

转 *Bt* 基因作物对蚯蚓影响研究进展 *

张艳艳^{1,2,3} 舒迎花^{1,2,3} 王建武^{1,2,3 * *}

(¹ 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642; ² 华南农业大学农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642;

³ 华南农业大学广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘要 转苏云金杆菌杀虫蛋白(*Bt*)基因作物的商品化种植可能对土壤生态系统产生不利影响是近10年来颇有争议的问题。转*Bt*基因作物可通过多种方式向土壤中释放苏云金杆菌杀虫蛋白即*Bt*蛋白,从而引起土壤生物和生态系统基本功能的变化;蚯蚓可加快动植物残体的降解,促进有机质的分解和矿化,与其他土壤生物相比,蚯蚓对某些污染物更敏感。本文从研究中用到的蚯蚓种类、采用的实验方式、研究的科学问题等方面综述了转*Bt*基因作物对土壤动物蚯蚓影响的研究进展,并对转*Bt*基因作物对土壤动物蚯蚓影响研究的发展趋势进行了展望,旨在为转*Bt*基因作物对非靶标土壤动物的影响提供参考,进而为全面评价转*Bt*基因作物对土壤生态系统的影响提供依据。

关键词 转*Bt*基因作物; 苏云金杆菌杀虫蛋白; 蚯蚓

中图分类号 Q958.11 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)9-2420-05

Effects of *Bt*-transgenic crops on soil earthworms: A review. ZHANG Yan-yan^{1,2,3}, SHU Ying-hua^{1,2,3}, WANG Jian-wu^{1,2,3 * *} (¹Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; ²Key Laboratory of Ecological Agro-Environment in the Tropics of Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; ³Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2420–2424.

Abstract: Whether the commercial planting of *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) transgenic crops could have potential adverse effects on soil ecosystem is a controversial issue over the past decade. The *Bt* larvicidal protein from *Bt*-transgenic crops can enter into the soil in various ways, leading to the changes in soil organisms and in the essential functions of soil ecosystem. Soil earthworm can accelerate the degradation of animal- and crop residues, and promote the decomposition and mineralization of soil organic matter. As compared with other soil organisms, soil earthworm is more sensitive to some pollutants. In the present paper, the research progress in the effects of *Bt*-transgenic crops on the non-target soil animal earthworm was summarized from the aspects of the earthworm species and the methods applied in related experiments as well as the problems explored in related studies, and the future research trend was prospected. The aim of this review was to provide a reference for the study of the effects of *Bt*-transgenic crops on non-target soil animals, and to offer the basis for the comprehensive evaluation of *Bt*-transgenic crops on soil ecosystem.

Key words: *Bt*-transgenic crops; *Bacillus thuringiensis* larvicidal protein; earthworms.

2011年,全球转基因农作物种植面积达到1.6亿hm²,其中转*Bt*基因作物(以下简称*Bt*作物)面

积为2390万hm²(James, 2011)。*Bt*作物在一定程度上有效控制了靶标害虫,减少了农药的使用,但引起了多种生态安全和环境问题,其中*Bt*作物对农业生态系统中非靶标生物的影响是生态风险评价的重要内容之一。*Bt*作物释放的*Bt*蛋白可以通过根系分泌物(Saxena & Stotzky, 2000; 王建武和冯远娇,

* 国家自然科学基金项目(31170506)、教育部博士点基金项目(20104404110003)、广东省自然科学基金项目(10451064201005413)和瑞典国际基金 International Foundation for Science (C/5145-1)资助。

** 通讯作者 E-mail: wangjw@scau.edu.cn
收稿日期: 2012-03-27 接受日期: 2012-06-15

2005)、花粉飘落(邢珍娟等,2008)、秸秆分解(Palm et al.,1996;Donegan et al.,1996;王建武等,2005)、土壤动物活动(Weber & Nentwig,2006;Vaufleury et al.,2007;袁一杨和戈峰,2010)等方式进入到土壤中,这就意味着以植物残体、土壤腐殖质为食的土壤生物可能接触到这些残留的Bt蛋白,从而受到影响(王建武等,2003)。

蚯蚓是土壤生物中生物量最大的动物类群之一,占土壤无脊椎动物生物量的90%,占土壤动物总量的60%(Thakuria et al.,2010)。蚯蚓与耕地中作物秸秆的分解关系更为紧密(Schrader et al.,2008)。蚯蚓通过取食、消化、排泄(蚯蚓粪便)、分泌(粘液)和掘穴等活动促进有机质的分解,促进土壤养分的循环和改善土壤结构和理化性状。在耕地中蚯蚓以作物残留物为食,通过掘穴和取食活动改善土壤和土壤有机质的结构,并且为其他土壤生物改善生物资源,是反映土壤质量的良好指标(龚鹏博等,2007;Schamphelleire et al.,2007),相对于其他土壤动物,蚯蚓对有些污染物更敏感,适用于土壤生态风险评价(Capowiez & Berard,2006;Xiao et al.,2006)。本文综述了Bt作物对蚯蚓影响的研究

进展,旨在为Bt作物对非靶标土壤动物的影响提供参考,进而为全面评价Bt作物对土壤生态系统的影
响提供依据。

1 Bt作物对蚯蚓存活、生长发育和繁殖的影响

目前Bt作物对蚯蚓影响研究中所用到的生态指标主要有:蚯蚓存活、生长发育和繁殖。存活是急性处理条件下污染物对蚯蚓的致死效应,而生长发育和繁殖是污染物在非致死浓度下对蚯蚓的亚急性毒性效应,更接近实际生态系统中低剂量污染物对蚯蚓的长期毒性效应(Reinecke & Reinecke,2007)。蚯蚓受到污染胁迫以后,体重变化是十分敏感的指标(肖能文等,2006),所以蚯蚓的生长发育主要关注的是其体重的变化。

多数研究表明,Bt玉米、Bt棉花对蚯蚓存活、体重变化和繁殖没有影响(表1)。Ahl Goy等(1995)将Bt玉米整株粉碎加入土壤中饲养蚯蚓,研究发现,虽然在赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)肠道和粪便中检测到Cry1Ab蛋白,但Bt玉米对赤子爱胜蚓存活和体重无急性致死效应。Saxena和Stotzky(2001)通过室内实验在土壤中添加粉碎的Bt玉米植株以

表1 Bt作物对蚯蚓影响研究概况

Table 1 Research survey on effects of Bt crops on earthworms

研究的问题	Bt作物种类	Bt蛋白种类	蚯蚓种类	研究地点	文献
对蚯蚓存活、生长发育和繁殖的影响	Bt玉米	Cry1Ab Cry1Ac	<i>Eisenia fetida</i>	室内	Shu et al., 2011
	Bt玉米	Cry1Ab Cry3Bb1	<i>Enchytraeus albidus</i>	田间	Hönemann & Nentwig, 2009
	Bt棉花	Cry1Ac	<i>Eisenia fetida</i>	室内	Liu et al., 2009a
	Bt玉米	Cry3Bb1	<i>Lumbricus terrestris</i>	室内	Ahmad et al., 2006
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Eisenia fetida</i>	室内	Clark & Coats, 2006
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	室内	Vercesi et al., 2006
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricus terrestris</i>	室内	Zwahlen et al., 2003
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricus terrestris</i>	室内	Saxena & Stotzky, 2001
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Eisenia fetida</i>	室内	Ahl Goy et al., 1995
对蚯蚓体内酶活的影响	Bt玉米	Cry1Ab Cry1Ac	<i>Eisenia fetida</i>	室内	舒迎花等, 2011
	Bt棉花	Cry1Ac	<i>Eisenia fetida</i>	室内	Liu et al., 2009b
对蚯蚓种群的影响	Bt玉米	Cry1Ab Cry3Bb1	<i>Lumbricidae community</i>	田间	Zeilinger et al., 2010
	Bt玉米	Cry1Ab Cry3Bb1	<i>Lumbricidae community</i> <i>Enchytraeidae community</i>	田间	Hönemann et al., 2008
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricus terrestris</i> <i>Aporrectodea community</i>	田间	Krogh et al., 2007
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricidae community</i> <i>Enchytraeidae community</i>	田间	Zwahlen et al., 2007
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricidae community</i>	田间	Lang et al., 2006
蚯蚓对Bt蛋白降解的影响	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricus terrestris</i>	室内	Emmerling, et al., 2011
	Bt玉米	Cry1Ab	<i>Lumbricus terrestris</i> <i>Aporrectodea caliginosa</i>	室内	Schrader et al., 2008

及盆栽种植 *Bt* 玉米模拟田间实验,就 *Bt* 玉米释放的 Cry1Ab 蛋白对蚯蚓的影响进行了研究,种植 *Bt* 玉米(转化事件 NK4640)及其非转基因同源常规玉米 40 d 后以及将转基因和非转基因玉米残体加入土壤中 45 d 后,通过对蚯蚓肠道和蚯蚓粪便进行检测证明蚯蚓摄取了 *Bt* 蛋白,但蚯蚓的体重和死亡率并无显著差异;接着将蚯蚓转移到新鲜无污染土壤中 2~3 d 后,肠道中的 *Bt* 蛋白消失,说明 *Bt* 蛋白只是经过了蚯蚓的消化系统,并没有被消化系统的酶降解,也不影响蚯蚓的正常生长。Ahmad 等(2006)通过将 *Bt* 玉米整株(根、茎、叶)粉碎加入土壤中秸秆降解实验和室内盆栽种植实验研究了 *Bt* 玉米对蚯蚓存活和体重的影响,结果表明 *Bt* 玉米对蚯蚓存活和体重无影响。Schrader 等(2008)研究了 *Bt* 玉米秸秆降解过程中添加蚯蚓和不添加蚯蚓后,秸秆中 *Bt* 蛋白的降解情况以及 *Bt* 蛋白对蚯蚓的影响,结果表明蚯蚓促进 *Bt* 蛋白的降解,且 *Bt* 蛋白对蚯蚓没有不利影响。Liu 等(2009a, 2009b)室内将粉碎的 *Bt* 棉花叶片添加到土壤中,研究 *Bt* 棉花和常规棉花叶片对赤子爱胜蚓存活、生长发育和繁殖的影响,结果表明 *Bt* 棉花饲养的成蚓体重、产生的蚓茧和幼蚓数略高于常规棉,但未达到显著差异水平。

还有研究指出, *Bt* 作物对蚯蚓存活、生长发育和繁殖产生有利影响。Hönemann 和 Nentwig(2009)将 *Bt* 玉米叶片粉碎后添加到土壤中饲养蚯蚓,指出 *Bt* 玉米(Cry1Ab)处理中成蚓存活率显著高于其对照。Clark 和 Coats(2006)将 *Bt* 玉米叶片粉碎加入土壤和马粪混合物中饲养蚯蚓,研究表明,赤子爱胜蚓 *Eisenia fetida* 成蚓取食两种 *Bt* 玉米(转化事件 Bt11 和 Mon810)和非转基因同源常规玉米叶片后, *Bt* 玉米对赤子爱胜蚓的存活和繁殖无有害影响,但对其生长率稍有促进。Shu 等(2011)将 *Bt* 玉米秸秆粉碎添加到土壤中,模拟秸秆还田,研究了秸秆不同浓度下对赤子爱胜蚓生长发育和繁殖的影响,结果表明取食 *Bt* 玉米的赤子爱胜蚓其相对生长率、蚓茧和幼蚓数量显著高于非 *Bt* 玉米。

但也有少数研究表明, *Bt* 作物对蚯蚓生长发育和繁殖稍有不利影响。Zwahlen 等(2003)通过在土壤中加入粉碎的 *Bt* 玉米叶片饲养蚯蚓研究指出,取食 *Bt* 和非 *Bt* 玉米残体 160 d 后,成蚓和幼蚓的体重和死亡率无显著差异,但 200 d 后,取食 *Bt* 玉米的成蚓生长较非 *Bt* 玉米慢,成蚓的体重显著下降。Vercesi 等(2006)通过室内实验在土壤和牛粪混合

物中添加粉碎的 *Bt* 玉米叶片,结果表明, *Bt* 玉米叶片和根系分泌物的 Cry1Ab 蛋白对暗色阿波蚓(*Aporrectodea caliginosa*)的存活、生长发育和繁殖无显著影响,但 *Bt* 玉米处理后的蚓茧孵化率低于常规玉米处理。而 Hönemann 和 Nentwig(2009)研究则表明, *Bt* 玉米(Cry1Ab)处理中幼蚓数量显著低于对照。

2 *Bt* 作物对蚯蚓酶活的影响

外源污染物可以引起蚯蚓体内酶活的变化,因此研究者提出将蚯蚓体内酶活作为土壤污染的生物标志物(徐冬梅等, 2009)。目前有关 *Bt* 作物对蚯蚓影响的研究中所包括的酶有超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)、谷胱甘肽转移酶(glutathione transferase, GST)、乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)和纤维素酶(表 1)。其中 SOD、CAT 和 GSH-Px 属于抗氧化防御系统酶,主要功能是消除生物体内的活性氧。AChE 和 GST 是蚯蚓体内重要的解毒酶,AChE 在蚯蚓神经传递过程中起着重要作用,GST 主要参与对外源物的解毒作用。纤维素酶主要作用于有机质分解,蚯蚓是土壤中一种植食性动物,是土壤有机质的重要分解者,因此蚯蚓体内纤维素酶在土壤有机质分解中起着重要作用,其酶活性变化会对蚯蚓生命活动和生态作用产生影响。

肖能文等(2005)模拟 *Bt* 棉花表达的 *Bt* 蛋白进入土壤的发生程度,用含不同浓度 *Bt* 蛋白 Cry1Ac 的人造土壤处理赤子爱胜蚓,测定其体内 CAT、AChE 和纤维素酶等指标,研究结果表明, *Bt* 蛋白对赤子爱胜蚓体内酶活影响不明显。Liu 等(2009b)研究表明, *Bt* 棉和常规棉处理后,赤子爱胜蚓体内 SOD 酶活均显著高于牛粪中蚯蚓体内 SOD 酶活,但 *Bt* 棉和常规棉处理之间无显著差异。舒迎花等(2011)研究亦表明, *Bt* 玉米秸秆处理在短时间内能诱导赤子爱胜蚓 SOD 酶活性,但对 TChE、GSH-Px 和 CAT 酶活性没有诱导作用。

3 *Bt* 作物对蚯蚓种群的影响

Lang 等(2006)对 *Bt* 玉米和常规玉米田进行连续 4 年的调查,发现正蚓科蚯蚓的种群密度和生物量并无显著差异,且取样地点和时间对蚯蚓种群密

度和生物量的影响高于Bt玉米对其的影响。Zeilinger等(2010)对连续种植4年的2个Bt玉米和3个常规玉米实验田进行调查,发现种植Bt玉米和常规玉米田间的成蚓和幼蚓的生物量无显著差异,Bt玉米释放的Bt蛋白(Cry1Ab和Cry3Bb1)对暗色阿波蚓种群和陆正蚓(*Lumbricus terrestris*)的影响很小。Zwahlen等(2007)将装有Bt玉米秸秆的不同孔径网袋埋入非Bt玉米田中,定期取回,调查土壤生物及玉米秸秆降解情况,结果表明Bt玉米秸秆降解中土壤无脊椎动物组成与对照无差异。

4 总结与展望

目前有关Bt作物对蚯蚓影响的研究主要是采用田间调查蚯蚓种群的变化或室内与田间模拟秸秆还田来进行(表1)。室内或田间模拟研究的主要对象是陆正蚓(Saxena & Stotzky, 2001; Ahmad et al., 2006; Schrader et al., 2008)、暗色阿波蚓(Vercesi et al., 2006; Schrader et al., 2008; Pérez-Losada et al., 2009)和赤子爱胜蚓(Ahl Goy et al., 1995; Clark & Coats, 2006; Liu et al., 2009a, 2009b)。Bt作物对蚯蚓影响的研究主要集中在对蚯蚓存活、生长发育、繁殖和保护酶等活性的影响方面,且研究结果不一致(Icoz & Stotzky, 2008),难以提供生态风险评价所需要的科学证据。

通过对众多研究结果的综述,发现在Bt作物对蚯蚓影响的研究过程中其研究内容、研究方法等方面还存在一些问题,未来的研究应在现有研究的基础上规范研究方法和丰富研究内容。而且现有的研究持续时间一般较短,室内实验一般不超过1年,田间实验最多4年,研究中涉及蚯蚓代数较少,今后应对多代蚯蚓进行长期监测,如产生蚓茧和幼蚓数量,幼蚓存活情况、幼蚓从孵化到成熟的时间、对Bt蛋白的敏感性等。同时,也需要加强对蚯蚓体内环境的研究,特别是从微生物、酶活等方面将蚯蚓体内环境与土壤环境联系起来,了解Bt蛋白在蚯蚓体内的代谢过程,利用现代分子技术对其进行深入探讨。Bt蛋白对蚯蚓产生何种影响是目前研究的重要内容,而蚯蚓对Bt蛋白降解产生何种影响研究相对较少(Schrader et al., 2008; Emmerling et al., 2011)。毒理研究表明,蚯蚓可通过排泄物固定外源物,减缓外源物的降解,因此,蚯蚓的生物活动会对Bt作物残体产生怎样的影响,也是一个值得今后多加关注的问题。室内实验和田间实验研究结果有时会出现

分歧,比如Bt蛋白是否对蚯蚓生长发育和繁殖产生负面影响等,另外,由于田间实验影响因素较多,条件难以控制,对其研究结果需进行具体分析。自然界中每个环节都不是孤立存在的,任何变化都可能引起其他因素的变化,因此不能只关注Bt作物的Bt蛋白,还要加强其他方面的研究,将Bt作物产生的影响放到自然条件下研究,从Bt作物-土壤环境-蚯蚓食物链角度进行深入探讨。此外,目前研究中所采用的实验方式、指示物种选择、Bt蛋白添加量等尚未有统一标准,因此风险评价研究方法的标准化也是值得探讨的问题。

参考文献

- 龚鹏博,李健雄,郭明昉,等. 2007. 蚯蚓生态毒理试验现状与发展趋势. 生态学杂志, **26**(8): 1297-1302.
- 舒迎花,马洪辉,杜艳,等. 2011. Bt玉米秸秆释放的杀虫蛋白对赤子爱胜蚓酶活性的影响. 应用生态学报, **22**(8): 2133-2139.
- 王建武,冯远娇,骆世明. 2005. Bt玉米秸秆分解对土壤酶活性和土壤肥力的影响. 应用生态学报, **16**(3): 524-528.
- 王建武,冯远娇. 2005. 种植Bt玉米对土壤微生物活性和肥力的影响. 生态学报, **25**(5): 1213-1220.
- 王建武,骆世明,冯远娇,等. 2003. 转Bt基因作物Bt毒素在土壤中的环境去向及其生态效应. 生态学报, **23**(4): 797-804.
- 肖能文,戈峰,刘向辉. 2005. Bt蛋白Cry1Ac在人造土壤中对赤子爱胜蚓毒理及生化影响. 应用生态学报, **16**(8): 1523-1526.
- 肖能文,刘向辉,李薇,等. 2006. 用蚯蚓溶酶体作为检测土壤污染的生物标志物. 应用生态学报, **17**(3): 516-519.
- 邢珍娟,王振营,何康来. 2008. 转Bt基因玉米幼苗残体中Cry1Ab杀虫蛋白田间降解动态. 中国农业科学, **41**(2): 412-416.
- 徐冬梅,刘文丽,刘维屏. 2009. 外源污染物对蚯蚓毒理作用研究进展. 生态毒理学报, **4**(1): 21-27.
- 袁一杨,戈峰. 2010. 转Bt基因作物对非靶标土壤动物的影响. 应用生态学报, **21**(5): 1339-1345.
- Ahl Goy P, Warren G, White J, et al. 1995. Interaction of insect tolerant maize with organisms in the ecosystem. *Mitteilungen des Biologischen Bundesamts für Forst und Landwirtschaft*, **309**: 50-53.
- Ahmad A, Wilde GE, Zhu KY. 2006. Evaluation of effects of Coleopteran-specific Cry3Bb1 protein on earthworms exposed to soil containing corn roots or biomass. *Environmental Entomology*, **35**: 976-985.
- Capowiez Y, Berard A. 2006. Assessment of the effects of imidacloprid on the behavior of two earthworm species (*Aporrectodea nocturna* and *Allolobophora picta*) using 2D terrar-

- ia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **64**: 198–206.
- Clark BW, Coats JR. 2006. Subacute effects of Cry1Ab Bt corn litter on the earthworm *Eisenia fetida* and the springtail *Folsomia candida*. *Environmental Entomology*, **35**: 1121–1129.
- Donegan KK, Schaller DL, Stone JK, et al. 1996. Microbial populations, fungal species diversity and plant pathogen levels in field plots of potato plants expressing the *Bacillus thuringiensis* var. *tenbriionis* endotoxin. *Transgenic Research*, **5**: 25–35.
- Emmerling C, Strunk H, Schöbinger U, et al. 2011. Fragmentation of Cry1Ab protein from *Bt*-maize (MON810) through the gut of the earthworm species *Lumbricus terrestris* L. *European Journal of Soil Biology*, **47**: 160–164.
- Hönemann L, Nentwig W. 2009. Are survival and reproduction of *Enchytraeus albidus* (Annelida; Enchytraeidae) at risk by feeding on *Bt*-maize litter. *European Journal of Soil Biology*, **45**: 351–355.
- Hönemann L, Zurbrügg C, Nentwig W. 2008. Effects of *Bt*-corn decomposition on the composition of the soil meso- and macrofauna. *Applied Soil Ecology*, **40**: 203–209.
- Icoz I, Stotzky G. 2008. Fate and effects of insect-resistant *Bt* crops in soil ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**: 559–586.
- James C. 2011. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: ISAAA Brief, No. 43. ISAAA: Ithaca, NY.
- Krogh PH, Griffiths B, Demesar D, et al. 2007. Responses by earthworms to reduced tillage in herbicide tolerant maize and *Bt* maize cropping systems. *Pedobiologia*, **51**: 219–227.
- Lang A, Arndt M, Beck R, et al. 2006. Monitoring of the environmental effects of the *Bt* gene. Bavarian State Research Center for Agriculture, No. 10. *Vöttinger Strasse*, **38**: 85354.
- Liu B, Cui J, Meng J, et al. 2009a. Effects of transgenic *Bt*+CpTI cotton on the growth and reproduction of earthworm *Eisenia foetida*. *Frontiers in Bioscience: A Journal and Virtual Library*, **14**: 4008–4014.
- Liu B, Wang L, Zeng Q, Meng J, et al. 2009b. Assessing effects of transgenic Cry1Ac cotton on the earthworm *Eisenia fetida*. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**: 1841–1846.
- Palm CJ, Schallet D, Donegan KK, et al. 1996. Persistence in soil of transgenic plants produced *Bacillus thuringiensis* var. *kurstaki* δ-endotoxin. *Canadian Journal of Microbiology*, **42**: 1258–1262.
- Pérez-Losada M, Rico M, Marshall JC, et al. 2009. Phylogenetic assessment of the earthworm *Aporrectodea caliginosa* species complex (Oligochaeta: Lumbricidae) based on mitochondrial and nuclear DNA sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, **52**: 293–302.
- Reinecke SA, Reinecke AJ. 2007. Biomarker response and biomass change of earthworms exposed to chlorpyrifos in microcosms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **66**: 92–101.
- Saxena D, Stotzky G. 2000. Insecticidal toxin from *Bacillus thuringiensis* is released from roots of transgenic *Bt* corn in vitro and in situ. *FEMS Microbiology Ecology*, **33**: 35–39.
- Saxena D, Stotzky G. 2001. *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) toxin released from root exudates and biomass of *Bt* corn has no apparent effect on earthworms, nematodes, protozoa, bacteria, and fungi in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 1225–1230.
- Schamphaleire MD, Spanoghe P, Brusselman E, et al. 2007. Risk assessment of pesticide spray drift damage in Belgium. *Crop Protection*, **26**: 602–611.
- Schrader S, Münchenberg T, Baumgarte S, et al. 2008. Earthworms of different functional groups affect the fate of the *Bt*-toxin Cry1Ab from transgenic maize in soil. *European Journal of Soil Biology*, **44**: 283–289.
- Shu YH, Ma HH, Du Y, et al. 2011. The presence of *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) protein in earthworms *Eisenia fetida* has no deleterious effects on their growth and reproduction. *Chemosphere*, **85**: 1648–1656.
- Thakuria D, Schmidt O, Finan D, et al. 2010. Gut wall bacteria of earthworms: A natural selection process. *ISME Journal*, **4**: 357–366.
- Vaufleury A, Kramarz PE, Binet P, et al. 2007. Exposure and effects assessments of *Bt*-maize on non-target organisms (gastropods, microarthropods, mycorrhizal fungi) in microcosms. *Pedobiologia*, **51**: 185–194.
- Vercesi ML, Krogh PH, Holmstrup M. 2006. Can *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) corn residues and *Bt*-corn plants affect life-history traits in the earthworm *Aporrectodea caliginosa*? *Applied Soil Ecology*, **32**: 180–187.
- Weber M, Nentwig W. 2006. Impact of *Bt* corn on the diplopod *Allajulus latestriatus*. *Pedobiologia*, **50**: 357–368.
- Xiao NW, Jing BB, Ge F, et al. 2006. The fate of herbicide acetochlor and its toxicity to *Eisenia fetida* under laboratory conditions. *Chemosphere*, **62**: 1366–1373.
- Zeilinger AR, Andow DA, Zwahlen C, et al. 2010. Earthworm populations in a northern US corn belt soil are not affected by long-term cultivation of *Bt* maize expressing Cry1Ab and Cry3Bb1 proteins. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**: 1284–1292.
- Zwahlen C, Hilbeck A, Howald R, et al. 2003. Effects of transgenic *Bt* corn litter on the earthworm *Lumbricus terrestris*. *Molecular Ecology*, **12**: 1077–1086.
- Zwahlen C, Hilbeck A, Nentwig W. 2007. Field decomposition of transgenic *Bt* maize residue and the impact on non-target soil invertebrates. *Plant and Soil*, **300**: 245–257.

作者简介 张艳艳,女,1981年生,博士研究生,主要从事转基因作物对非靶标生物安全性评价与分子生态学研究。E-mail: zhangyan_5051@163.com

责任编辑 刘丽娟