DOI:10.13802/j.cnki.zwbhxb.2003.01.018

第30卷 第1期 植 物 保 护 学 报 Vol.30 No.1
2003年 3 月 ACTA PHYTOPHYLACICA SINICA March 2003

转Bt基因抗虫玉米在害虫综合治理中的作用及生态风险

王冬妍[1,2] 王振营[1*] 何康来[1] 丛 斌[2]

(1. 中国农业科学院植物保护研究所生物安全研究中心,北京 100094;
2. 沈阳农业大学植物保护学院,沈阳 110161)

摘要 转Bt基因抗虫玉米(简称Bt玉米)作为玉米害虫综合治理的基本措施,自1996年在美国被批准商业化种植以来,已在许多国家广泛应用于农业生产,它的抗虫性和经济效益已得到普遍肯定,与此同时,Bt玉米对生态安全的影响也倍受关注。文章综述了Bt玉米在国内外的研究和应用现状、Bt玉米在害虫综合治理中的作用以及种植Bt玉米的生态风险及对策,包括对非目标昆虫及天敌昆虫的影响、害虫产生抗药性以及治理对策,为今后Bt玉米在我国商业化种植过程中正确评价Bt玉米的生态安全性、充分发挥Bt玉米在害虫综合治理中的重要作用奠定基础。

关键词 Bt玉米, 害虫综合治理, 生态风险, 对策

玉米是重要的粮食作物之一,在世界农业生产中具有举足轻重的地位。病虫危害是严重影响玉米产量和品质的重要因素,其中欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* (Hbn.)和亚洲玉米螟 *O. furnacalis*(Guenée)是危害玉米的最重要害虫。前者分布于欧洲、北非和西亚,20世纪初传入北美[1],后者分布于东亚、东南亚及太平洋诸岛。据统计,仅美国每年因欧洲玉米螟造成的产量损失及投入的防治费用达10~25亿美元[1];我国每年因亚洲玉米螟危害,玉米减产10%左右,大发生年产量损失达30%以上,甚至绝收[2]。现代分子生物学技术的高速发展,特别是转基因抗病、虫植物的诞生,为控制植物病虫害提供了新途径。自1990年转Bt基因抗虫玉米(以下简称Bt玉米)问世、1995年美国环保局(EPA)批准登记以来,由于Bt玉米对欧洲玉米螟的防治效果好、增产增收、对人畜安全、可减少化学农药用量和有利于保护环境等优点,已在美国等国家大面积推广应用。美国Bt玉米栽培面积由1997年的280万 hm^2 上升到1999年的970万 hm^2,约占北美玉米种植面积的30%。我国Bt玉米研究虽然起步较晚,在国家"863"等计划支持下,已进入环境释放阶段。作者就国内外Bt玉米的研究及应用现状、在IPM中的作用及生态风险评估研究作一综述。

基金项目:国家转基因产业化专项(J00-C-002-04)及国家重点基础发展规划(001CB109004)资助
作者简介:王冬妍(1977-),女,在读硕士,主要从事转Bt基因抗虫玉米的抗虫效果评价研究
*通讯作者(E-mail:wangzy@95777.com);收稿日期:2002-4-25

1 Bt玉米的研究及应用现状

苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis*,简称Bt,是一种能产生杀虫晶体蛋白(也被称为δ-内毒素或Bt毒蛋白)的革兰氏阳性细菌。它对敏感害虫毒力高,对人畜、捕食性天敌安全,不污染环境。自20世纪初被发现以来,已分离出52个亚种,4万多个Bt菌株,完成了100多个杀虫晶体蛋白基因的测序[3]。目前,国内外已成功地运用多种转化方法,获得了Bt玉米[4~6]。

自1996年Bt玉米在美国商品化种植以来,已有多个国家批准大田种植。到2000年,世界范围Bt玉米种植面积达1450万 hm^2。Bt玉米已注册的转育系并已批准商品化种植的国家见表1[7]。此外,安万特(Aventis)公司的转 *Cry9C* 基因注册为StarLink的Bt玉米,仅被批准用于动物饲料和乙醇加工,由于发生了混入普通食用玉米中的事件,它的登记已自动取消。迪卡(DEKALB)公司表达 *Cry1Ac* 基因的DBT418的登记也于2001年2月自动取消。另外,表达 *Cry1F* 基因的TC1507可控制欧洲玉米螟、西南玉米螟 *Diatraea graridiosella*、秋粘虫 *Spodoptera frugiperda* 及小地老虎 *Agrotis ypsilon*,已于2001年登记注册为Herculex Ⅰ[8]。孟山都公司正在申请注册的表达 *Cry3Bb* 基因抗玉米切根虫的MON863 Bt玉米,期望在2003年投入使用[9],表达 *Cry2Ab* 基因的Bt玉米正处于试验阶段[8]。

表1 国外目前注册生产的Bt玉米情况[7]

Table 1 Bt corn currently registered, by country and date, for production[7]

注册商标/公司 Trademark/company	转育系 Transformed line	国家 Country	批准日期 Approval date
保丰/孟山都	MON 810	阿根廷 Argentina	1998
Yieldgard/Monsanto	MON 810	保加利亚 Bulgaria	2000
	MON 810	加拿大 Canada	1997
	MON 810	欧盟* European Union	1998
	MON 810	南非 South Africa	1999
	MON 810	美国 U.S.A	1996
保丰/先正达	Bt 11	加拿大 Canada	1996
NK Brand Bt corn with YieldGard/Syngenta	Bt 11	美国 U.S.A	1996
Knockout corn/Syngenta	Event 176	阿根廷 Argentina	1998
	Event 176	加拿大 Canada	1996
	Event 176	欧盟* European Union	2001
	Event 176	美国** U.S.A	1995

注:*欧盟中少数国家如卢森堡、奥地利和意大利没有执行欧盟的决定,并颁布法令禁止进口某些甚至所有转基因玉米[7]。**由于Event176控制二代欧洲玉米螟和西南玉米螟危害效果差,得克萨斯州等4个州的63个县从2000年1月不再出售此种Bt玉米。先正达和Mycogen种子公司分别于2001年4月和6月解除登记,剩余产品使用截止到2003年[8]。*Within the European Union(EU), some individual countries, such as Luxemburg, Austria and Italy, in defiance of EU approvals, have enacted bans against special transgenic crops[7]. **May not provide complete protection against second generation European and Southwestern corn borer, No sales of Event 176 should take place after the close of business January 5, 2000 in about 63 counties for the four listed state: Texas, Colorado Oklahoma and Kansas. Syngenta Seeds and Mycogen Seeds c/o Dow AgroSciences LLC Event 176 *Cry1Ab* corn registrations expired on April 1, 2001 and on June 30, 2001, respectively. Existing stocks for these products must be used before or during the 2003 growing season[8].

我国自行研制的 Bt 玉米于 1997 ~ 2000 年,先后在河北、山东和北京进行中间试验,在河南、山东、黑龙江、吉林、辽宁等省进行环境释放试验。

2 Bt 玉米在 IPM 中的作用

2.1 Bt 玉米对靶标害虫的控制作用

目前用作防治欧洲玉米螟的 Bt 玉米主要表达 *Cry1Ab* 杀虫蛋白,少数表达 *Cry1Ac* 和 *Cry9C*。表达 *Cry1Ab* 杀虫蛋白基因的 Bt 玉米分别对食叶和蛀茎的一、二代欧洲玉米螟都有较高水平的抗性[4,10]。表达 *Cry9C* 杀虫蛋白的 Bt 玉米可有效控制两代欧洲玉米螟危害,1 ~ 2 龄幼虫取食 Bt 玉米 4 天内死亡率达 100%,即使在大量人工接种条件下,茎杆蛀孔隧道长仅为 0.09 ~ 0.14cm,而非 Bt 玉米长达 23 ~ 30cm[11]。在自然侵染和人工接种 4 次的条件下,Bt 玉米的产量不受玉米螟的影响,比非 Bt 玉米增产 10% 以上[12],Bt 甜玉米雌穗对欧洲玉米螟的控制效果在 99% 以上[13]。

启动子及 Bt 基因插入位点的不同,植株体内 Bt 杀虫蛋白的表达存在时空差异,对害虫的控制作用也表现时空变化。如表达 *Cry1Ab* 杀虫蛋白的 Bt 11、MON 810 和 Event 176 对心叶期欧洲玉米螟的防效平均高达 96%,对穗期螟害的防效前两者达 96%,而 Event 176 仅为 75%,原因是 Event 176 只在植株的绿色组织和花粉中表达 Bt 杀虫蛋白,部分取食花丝和籽粒存活的幼虫仍能蛀茎,而 Bt 11 和 MON 810 的各组织等都表达 Bt 杀虫蛋白[14,15]。对 4 ~ 5 龄欧洲玉米幼虫的控制作用也因 Bt 基因类型和启动子不同差异显著[16]。此外,播期和干旱等因素制约 Bt 玉米对玉米螟的控制作用[17]。

初步试验表明,MON 810 Bt 玉米同样对亚洲玉米螟有很好的抗虫性[18]。目前国产 Bt 玉米正处于商品化种植前的环境释放阶段,主要针对心叶期 Bt 玉米对亚洲玉米螟的抗性评价。室内抗虫性鉴定结果表明,亚洲玉米螟幼虫取食 Bt 玉米叶片后的校正死亡率为 68.01%,取食混有转 Bt 毒蛋白基因玉米叶片汁液的人工饲料后幼虫虫体明显变小,体重只有对照的 6% ~ 9%,对亚洲玉米螟抗性较好的 Bt 玉米品种正在选育中。

2.2 Bt 玉米对其它害虫的控制效果

MON 810 和 Bt 11 可以较好地控制一、二代西南玉米螟,Event 176 则不能控制二代西南玉米螟的危害[19];Bt 11 对玉米穗虫的防效达 85% ~ 88%[13]。实验室和田间测定 8 种表达 *Cry1Ab* 基因的甜玉米对玉米穗虫和秋粘虫的影响,发现所有取食 Bt 甜玉米叶片、花丝和籽粒的初孵或 3 日龄玉米穗虫幼虫都不能存活,6 日龄幼虫少量存活且停止取食;Bt 玉米叶片和花丝对秋粘虫有中度抗性,主要表现在延缓其生长发育和减轻虫重[20~22]。不同 Bt 玉米对玉米干夜蛾 *Busseola fusca* (Fuller)和玉米禾螟 *Chilo partellus* (Swinboe)的控制效果不同,以 MON 810 效果较好[23]。目前应用的 Bt 玉米对蚜虫、玉米叶螨、地老虎、以及地下害虫玉米切根叶甲、金针虫、蛴螬、瓜种蝇和玉米小蝼甲等害虫无效。防治玉米切根虫以杀虫剂为主,美国每年投入的防治费用以及该虫危害造成的产量损失高达 10 亿美元[24],目前用于防治切根虫的表达 *Cry3Bb* 基因的 Bt 玉米正处于试验阶段[8]。Bt 玉米籽粒对鳞翅目的储粮害虫也有一定的控制作用,如 Bt 11 和 MON 810 玉米籽粒可使印度谷螟 *Plodia interpunctella* Hübner 和麦蛾 *Sitotroga cerealella* (Oliv.) 的生殖力下降[25]。对储粮

害虫的控制效果也受启动子或 Bt 基因的影响,用 CaMV/35S 启动子的 Bt 玉米饲喂印度谷螟后,其发育延迟,存活率下降,而用 PEPC 启动子的 Bt 玉米饲喂印度谷螟则与非 Bt 玉米相似[26]。

2.3 Bt 玉米对一些病害发生的影响

一些鳞翅目害虫的取食危害,可以加重玉米穗粒腐病和茎腐病的发生。以欧洲玉米螟为主的害虫在病害发生过程中起到三点作用:(1)作为病原菌的携带者将镰刀菌孢子从一株植物的受害籽粒表面带到另一株植物表面或带入茎杆中。(2)幼虫危害玉米茎杆或籽粒为真菌侵染提供了伤口通道,(3)迫使植株更易受侵染而发病[27]。尤其是由 *Fusarium verticillioides* 等镰刀菌引起的穗腐病以及由 *Aspergillus flavus* 引起的曲霉属粒腐病,增加了玉米籽粒中的霉菌毒素的聚集,包括黄曲霉素(aflatoxin)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol)、玉米赤霉烯醇(zearalenone)、麦角甾醇(ergosterol)及伏马菌素(fuminisin)等。霉菌毒素导致人畜中毒,有些还是人类的致癌因素[28,29]。试验表明,欧洲玉米螟中等偏重发生时,Bt 玉米穗腐病的发病率明显比非 Bt 玉米轻,且受 Bt 基因的影响,如 MON 810、BT11 和 CBH351 杂交种穗腐病发病率明显低于非 Bt 玉米,籽粒中伏马菌素的聚集比非 Bt 玉米减少 10%;但 DBT418 和 Event 176 杂交种穗腐病发病率和籽粒中伏马菌素的聚集与非 Bt 玉米相似。Bt 玉米对害虫的控制作用间接地减轻了穗腐病及茎腐病的发生,减少了霉菌毒素在玉米籽粒中的聚集[28,30],减轻了穗腐病和茎腐病产生的毒素对玉米籽粒的污染[31]。当然这些病害的防治还应结合其它措施,因为当病害发生条件十分适宜时,Bt 玉米对茎腐病和穗腐病的控制效果较差。

3 应用 Bt 玉米的生态风险及对策

3.1 Bt 玉米对非目标昆虫及有益昆虫的影响

3.1.1 Bt 玉米对非目标昆虫种群数量的影响:用涂有 Bt 玉米花粉的马利筋草 *Asclepias curassavica* 饲喂帝王斑蝶 *Danaus plexippus* 幼虫后,其取食量减少,生长缓慢,4 天后死亡率达 44%,而饲喂无 Bt 玉米花粉叶片的幼虫无一死亡,由此推测斑蝶幼虫的死亡是由 Bt 花粉中杀虫蛋白引起的[32]。"斑蝶事件"引起了人们对 Bt 玉米生态安全性的广泛关注,美国科学家对此进行了深入细致的研究。将 Event 176、Bt 11 和 MON 810 玉米花粉分别涂在马利筋叶片上饲喂斑蝶幼虫,发现幼虫取食涂有 Event 176 花粉的叶片,虫重明显比取食 Bt 11 和 MON 810 花粉的轻。从 Event 176 玉米田中取回的马利筋草叶片,较从田外取回的马利筋草叶片饲喂的幼虫存活率和虫重明显降低,而 Bt 11 和 Mon810 花粉对帝王斑蝶幼虫的存活没有影响[33]。但试验中发现,人工处理花粉过程中造成对花粉的污染,会显著影响幼虫的存活和虫重[34]。近年来,在 Bt 玉米大面积种植的条件下,帝王斑蝶的种群数量在逐年减少,并不能说明二者有直接的关系。目前,大部分 Bt 玉米花粉对斑蝶还不会构成威胁[35]。威胁帝王斑蝶生存的因素是栖息地的减少、除草剂和广谱杀虫剂的使用、天敌的捕食及自然灾害等[36,37]。另外, Event 176 Bt 玉米花粉可使香芹黑凤蝶 *Papilio polyxenes* 幼虫的生长减慢,但 Mon810 玉米花粉无此影响[38,39]。上述研究发现,除 Event 176花粉可能会对非目标鳞翅目昆虫(如帝王斑蝶、香芹黑凤蝶)产生不利影响外,其他类

型 Bt 玉米花粉不会产生负面影响。目前 Event 176 在美国的种植面积不足 2%,且已取消了注册登记[37]。由于上述研究都是在短期内进行的,还需要对 Bt 玉米花粉的影响作长期的研究,进一步合理选择利用生态安全的 Bt 玉米品种。

3.1.2 *Bt 玉米对有益昆虫的影响*:大量研究尚未发现 Bt 玉米对有益昆虫包括蜜蜂、瓢虫、草蛉、蜘蛛、猎蝽和寄生蜂等有不良影响。用取食 Bt 玉米的粟缢管蚜饲喂草蛉,对草蛉的生长发育及死亡率没有影响[40]。*Coleomegilla maculata*、*Orius insidiosus* 和普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 三种捕食性天敌取食 Bt 玉米和非 Bt 玉米花粉后,对其发育及存活率没有不利影响[41]。表达 *Cry1Ab* 基因的甜玉米田瓢虫、草蛉及花蝽的种群数量与非 Bt 玉米田中没有明显不同[42]。分别用取食 Bt 玉米与非 Bt 玉米的欧洲玉米螟饲喂普通草蛉幼虫,草蛉的死亡率在两者间没有差异,但前者的成熟时间延长,可能是 Bt 与病态猎物引起的营养不足共同作用的结果[43]。Bt 和非 Bt 玉米田中步甲科昆虫的丰富度与玉米类型没有明显相关[44],益虫种群数量也没有明显区别[45]。尽管多数报道认为,Bt 玉米对有益昆虫无害,但已有实验证明 Bt 制剂对某些天敌昆虫具有亚致死作用毒性[46]。长期大规模种植转 Bt 基因抗虫作物,是否会影响天敌昆虫的种类及种群数量,尚需深入研究。

3.2 害虫对 Bt 玉米产生抗性风险

3.2.1 *害虫对 Bt 玉米产生抗性的可能性*:影响欧洲玉米螟对 Bt 玉米抗性发展的因素很多,包括 Bt 玉米种植面积、玉米螟在生长季节的死亡率及每年世代数等。实验室汰选结果表明,欧洲玉米螟能够对 Bt 杀虫剂或杀虫蛋白产生中等程度的抗性,而且是在相对小的实验种群用 Bt 杀虫蛋白处理 7 ~ 9 代后产生的。经过 13 代汰选后的玉米螟群体接种到表达 *Cry1Ab* 的 Bt 玉米上后都不能存活[47]。我国 11 个不同地理种群的亚洲玉米螟初孵幼虫对 *Cry1Ab* 杀虫蛋白都非常敏感,但不同地理种群的 LC_{50}间有一定差异[18]。说明玉米螟存在对 Bt 杀虫蛋白产生抗性的潜力。由于目前的 Bt 玉米只含一种 Bt 基因,且在整个生育期植株体内表达杀虫蛋白,这种时空上的连续表达对害虫构成的选择压力比使用 Bt 制剂更大,更易诱导害虫的抗性产生。通过欧洲玉米螟对 Bt 玉米适应性动力学模型分析认为,若 Bt 杀虫蛋白表达量低,部分敏感的纯合和杂合体玉米螟幼虫将在 Bt 玉米上存活下来,然而,若在理想的高剂量下玉米螟的抗性将提高 10% ~ 0%[48]。研究同时表明,Bt 玉米根部释放出的 *Cry1Ab* 杀虫蛋白可被土壤吸附,避免微生物的降解,保持较长时间的活性。Bt 玉米花粉和植株残体的累积,也可使 Bt 杀虫蛋白残留在根周围的土壤中[49]。Bt 杀虫蛋白的长期积累,有可能助长害虫抗性的产生。但 Bt 玉米根部释放出的杀虫蛋白等对蚯蚓、线虫、原生动物、细菌和真菌无毒性[50]。

3.2.2 *抗性机理*:昆虫对 Bt 产生抗性同杀虫蛋白与中肠刷状缘膜小泡 (brush border membrane vesicles, BBMV) 的结合有关[51,52]。欧洲玉米螟的 BBMV 中存在两种不同杀虫蛋白的受体,即氨肽酶 N(Aminopeptidase N, APN)和钙粘着蛋白 Cadherin[53,54]。*Cry1Ab* 和 *Cry1Ac* 结合到欧洲玉米螟中肠上皮细胞的相同受体上,但亲和能力不同[55]。*Cry1Ac* 竞争 *Cry1Ab* 的受体结合位点,但 *Cry9C* 不识别 *Cry1Ab* 的结合位点[56]。含有与杀虫蛋白结合的特异性受体、杀虫蛋白与受体间的结合能力、特异性结合位点的数目及改变都与抗性产生有关。但同时也发现,结合位点数目和亲和性并不能完全解释形成抗性的原因,也许还存

在其它参与抗性形成的因子[57]。*Cry1F* 不与 *Cry1Ab* 的结合位点高度亲和[54]，而 *Cry1F* 却高抗欧洲玉米螟[58]，可能 *Cry1F* 对 *Cry1Ab* 结合位点的识别与 *Cry1F* 的毒性无关。玉米螟对不同 Bt 杀虫蛋白形成抗性的分子机理的深入研究，有助于进一步筛选和利用最有效的 Bt 杀虫蛋白，培育抗虫性最佳的 Bt 玉米。同时可根据抗性产生的机理混合或循环种植识别 BBMV 不同位点的不同 Bt 杀虫蛋白的品系，延缓害虫抗性的发展[59]。

3.3 Bt 玉米的杂草化及基因漂流

若植物在获得新的基因后增加了生存竞争性，在生长势、越冬性、种子产量和生活力等方面都比非转基因植物强，则可能会演变为农田杂草。对转基因油菜、玉米、甜菜、马铃薯进行 10 年的研究，没有发现这些转基因作物具有较强的入侵性或生长时间更长。尽管不能说明所有的转基因植物都是安全的，但至少上述四种转基因植物不会发生杂草化[60]。自然生态条件下，有些栽培植物会和周围的近缘野生种天然杂交，将栽培植物中的基因转入近缘野生种中。若在这些地区种植转基因植物，有可能发生转入基因漂流到野生近缘种中。Bt 玉米花粉的大量传播，很有可能使 Bt 基因转移到玉米的近缘野生种——玉米草上。我国没有这种玉米草，种植 Bt 玉米一般不会发生基因漂流。

3.4 抗性预防及对策

3.4.1 *"高剂量+庇护所"策略*：目前被认为是抗性治理策略中最切实可行的方法。"高剂量"，就是要保证 Bt 玉米中杀虫蛋白高水平表达，远高于防治玉米螟所用 Bt 杀虫剂的用量，并在整个生育期植株体内各组织达到最适量表达，目的是杀死所有没有抗性基因和有一个抗性基因的玉米螟幼虫，延缓或减少抗性个体的产生。但"高剂量"策略同时也存在风险，如欧洲玉米螟 5 龄幼虫对 Bt 制剂的 LC_{50}和 LC_{90}分别是 1 龄幼虫的 98.1 和 168.2 倍，由于玉米螟幼虫在危害 Bt 玉米之前有机会在非 Bt 玉米或其它寄主上生长发育，这就给"高剂量"策略提出了新的问题[61]。"庇护所"，就是在 Bt 玉米田周围种植非 Bt 寄主作物或杂草，以提供害虫的敏感个体，与来自 Bt 玉米的抗性个体进行交配，使其后代成为杂合体，以延缓抗性的产生和发展。"庇护所"内不能用 Bt 制剂，只有玉米螟大暴发时，才可使用杀虫剂防治，以使经济损失降至最低，同时仍可提供足够的敏感玉米螟。自然条件下，Bt 玉米花粉对临近的非 Bt 玉米田的欧洲玉米螟幼虫作用极小甚至没有，飘散到临近的非 Bt 玉米植株上的 Bt 花粉不会增加抗性治理的风险[62]。因此，Bt 玉米"庇护所"的设置主要受到玉米螟寄主植物分布和成虫扩散能力的影响。美国对构建"庇护所"的经济预算表明，20%的非 Bt 玉米"庇护所"是最经济的方法[63]。"高剂量+庇护所"策略能否有效避免或延缓害虫抗性的产生，需要看昆虫的抗性是隐性遗传还是部分隐性遗传。然而有报道称在实验室中发现欧洲玉米螟对 Bt 杀虫蛋白的抗性为不完全显性遗传[64]。若昆虫在田间的抗性与实验室中保持一致，"高剂量+庇护所"策略将受到严重挑战。同时，还应保证存活下来的抗性种群与"庇护所"内的敏感种群的发育速度保持一致，同期羽化，并保证能够随机交配，否则，降低了"庇护所"的作用[65]。另外，由于 Bt 玉米田中害虫数量的下降，导致天敌减少，引起"庇护所"内天敌数量上升，减少敏感虫数量，也会降低"庇护所"的实际作用。因此，"庇护所"对于延缓害虫抗性的产生及发展究竟起到多大作用，有待进一步研究。

3.4.2 *多基因策略*:针对目前 Bt 玉米杂交种主要表达一种 Bt 基因,且一特定的杀虫蛋白只对某一种或几种害虫具有毒杀作用,抗虫谱窄,害虫易产生抗性。利用现代基因工程技术将两种或两种以上的 Bt 基因或不同杀虫机理的其它基因与 Bt 基因混合转入玉米中,增加外源基因的种类。既可以提高杀虫活性,又可延缓害虫抗性的产生和发展。但必须保证混合基因与 Bt 基因之间不发生交互抗性。如将 *Cry1Ab* 和 *Cry1C* 基因同时转入烟草和马铃薯植株,扩大了抗虫谱,也起到了治理害虫抗性的效果[66]。人工汰选条件下,转双基因(Bt + CPTI)抗虫烟草可显著延缓棉铃虫的抗性形成[67]。

3.4.3 *特异性、诱导型启动表达*:杀虫蛋白在植物中的组成型表达会对昆虫群体产生较高选择压,促使昆虫产生抗性。采用诱导型或组织特异性表达的启动子与 Bt 杀虫蛋白基因构成嵌合基因,可获得特异性表达的抗虫品种。使 Bt 基因只在害虫侵害时或者只在植物易受侵害的部位或者只在一定条件下高效表达,可以保持高剂量,同时降低选择压。既能有效防治害虫,又能延缓害虫抗性的产生。

3.4.4 *监测田间靶标种群对 Bt 玉米的抗性动态*:由于少数 Bt 玉米种子中杀虫蛋白含量很少或根本没有,因此对 Bt 玉米的杀虫效果及田间种群的抗性变化进行监测,提高预测预报技术是必不可少的,通过监测,可以正确评估 Bt 玉米的杀虫效果及害虫的抗性水平,以便及时预测害虫抗性的产生及发展。

3.4.5 *实施害虫综合治理(IPM)策略*:由于 Bt 玉米主要控制玉米螟等少数害虫的危害,对大部分害虫的控制效果不明显或是不具有抗性。因此,应当以 Bt 玉米为主,结合其他防治措施,根据 IPM 理论进行害虫的综合治理。从而更好地发挥 Bt 玉米的杀虫效果,有效控制害虫,保持自然生态平衡。

3.4.6 *加强立法,建立转基因作物安全评价技术体系*:目前还没有完整的 Bt 玉米安全性评价技术体系,但我国政府 2001 年颁布了《农业转基因生物安全管理条例》,农业部根据该条例,2002 年 1 月发布了《农业转基因生物安全评价管理办法》,要求转基因植物种子的生产者具有相当的安全管理和防范措施。随着对转基因作物研究的深入,转 Bt 基因作物生态安全性评价标准体系将会出台和完善。

参 考 文 献

1 Bergman P W, *et al*. Pesticide assessment of field corn and soybeans: corn belt states. Nat. Agric. Pesticide Imp. Assess. Prog., USDA-ARS-ERS Staff Rep. No. AGES850524A

2 中国农作物病虫害编委会. 玉米螟. 中国农作物病虫害(第二版). 北京:中国农业出版社,1995,562 - 574

3 Frutos R, *et al*. Managing resistance to plants producing *Bacillus thuringiensis* toxins. Crit. Rev. Biotechnol.,1999,19:227 - 276

4 Koziel M G, *et al*. Field performance of elite transgenic maize plants expressing an insecticidal protein derived from *Bacillus thuringiensis*. Bio/Technology, 1993,11:194 - 200

5 丁群星,等. 用子房注射法将 Bt 毒蛋白基因导入玉米的研究. 中国科学(B 辑),1993,23:707 - 713

6 王国英,等. 用基因枪将 Bt 毒蛋白基因转入玉米及转基因植株再生. 中国科学(B 辑),1995,25:71 - 76

7 Shelton A M, Zhao J Z and Roush R T. Economic, ecological, food safety, and social consequences of the deployment of Bt transgenic plant. Ann. Rev. Entomol.,2002,47:845 - 881

8 Current status of Bt corn hybrids. 2001. http://www.oznet.ksu.edu/SWAreaOffice/Bt-Folder/Bt Crorns.html

9 Update monsanto sees Yieldgard rootworm corn available in 2003. http:// www.agweb.com/

10 Armstrong C L, *et al*. Field evaluation of European corn borer control in progeny of 173 transgenic corn events expressing an insecticidal protein from *Bacillus thuringiensis*. Crop Sci., 1995, 35: 550 - 557

11 Jansens S, *et al*. Transgenic corn expressing a *Cry9C* insecticidal protein from *Bacillus thuringiensis* protected from European corn borer damage. Crop Sci., 1997, 37: 1616 - 1624

12 Lauer J and Wedberg J. Grain yield of initial Bt corn hybrid introductions to farmers in the northern corn belt. J. Prod. Agr., 1999, 12: 373 - 376

13 Burkness E C, *et al*. Field efficacy of sweet corn hybrids expressing a *Bacillus thuringiensis* toxin for management of *Ostrinia nubilalis* and *Helicoverpa zea*. J. Econ. Entomol., 2001, 94: 197 - 203

14 Ostlite K R, *et al*. Bt corn and European corn borer, long term success through resistance management. North Cent. Reg. Ext. Publ. 602. St. Paul: Univ. Minn. Ext. Serv., 1997

15 Archer T L, *et al*. Ear and shank damage by corn borers corn earworms to four events of *Bacillus thuringiensis* transgenic maize. Crop Protection, 2001, 20: 139 - 144

16 Walker K A, *et al*. Late-instar Europan corn borer (Lepidoptera: Crambidae) tunneling and survival in transgenic corn hybrids. J. Econ. Entomol., 2000, 93: 1276 - 1285

17 Pilcher C D and Rice M E. Effect of planting dates and *Bacillus thuringiensis* corn on the population dynamics of European corn borer (Lepidoptera: Crambidae). J. Econ. Entomol., 2001, 94: 730 - 742

18 何康来,王振营,文丽萍. Bt玉米在玉米害虫持续控制中的作用、风险问题及对策. 面向21世纪的植物保护发展战略. 北京:中国科学技术出版社, 2001, 344 - 349

19 Archer T L, *et al*. Whorl and stalk damage by European and Southwestern corn borers to four events of *Bacillus thuringiensis* transgenic maize. Crop Protection, 2000, 19: 181 - 190

20 Lynch R E, *et al*. Evaluation of transgenic sweet corn hybrids expressing *CryIA(b)* toxin for resistance to corn earworm and fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). J. Econ. Entomol., 1999, 92: 246 - 252

21 Williams W P, *et al*. Enhancing inherent fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) resistance of corn with *Bacillus thuringiensis* genes. Florid Entomologist, 1999, 82: 271 - 276

22 Williams W P, *et al*. Evaluation of transgenic corn for resistance to corn earworm, fall armyworm, and southwestern corn borer in a laboratory bioassay. J. Agric. Entomol., 1998, 15: 105 - 112

23 Van Rensburg J B J. Evaluation of Bt-transgenic maize for resistance to the stem borers *Busseola fusca* (Fuller) and *Chilo partellus* (Swinhoe) in south Africa. S. Afr. J. Plant Soil, 1999, 16: 38 - 43

24 Metcalf R L, *et al*. Destructive and useful insects: their habits and control. New York: McGraw-Hill. 5 th ed, 1993

25 Sedlacek J O, *et al*. Life history attributes of Indian meal moth (Lepidoptera: Pyralidae) and Angoumois grain moth (Lepidoptera: Gelechiidae) reared on transgenic corn kernels. J. Econ. Entomol., 2001, 94: 586 - 592

26 Giles K L, *et al*. Effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* maize grain on *B. thuringiensis* susceptible *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyrabidae). J. Econ. Entomol, 2000, 93: 1011 - 1016

27 Munkvold G P. Disease control in Bt corn? Integrated crop management IC-480 1: 1-2. Iowa State University Extension, Ames., 1998

28 Munkvold G P, *et al*. Reduced fusarium ear rot and symptomless infection in kernels of maize genetically engineered for European corn borer resistance. Phytopathology, 1997, 87: 1071 - 1077

29 Thiel P G, *et al*. The implications of naturally occurring levels of fumonisins in corn for human and animal health. Mycopathologia, 1992, 117: 3 - 9

30 Munkvold G P, *et al*. Comparison of fumonisin concentrations in kernels of transgenic Bt maize hybrids and nontransgenic hybrids. Plant Disease, 1999, 83: 130 - 138

31 Valenta H, *et al*. Comparative studies on concentration of the fusarium mycotoxins deoxynivalenol and zearalenone in kernels of transgenic Bt maize hybrids and non transgenic hybrids. Proc. Nutr. Soc. Physiol., 2001, 10, 164

32 Losey J E, Rayor L S and Carter M E. Transgenic pollen harms monarch larvae. Nature, 1999, 399:214

33 Stanley-Horn D E, *et al*. Assessing the impact of *Cry1Ab*-expressing corn pollen on monarch butterfly larvae in field studies. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2001, 98:11931 - 11936

34 Hellmich R L, *et al*. Monarch larvae sensitivity to *Bacillus thuringiensis*-purified proteins and pollen. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2001, 98:11925 - 11930

35 Monsanto butterflies and Bt corn pollen: Lab research & field realities. 2000, http://www. biotechknowledge. monsanto. com

36 Oberhauser K S, *et al*. Temporal and spatial overlap between monarch larvae and corn pollen. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2001, 98:11913 - 11918

37 Sears M K, *et al*. Impact of Bt corn pollen on monarch butterfly populations: A risk assessment. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2001, 98:11937 - 11942

38 Zangerl A R, *et al*. Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and black swallowtail caterpillars under field conditions. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2001, 98:11908 - 11912

39 Wraight C L, *et al*. Absence toxicity of *Bacillus thuringiensis* pollen to black swallowtails under field conditions. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2000, 97:7700 - 7703

40 Lozzia G C, *et al*. Effects of Bt corn on *Rhopalosiphum padi* L. (Rhynchota: Aphididae) and on its predator *Chrysoperla carnea stephen* (Neuroptera: Chrysopidae). Boll. Zool. Agr., 1998, 30:153 - 164

41 Pilcher C D, *et al*. Preimaginal development, survival and field abundance of insect predators on transgenic *Bacillus thuringiensis* corn. Environ. Entomol., 1997, 26:446 - 454

42 Wold S J, *et al*. In-field monitoring of beneficial insect populations in transgenic corn expressing a *Bacillus thuringiensis* toxin. J. Entomol. Sci., 2001, 36:177 - 187

43 Hilbeck A, *et al*. Effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn-fed prey on mortality and development time of immature *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). Environ. Entomol., 1998, 27:480 - 487

44 Lozzia G C. Biodiversity and structure of ground beetle assemblages (Coleoptera: Carabidae) in Bt corn and its effects on non target insects. Bollettino-di-zoologia-Agraria-e-di-Bachicoltura, 1999, 31:37 - 50

45 Barry B D, *et al*. Performance of transgenic corn hybrids in Missouri for insect control and yield. J. Econ. Entomol., 2000, 93:993 - 999

46 Giroux S, *et al*. Bacteriological insecticide M-One effects on predation efficiency and mortality of adult *Coleomegilla maculata lengi* (Coleoptera: Coccinellidae). J. Econ. Entomol., 1994, 87:39 - 43

47 Huang F, *et al*. Baseline susceptibility and changes in susceptibility to *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* under selection pressure in European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae). J. Econ. Entomol., 1997, 90:1137 - 1143

48 Onstad D W and Gould F. Modeling the dynamics of adaptation to transgenic maize by European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae). J. Econ. Entomol., 1998, 91:585 - 593

49 Saxena D, *et al*. Insecticidal toxin in root exudates from Bt corn. Nature, 1999, 402 - 480

50 Saxena D, *et al*. *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 Bio. Biochemi., 2001, 33:1225 - 1230

51 Hofmann C, *et al*. Specificity of *Bacillus thuringiensis* delta-endotoxin is correlated with the presence of high-affinity binding sites in the brush border membrane of target insect midguts. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1988, 85:7844 - 7848

52 Hofmann C, *et al*. Binding of the delta-endotoxin from *Bacillus thuringiensis* to brush-border membrane vesicles of the cabbage butterfly (*Pieris brassicae*). Eur. J. Biochem., 1988, 173:85 - 91

53 Hua G, *et al*. Binding analyses of *Bacillus thuringiensis Cry* δ-endotoxins using brush border membrane vesicles of *Ostrinia nubilalis*. Appl. Environ. Microbiol., 2001, 67:872 - 879

54 Denofl P, *et al*. Two different *Bacillus thuringiensis* delta-endotoxin receptor in the midgut brush border membrane of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Hübner). Appl. Environ. Microbiol., 1993, 59:1828 - 1837

55 Garczynski S, *et al*. Indentification of putative insect brush border membrane-biding molecules specific to *Bacillus thuringiensis*

delta-endotoxin by protein blot analysis. Appl. Environ. Microbiol., 1991, 57: 2816 - 2820

56 Lambert B L, *et al*. A *Bacillus thuringiensis* insecticidal crystal protein with a high activity against members of the family Noctuidae. Appl. Environ. Microbiol., 1996, 62: 80 - 86

57 Macintosh S C, *et al*. Binding of *Bacillus thuringiensis* proteins to a laboratory selected line of *Heliothis virescens*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1991, 88: 8930 - 8933

58 Chamber J A, *et al*. Isolation and characterization of a novel insecticidal crystal protein gene from *Bacillus thuringiensis* subsp. *aizawai*. J. Bacteriol., 1991, 173: 3966 - 3976

59 Mani G. Evolution of resistance in the presence of two insecticides. Genetics, 1985, 109: 761 - 783

60 Crawley M J, *et al*. Biotechnology: transgenic crops in natural habits. Nature, 2001, 409: 682 - 683

61 Huang F, *et al*. Susceptibility of different instars of European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) to diet containing *Bacillus thuringiensis*. J. Econ. Entomol., 1999, 92: 547 - 550

62 Pilcher C D, *et al*. Pollen drift from *Bacillus thuringiensis* corn: efficacy against European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) in adjacent rows of non-Bt corn . Environ. Entomol., 2001, 30: 409 - 414

63 Hyde J, *et al*. An economic analysis of non-Bt corn refuges. Crop Protection, 2001, 20: 167 - 171

64 Huang F, *et al*. Inheritance of resistance to *Bacillus thuringiensis* toxin (Dipel ES) in the European corn borer. Science, 1999, 284: 965 - 967

65 Liu Y B, *et al*. Development time and resistance to Bt crops. Nature, 1999, 400 - 519

66 Van Der Salm T, *et al*. Insect resistance of transgenic plants that express modified *Bacillus thuringiensis CryIA*(*b*) and *CryIC* genes: a resistance management strategy. Plant Mol. Biol., 1994, 26: 51 - 59

67 赵建周,范云六,范贤林,等. 转双基因抗虫烟草延缓棉铃虫抗性的作用评价. 科学通报, 1999, 44: 1635 - 1639

The function of Bt transgenic corn in IPM system and its ecological risks

Wang Dongyan[1,2] Wang Zhenying[1] He Kanglai[1] Cong Bin[2]

(1. Biosafety Research Center, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China; 2. College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract Since Bt (insecticidal crystal protein genes of *Bacillus thuringiensis* Berliner) transgenic corn has been approved for commerciai production in 1996 in U.S.A., it has been widely planted in several countries as the basic measure in corn IPM system, and it is a common fact that the Bt corn possesses high resistance to certain important insect pests such as corn borers, reduces the use of insecticides and increases the economic benefits of growers. However, not a few people are worried about whether or not the growing of Bt corn damages ecological safty. In this paper, the present situation of research and application of Bt corn, its function in IPM system and potential ecological consequences after commercial growth, such as effects on nontarget insects, natural enemies, development of resistance of insect pests to Bt corn and the management strategies are reviewed.

Key words Bt transgenic corn, IPM, ecological risks, management strategy