

周 蕾, 井乐刚, 周 琳, 等. 转基因水稻叶片残体对白符跳和赤子爱胜蚓的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1978–1983.

ZHOU Lei, JING Le-gang, ZHOU Lin, et al. Effects of transgenic rice leaf residues on *Folsomia candida* and *Eisenia fetida*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1978–1983.

转基因水稻叶片残体对白符跳和赤子爱胜蚓的影响

周 蕾¹, 井乐刚¹, 周 琳¹, 王柏凤^{2,3}, 冯树丹^{1*}, 宋新元^{2,3}

(1. 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 哈尔滨 150025; 2. 吉林省农业科学院, 长春 130033; 3. 吉林省农业生物技术重点实验室, 长春 130033)

摘 要:为研究转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 对土壤中非靶标生物安全性的影响, 以转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 的非转基因亲本品种吉粳 88 为对照, 选择白符跳和赤子爱胜蚓作为指示生物, 在室内条件下, 用水稻 1c-5 的叶片喂饲白符跳和赤子爱胜蚓, 考察其对白符跳存活率和体长的影响, 以及对赤子爱胜蚓存活率、繁殖率和体重变化率的影响。结果表明, 与吉粳 88 相比, 水稻 1c-5 对白符跳和赤子爱胜蚓无显著影响。由此可初步判定, 短期内转 *Cry1c* 基因水稻 1c-5 对白符跳和赤子爱胜蚓无生态风险。

关键词:转基因水稻; 白符跳; 赤子爱胜蚓; 存活率; 繁殖率

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)10-1978-06 doi:10.11654/jaes.2017-0424

Effects of transgenic rice leaf residues on *Folsomia candida* and *Eisenia fetida*

ZHOU Lei¹, JING Le-gang¹, ZHOU Lin¹, WANG Bai-feng^{2,3}, FENG Shu-dan^{1*}, SONG Xin-yuan^{2,3}

(1. College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 3. Jilin Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to investigate the effects of transgenic *Cry1c* rice 1c-5 on the safety of nontarget soil organisms, *Folsomia candida* and *Eisenia fetida* were studied as environmental bio-indicators. Under indoor conditions, both organisms were fed with leaves of transgenic rice 1c-5 and nontransgenic rice Jigeng88 as a control during the entire growth period. During this period, the survival rate and body length of *F. candida* as well as the survival, reproduction, and weight change rates of *E. fetida* were investigated. The results showed that 1c-5 had no significant effect on the growth of both organisms, as compared with that of the nontransgenic control. Thus, we concluded that the transgenic rice line 1c-5 did not pose an ecological risk to *F. candida* and *E. fetida* following short-term exposure.

Keywords: transgenic rice; *Folsomia candida*; *Eisenia fetida*; survival rate; reproduction rate

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是重要的粮食作物, 如何培育出优质、高产的水稻品种对世界粮食生产具有重要意义^[1]。20 世纪 80 年代, 转基因技术被应用于水稻优化育种研究^[2], 迄今已有大量的相关研究报道^[3-5]。我国在世界转基因水稻研究方面具有重要地位, 已成功获得一大批具有重要应用价值和自主知识产权的基因, 并培育出抗虫、抗除草剂、抗病、营养高效、耐盐和高产等一系列转基因水稻品系/组合, 其中转基

因抗虫水稻研究处于世界领先水平^[6]。由于水稻在我国食物结构中的重要性和水稻起源的特殊地位, 在研发转基因水稻的同时, 其安全性问题亦成为被关注的焦点^[7]。

目前, 转基因水稻的环境风险研究, 主要集中在转基因水稻外源基因漂移及影响^[8-9]、转基因水稻对生物多样性的影响等。其中, 对生物多样性的影响研究分为地上与地下两部分, 地上部多以物种群落结构参

收稿日期: 2017-03-23 录用日期: 2017-06-21

作者简介: 周 蕾 (1992—), 女, 吉林德惠人, 硕士研究生, 从事转基因作物环境安全性研究。E-mail: zll987012@163.com

* 通信作者: 冯树丹 E-mail: sdf6616@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31500345); 国家科技重大专项课题 (2016ZX08011-003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31500345); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016ZX08011-003)

数为评价指标^[10-11],地下部多以土壤动物群落、微生物群落结构参数为评价指标^[12-13]。祝向钰等^[14]研究了转 *Bt* 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化, 研究结果表明, 转 *Bt* 水稻种植会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无显著影响。由于田间调查数据的评价方法很容易受环境因子等影响, 实验周期较长、重复性较差, 近年来采用室内生测方法, 利用常见环境生物的指示作用, 成为研究转基因植物生态安全性的重要补充手段^[15]。Zwahlen 等^[16]分别用转基因玉米叶片和非转基因玉米叶片喂饲蚯蚓, 结果表明, 用转基因玉米叶片喂饲的蚯蚓体重增加 4.4%, 而用非转基因玉米叶片喂饲的蚯蚓体重下降 18.3%。

土壤动物在土壤生态系统中起着重要作用, 特别是土壤中广泛存在的跳虫和蚯蚓。跳虫属于弹尾纲、弹尾目, 其种类和个体数量在土壤中十分丰富, 是土壤中的重要分解者^[17], 在土壤生态系统中能够参与物质循环、提高土壤肥力等活动, 在土壤质量评价、污染监测、污染土壤的生物修复以及控制植物真菌病害等方面都具有重要作用^[18]。白符跳 (*Folsomia candida*) 作为对化学物质最为敏感的跳虫之一, 具有抗旱、抗冻、抗缺氧、孤雌生殖、对毒物敏感等特性, 是国内外土壤生态安全评价中普遍使用的模式物种^[19]。蚯蚓约占土壤生物总量的 60%~80%, 其生存活动可促进有机质的分解、促进土壤养分的循环与释放、改善土壤结构和理化性状^[20], 在维持土壤生态系统功能中起着不可替代的作用^[21]。赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 对毒物敏感、体型较大, 且具有标准的急毒性和亚毒性测定方法^[22], 常被作为生态毒理试验的标准物种。

本研究选择转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 及其非转基因对照吉粳 88 的叶片, 以常用的环境指示生物白符跳和赤子爱胜蚓作为评价物种, 在室内可控条件下, 采用直接喂饲法, 研究了转基因水稻叶片残体对白符跳存活率和体长的影响, 以及对赤子爱胜蚓存活率、繁殖率和体重变化率的影响, 旨在为评估转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 对土壤生态系统的影响提供参考, 为转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 的安全性评价提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用转基因水稻为我国自主研制的转

Cry1c 基因抗虫水稻 1c-5 及其非转基因亲本对照吉粳 88, 均由转基因水稻研发单位吉林省农业科学院提供。

本试验所用跳虫为白符跳, 蚯蚓为赤子爱胜蚓大平 2 号, 二者均取自国家转基因玉米、大豆中试与产业化基地(吉林省公主岭)、吉林省农业科学院转基因植物环境安全研究课题组培养的试验种群, 试验时该种群已在实验室内稳定培养 3 年。

本试验所用土壤为东北黑土, 取自吉林省农业科学院公主岭院区, 质地为壤土, 采土区土地未种植过任何转基因作物。

1.2 试验方法

1.2.1 白符跳室内生测

取水稻成熟期叶片, 60℃烘干 12 h, 用植物组织粉碎机破碎后, 置于-20℃冰箱备用^[23]。按石膏:活性炭=9:1(体积)的比例配制培养基并置于培养皿中, 收集 3 d 内白符跳所产卵块放入其中, 将培养盒放置到人工气候箱内进行白符跳的卵化及“同步化”培养。气候箱内温度为 20±1℃, 光周期为全黑夜, 每周用去离子水调节 1 次空气相对湿度, 使其接近 100%。“同步化”培养时, 在培养皿中添加啤酒酵母作为食物^[24]。从“同步化”培养的培养皿中选取虫龄为 10~12 d 的白符跳进行喂饲试验, 喂饲试验环境与“同步化”培养的试验环境相同。喂饲试验中, 以上述粉碎后的转基因水稻叶片作为食物, 每 2 d 检查 1 次并更换食物。以喂饲转基因水稻叶片的白符跳作为试验组, 以喂饲非转基因水稻叶片的白符跳作为对照组, 分别设置 5 个重复, 每个重复内放入 10 头长势基本一致的白符跳。分别在接虫后第 10、20、30 d 对白符跳存活率进行调查, 然后将培养皿放回恒温气候箱内继续培养, 试验结束时从中随机选取 3 头白符跳, 测量其体长并计算平均值。

1.2.2 赤子爱胜蚓室内生测

分别取转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 及其非转基因对照吉粳 88 的成熟期叶片, 用蒸馏水洗净后自然风干, 人工粉碎, 过孔径为 2.0 mm 的筛。采集土层深度为 5~25 cm 未种植过转基因作物的土壤, 自然条件下风干后, 用孔径为 15.0 mm 的筛去除植物残渣、沙石等, 再过孔径为 2.0 mm 筛^[25]。将牛粪自然风干后打碎, 过孔径为 2.0 mm 筛。按照土壤:牛粪:叶片的质量比为 50:5:2 的比例, 将三者充分混合后, 置于培养盒中^[25-27]。挑选出生 2 个月、具有生殖环、长势一致、体重 180~220 mg 的赤子爱胜蚓放入培养盒中。以用转基

因水稻叶片培养的赤子爱胜蚓为试验组,用非转基因水稻叶片培养的为对照组,各设置5组,每组中含赤子爱胜蚓10条。在 $24\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、空气相对湿度65%、无光条件下培养。在培养盒顶端覆盖纱布,并用软胶套或细绳固定,以防蚯蚓逃脱并保证其呼吸通畅。分别在接虫后第7、14、21、28、35、42 d调查存活成蚓数量。将各培养盒中存活的赤子爱胜蚓全部取出,于室温下用无菌水洗涤,滤纸干燥,称重,记录各培养盒中幼蚓及蚓茧的数量。按下式计算体重变化率:体重变化率=(成蚓检查当天质量-成蚓初始质量)/成蚓初始质量 $\times 100\%$ 。按下式计算繁殖率:繁殖率=检查当天幼蚓数/初始幼蚓数 $\times 100\%$ 。

1.3 数据处理

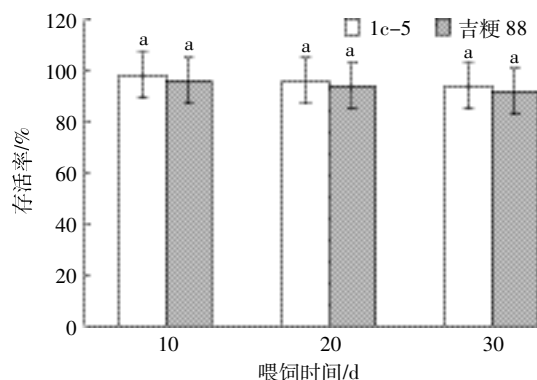
采用软件SPSS 18.0进行统计分析,用一般线性模型(General linear model)中的重复测量(Repeated measures)对测量数据进行方差分析,通过球形检验(Mauchly's test of sphericity)判断数据之间是否存在相关性。如果 $P>0.05$,说明数据之间不存在相关性,用单因素方差分析;如果 $P<0.05$,说明数据之间存在相关性,用多元方差分析。

2 结果与分析

2.1 对白符跳存活率与体长的影响

2.1.1 存活率

用转基因水稻1c-5的叶片喂饲白符跳10、20、30 d后,其存活率分别为98%、96%和94%,均高于非转基因对照吉梗88喂饲的白符跳存活率。方差分析结果表明,转基因水稻1c-5与非转基因对照吉梗88相比,对白符跳的存活率无显著影响(图1)。



同一时间不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters for the same sampling time indicate significant difference at 5% level among treatments. The same below

图1 转基因水稻对白符跳存活率的影响

Figure 1 Effects of transgenic rice on survival rate of *F. candida*

2.1.2 体长

试验条件下喂饲白符跳30 d后,每个重复中随机选取3头白符跳测量其体长,取平均数并进行单因素方差分析。结果表明,转基因水稻1c-5和非转基因对照吉梗88喂饲的白符跳体长均值均为 $1.17\pm 0.01\text{ mm}$ (平均值 $\pm$ 标准误)。方差分析结果表明,与非转基因对照吉梗88相比,转基因水稻1c-5对白符跳的体长无显著影响(图2)。

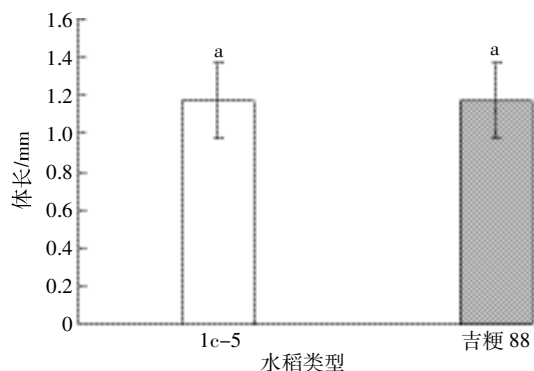


图2 转基因水稻对白符跳体长的影响

Figure 2 Effects of transgenic rice on body length of *F. candida*

2.2 对赤子爱胜蚓存活率、繁殖率及体重变化率的影响

2.2.1 存活率

试验表明,无论是用转基因水稻1c-5的叶片喂饲,还是用非转基因对照吉梗88的叶片喂饲,赤子爱胜蚓的存活率均随着处理时间延长而不断降低。在第7、14 d时,喂饲转基因水稻1c-5蚯蚓的存活率,与喂饲非转基因对照吉梗88的基本一致;在第21、28、35、42 d时,与后者相比,前者的下降较慢。方差分析结果表明,与非转基因对照吉梗88相比,转基因水稻1c-5对赤子爱胜蚓的存活率无显著影响(图3)。

2.2.2 繁殖率

用转基因水稻1c-5和非转基因对照吉梗88喂

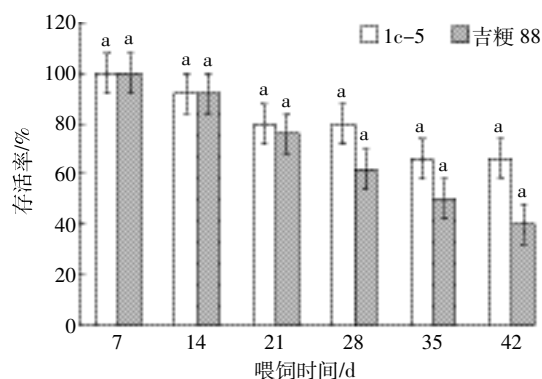


图3 转基因水稻对赤子爱胜蚓存活率的影响

Figure 3 Effects of transgenic rice on survival rate of *E. fetida*

饲的赤子爱胜蚓,第 7 d 时均未繁殖,第 14 d 时均开始繁殖,繁殖高峰期均出现在第 28 d。虽然转基因水稻 1c-5 和非转基因对照吉梗 88 的各组间增长数量不同,但方差分析结果表明,与非转基因对照吉梗 88 相比,转基因水稻 1c-5 对赤子爱胜蚓的繁殖率无显著影响(图 4)。

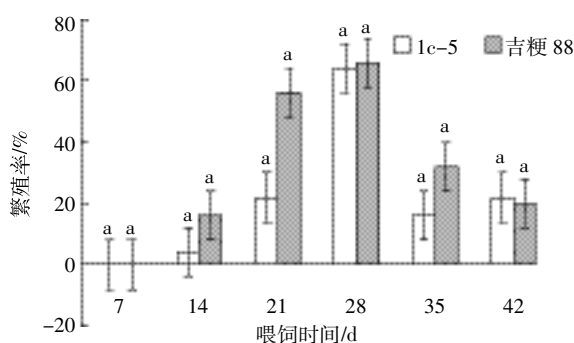


图 4 转基因水稻对赤子爱胜蚓繁殖率的影响

Figure 4 Effects of transgenic rice on reproductive rate of *E. fetida*

2.2.3 体重变化率

从表 1 可看出,用转基因水稻 1c-5 与非转基因对照吉梗 88 喂饲的赤子爱胜蚓,每 7 d 的体重变化率无显著差异($P>0.05$);从第 28 d 开始,各处理组中赤子爱胜蚓的体重开始下降,体重变化率为负值。方差分析结果表明,与非转基因对照吉梗 88 相比,转基因水稻 1c-5 对赤子爱胜蚓的体重变化率无显著影响。

3 讨论

1999 年,关于转基因玉米花粉对帝王蝶的影响被报道后^[28],转基因作物对非靶标生物的影响引起了研究人员的广泛关注。此外,研究人员还对如何选取

具有代表性的种群作为非靶标效应的评价种群进行了激烈的讨论。白符跳与赤子爱胜蚓均处于食物链底端,分布较广,主要取食土壤内的植物残体,常被研究人员选作测试各种土壤污染物毒理性的模式生物。Yang 等^[29]分别按 $300 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cry1C 蛋白、 $600 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ Cry2A 蛋白的比例,将上述两种蛋白与啤酒酵母混合并喂饲白符跳,结果表明对白符跳的存活率无显著影响。本研究结果与上述研究的结果是一致的。除此之外,也有研究表明,转 *Bt* 作物不会对跳虫产生影响。Bitzer 等^[30]在 4 个地区研究了转 *Bt* 玉米与杀虫剂对土壤表面跳虫和地下跳虫的影响,结果显示转 *Bt* 玉米对跳虫的丰度无影响,对跳虫物种多样性指数的影响也较小。肖能文等^[31]通过将不同浓度的 Cry1Ac 杀虫蛋白加入试验土壤处理赤子爱胜蚓,研究表明 Cry1Ac 杀虫蛋白对蚯蚓存活率、体重变化及体内总蛋白酶、过氧化氢酶、乙酰胆酯酶、谷胱甘肽-S-转移酶、纤维素酶活性均没有不利影响。丁帅等^[32]和冷春龙等^[33]研究了转基因棉花对赤子爱胜蚓的影响,结果表明,转基因棉花与非转基因棉花对赤子爱胜蚓体重变化的影响趋势基本一致,蚓茧数、新产生的幼蚓数及体内 SOD 活性均无显著差异。Ahmad 等^[34]在土壤中添加转 *Cry3Bb1* 基因玉米植株残体,发现其对普通蚯蚓的生存和体重没有显著影响。Vercesi 等^[35]选用欧洲地区大面积种植的表达 Cry1Ab 蛋白的转基因玉米叶,将其研成细粉,按不同剂量与土壤混合,没有发现转 *Bt* 基因玉米组织在降解过程中对蚯蚓的存活、生长和繁殖产生影响。进一步的研究表明陆生蚯蚓 (*Lumbricus terrestris*) 和内栖蚯蚓 (*Aporrectodea caliginosa*) 2 种蚯蚓可加快土壤中转 *Cry1Ab* 基因玉米残体的降解^[36]。为了在田间较大面积中研究多年连续种植转 *Bt* 基因玉米对蚯蚓的影响,Zeilinger 等^[37]在 0.16 hm^2 土地上连续 4 年种植 2 种转 *Bt* 基因玉米 (*Cry1Ab* 和 *Cry3Bb1*),同时设置非转基因玉米对照区,所有玉米收获后均秸秆还田。在试验区域的土壤中有 4 种蚯蚓生存,分别按不同种类对蚯蚓的生物量进行测试。调查数据显示,无论是幼年还是成年蚯蚓,在转基因和非转基因玉米种植区的生物量均无显著性差异,因此认为转 *Bt* 基因玉米对蚯蚓的影响很小。Merwe 等^[38]进行的一项为期 28 d 的试验表明,Cry1Ab 蛋白对安德爱胜蚓 (*Eisenia andrei*) 的蚓茧量和茧孵化量没有显著影响。本研究结果与上述研究的结果是一致的。除此之外,肖能文等^[31]、冷春龙等^[33]、舒迎花等^[39]还研究了 *Bt* 毒蛋白对赤子爱胜蚓酶活性的影响,结果表

表 1 赤子爱胜蚓的体重变化率

Table 1 Body weight change rate of *Eisenia fetida*

喂饲时间/d	体重变化率/%	
	转基因水稻(1c-5)	非转基因对照(吉梗 88)
7	0.01±0.02a	0.04±0.01a
14	0.04±0.03a	-0.01±0.01a
21	0.01±0.04a	-0.08±0.03a
28	-0.04±0.03a	-0.08±0.02a
35	-0.03±0.04a	-0.12±0.04a
42	-0.09±0.03a	-0.16±0.03a

注:表中数据为平均值±标准误($n=5$);同行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference at 5% level.

明, 转 *Bt* 基因玉米秸秆处理对赤子爱胜蚓总蛋白没有抑制作用, 对过氧化氢酶没有诱导作用, 但在短时间内能诱导超氧化物歧化酶(SOD)活性。

4 结论

(1)短期内转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 对土壤中非靶标生物的安全性无显著影响。

(2)为考察长期种植转 *Cry1c* 基因抗虫水稻 1c-5 对土壤中非靶标生物的安全性, 在将来的研究中, 应延长喂饲试验周期, 测定 *Cry1c* 蛋白在试验动物体内的残留量, 对代表性的分子毒理学指标进行评价分析。

参考文献:

- [1] 朱 桢. 转基因水稻研发进展[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(2): 9-16.
ZHU Zhen. Progress in research and development of transgenic rice[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2010, 12(2): 9-16.
- [2] 陈 浩, 林拥军, 张启发, 等. 转基因水稻研究的回顾与展望[J]. 科学通报, 2009, 54(18): 2699-2717.
CHEN Hao, LIN Yong-jun, ZHANG Qi-fa, et al. Review and prospect of transgenic rice research[J]. *Chinese Science Bull*, 2009, 54(18): 2699-2717.
- [3] 张 欣, 付亚萍, 周君莉, 等. 水稻规模化转基因技术体系构建与应用[J]. 中国农业科学, 2014, 47(21): 4141-4154.
ZHANG Xin, FU Ya-ping, ZHOU Jun-li, et al. Establishment and application of large-scale transformation systems for rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(21): 4141-4154.
- [4] 王 莉, 钱 前, 张光恒. 水稻抗旱基因调控机制及其分子育种利用[J]. 分子植物育种, 2014, 12(5): 1027-1033.
WANG Li, QIAN Qian, ZHANG Guang-heng. Regulation mechanism of drought-resistance Genes and its molecular breeding utilization in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2014, 12(5): 1027-1033.
- [5] 肖小君, 王 辉, 齐泽民, 等. 转基因技术及其在水稻育种中的研究进展等[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2011, 32(5): 60-64.
XIAO Xiao-jun, WANG Hui, QI Ze-min, et al. Transgenic technology and its research progress in rice breeding[J]. *Journal of Jinggangshan University(Natural Science)*, 2011, 32(5): 60-64.
- [6] 孙国庆, 金茺军, 宛煜嵩, 等. 中国转基因水稻的研究进展及产业化问题分析[J]. 生物技术通报, 2010(12): 1-6.
SUN Guo-qing, JIN Wu-jun, WAN Yu-song, et al. Research progress and analysis of industrialization on transgenic rice in China[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2010(12): 1-6.
- [7] 杨庆文. 转基因水稻的生物安全性问题及其对策[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 261-264.
YANG Qing-wen. Potential biological safety problems and countermeasures in developing transgenic rice in China[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003, 4(3): 261-264.
- [8] 左 娇, 郭运玲, 孔 华, 等. 转基因水稻环境安全评价研究进展[J]. 热带作物学报, 2013, 34(12): 2521-2526.
- [9] ZUO Jiao, GUO Yun-ling, KONG Hua, et al. Progress on environmental safety evaluation of transgenic rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(12): 2521-2526.
- [10] 姜大刚, 梁奕涛, 黄 靖, 等. 转基因水稻外源基因的漂移研究[J]. 生物技术通报, 2010(6): 95-99.
JIANG Da-gang, LIANG Yi-tao, HUANG Jing, et al. Study on gene flow of transgenic rice[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2010(6): 95-99.
- [11] 刘雨芳. 转 *Bt* 抗虫稻对地上非靶标节肢动物的生态风险性[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(5): 1133-1142.
LIU Yu-fang. An overview of the potential ecological risk of insect-resistant transgenic *Bt* rice on non-target arthropods aboveground in fields[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51(5): 1133-1142.
- [12] 梁玉勇, 程正新, 程森弟, 等. *Bt* 水稻对褐飞虱及其二种天敌种群动态的影响[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(5): 1163-1172.
LIANG Yu-yong, CHENG Zheng-xin, CHENG Sen-di, et al. Effect of transgenic *Bt* rice on the population dynamics of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) and two of its natural enemies[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51(5): 1163-1172.
- [13] 傅 强, 赖凤香, 陈 洋, 等. 抗虫转基因水稻对非靶标生物的生态安全性研究进展[J]. 植物生理学报, 2013, 49(7): 655-663.
FU Qiang, LAI Feng-xiang, CHEN Yang, et al. A review of the ecological safety of the insect-resistant transgenic rices to non-target organisms[J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(7): 655-663.
- [14] 陈晓雯, 林 胜, 尤民生, 等. 转基因水稻对土壤微生物群落结构及功能的影响[J]. 生物安全学报, 2011, 20(2): 151-159.
CHEN Xiao-wen, LIN Sheng, YOU Min-sheng, et al. Effects of transgenic rice on the structure and function of soil microbial communities [J]. *Journal of Biosafety*, 2011, 20(2): 151-159.
- [15] 祝向钰, 李志毅, 常 亮, 等. 转 *Bt* 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3546-3554.
ZHU Xiang-yu, LI Zhi-yi, CHANG Liang, et al. Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic *Bt* rice paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3546-3554.
- [16] 宋新元, 张欣芳, 于 壮, 等. 转基因植物环境安全评价策略 [J]. 生物安全学报, 2011, 20(1): 37-42.
SONG Xin-yuan, ZHANG Xin-fang, YU Zhuang, et al. Strategy of environmental bio-safety assessment for transgenic plants[J]. *Journal of Biosafety*, 2011, 20(1): 37-42.
- [17] Zwaalen C, Hilbeck A, Gugerli P, et al. Degradation of Cry1Ab protein within transgenic *Bacillus thuringiensis* corn tissue in the field[J]. *Molecular Ecology*, 2003, 12(3): 765-775.
- [18] Fountain M T, Hopkin S P. *Folsomia candida* (collembola): A "Standard" soil arthropod[J]. *Annual Review of Entomology*, 2005, 50(1): 201-222.
- [19] Sabatini M A, Innocenti G. Effects of collembola on plant-pathogenic fungus interactions in simple experimental systems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(1): 62-66.
- [20] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 等. 跳虫在土壤生态系统中的作用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 154-161.

- CHEN Jian-xiu, MA Zhi-chun, YAN Hai-juan, et al. Roles of spring-tails in soil ecosystem[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 154-161.
- [20] 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 142-153.
- ZHANG Wei-xin, CHEN Di-ma, ZHAO Can-can. Functions of earth-worm in ecosystem[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 142-153.
- [21] 史志明, 徐 莉, 胡 锋. 蚯蚓生物标记物在土壤生态风险评价中的应用[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5369-5379.
- SHI Zhi-ming, XU Li, HU Feng. Progress in earthworm biomarker studies and theirs applications in soil pollution risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5369-5379.
- [22] Gong P B, Li J X, Guo M F, et al. Present status and development trend of earthworm eco-toxicological test[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1297-1302.
- [23] 周 琳, 王柏凤, 刘新颖, 等. 转基因大豆叶片残体对白符跳的影响评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3023-3028.
- ZHOU Lin, WANG Bai-feng, LIU Xin-ying, et al. Assessment for the impacts of genetically modified soybean leaves residues on the collembolan *Folsomia candida*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 3023-3028.
- [24] 杨 玺, 袁一杨, 戈 峰, 等. 转 *Bt* 基因水稻对白符跳虫取食选择行为的影响[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(5): 1197-1203.
- YANG Xi, YUAN Yi-yang, GE Feng, et al. Tests of the preference of *Folsomia candida* for isogenic and *Bt*-rice[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51(5): 1197-1203.
- [25] 程苗苗, 舒迎花, 王建武. *Bt* 水稻秸秆还田对赤子爱胜蚓生长发育和生殖的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3667-3674.
- CHENG Miao-miao, SHU Ying-hua, WANG Jian-wu. Effect of *Bt* rice straw returning in soil on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3667-3674.
- [26] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 336-339.
- ZENG Mu-xiang, WANG Rong-fang, PENG Shi-qi, et al. Summary of returning straw into field of main agricultural areas in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(5): 336-339.
- [27] Liu B, Cui J, Meng J, et al. Effects of transgenic Bt+CpTI cotton on the growth and reproduction of earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Frontiers in Bioscience*, 2009, 14(10): 4008-4014.
- [28] Losey J E, Rayer L S, Carter M E. Transgenic pollen harms monarch larvae[J]. *Nature*, 1999, 399(6733): 214.
- [29] Yang Y, Chen X P, Cheng L S, et al. Toxicological and biochemical analyses demonstrate no toxic effect of Cry1C and Cry2A to *Folsomia candida*[J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 15619-15628.
- [30] Bitzer R J, Rice M E, Pilcher C D, et al. Biodiversity and community structure of epedaphic and euedaphic springtails (collembola) in transgenic rootworm *Bt* corn[J]. *Environmental Entomology*, 2005, 34(5): 1346-1376.
- [31] 肖能文, 戈 峰, 刘向辉. *Bt* 毒蛋白 Cry1Ac 在人造土壤中对赤子爱胜蚓毒理及生化影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1523-1526.
- XIAO Neng-wen, GE Feng, LIU Xiang-hui. Effects of *Bt* toxin Cry1Ac on biochemical responses of *Eisenia fetida* in an artificial soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1523-1526.
- [32] 丁 帅, 方志翔, 刘 标, 等. 转野生芥菜凝集素基因棉花对赤子爱胜蚓的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 389-393.
- DING Shuai, FANG Zhi-xiang, LIU Biao, et al. Effects of wild-shepherd's-purse-agglutinin (WSA) transgenic cotton on *Eisenia fetida*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(4): 389-393.
- [33] 冷春龙, 俞元春, 吴电明, 等. 转基因抗虫棉对赤子爱胜蚓生长、生殖及 SOD 活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 927-931.
- LENG Chun-long, YU Yuan-chun, WU Dian-ming, et al. Effect of transgenic pest-resistant cotton on the growth, reproduction and SOD activity of *Eisenia fetida*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 927-931.
- [34] Ahmad A, Wilde G E, Zhu K Y. Evaluation of effects of coleopteran-specific Cry3Bb1 protein on earthworms exposed to soil containing corn roots or biomass[J]. *Environmental Entomology*, 2006, 35(4): 976-985.
- [35] Vercesi M L, Krogh P H, Holmstrup M. Can *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) corn residues and *Bt*-corn plants affect life-history traits in the earthworm *Aporrectodea caliginosa*?[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32(2): 180-187.
- [36] Schrader S, Münchenberg T, Baumgarte S, et al. Earthworms of different functional groups affect the fate of the *Bt*-toxin Cry1Ab from transgenic maize in soil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(3): 283-289.
- [37] Zeilinger A R, Andow D A, Zwahlen C, et al. Earthworm populations in a northern U. S. Cornbelt soil are not affected by long-term cultivation of *Bt* maize expressing Cry1Ab and Cry3Bb1 proteins[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(8): 1284-1292.
- [38] Van der Merwe F, Bezuidenhout C, van den Berg J, et al. Effects of Cry1Ab transgenic maize on lifecycle and biomarker responses of the earthworm, *Eisenia andrei*[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 17155-17167.
- [39] 舒迎花, 马洪辉, 杜 艳, 等. *Bt* 玉米秸秆杀虫蛋白对赤子爱胜蚓酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2133-2139.
- SHU Ying-hua, MA Hong-hui, DU Yan, et al. Effects of *Bt* corn straw insecticidal proteins on enzyme activities of *Eisenia fetida*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2133-2139.