H, Duan XJ, Jin WM, 2004. Bt-transgenic rice straw affects the culturable microbiota and dehydrogenase and phosphatase activities in a flooded paddy soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 289–295.
- Xu XL, Han Y, Wu G, Cai WL, Yuan BQ, Wang H, Liu FZ, Wang MQ, Hua HX, 2011. Field evaluation of effects of transgenic *cry1Ab/cry1Ac*, *cry1C* and *cry2A* rice on *Cnaphalocrocis medinalis* and its arthropod predators. *Science China (Life Science)*, 54(11): 1019–1028.
- Yao K, Hu N, Chen WL, Li RZ, Yuan QH, Wang F, Qian Q, Jia SR, 2008. Establishment of a rice transgene flow model for predicting maximum distances of gene flow in southern China. *New Phytol.*, 180(1): 217–228.
- Ye GY, Shu QY, Yao HW, Cui HR, Cheng XY, Hu C, Xia YW, Gao MW, Altosaar I, 2001. Field evaluation of resistance of transgenic rice containing a synthetic *cry1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* Berliner to two stem borers. *J. Econ. Entomol.*, 94(1): 271–276.
- Ye R, Huang Q, Yang Z, Chen TY, Liu L, Li XH, Chen H, Lin YJ, 2009. Development of insect-resistant transgenic rice with *cry1C*-free endosperm. *Pest Manag. Sci.*, 65(9): 1015–1020.
- Yuan YY, Xiao NW, Krogh PH, Chen FJ, Ge F, 2013. Laboratory assessment of the impacts of transgenic Bt rice on the ecological fitness of the soil non-target arthropod, *Folsomia candida* (Collembola: Isotomidae). *Transgenic Res.*, 22(4): 791–803.
- Zangerl AR, McKenna D, Waight CL, Carroll M, Ficarello P, Warner R, Berenbaum MR, 2001. Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and blackswallowtail caterpillars under field conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98(21): 11908–11912.
- Zhang Q, 2007. Strategies for developing green super rice. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104(42): 16042–16049.
- 白耀宇, 蒋明星, 程家安, 2005. 转 Bt 基因水稻对两种弹尾虫及尖钩宽尾蝽捕食作用的影响. *昆虫学报*, 48(1): 42–47. [Bai YY, Jiang MX, Cheng JA, 2005. Impacts of transgenic cry 1Ab rice on two collembolan species and predation of microvelia horvathi (Hemiptera: Veliidae). *Acta Entomologica Sinica*, 48(1): 42–47.]
- 陈茂, 叶恭银, 胡萃, Tu J, Datta SK, 2003. Bt 水稻对飞虱和叶蝉及其卵寄生蜂扩散规律的影响. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 29(1): 29–33. [Chen M, Ye GY, Hu C, Tu J, Datta SK, 2003. Effect of transgenic Bt rice on dispersal of planthoppers and leafhoppers as well as their egg parasitic wasps. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 29(1): 29–33.]
- 陈茂, 叶恭银, 姚洪渭, 胡萃, 舒庆尧, 2004. 抗虫转基因水稻对非靶标害虫褐飞虱取食与产卵行为影响的评价. *中国农业科学*, 37(2): 222–226. [Chen M, Ye GY, Yao HW, Hu C, Shu QY, 2004. Evaluation of the impact of insect-resistant transgenic rice on the feeding and oviposition behavior of its non-target insect, the brown planthopper, *nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae). *Scientia Agricultura Sinica*, 37(2): 222–226.]

- 陈文滨, 刘丰静, 林胜, 尤民生, 2007. 转双价基因抗虫杂交稻对华丽肖蛸生物学特性的影响. 华东昆虫学报, 16 (1): 13–17. [Chen WB, Liu FJ, Lin S, You MS, 2007. Effects of insect-resistant hybrid rice on bionomical characteristics of *Tetragnatha nitens*. *Entomological Journal of East China*, 16 (1): 13–17.]
- 邓力华, 邓晓湘, 魏岁军, 曹正春, 唐俐, 肖国樱, 2014. 抗虫除草剂转基因水稻 B1C893 的获得与鉴定. 杂交水稻, 29(1): 67–71. [Deng LH, Deng XX, Wei SJ, Cao ZC, Tang L, Xiao GY, 2014. Development and identification of herbicide and insect resistant transgenic plant B1 C893 in rice. *Hybrid Rice*, 29(1): 67–71.]
- 傅强, 赖凤香, 陈洋, 李凯龙, 2013. 抗虫转基因水稻对非靶标生物的生态安全性研究进展. 植物生理学报, 49 (7): 655–663. [Fu Q, Lai FX, Chen Y, Li KL, 2013. A review of the ecological safety of the insect-resistant transgenic rices to non-target organisms. *Plant Physiology Communications*, 49 (7): 655–663.]
- 傅强, 王锋, 李冬虎, 姚青, 赖凤香, 张志涛, 2003. 转基因抗虫水稻 MSA 和 MSB 对非靶标害虫褐飞虱和白背飞虱的影响. 昆虫学报, 46 (6): 697–704. [Fu Q, Wang F, Li DH, Yao Q, Lai FX, Zhang ZT, 2003. Effects of insect-resistant transgenic rice lines MSA and MSB on non-target pests *nilaparvata lugens* and *sogatella fucifera*. *Acta Entomologica Sinica*, 46 (6): 697–704.]
- 华桦, 2012. 转基因水稻中 Bt 蛋白的表达规律及生态适应性研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学. [Hua H, 2012. Expression pattern and ecological adaptability of the Bt protein in transgenic rice. Master Degree Thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University.]
- 姜永厚, 傅强, 程家安, 祝增荣, 蒋明星, 叶恭银, 张志涛, 2004. 转 Bt 基因水稻表达的毒蛋白 *CryIAb* 在害虫及其捕食者体内的积累动态. 昆虫学报, 47(4): 454–460.
- 李芳芳, 2006. Bt 毒蛋白在“转 Bt 水稻—稻纵卷叶螟—纵卷叶螟—绒茧蜂”食物链中的传递和作用机制. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.
- 李志毅, 隋贺, 徐艳博, 韩兰芝, 陈法军, 2012. 转 *CryIAb* 和 *CryIAc* 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响. 生态学报, 32(6): 1783–1789. [Li ZY, Sui H, Xu YB, Han LZ, Chen FJ, 2012. Effects of insect-resistant transgenic Bt rice with a fused *CryIAb*+*CryIAc* gene on population dynamics of the stem borers, *chilo suppressalis* and *sesamia inferens*, occurring in paddyfield. *Acta Ecologica Sinica*, 32(6): 1783–1789.]
- 刘立军, 2010. 基因水稻表达的 Bt 杀虫蛋白对拟环纹豹蛛 (*Pardosa pseudoannulata*) 的安全性评价. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学.
- 刘雨芳, 2004a. 转基因抗虫水稻对稻田节肢动物群落的影响与生态安全评价. 博士后工作报告. 福州: 福建农林大学.
- 刘雨芳, 2004b. 转 Bt 基因抗虫水稻的研究进展与生态安全评价. 生命科学研究, 8(4): 294–299. [Liu YF, 2004b. Advances on Transgenic Bt rice and ecological safety evaluation. *Life Science Research*, 8(4): 294–299.]
- 刘雨芳, 贺玲, 汪琼, 胡斯琴, 刘文海, 陈康贵, 尤民生, 2006. 转 *cryIAc/sck* 基因抗虫水稻对稻田寄生蜂群落影响的评价. 昆虫学报, 49 (6): 955–962. [Liu YF, He L, Wang Q, Hu SQ, Liu WQ, Chen KG, You MS, 2006. Evaluation of the effects of insect-resistant *cryIAc/sck* transgenic rice on the parasitoid communities in paddy fields. *Acta Entomologica Sinica*, 49 (6): 955–962.]
- 刘雨芳, 贺玲, 汪琼, 胡斯琴, 刘文海, 陈康贵, 2007. 转 *cryIAc/sck* 基因抗虫水稻对稻田主要非靶标害虫的田间影响评价. 中国农业科学, 40(6): 1181–1189. [Liu YF, He L, Wang Q, Hu SQ, Liu WH, Chen KG, 2007. Effects and ecological safety insect-resistant *cryIAc/sck* transgenic rice on key non-target pests in paddy fields. *Scientia Agricultura Sinica*, 40(6): 1181–1189.]
- 刘雨芳, 王锋, 尤民生, 汪琼, 胡斯琴, 刘文海, 赵士熙, 2005a. 转基因水稻及其杂交后代对稻纵卷叶螟的田间抗性检测. 中国农业科学, 38(4): 725–729. [Liu YF, Wang F, You MS, Wang Q, Hu SQ, Liu WH, Zhao SX, 2005a. Resistance of *cryIAc* + *SCK* transgenic rice and its filial generation to the rice leaf roller *cnaphalocrocis medinalis*. *Scientia Agricultura Sinica*, 38(4): 725–729.]
- 刘雨芳, 苏军, 尤民生, 汪琼, 胡斯琴, 刘文海, 赵士熙, 王锋, 2005b. 转基因抗虫水稻对水稻害虫群落的影响. 昆虫学报, 48(4): 544–553. [Liu YF, Su J, You MS, Wang Q, Hu SQ, Liu WH, Zhao SX, Wang F, 2005b. Effect of transgenic pest-resistant rice on pest insect communities in paddy fields. *Acta Entomologica Sinica*, 48(4): 544–553.]
- 刘雨芳, 尤民生, 2002. 中国农业转基因生物的安全性管理与评价方法. 武夷科学, 18: 46–50. [Liu YF, You MS, 2002. Management and evaluating methods of biosafety of transgenic crops in China. *Wuyi Science Journal*, 18: 46–50.]
- 刘雨芳, 尤民生, 王锋, 刘文海, 胡斯琴, 赵士熙, 2005c. 转 *cryIAc/sck* 基因抗虫水稻对稻田捕食性节肢动物群落的影响及生态安全评价//成卓敏主编: 农业生物灾害预防与控制研究. 北京: 中国农业科学技术出版社. 24–31.
- 卢宝荣, 傅强, 沈志成, 2008. 我国转基因水稻商品化应用的潜在环境生物安全问题. 生物多样性, 16(5): 426–436. [Lu BR, Fu Q, Shen ZC, 2008. Commercialization of transgenic rice in China: potential environmental biosafety issues. *Biodiversity Science*, 16(5): 426–436.]

- 卢宝荣, 夏辉, 2011. 转基因植物的环境生物安全: 转基因逃逸及其潜在生态风险的研究和评价. 生命科学, 23(2): 186-194. [Lu BR, Xia H, 2011. Environmental biosafety of transgenic plants: research and assessment of transgene escape and its potential ecological impacts. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 23(2): 186-194.]
- 邱慧敏, 董波, 吴进才, 王锋, 傅强, 张志涛, 2005. 几种转基因抗虫水稻对蜘蛛生长及捕食的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 26(3): 79-82. [Qiu HM, Dong B, Wu JC, Wu JC, Wang Q, Zhang ZT, 2005. Effect of transgenic rice on the growth, fecundity and predation of spiders. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 26(3): 79-82.]
- 隋贺, 李志毅, 徐艳博, 韩超, 韩兰芝, 陈法军, 2011. 广西兴安转 Bt 水稻大田两迁害虫发生动态. 应用生态学报, 22(11): 3021-3025. [Sui H, Li ZY, Xu YB, Han C, Han LZ, Chen FJ, 2011. Occurrence dynamics of migratory pest insects *cnaphalocrocis medinalis* and *sogatella furcifera* in transgenic Bt rice field in Xing'an county of Guangxi province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(11): 3021-3025.]
- 王阳阳, 林胜, 尤民生, 2014. 非靶标害虫褐飞虱对转 *cry1Ab* 抗虫水稻产量的影响. 环境昆虫学报, 36(3): 365-371. [Wang YY, Lin S, You MS, 2014. Effect of non-target pest, *nilaparvata lugens*, on the yield of transgenic *cry1Ab* rice. *Natural Enemies of Insects*, 36(3): 365-371.]
- 卫剑文, 许新萍, 陈金婷, 张良佑, 范云六, 李宝健, 2000. 应用 B.t 和 *SBTi* 基因提高水稻抗虫性的研究. 生物工程学报, 16(5): 603-608.
- 徐晓宇, 叶庆富, 吴伟祥, 闵航, 2004. 转 Bt 基因“克螟稻”秸秆还田对稻田厌氧微生物种群和酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 10(1): 63-67. [Xu XN, Ye QF, Wu WX, Min H, 2004. Effects of transgenic Bt rice straw on anaerobic microbial populations and enzyme activities in paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 10(1): 63-67.]
- 闫瑞红, 白耀宇, 程家安, 叶恭银, 2009. Bt 稻 *Cry1Ab* 蛋白的表达和降解及对采后季节土壤灰橄榄长角跳虫发生的影响. 植物保护学报, 36(5): 431-436. [Yan RH, Bai YY, Cheng JA, Ye GY, 2009. Expression and degradation of *Cry1Ab* protein in Bt hybrid rice and its impacts on ground-dwelling entomobrya *griseoolivata* occurrence in postharvest seasons. *Acta Phytophylacica Sinica*, 36(5): 431-436.]
- 于恒秀, 赵志鹏, 王玲, 刘巧泉, 龚志云, 顾铭洪, 2007. 导入 *GNA* 和 *Bar* 基因获得抗褐飞虱和抗除草剂的转基因水稻. 植物保护学报, 34(5): 555-556. [Yu HX, Zhao ZP, Wang L, Liu QQ, Gong ZY, Gu MH, 2007. Breeding of transgenic rice lines with *GNA* and *Bar* genes resistance to both brown planthopper and herbicide. *Acta Phytophylacica Sinica*, 34(5): 555-556.]
- 翟文学, 李晓兵, 田文忠, 周永力, 潘学彪, 曹守云, 赵显峰, 赵彬, 章琦, 朱立煌, 2000. 由农杆菌介导将白叶枯病抗性基因 *Xa21* 转入我国的 5 个水稻品种. 中国科学 C 辑(生命科学), 30(2): 200-206.
- 张磊, 朱祯, 2011. 转基因抗虫水稻对生物多样性的影响. 遗传, 33(5): 414-421. [Zhang L, Zhu Z, 2011. Effect of transgenic insect-resistant rice on biodiversity. *Hereditas*, 33(5): 414-421.]
- 张启军, 李聪, 虞德容, 孙永华, 吕川根, 2011. 转 *sbk* 和 *sck* 基因提高水稻 *Dular* 的抗虫能力. 分子植物育种, 9(1): 63-68. [Zhang QJ, Li C, Yu SR, Sun YH, Lv XG, 2011. Improving the insect resistant ability of rice varieties *dular* by transforming *sbk* and *sck* gene. *Molecular Plant Breeding*, 9(1): 63-68.]
- 张青玲, 李云河, 华红霞, 杨长举, 武红巾, 彭于发, 2013. Bt 水稻田重要非靶标节肢动物暴露于 *Cry2Aa* 蛋白的程度分析. 应用生态学报, 24(6): 1647-1651. [Zhang QL, Li YH, Hua HX, Yang CJ, Wu HJ, Peng YF, 2013. Exposure degree of important non-target arthropods to *Cry2Aa* in Bt rice fields. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(6): 1647-1651.]
- 张巍, 2009. *Cry1Ab* 杀虫蛋白在“转 Bt 基因水稻-稻纵卷叶螟-拟水狼蛛”间的传递及对拟水狼蛛的影响. 硕士学位论文. 长沙: 湖南师范大学.
- 周霞, 程家安, 胡阳, 姜永根, 2005. 转 Bt 基因水稻克螟稻对黑尾叶蝉种群增长的影响. 中国水稻科学, 19(1): 74-78. [Zhou X, Cheng JA, Hu Y, Lou YG, 2005. Effects of transgenic Bt rice on the population development of *nephotettix cincticeps*. *Chinese Journal of Rice Science*, 19(1): 74-78.]
- 朱祯, 2010. 转基因水稻研发进展. 中国农业科技导报, 12(2): 9-16. [Zhu Z, 2010. Progress in research and development of transgenic rice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(2): 9-16.]
- 朱祯, 曲乐庆, 张磊, 2010. 水稻转基因研究及新品种选育. 生物产业技术, 17(3): 28-34.
- 祝向钰, 李志毅, 常亮, 袁一扬, 戈峰, 吴刚, 陈法军, 2012. 转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化. 生态学报, 2(11): 3546-3554. [Zhu XJ, Li ZY, Chang L, Yuan YY, Ge Y, Wu G, Chen FJ, 2012. Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields. *Acta Entomologica Sinica*, 2(11): 3546-3554.]