

DOI: 10.5846/stxb201411122235

刘标, 韩娟, 薛堃. 转基因植物环境监测进展. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Liu B, Han J, Xue K. Progress in the environmental monitoring of transgenic plants. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

转基因植物环境监测进展

刘 标^{1,*}, 韩 娟², 薛 堃³

1 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

2 农业部食物与营养发展研究所, 北京 100081

3 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

摘要:近 20 年来, 转基因植物的商业化应用规模越来越大, 而转基因生物安全问题依然是转基因植物产业进一步发展的最主要制约因素。转基因植物在商业化应用之前虽然预先进行了风险评估, 但是, 包括环境监测在内的风险管理措施是确保转基因植物安全应用的必要手段。在转基因作物大规模应用近 20 年之后, 其在靶标生物抗性、对生物多样性的影响、基因漂移、在生态系统中的长期存留等方面产生的环境风险已经渐渐显现出来, 表明风险评估无法为转基因植物应用提供足够的安全保障, 还必须通过开展系统而长期的环境监测, 明确转基因植物在生产应用后的实际环境影响。联合国环境规划署和欧盟等已经制定了转基因植物环境监测的法规和技术指南, 一些国家实施了系统的转基因植物环境监测。本文对转基因植物所产生的环境风险以及环境监测应包括的内容进行了综述。

关键词:转基因植物; 风险评估; 环境监测; 风险管理

Progress in the environmental monitoring of transgenic plants

LIU Biao^{1,*}, HAN Juan², XUE Kun³

1 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection of China, Nanjing 210042, China

2 Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

3 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract: Although global commercialization of transgenic plants has rapidly increased in the past 20 years, biosafety issue is still a constraint on further expansion and use of transgenic plants. Risk assessment has always been performed before commercialization of transgenic plants, but risk management measures, including environmental monitoring, are still necessary to ensure the safe application of transgenic plants. After 20 years of extensive application, some environmental risks caused by transgenic plants have gradually been revealed, such as resistance of target organisms, impacts on biodiversity, gene flow, and long-term persistence of transgenic plants in ecosystems. This reminds us that risk assessment is not enough to guarantee the safe application of transgenic plants; systematic and long-term environmental monitoring is necessary to identify the actual environmental effects. Laws and technical guidelines on environmental monitoring of transgenic plants have been issued by international organizations, such as the United Nations Environment Program (UNEP) and the European Union. Some countries have already performed systematical environmental monitoring of transgenic plants. This article summarizes the environmental risks of transgenic plants and the contents of environmental monitoring.

基金项目:国家自然科学基金项目(31370544); 转基因生物新品种培育重大专项(2014ZX08012005); 环保公益性行业科研专项“转基因蛋白的环境代谢技术研究”

收稿日期: 2014-11-12; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liubiao@nies.org

Key Words: transgenic plants; risk assessment; environmental monitoring; risk management

转基因作物的全球商业化种植面积从 1996 年的 170 万公顷迅速增加到 2013 年的 1.75 亿公顷,产生了显著的经济效益^[1]。中国的转基因作物研发也取得了很大进展,转基因棉花、杨树、甜椒、番木瓜等已经进行多年的商业化环境释放,而且转基因抗虫水稻、转植酸酶基因玉米等作物也具备了商业化生产的技术能力。但是,自从转基因技术诞生之日起,转基因生物的安全性问题一直伴随着转基因技术的每个发展阶段,成为转基因产业发展的最主要制约因素。转基因生物的安全性问题主要包括食品安全、环境安全以及对社会经济、伦理、法律(如知识产权)的影响。为了解决转基因生物的安全性问题,国际组织如联合国环境规划署(UNEP)、联合国粮农组织(FAO)以及美国、欧盟、中国、日本等国家都颁布了转基因生物安全管理的法律法规,要求转基因生物的研发必须预先进行食品安全和环境安全性的评价,通过了安全性评价后虽可进行商业化生产和应用,还需要在生产和应用过程中采取包括环境监测在内的安全管理措施。

1 转基因生物环境监测的必要性

转基因生物在获准商业化应用之前虽然已经根据转基因生物安全法规的要求进行了环境风险评估,但是,这并不表明这些转基因生物就是没有环境风险和绝对安全的,主要原因包括以下几个方面。

首先,风险评估的结果一般都会指出转基因植物可能存在一定风险,但是,只要这些风险是可以控制的,在采取必要的风险管理措施之后,其风险程度可以接受,转基因植物仍然有可能获准进行生产和应用。

其次,风险评估一般是在人工的可控条件下开展的,评估的内容、规模和时间都比较有限,其结果只能提供最基本的安全信息,并不能代表转基因植物在多环境因子交互影响的复杂自然条件下长时间、大规模种植后产生的实际影响,如可控条件下的靶标生物抗性风险评价结果无法反映真实大田条件下多种作物、众多环境因子和生物因子相互作用时靶标害虫抗性的实际发生和发展情况^[2]。

第三,如同双对氯苯基三氯乙烷(DDT)的环境危害是在其大规模应用 40 多年后才显现并为人类所认识,转基因生物是人类历史上第一次出现的新型生物,其应用至今仅仅不足 20 年,人类对转基因生物安全性的本质尚没有足够的认识,无法排除长期、大规模应用转基因生物之后会出现人类目前所无法预知风险的可能性。

第四,目前的转基因生物安全评价仅仅是针对某个具有特定性状的转基因生物,但是,随着转基因技术的快速发展,具有越来越多新性状的不同种类转基因生物可能同时出现在某环境中出现并相互影响,这些转基因生物在环境中相互影响及其后的环境行为也是目前的安全性评估所没有的内容。

因此,为了既不因为安全性问题而影响、阻碍转基因技术的发展,又为转基因技术的发展提供必要的安全保障,在风险评估之后采取包括环境监测在内的环境安全管理措施已经成为国际社会的共识。《卡塔赫纳生物安全议定书》(以下简称《议定书》)是转基因生物安全领域的国际法,其第 15 条(风险评估)和第 16 条(风险管理)的条款均含有通过环境监测来管理和控制转基因生物环境风险的规定,为缔约国制定本国转基因生物监测管理法规提供了依据^[3]。欧盟制定并实施的一系列转基因生物安全法律中就转基因生物环境监测明确规定:转基因生物在欧盟成员国范围内申请商业化生产、应用时,其申报书中必须包括监测(包括环境监测)计划;转基因生物或者其产品商业化生产之后,申请人应确保遵照批准书的要求开展转基因生物的监测(包括环境影响的监测),并定期提交监测报告^[4-5]。国际生物技术公司孟山都、巴斯夫分别在欧盟范围内种植了其研发的转基因玉米和马铃薯,都按照该法规的要求提交了这 2 种转基因作物的年度监测报告^[6]。我国 2002 年颁布实施的《农业转基因生物安全评价管理办法》中也包括了农业转基因生物安全监管和监测的规定。

2 转基因植物环境监测的案例

在大豆、玉米、棉花等转基因作物进行了近 20 年的商业化种植之后,其所产生的经济效益是显著的。但

是,越来越多的证据表明,作为一种预防性管理措施,转基因生物的环境风险评估无法反映其生产应用之后产生的实际环境影响,一些当初风险评估过程中被认为不可能发生的风险或者很小的风险,已经通过后续的环境监测被发现成为现实。下面简要综述公开报道中已经确认的转基因植物所产生的环境风险。

2.1 靶标生物对抗虫转基因作物和除草剂产生抗性

抗虫、抗除草剂转基因作物的种植面积占目前全球转基因作物总种植面积的比例超过 95%,靶标生物的抗性对其可持续应用具有决定性的影响。

中国转 Bt 基因抗虫棉在经过多年的商业种植之后,南京农业大学、中国农业科学院植物保护研究所的多年监测结果表明,已经在大田水平上出现了某些靶标害虫(如棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和红铃虫 *Pectinophora gossypiella*)对 Cry1Ac 蛋白的抗性显著上升^[7-8]。印度棉田也出现了抗 Cry1Ac 蛋白的红铃虫抗性种群^[9-10]。在美国的波多黎各,转 Cry1F 基因玉米种植了 3 年之后,草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)就对其产生了明显的抗性,导致该转基因玉米于 2011 年撤出当地市场^[11];转 Cry3Bb 基因玉米在经过 7 年大规模种植后,其鞘翅目靶标害虫玉米根萤叶甲(*Diabrotica virgifera virgifera*)已经在大田水平上产生了显著抗性,造成玉米产量显著下降^[12-13]。转 Cry1Ab 基因玉米在南非连续 8 年种植已经导致靶标害虫玉米茎蛀褐夜蛾(*Busseola fusca*)对其产生了显著的抗性,使得该转 Cry1Ab 基因玉米无法在南非继续种植^[14-15];转 Cry1F 基因玉米 TC1507 于 2009 年开始在巴西种植,但是 2011 年就在部分种植区出现了显著抗性的草地贪夜蛾种群^[16]。最新调查结果表明,虽然大部分害虫种群依然对转 Bt 基因作物保持很高的敏感性,但是 5 大洲的 13 种主要靶标害虫中已经有 5 种靶标害虫出现大田抗性种群,而 2005 年只有一种大田靶标害虫抗性种群,表明靶标害虫的抗性一直在随着抗虫转基因作物种植面积扩大、种植时间的延长而稳定地发展^[17]。

转 EPSPS 基因抗除草剂作物是世界范围内种植面积最大的转基因作物。2002 年,《Nature Biotechnology》杂志上的一篇文章曾经断言:杂草几乎不可能对草甘膦除草剂产生抗性,转基因抗草甘膦除草剂大豆的种植没有增加草甘膦的用量,反而降低了草甘膦的用量^[18]。但是,随着抗草甘膦转基因作物的大规模应用,促进了杂草对草甘膦的抗性快速进化,如今已经在多个国家出现了 24 种抗草甘膦的杂草,其中长芒苋(*Amaranthus palmeri*)已经成为美国转基因大豆田中的恶性杂草,农民不得不增加施用除草剂的剂量和频率,甚至使用其他毒性更大的除草剂,导致化学除草剂用量近年来显著上升;1996—2011 年间,杂草抗性的快速进化已经导致美国抗除草剂转基因大豆、玉米、棉花的除草剂用量增加了 23.9 万吨^[19-20]。

2.2 对生物多样性的影响

我国转基因抗虫棉多年种植之后,一方面较好地控制了棉铃虫的种群数量,降低化学杀虫剂用量也间接保护了棉田的捕食性天敌^[21],但是也对棉田生物多样性的组成和功能造成了不利影响,主要表现在蚜虫、棉盲蝽等原来农田的次要非靶标害虫近年来已经发展成为我国棉田的主要害虫,同样需要施用大量的化学农药才能有效控制,而且转基因抗虫棉的枯萎病、黄萎病发病率显著高于常规棉,棉铃虫的寄生性天敌数量也显著下降^[22-24]。在美国,关于抗虫转 Cry1Ab 基因玉米对于君主斑蝶(*Danaus plexippus*)幼虫的生长发育具有显著不利影响的成果于 1999 年发表之后^[25],美国农业部、环境保护局 2000 年组织了一些科学家在美国三个州和加拿大的农田生态系统开展了转 Cry1Ab 基因抗虫玉米对君主斑蝶实际影响的监测和调查,结果表明抗虫玉米花粉对君主斑蝶种群的生存并不构成实际威胁^[26]。但是,过去十年在墨西哥越冬的君主斑蝶种群数量显著下降与美国大规模种植抗除草剂作物直接相关,因为除草剂的大规模使用杀灭了常见的农田杂草马利筋(*Asclepias scurassavica*),而后者是君主斑蝶的最主要寄主植物^[27]。

2.3 基因漂移造成外源基因在作物和野生植物基因库的扩散

基因漂移(gene flow)是一种不以人的意志为转移的自然现象,一旦转基因植物大规模种植,其外源基因将不可避免地向其周围环境中能够与之杂交的作物和野生种中扩散。例如,加拿大在多年种植对单一除草剂具有抗性的转基因油菜之后,农田已经出现能够同时抗 3 种除草剂的转基因油菜,这是不同转基因油菜之间基因漂移所造成的,这种油菜只能用 2,4-D 等毒性更大的除草剂才能杀灭^[28]。浙江大学陈学新教授课题组

的最新研究结果表明,水稻扬花期有多达 510 余种昆虫访问水稻的花,其中意大利蜜蜂能将水稻花粉携带至距离花粉源至少 500 米以外的地方,而且 81% 的花粉仍具有活性,这比之前人们认识到的风传水稻花粉的距离要远得多^[29]。如果转基因水稻在我国进行大规模商业化种植,其外源基因将不可避免地进入野生稻、稗草等水稻近缘种的基因库。

2.4 转基因植物从农田生态系统逃逸到自然生态系统并在环境中长期存留

抗除草剂转基因油菜种子可以在土壤种子库中存在至少 10 年,而且其中 40% 的自生苗仍然具有抗除草剂活性^[30]。在美国和加拿大,长期种植抗除草剂油菜也导致公路、农场附近的自然生态系统中被发现大量生长抗除草剂的转基因油菜,而且抗除草剂的转基因小麦也在试验之后 11 年被发现大规模生长在另外一块野地里^[31-34]。

可见,在转基因作物进行了近 20 年的大规模应用之后,其产生的环境效益以及某些环境风险已经渐渐显现出来,并且还将随着转基因作物种植规模的扩大和种植时间的延长而发展和变化,对其实际环境影响进行系统而长期的跟踪调查和监测是十分必要的。

3 转基因植物环境监测技术指南

在国内外已经开展的转基因植物环境监测的基础上,一些国际组织和国家已经着手制定转基因植物环境监测技术指南。目前世界上主要有 2 个转基因植物环境监测方面的技术指南。为了促进缔约国按照《议定书》的要求实施转基因植物环境监测,UNEP 组织各缔约国共同制定了“关于改性活生物体风险评估的指导意见”^[35],其中包括“释放入环境的改性活生物体的监测”技术指南,已经成为缔约国开展转基因植物环境监测的技术依据;此外,欧洲食品安全局(EFSA)也发布并实施了“商业化生产后转基因植物环境监测(PMEM)指南”^[36]。虽然这 2 个转基因植物环境监测技术指南存在一些差异,但是在监测的目标和范围、目的、监测计划的制定等主要内容上是基本一致的。

3.1 监测的目标

首先,明确转基因生物在长时间大规模商业化应用之后的实际环境影响;其次,调查转基因生物是否产生了非预期的环境影响;第三,验证各种风险管理措施的有效性。

3.2 监测的类型

根据转基因植物环境风险的性质和特点,可将其环境监测分为 2 个类型,即个案监测(Case-specific monitoring, CSM)和通用监测(general surveillance, GS)。

3.2.1 个案监测

个案监测是指对风险评估过程中能够预知和确认的风险以及显著而重要的不确定性进行监测,主要包括转基因作物的基因漂移及其生态后果,转基因植物的环境入侵性,对非靶标生物的影响,外源基因及其表达的蛋白质在环境中的残留,靶标生物对抗虫、抗除草剂转基因植物产生抗性等,以明确风险评估过程中关于转基因生物环境风险的评价结果是不是正确的。只有当具备足够的科学假说证明某个环境风险可能存在,而且在风险评估阶段无法得到这些重要数据,必需通过环境监测才能得到这些数据,才需要有针对性地开展个案环境监测。因此,个案监测并不是强制性的,而只是用于验证风险评估过程中发现的某些可能不利影响或者显著而重要的不确定性风险。

3.2.2 通用监测

通用监测是指对风险评估过程中未预料到的环境影响进行监测,主要包括转基因植物产生的间接环境影响,或者随着时间的延长和规模的扩大而出现的延迟的和累积后发生的环境影响。通用监测一般不需要采用直接的实验方法来实现,可以使用并对现存的监测系统(如环境调查和监测系统、常规的农业调查系统、植物保护系统、品种/种子登记系统、土壤调查系统)进行必要的改造,结合生态监测和环境监测的有关方法,调查和记录所发生的任何在常规作物上没有发生过的不正常效应。根据 EFSA 发布实施的“商业化生产后转基因

植物环境监测指南”的要求,孟山都公司采用农民问卷调查表的方式来实施转基因玉米的通用监测,其主要内容是为了调查农民发现的转基因玉米可能对人体、动物健康和环境产生的非预期不利影响。通用监测需要解决 3 个问题:是否出现了非预期的影响;非预期的影响是否有害;由于开放的大田条件下很多因素可能影响到监测结果,应弄清有害的非预期影响是否与转基因作物的种植有关系。

3.3 监测计划

监测计划主要包括监测指标和参数的选择、监测的方法或基准、监测的频率和持续期、监测位置和区域等,是实施转基因植物环境监测时需要首先明确的内容。但是,由于不同的外源基因、植物种类以及环境会产生不同的环境风险,而且转基因植物环境监测工作目前尚处于起步阶段,因此,现有的转基因植物环境监测技术指南还只能对这些内容给出原则性的规定。例如,关于监测的持续时间,考虑到长期的环境释放更易于产生累积的环境效应(cumulative effects),为了检测出转基因植物的即刻影响(immediate effects)和延迟影响(delayed effects),监测的时间应该足够长。监测的持续时间取决于:风险评估过程中发现转基因植物潜在风险的大小;初步监测是否发现不利影响;转基因植物是多年生还是一年生,以及生存期(average lifetime)、世代时间(generation time)、种子库生存期(lifetime of seed banks)等。但是,如果连续 3 年没有监测到不利影响,则可以停止监测。如果监测到不利影响,就应一直监测到确认了不利影响,而且弄清楚该不利影响与转基因植物之间的关系,并制定出对策和控制措施来有效减缓该不利影响为止。

4 展望

风险评估和风险管理是解决包括转基因生物在内的所有新技术、新产品安全性的两个相辅相成、缺一不可的手段。新的药物和化学品在获准进行生产应用之前都必须经过严格的安全性测试,但是,这些安全性测试只能为新的药物和化学品提供最基本的安全信息,并不能证明其生产应用后的安全性,还需要在后续的生产应用过程进行安全性监测;一旦在后续的生产应用过程中发现了显著的不利影响,有些药物和化学品的生产应用证书会被撤销。在转基因生物发展和转基因生物安全问题上,一方面转基因技术还在快速发展,转基因生物的应用规模和范围越来越大;另一方面,虽然转基因生物在生产应用之前都按照转基因生物安全法规的规定开展了食用和环境安全性评价,而且有关政府主管部门和部分专家也力挺转基因生物的安全性,但是,人们对转基因生物安全性的争论和疑虑依然存在,这与转基因生物风险评估存在的固有局限性有很大关系,更与没有在生产应用过程中通过后续监测提供充分的安全信息有必然的联系。虽然国内外已经开展了一些转基因植物环境影响的监测并发现了转基因作物近 20 年的生产应用过程中产生的一些环境安全问题,但是,现有的监测是建立在某些科学家的兴趣基础上的自发行为,因而是零散的和不连续的,迫切需要在政府主管部门有意识地组织和计划下,开展系统而全面的长期环境监测,明确转基因植物生产应用后的实际环境影响,及时和尽早地检测到可能产生的不利影响,以便及时采取相应的安全管理措施,确保转基因产业的持续和健康发展。例如,欧盟已经立项资助了“转基因植物对农业生态系统影响的评估和监测”项目(AMIGA),组织了一批科学家在欧盟的 5 个地区开展转基因玉米和马铃薯的长期环境监测^[37]。

随着转基因植物应用规模的扩大和时间的延长,转基因植物及外源基因今后将不可避免地长期存在于农田生态系统,并通过基因漂移、种子扩散等途径进入自然生态系统,其在农田和自然生态系统中的长期进化以及通过与生态系统内生物因子和非生物因子的互作所产生的长期影响,也将逐渐成为转基因植物环境监测的重要内容。

参考文献(References):

- [1] James C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2013. ISAAA Brief No. 46. ISAAA: Ithaca, NY.
- [2] Zhang H N, Tian W, Zhao J, Jin L, Yang J, Liu C H, Yang Y H, Wu S W, Wu K M, Cui J J, Tabashnik B E, Wu Y D. Diverse genetic basis of field-evolved resistance to Bt cotton in cotton bollworm from China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(26): 10275-10280.

- [3] Text of the Cartagena Protocol on Biosafety. (2013-07-16) [2015-01-19]. <http://bch.cbd.int/protocol/text/>.
- [4] EC. 2001. Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council of 12 March 2001 on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms and repealing Council Directive 90/220/EEC. Official Journal L106, 1-39.
- [5] EC. 2003. Regulation (EC) No. 1829/2003 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2003 on genetically modified food and feed. Official Journal L268, 1-23.
- [6] Post-market environmental monitoring. [2015-01-19]. http://ec.europa.eu/food/plant/gmo/reports_studies/index_en.htm.
- [7] Zhang H N, Yin W, Zhao J, Jin L, Yang Y H, Wu S W, Tabashnik B E, Wu Y D. Early warning of cotton bollworm resistance associated with intensive planting of Bt cotton in China. PLoS ONE, 2011, 6(8): e22874.
- [8] Wan P, Huang Y X, Wu H H, Huang M S, Cong S B, Tabashnik B E, Wu K M. Increased frequency of pink bollworm resistance to Bt toxin Cry1Ac. PLoS ONE, 2012, 7(1): e29975.
- [9] Dhurua S, Gujar G T. Field-evolved resistance to Bt toxin Cry1Ac in the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae), from India. Pest Management Science, 2011, 67(8): 898-903.
- [10] Fabrick J A, Ponnuraj J, Singh A, Tanwar R K, Unnithan G C, Yelich A J, Li X C, Carrière Y, Tabashnik B E. Alternative splicing and highly variable cadherin transcripts associated with field-evolved resistance of pink bollworm to Bt cotton in India. PLoS ONE, 2014, 9(5): e97900.
- [11] Storer N P, Kubiszak M E, King J E, Thompson G D, Santos A C. Status of resistance to Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: lessons from Puerto Rico. Journal of Invertebrate Pathology, 2012, 110(3): 294-300.
- [12] Gassmann, A J, Petzold-Maxwell J L, Keweshan R S, Dunbar M W. Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm. PLoS ONE 2011, 6(7): e22629.
- [13] Gassmann A J. Field-evolved resistance to Bt maize by western corn rootworm: predictions from the laboratory and effects in the field. Journal of Invertebrate Pathology, 2012, 110(3): 287-293.
- [14] van Rensburg J B J. First report of field resistance by the stem borer, *Busseola fusca* (Fuller) to Bt-transgenic maize. South African Journal of Plant and Soil, 2007, 24(3): 147-151.
- [15] van den Berg J, Hilbeck A, Bøhn T. Pest resistance to Cry1Ab Bt maize: Field resistance, contributing factors and lessons from South Africa. Crop Protection, 2013, 54: 154-160.
- [16] Farias J R, Andow D A, Horikoshi R J, Sorgatto R J, Fresia P, dos Santos A C, Omoto C. Field-evolved resistance to Cry1F maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. Crop Protection, 2014, 64: 150-158.
- [17] Tabashnik B E, Brévault T, Carrière Y. Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres. Nature Biotechnology, 2013, 31(6): 510-521.
- [18] Dale P J, Clarke B, Fontes E M G. Potential for the environmental impact of transgenic crops. Nature Biotechnology, 2002, 20(6): 567-574.
- [19] Benbrook C M. Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U. S. - the first sixteen years. Environmental Sciences Europe, 2012, 24: 24-24.
- [20] Editorial. A growing problem. Nature, 2014, 510: 187-187.
- [21] Wu K M, Lu Y H, Feng H Q, Jiang Y Y, Zhao J Z. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. Science, 2008, 321(5896): 1676-1678.
- [22] 任璐, 杨益众, 李碯, 苗麟, 余月书, 秦启联. 转基因抗虫棉对棉铃虫及其内寄生蜂的双重效应. 昆虫学报, 2004, 47(1): 1-7.
- [23] Li X G, Liu B, Heia S, Liu D D, Han Z M, Zhou K X, Cui J J, Luo J Y, Zheng Y P. The effect of root exudates from two transgenic insect-resistant cotton lines on the growth of *Fusarium oxysporum*. Transgenic Research, 2009, 18(5): 757-767.
- [24] Lu Y H, Wu K M, Jiang Y Y, Xia B, Li P, Feng H Q, Wyckhuys K A, Guo Y Y. Mirid bug outbreaks in multiple crops correlated with wide-scale adoption of Bt cotton in China. Science, 2010, 328(5982): 1151-1154.
- [25] Losey J E, Rayor L S, Carter M E. Transgenic pollen harms monarch larvae. Nature, 1999, 399: 214-214.
- [26] Sears M K, Hellmich R L, Stanley-Horn D E, Oberhauser K S, Pleasants J M, Mattila H R, Siegfried B D and Dively G P. Impact of *Bt* corn pollen on monarch butterfly populations: a risk assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(21): 11937-11942.
- [27] Pleasants J M, Oberhauser K S. Milkweed loss in agricultural fields because of herbicide use: effect on the monarch butterfly population. Insect Conservation and Diversity, 2013, 6(2): 135-144.
- [28] Orson J. Gene stacking in herbicide tolerant oilseed rape: lessons from the North American experience. London: English Nature Research Reports, 2002, No. 443.
- [29] Pu D Q, Shi M, Wu Q, Gao M Q, Liu J F, Ren S P, Yang F, Tang P, Ye G Y, Shen Z C, He J H, Yang D, Bu W J, Zhang C T, Song Q S, Xu D, Strand M R, Chen X X. Flower-visiting insects and their potential impact on transgene flow in rice. Journal of Applied Ecology, 2014, 51

- (5): 1357-1365.
- [30] D'Hertefeldt T, Jørgensen R B, Pettersson L B. Long-term persistence of GM oilseed rape in the seedbank. *Biological Letter*, 2008, 4(3): 314-7.
- [31] Cerdeira A L, Duke S O. The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(5): 1633-58.
- [32] Knispel A L, McLachlan S M. Landscape-scale distribution and persistence of genetically modified oilseed rape (*Brassica napus*) in Manitoba, Canada. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2010, 17(1): 13-25.
- [33] Warwick S I, Légère A, Simard M J, James T. Do escaped transgenes persist in nature? The case of an herbicide resistance transgene in a weedy *Brassica rapa* population. *Molecular Ecology*, 2008, 17(5): 1387-1395.
- [34] Schafer M G, Ross A A, Londo J P, Burdick C A, Lee E H, Travers S E, Van de Water P K, Sagers C L. The establishment of genetically engineered canola populations in the U.S. *PLoS ONE*, 2011, 6(10): e25736.
- [35] PART III: Monitoring of living modified organisms released into the environment // Guidance on risk assessment of living modified organisms. (2012-07-30) [2015-01-19] http://bch.cbd.int/onlineconferences/guidance_ra.shtml.
- [36] EFSA GMO Panel (EFSA Panel on Genetically Modified Organisms). Scientific Opinion on the annual post-market environmental monitoring (PMEM) report from Monsanto Europe S.A. on the cultivation of genetically modified maize MON 810 in 2012. *EFSA Journal*, 2014, 12(6): 3704, 29 pp. doi:10.2903/j.efsa.2014.3704
- [37] Arpaia S, Messéan A, Birch N A, Hokannen H, Härtel S, van Loon J, Lovei G, Park J, Spreafico H, Squire G R, Steffan-Dewenter I, Tebbe C, van der Voet H. Assessing and monitoring impacts of genetically modified plants on agro-ecosystems: the approach of AMIGA project. *Entomologia*, 2014, 2(1): 79-86.