

◆ 专论:转基因与农药(特约稿) ◆

转基因作物与农药残留风险监测

沈超,潘兴鲁,吴小虎,徐军,董丰收*,郑永权

(中国农业科学院植物保护研究所,植物病虫害生物学国家重点实验室,北京 100193)

摘要:转基因作物的培育和应用是人类提高农业生产能力的关键技术,目前已成功培育的转基因作物种类包括耐除草剂、抗虫、抗病、抗逆和复合性状转基因作物。转基因作物可有效减少杀虫剂和杀菌剂等农药的施用,提高作物的产量和品质。然而,转基因作物中也存在农药残留风险,主要集中在除草剂应用方面。转基因耐除草剂作物在农产品中的农药残留状况需要得到关注。由于不同转基因作物对除草剂的耐性作用机制存在差异,除草剂在农产品中形成污染的组成成分也有所区别,因此不同转基因耐除草剂作物具有不同的除草剂残留监测对象。本文对转基因作物的发展及应用现状进行综述,并对转基因耐除草剂作物的农药残留及风险监测进行概括,以期为转基因作物的合理利用和安全管理提供参考。

关键词:转基因作物;耐除草剂;农药残留;风险监测

中图分类号:S-1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2023.01.004

Transgenic Crops and the Risk Monitoring of Pesticide Residues

SHEN Chao, PAN Xinglu, WU Xiaohu, XU Jun, DONG Fengshou*, ZHENG Yongquan

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The cultivation and application of transgenic crops is the key technology for human beings to improve the agricultural production capacity. At present, transgenic crops that have been successfully cultivated include herbicide-tolerant, insect-resistant, disease-resistant, stress-resistant and stacked transgenic crops. Transgenic crops can effectively reduce the application of pesticide, e.g. insecticide and fungicides, and improve the yield and quality of crops. However, applying herbicide is the main cause of pesticide residues risk of transgenic crops. The situation of pesticide residue of transgenic herbicide-tolerant crops in agricultural products needs attention. Due to the differences in the tolerant mechanism of transgenic crops among various herbicides, the components of pollution generated from herbicides in agricultural products will be different as well. Therefore, different transgenic herbicide-tolerant crops have different monitoring objects for herbicide residues. This paper reviewed the development and application status of transgenic crops, and summarized pesticide residues and risk monitoring of transgenic herbicide-tolerant crops in order to provide reference for rational utilization and safety management of transgenic crops.

Key words: transgenic crop; herbicide tolerance; pesticide residue; risk monitoring

随着世界人口的不断增长,传统农作物的生产已不能满足人类对粮食的需求^[1]。当前,世界人口已达70亿,预计到2050年,全世界人口将增至92亿,届时世界粮食需求量至少增长70%。世界各地一直努力

解决粮食需求供应不足这一重大难题。转基因技术作为现代生物技术的核心,可以打破物种之间的界限,实现作物目标性状的定向改造,在缓解资源束缚,改进农产品质量,保障食品安全,减少生态环境

收稿日期:2022-12-19

基金项目:国家自然科学基金(32172465)

作者简介:沈超(1992—),男,福建莆田人,博士,主要从事农药残留与风险评估工作。E-mail: shenchao202111@126.com

通信作者:董丰收(1974—),男,河南沁阳人,博士,研究员,主要从事农药残留与环境毒理工作。E-mail: dongfengshou@caas.cn

污染,节水增效及拓展农业功能等方面起到积极作用^[2]。转基因作物是通过基因工程技术将外源有利基因整合到目标作物基因组,使作物产生一些抗性性状来提高对环境的适应能力,从而形成品质更好的作物^[3]。转基因作物的出现为缓解粮食安全问题提供了重要机遇,其种植带来了巨大的社会、经济、政治和生态效益^[4]。目前已成功培育的转基因作物种类包括耐除草剂、抗虫、抗病、抗盐碱、抗旱及抗寒性状作物等^[5]。广泛种植的转基因作物品种有转基因大豆、转基因玉米、转基因棉花和油菜^[6]。

尽管转基因作物的出现对缓解人类粮食需求供应不足起到积极的作用,但仍存在着诸多问题。例如,转基因作物对环境及人类健康产生的安全性问题;转基因耐除草剂作物的农药残留、风险监测及标准制定问题;转基因作物的应用前景问题等。本文聚焦转基因作物的发展历程及转基因作物的种类,并对转基因耐除草剂作物的农药残留和风险监测方面进行综述,以期对转基因作物的培育和应用、安全评估及农药残留和风险监测提供参考。

1 转基因作物的发展

早在20世纪80年代初期,生物学家们已经发现能够通过生物工程技术将来自不同生命体的基因移植到植物基因组中,使其产生具有抵抗病毒入侵、细菌感染或昆虫啃食的特性^[7]。该技术的引入大大提高了作物的质量和产量。转基因烟草在1983年被培育出来,是世界上最早的转基因作物,带有抗生素药

类抗体^[8]。1993年,首个转基因番茄在美国以市场化的方式出现在人们的视野中^[9],但直到1996年,该种转基因食品才被允许在超市出售,并在全球商业化种植^[10]。随着转基因技术的不断成熟与完善,越来越多的转基因作物被培育出来。据报道,自转基因作物问世以来,在短短7年时间内品种便增加了40倍^[11];转基因作物种植国也由1996年的5个(美国、澳大利亚、阿根廷、加拿大和墨西哥)逐渐增加到2019年的29个(美国、巴西、中国、印度、澳大利亚、阿根廷、加拿大、墨西哥、巴基斯坦、巴拉圭、乌拉圭、玻利维亚、缅甸、菲律宾、苏丹、西班牙、越南、哥伦比亚等)。同时,转基因作物的种植面积也在不断增加。自1996年开始商业化种植至今,转基因作物在全球的种植规模由原先每年种植面积不到200 hm²飙升到如今的每年种植面积将近2亿hm²^[12],并从2013年起基本趋于稳定。目前,转基因作物种植面积在1 000万hm²以上的国家主要包括美国、阿根廷、加拿大、巴西和印度。我国每年转基因作物的种植面积在300万hm²左右,居世界第7位,种植面积远小于美国、阿根廷、加拿大、巴西和印度等国。我国转基因作物的发展经历了4个阶段(图1):(1)20世纪80年代末至20世纪90年代,转基因棉花在国内得到推广应用,转基因大豆等作物处于研发阶段;(2)21世纪初,我国开始进入自主研发阶段,开展转基因新品种培育工作,如转基因番木瓜新品种培育;(3)21世纪10年代初,从转基因作物的安全性争议到产品研发、推广应用等政策严格管制;(4)21世纪10年代中期至今,转基因作物进入有序发展阶段;转Bt基因抗虫玉米新品种培育

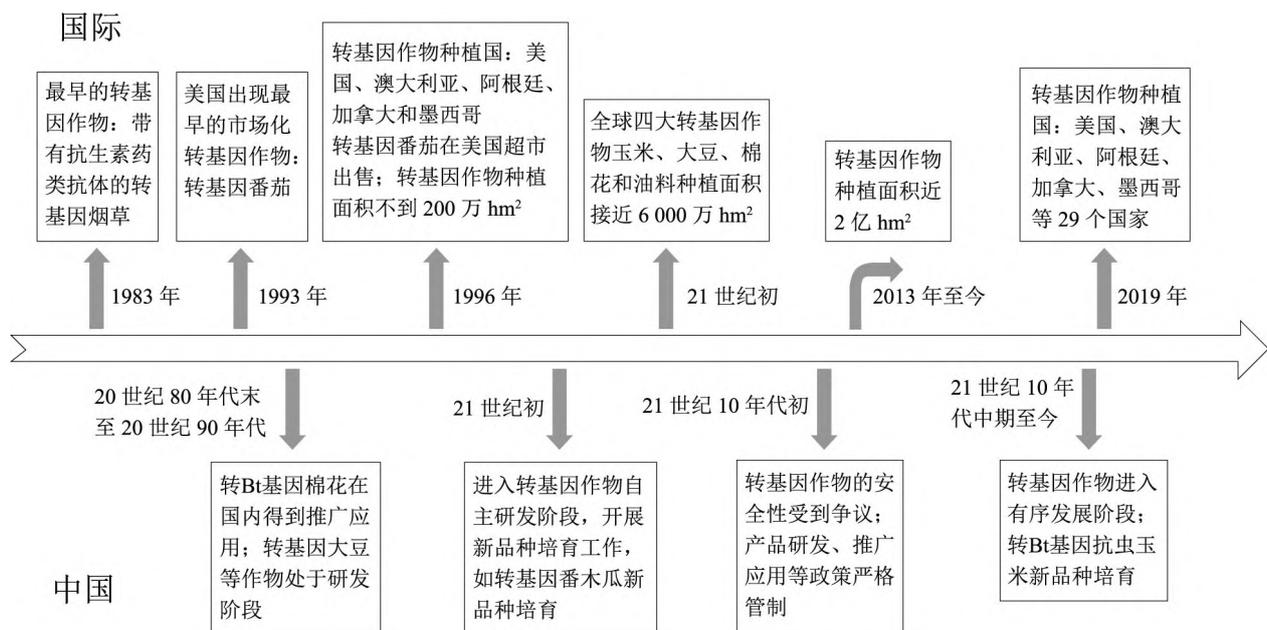


图1 转基因作物的发展历程

2 转基因作物的种类

目前比较常见的转基因作物包括转基因抗虫作物、转基因耐除草剂作物、转基因抗病作物、转基因抗逆作物和复合性状转基因作物。

2.1 转基因抗虫作物

自20世纪90年代起,包括加拿大、美国和阿根廷在内的发达国家及部分发展中国家已开始大面积推广并种植转基因抗虫作物。转基因抗虫作物能够缓解因害虫啃食造成的农作物产量损失,且能够减少化学农药的投入量和二氧化碳的排放量,对保护环境及人类健康产生了积极的影响^[14]。目前获得转基因抗虫作物的主要途径是通过基因工程技术将外源抗虫基因导入植物,使其表现出抵抗害虫的能力^[15]。常见的外源基因包括苏云金杆菌(*Bacillus thuringiensis*, Bt) δ -内毒素基因、几丁质酶基因、 α -淀粉酶抑制剂基因、外源凝集素基因和蛋白酶抑制剂

基因等^[16-17]。转基因抗虫作物抵抗害虫的机理:(1)通过内毒素蛋白影响害虫中肠上皮纹缘细胞的渗透压平衡,使细胞裂解,促进害虫死亡^[18]; (2)通过几丁质酶破坏害虫表皮或外壳的完整结构,使害虫变得脆弱、敏感而死亡^[19]; (3)通过 α -淀粉酶抑制剂抑制害虫消化道内的 α -淀粉酶活性,使害虫无法水解淀粉来补充自身的能量需求,同时刺激害虫分泌大量消化酶且产生厌食反应而死亡^[20](图2); (4)通过外源凝集素影响害虫肠道黏膜上的糖配体吸收营养物质的功能,使害虫缺乏营养物质而死亡^[21]; (5)通过蛋白酶抑制剂抑制害虫肠道的蛋白消化酶发挥功效,导致害虫厌食而死亡^[22]。转基因抗虫棉和转基因抗虫玉米是当前被广泛推广种植的转基因抗虫作物^[23]。

此外,转基因抗虫烟草、抗虫水稻和抗虫番茄等也已经被成功培育。不久的将来,这些转基因抗虫作物便会在生产中得到推广^[16,24-25]。

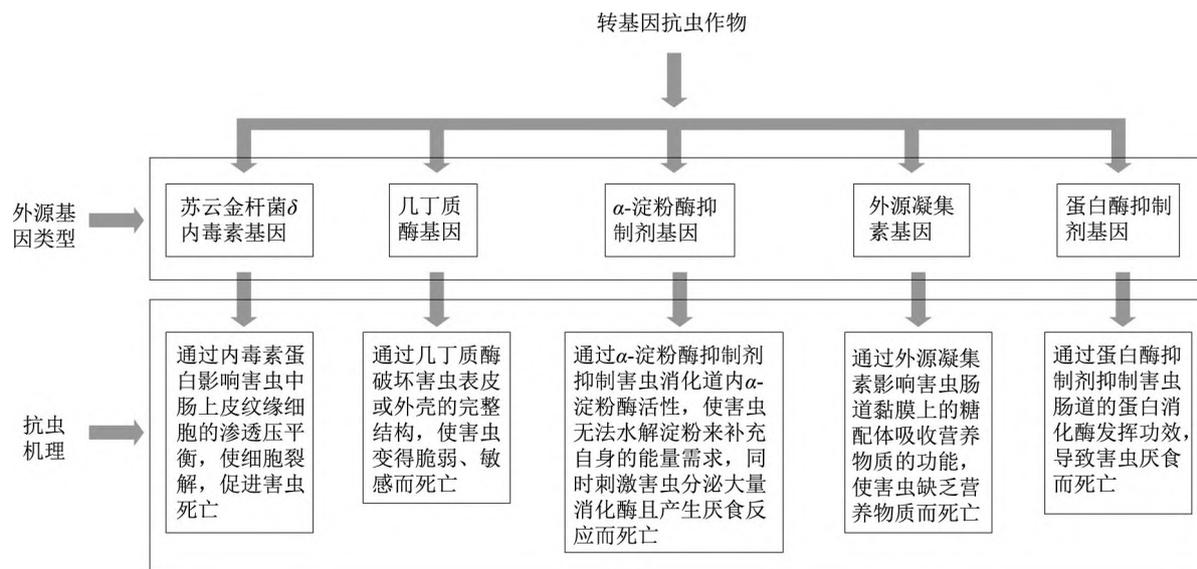


图 2 转基因抗虫作物抵抗害虫的作用机理

2.1.1 转基因抗虫棉

我国棉花种植区域主要分布于黄河流域、长江流域及以新疆为主的西北内陆^[26]。据国家统计局统计报道,我国2021年棉花种植面积约为300万hm²,产量近600万t。然而,棉花在种植过程中同样易受害虫为害,严重影响其产量。棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)是亚洲、欧洲、非洲及大洋洲地区为害棉花的主要害虫之一。20世纪90年代以来,棉铃虫在我国棉花产区大规模发生,使棉花减产高达35%^[27]。我国在面对棉铃虫的持续性发生或暴发的情况下,通过将人工合成的Bt杀虫基因导入棉花获得了转Bt基因抗虫

棉^[28]。转Bt基因抗虫棉的成功培育不但降低了棉花害虫造成的巨大损失,而且有效减少了化学农药的投入量,对保护环境和生态起到积极的作用^[29]。

2.1.2 转基因抗虫玉米

我国是玉米种植大国,种植面积(0.4亿余公顷)和总产量(近3亿t)居于我国粮食产业的第2位^[30]。然而,玉米在种植过程中易受害虫为害,严重影响其产量和质量。主要的玉米害虫包括玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)、棉铃虫、草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)、蚜虫、东方黏虫(*Mythimna separata*)和蓟马等^[31-32]。亚洲玉米螟是玉米生产中最重要

虫,已经严重影响玉米的生产^[33]。目前,玉米螟的防治技术已经比较成熟,可通过生物防治、农业防治、物理防治及化学防治等手段对其进行防治^[34-35]。草地贪夜蛾原产于美洲亚热带和热带地区,具有非常强的迁徙能力,是一种严重威胁农业生产的害虫^[36]。草地贪夜蛾辗转非洲、亚洲各国后于2019年入侵我国,对我国的农业生产带来了巨大的冲击^[37]。草地贪夜蛾主要通过啃食玉米叶片为害,造成玉米产量减少^[38]。目前防治草地贪夜蛾比较常用的手段为药剂防治^[39]。尽管传统的害虫防治手段可短期有效控制玉米害虫的为害,但仍存在诸多弊端。例如,生物防治、农业防治、物理和化学防治无法从根本上控制害虫的数量。化学农药的大量投入易诱导害虫产生抗性,且对环境及人类健康造成严重危害^[40]。转Bt基因抗虫玉米可有效防治包括棉铃虫、草地贪夜蛾和玉米螟在内的鳞翅目害虫,因此被广泛推广^[41-43]。其主要类型包括表达杀虫蛋白的*cry1Ab*、*cry1A.105*、*cry2Ab2*和*cry1F*基因^[41,44-45]。据报道,中国农业科学院植物保护研究所联合多家单位研究了‘DBN9936’和‘瑞丰125’玉米抗虫品种,这2种抗虫品种对亚洲玉米螟、棉铃虫、草地贪夜蛾和东方黏虫等鳞翅目害虫具有非常好的控制效果,可有效减少玉米的产量损失^[46]。

2.2 转基因耐除草剂作物

农田杂草作为适应能力非常强的植物,由于与农作物竞争水、肥料、光等资源,会严重影响农作物的产量和质量^[47],且容易成为农作物病原菌及害虫的中间寄主^[48]。因此,农田杂草防控是保障作物生长安全的重要因素。转基因耐除草剂作物的出现有效缓解了人们对农作物的除草压力,不仅提高了除草效果,而且降低了除草成本,为拓宽除草剂的使用范围及减少作物药害带来了新的希望^[49]。

转基因耐除草剂作物的研究和推广一直处于转基因作物研究中的领先地位,其种植面积和应用也最为普遍。早在2004年,全球四大转基因耐除草剂作物玉米、大豆、棉花和油料的种植面积已接近6000万hm²^[50]。耐除草剂性状逐渐成为种业科技公司关注的重点^[51]。截至目前,全球已商品化的转基因耐除草剂作物包括耐草甘膦大豆、玉米、棉花、甜菜、水稻、向日葵和油菜(表1),耐磺酰脲类棉花和大豆,耐咪唑啉酮水稻、玉米、甜菜和油菜,耐溴苯腈烟草和棉花等^[52]。美国是最早商业化种植耐除草剂转基因大豆和玉米的国家之一,耐除草剂转基因作物种植面积已超过90%。据美国农业部国家农业统

计局于2022年6月发布的报告显示,美国耐除草剂转基因大豆和玉米的种植面积分别达到了0.357亿和0.364亿hm²。我国转基因耐除草剂作物主要有耐莠去津大豆,耐草甘膦玉米、大豆和小麦,耐草铵膦玉米和大豆,耐溴苯腈小麦和油菜等。目前种类最多的转基因耐除草剂作物是耐草铵膦和耐草甘膦作物。其耐除草剂的作用机理为(1)向作物导入耐除草剂基因,如5-烯醇式丙酮苯草酸-3-磷酸合成酶基因(*epsps*),使作物不受除草剂影响;(2)向作物导入可转化除草剂的基因,如草甘膦*N*-乙酰转移酶基因(*gat*)和膦丝菌素乙酰转移酶基因(*pat*),促进作物可以快速将除草剂转化并失去活性^[12]。转基因耐除草剂作物对除草剂表现出较强的耐受能力,可以减少作物药害^[49]。同时,转基因耐除草剂作物的种植在改善环境和简化栽培等方面也起到积极的作用^[53],包括草铵膦和草甘膦在内的除草剂销售市场将伴随转基因耐除草剂作物的发展而进一步扩大^[54]。

表1 部分已成功培育的转基因耐除草剂作物

耐除草剂类型	作物种类
耐草甘膦	大豆、玉米、棉花、甜菜、水稻、向日葵、油菜、小麦、烟草、花生、马铃薯、番茄、胡萝卜、洋葱、菠菜、南瓜、番木瓜、黑麦草和橡树等
耐磺酰脲类	棉花、大豆
耐咪唑啉酮	水稻、玉米、甜菜和油菜
耐溴苯腈	烟草、棉花、小麦和油菜
耐草铵膦	玉米、大豆
耐莠去津	大豆
耐2,4-D	玉米、大豆
耐麦草畏和草铵膦	棉花
耐草甘膦和草铵膦	玉米
耐麦草畏和草甘膦	大豆
耐草甘膦和异噁唑草酮	大豆
耐草甘膦和磺酰脲类除草剂	大豆

2.3 转基因抗病作物

病毒、细菌和真菌等病原微生物常年危害农作物,给农业生产带来巨大损失^[55]。抗病育种技术的出现对防治病原微生物产生的危害起到积极作用^[56]。目前,比较常见的转基因抗病作物包括抗病病毒马铃薯、水稻、小麦、甜椒、烟草和番茄,抗疫病马铃薯和 大豆,抗病原微生物柑橘等^[57-59]。

2.4 转基因抗逆作物

植物在自然生长周期中会遇到各种各样的不利环境条件,如干旱胁迫、低温寒冷、炎热高温和盐碱胁迫等的挑战。面对这些不利条件,植物只能通

过自我调节而生存^[60]。全球每年因不利自然条件造成的农作物生长受阻或大面积死亡频繁发生,严重影响农作物的产量^[61]。转基因抗逆作物的培育可有效缓解这些不利条件的发生对农作物产生的影响^[62]。转基因抗逆作物的培育方式是通过导入另一种生物优良性状基因,如鱼抗冻蛋白基因,获得新性状来抵抗恶劣的环境因素,从根本上改变作物的特性^[63]。转基因抗逆作物主要包括转基因抗盐碱、抗干旱、抗低温、抗涝害作物等^[64]。目前,比较常见的转基因抗逆作物有耐寒烟草和马铃薯,抗逆杨树,抗逆水稻和耐旱小麦等^[65-68]。

2.5 复合性状转基因作物

经过了近40年的发展,转基因作物从单性状的1.0时代(特定改变农作物性状),到复合性状的2.0时代(以完善品种性状为目标),再到即将开启的3.0时代(以生态型、营养型等加工或食用品质性状为目标),转基因作物正不断朝着人类需求的方向发展。复合性状转基因作物是指同一植株中含有多个转基因性状或转化体,相比于单性状转基因作物具有更大的优势,主要表现为开辟了育种的新途径;拓展了转基因作物的功能;提高了资源的利用效率^[69]。复合性状转基因作物的培育打破了单性状转基因作物的诸多弊端,更能满足农民多元化的需求,因此其具有广阔的应用前景^[70]。

3 转基因作物农药残留监测

转基因作物的培育及推广应用有效降低了农药的使用量,对保护环境及人类健康起到积极的作用^[71],但转基因作物仍可能面临着农药残留的风险。转基因作物的农药残留风险主要集中在除草剂应用方面^[72]。随着除草剂的大量应用,农田杂草通过进化易对除草剂产生抗性^[73],导致除草剂在转基因耐除草剂作物上的用量增加,造成除草剂在农产品中残留风险增高,从而影响农产品的食用安全性。基于此,国际上制定了相应的残留限量标准来规范除草剂在转基因耐除草剂作物中的残留水平。国际食品法典委员会(CAC)制定的草甘膦在转基因大豆和玉米中的残留限量标准分别为20 mg/kg和5 mg/kg,草铵膦在转基因大豆和玉米中的残留限量标准分别为2 mg/kg和0.1 mg/kg^[74]。目前国外对转基因耐除草剂作物中除草剂残留的监测数据表明,绝大部分耐除草剂转基因作物中除草剂的残留水平低于残留限量标准,不会影响人类健康。美国于2009年的转基因大豆样品监测数据表明,在60%~70%样品

中监测到的草甘膦残留水平在10 mg/kg;在30%~40%样品中监测到的草甘膦残留水平在10~20 mg/kg或低于10 mg/kg,以上均低于CAC制定的最大残留限量标准20 mg/kg^[75]。然而,仍有个别案例报道了因草甘膦使用过量导致草甘膦在转基因作物中残留超标的情况,如在巴西和阿根廷部分农场获得的大豆样本中监测到草甘膦平均残留水平为38.5 mg/kg,是CAC残留限量标准的近2倍^[76]。另有报道表明,在美国爱荷华州的转基因大豆个别样品中监测到草甘膦最大残留水平高达100 mg/kg^[72]。此外,用于食品和饲料的转基因耐除草剂作物中除草剂及其代谢物残留对人类的健康风险不容忽视^[77],如耐草甘膦大豆中草甘膦及其代谢物残留不仅影响了植物的组分,而且会影响以大豆为饲料的动物免疫系统、传代系统等,间接对人类健康造成风险。因此,还需加强耐除草剂作物农产品中除草剂残留的监测工作。

由于不同转基因作物对除草剂的耐性作用机制存在差异,除草剂在农产品中形成污染的组成成分也不同。目前,CAC已经对植物源转基因耐除草剂作物产品中的草甘膦和草铵膦制定了新的风险评估残留物定义,即将草甘膦、氨甲基膦酸、*N*-乙酰草甘膦和*N*-乙酰氨甲基膦酸的残留总和以草甘膦表示;将草铵膦、*N*-乙酰草铵膦和3-甲基膦基丙酸的残留总和以草铵膦表示。风险评估残留定义可以有效保证风险评估的科学性和完整性。同时,为了方便政府的日常监管和市场抽检的需要,通常会制定农药的残留监测定义来明确农药残留主要的监测对象。例如,制定草甘膦残留监测定义为:针对大豆和玉米作物,将监测到的草甘膦和*N*-乙酰草甘膦的总和以草甘膦表示;对其他作物,将监测到的草甘膦的残留水平以草甘膦表示。草铵膦残留监测定义对象为所有作物,将监测到的草铵膦、*N*-乙酰草铵膦和3-甲基膦基丙酸的总和以草铵膦表示^[12]。

我国对转基因耐除草剂大豆和玉米中的农药残留风险同样非常关注。中国农业科学院植物保护研究所实验室团队对来自于国内不同转基因耐除草剂作物种植区的市面上样品进行了草甘膦、草铵膦及其代谢物的残留测定,并建立了草甘膦、草铵膦及其代谢物的高效检测技术。监测结果显示,草甘膦、草铵膦及其代谢物在转基因大豆和玉米中的残留水平均低于我国及国际的残留限量标准,说明我国转基因大豆和玉米中的农药残留风险在可接受范围内^[78]。

4 结论与展望

综上所述,世界各地的转基因作物发展速度快,品种多样,包括转基因抗虫作物、转基因耐除草剂作物、转基因抗病作物、转基因抗逆作物和复合性状转基因作物等,这为作物的健康生长和抗逆性的增强提供了新的解决方案。转基因作物可有效减少病虫害,减少杀虫剂和杀菌剂等农药的使用,高效防控多种恶性杂草,提高作物产量和品质。由于各国机械化收获程度的差异,有些国家和地区在作物生长后期还会大量施用除草剂来进行杀青催枯处理,这往往会导致农产品中除草剂残留风险的增加。各国政府制定了转基因作物在农产品中的农药残留限量安全标准,并开展了日常农药残留监测和风险管理,有效保障了农产品消费安全。尽管如此,我们今后仍需加强对转基因作物中农药残留风险的监测力度,尤其是针对耐除草剂作物农产品中除草剂残留的监测。此外,还应加强除草剂的安全施用,针对常规非转基因作物,在施用除草剂后,药液往往会发生飘移,导致其在作物中残留而形成药害。因此,相关部门要进一步制定除草剂安全使用规范,加强施药人员的安全技术培训等工作。基于此,才能充分发挥转基因生物技术创新的优势,切实提高农业生产能力,保障粮食安全。

参考文献

- [1] 段灿星,孙素丽,朱振东.全球转基因作物的发展状况[J].科技传播,2020,12(24):29-31;48.
- [2] 吴珊,庞俊琴,庄军红,等.我国转基因作物的研发与安全管理[J].中国农业科技导报,2020,22(11):11-16.
- [3] RANI S J, USHA R. Transgenic plants: types, benefits, public concerns and future[J]. Journal of Pharmacy Research, 2013, 6(8): 879-883.
- [4] 金文涌,叶凤林,刘定富,等.中美转基因作物产业化最新进展[J].中国种业,2022(9):1-6.
- [5] 叶艳玲.什么是转基因食品?[J].中国科技术语,2013(5):44.
- [6] 朱乾浩,汪若海.转基因植物研究新进展[J].世界农业,2000(8):23-25.
- [7] 杨维才.植物转基因技术——回顾与前瞻[J].植物学报,2013,48(1):6-9.
- [8] 杨欣.各国的转基因作物[J].百科知识,2010(8):16.
- [9] 张丹华.转基因的理念与利益之争[J].农产品市场,2010(42):33.
- [10] 胡楫.摆上餐桌的转基因植物食品[J].环境,2000(4):27.
- [11] 李宏伟.美国转基因作物品种及其商业化应用[J].全球科技经济瞭望,2003(6):62-63.
- [12] 王琳权,王宽,李如男,等.我国转基因耐除草剂作物现状及目标除草剂登记管理要求[J].现代农药,2022,21(3):6-10.
- [13] 孙亚男,张维耀,王金星,等.转基因作物研究进展及我国转基因大豆的现状与未来[J].中国种业,2022(5):21-25.
- [14] SMITH C M. Conventional breeding of insect-resistant crop plants: still the best way to feed the world[J]. Current Opinion in Insect Science, 2021, 45: 7-13.
- [15] 刘剑辉.基因工程技术在植物抗虫方面应用及发展前景[J].北方园艺,2001(4):3.
- [16] 孙之潭,钟国华,胡美英.抗虫转基因作物研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(S1):148-152.
- [17] 郭线茹,蒋金炜,罗梅浩,等.转基因抗虫烟草研究进展[J].昆虫知识,2005,42(4):358-363.
- [18] 范艳艳,黄义德,周谷成,等.BT抗虫蛋白研究概述[J].生物学教学,2018,43(11):62-63.
- [19] 吴青君,张文吉,张友军.昆虫几丁质酶及其在植物保护中的应用[J].昆虫知识,2000,37(5):314-317.
- [20] 赫卫清,潘一廷,唐益雄.淀粉酶抑制剂与抗虫的研究进展[J].生命的化学,2002,22(2):172-174.
- [21] 王璋瑜.杀虫领域新发现[J].生物技术通报,1992(6):13-14.
- [22] 谢先芝,黄美娟,吴乃虎.转番茄蛋白酶抑制剂II基因烟草植株的培育及其抗虫特性分析[J].自然科学进展,2002,12(2):145-150.
- [23] 李永春,陈焕例,尹钧,等.作物抗虫转基因育种的现状及发展策略[J].浙江农业科学,2007(1):109-111.
- [24] 于志晶,蔡勤安,林秀峰,等.转基因抗虫水稻中Bt蛋白表达量的研究[J].安徽农业科学,2012(6):3251-3252.
- [25] 高蓝,傅建熙,王建华.转基因番茄研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2000,28(3):90-95.
- [26] 马春玥,买买提·沙吾提,姚杰,等.1950—2015年中国棉花生产时空动态变化[J].地理学报,2020,75(8):1699-1710.
- [27] 李斌.科学家破解棉铃虫大发生三谜[J].农村科技,1998(8):29.
- [28] 夏敬源,崔金杰.转Bt基因抗虫棉在害虫综合治理中的作用研究[J].棉花学报,1999,11(2):57-64.
- [29] 吴孔明,陆宴辉.种植Bt棉花可有效控制棉铃虫在我国多作物生态系统中的发生与危害[J].中国基础科学,2009,11(3):27-28.
- [30] 杨慧莲,王海南,韩旭东,等.我国玉米种植区域比较优势及空间分布——基因全国18省1996—2015年数据测算[J].农业现代化研究,2017,38(6):921-929.
- [31] 王成业,王友华,许波,等.玉米田主要害虫的防治[J].农学报,2004(8):15.
- [32] 陈琦,段云,候艳红,等.草地贪夜蛾与玉米灌浆期3种常见夜蛾科害虫的形态特征比较[J].植物保护,2020,46(1):34-41.
- [33] 陈元生,涂小云.玉米重大害虫亚洲玉米螟综合治理策略[J].广东农业科学,2011,38(2):80-83.
- [34] 牛荃荃,纪武鹏,孙浩妍.浅析玉米螟防治技术[J].现代化农业,2019(7):10-11.
- [35] 甘国福,唐峻岭,郎小芸.玉米田棉铃虫非化学防治技术与展望[J].甘肃农业科技,2003(7):44-46.
- [36] 王磊,陈科伟,钟国华,等.重大入侵害虫草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨[J].环境昆虫学报,2019,41(3):479-487.
- [37] 潘兴鲁,董丰收,芮昌辉,等.我国草地贪夜蛾应急化学防控风险评估及对策[J].植物保护,2020,46(6):117-123.
- [38] 赵志珍,许玉林,陶晓琴,等.草地贪夜蛾对玉米的危害及防控技术措施[J].江西农业,2019(20):13-14.

- [39] 关秀敏, 赵猛, 杨建国, 等. 草地贪夜蛾防治药剂田间试验示范效果[J]. 植物保护, 2021, 47(5): 320-324.
- [40] 柏海玲. 我国生物农药发展空间大[J]. 农药研究与应用, 2007, 11(6): 38.
- [41] 任龙, 沈明鹤, 王溪竹, 等. 转基因玉米防治草地贪夜蛾应用进展[J]. 现代农药, 2020, 19(2): 12-15.
- [42] 王振营, 文丽萍, 何康来. 美国转Bt基因抗虫玉米研究进展[J]. 世界农业, 1999(8): 35-37.
- [43] 芮昌辉, 范贤林, 孟香清, 等. 转Bt基因抗虫玉米对棉铃虫杀虫活性的初步评价[J]. 农药学报, 2000, 3(2): 90-92.
- [44] BUNTIN G D. Corn expressing *CryIAb* or *CryIF* endotoxin for fall army worm and corn earworm management in field corn for grain production[J]. Florida Entomologist, 2008, 91(4): 523-530.
- [45] SIEBERT M, LEONARD S, STEWART J. Evaluation of corn hybrids expressing *CryIF*, *CryIA.105*, *Cry2Ab2*, *Cry34Ab1/Cry35Ab1*, and *Cry3Bb1* against southern United States insect pests [J]. Journal of Economic Entomology, 2012, 105(5): 1825-1834.
- [46] YANG X M, ZHAO S Y, LIU B, et al. Bt maize can provide non-chemical pest control and enhance food safety in China[J/OL]. Plant Biotechnology Journal, 2022. <https://doi.org/10.1111/pbi.13960>.
- [47] 曹申林. 农田杂草的生物学特性及防治技术[J]. 现代农业科技, 2021(7): 111-112.
- [48] 崔翠, 唐银. 小麦播种量对杂草群落及小麦产量的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(12): 12-17.
- [49] 李云河, 李香菊, 彭于发. 转基因耐除草剂作物的全球开发与利用及在我国的发展前景和策略[J]. 植物保护, 2011, 37(6): 32-37.
- [50] 杨树果. 全球转基因作物发展演变与趋势[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 13-26.
- [51] 芦宝琳. 转基因作物的发展[J]. 中国甜菜糖业, 2021(4): 38-41.
- [52] 邱龙, 马崇烈, 刘博林, 等. 耐除草剂转基因作物研究现状及发展前景[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2357-2363.
- [53] 李香菊, 崔海兰. 转基因耐草甘膦作物的环境安全性[J]. 植物保护, 2011, 37(6): 38-43.
- [54] 胡笑彤. 全球转基因作物的发展以及对除草剂市场的影响[J]. 农药科学与管理, 2015, 36(6): 1-7.
- [55] TALAKAYALA A, ANKANAGARI S, GARLADINNE M. CRISPR-Cas genome editing system: a versatile tool for developing disease resistant crops[J]. Plant Stress, 2022, 3: 100056.
- [56] 刘进元, 余荔华. 植物抗病基因工程的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 1994, 14(2): 31-34.
- [57] ZHOU Y, YANG K, YAN Q, et al. Targeting of anti-microbial proteins to the hyphal surface amplifies protection of crop plants against *Phytophthora* pathogens[J]. Molecular Plant, 2021, 14(8): 1391-1403.
- [58] CASERTA R, TEIXEIRA-SILVA N S, GRANATO L M, et al. Citrus biotechnology: what has been done to improve disease resistance in such an important crop? [J]. Biotechnology Research Innovation, 2019, 3(S1): 95-109.
- [59] RANI S J, USHA R. Transgenic plants: types, benefits, public concerns and future[J]. Journal of Pharmacy Research, 2013, 6(8): 879-883.
- [60] 邱文怡, 王诗雨, 李晓芳, 等. MYB转录因子参与植物非生物胁迫响应与植物激素应答的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(7): 1317-1328.
- [61] 信怀滨, 张德远, 明玉珍, 等. 不利气候条件对作物生长的影响及应对措施[J]. 现代化农业, 2010(2): 44-45.
- [62] 刘晓蕊, 尚丽霞, 蔡勤安, 等. 耐盐转基因植物研究进展[J]. 东北农业科学, 2021, 46(4): 27-33.
- [63] XU J, HOU Q M, KHARE T, et al. Exploring miRNAs for developing climate-resilient crops: a perspective review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 91-104.
- [64] 孙卉, 韦正乙, 邢少辰. 作物抗逆转基因工程研究进展[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(2): 36-41.
- [65] 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.
- [66] 马有志. 抗旱转基因小麦“快步走”[J]. 农药市场信息, 2011(19): 34.
- [67] 杨利艳, 孙毅, 谢莉琴. 转基因杨树的研究及其生物安全评价[J]. 分子植物育种, 2008, 6(1): 123-127.
- [68] XIANG H, YANG X H, KE L, et al. The properties, biotechnologies, and applications of antifreeze proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 661-675.
- [69] 刘培磊, 李宁, 程金根. 不同国家和地区复合性状转基因作物安全评价管理的比较[J]. 农业科技管理, 2008, 27(3): 23-26.
- [70] 柳晓丹, 许文涛, 黄昆仑, 等. 复合性状转基因植物安全性评价的研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(6): 1-6.
- [71] 段又生. 种植转基因作物导致农药使用量下降[J]. 中国农药, 2012, 8(8): 21.
- [72] CUHRA M. Review of GMO safety assessment studies: glyphosate residues in roundup ready crops is an ignored issue[J]. Environmental Sciences Europe, 2015, 27(1): 20.
- [73] 王险峰, 关成宏. 关于农田杂草对除草剂产生抗性问题的探讨[J]. 现代化农业, 2004(1): 8-10.
- [74] European Food Safety Authority (EFSA). Review of the existing maximum residue levels for glyphosate according to article 12 of regulation (EC) No. 396/2005-revised version to take into account omitted data[J]. EFSA Journal, 2019, 17(10): 5862.
- [75] BØHN T, CUHRA M, TRAAVIK T, et al. Compositional differences in soybeans on the market: glyphosate accumulates in roundup ready GM soybeans[J]. Food Chemistry, 2014, 153: 207-215.
- [76] BØHN T, MILLSTONE E. The introduction of thousands of tons of glyphosate in the food chain: an evaluation of glyphosate tolerant soybeans[J]. Foods, 2019, 8: 669.
- [77] MIYAZAKI J, BAUER-PANSKUS A, BØHN T, et al. Insufficient risk assessment of herbicide-tolerant genetically engineered soybeans intended for import into the EU [J]. Environmental Sciences Europe, 2019, 31: 92.
- [78] WANG K, GENG Y, DONG Z, et al. Simultaneous determination of glyphosate, glufosinate ammonium and their metabolites in maize and soybean by ultra-performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry[J]. Analytical Methods, 2022, 14: 3850.

(责任编辑:高蕾)