

◆ 专论:转基因与农药(特约稿) ◆

我国转基因耐除草剂作物研发与应用

李香菊

(中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

摘要:杂草是引起作物减产的重要农业有害生物之一。基因重组技术为培育转基因耐除草剂作物提供了有力的手段,耐除草剂作物的种植也为农民带来了更多的除草选择,在扩大杀草谱、提高除草效果、提高作物安全性、改善环境和简化栽培模式等方面起到了推动作用。美国、巴西、阿根廷和加拿大等国家的转基因作物应用率接近饱和。以耐草甘膦为代表的耐除草剂作物商业化为种植国带来了显著的经济、社会和生态效益。在转基因生物新品种培育科技重大专项资金支持下,我国将生物技术应用用于耐除草剂作物育种,研发出了多个抗虫/耐除草剂玉米、耐除草剂大豆转化体。其中,‘DBN9936’‘DBN958’‘中黄6106’等含有耐除草剂基因的11个玉米转化体和3个大豆转化体获得农业转基因生物生产应用安全证书。试点种植结果显示,上述转化体配套使用草甘膦除草效果好、增产和节本,有利于大豆-玉米带状复合种植和后茬作物轮作倒茬。本文在概述杂草防控对耐除草剂作物需求的基础上,总结了耐除草剂作物研发与试验种植进展,论述了耐除草剂作物在我国的应用前景,以期为我国转基因耐除草剂作物的目标除草剂使用与管理提供参考。

关键词:转基因;耐除草剂作物;草甘膦;商业化种植

中图分类号:S5-3 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2023.01.002

The Development and Application of Genetically Modified Herbicide-tolerant Crops in China

LI Xiangju

(Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

Abstract: Weed is one of the important agricultural pests that causes reduction of crop yield. The discovery of recombinant DNA technology provides a powerful method to develop genetically modified (GM) herbicide-tolerant crops, and the cultivation of herbicide-tolerant crops also brings more weeding options for farmers, which plays a promoting role in expanding the weeding spectrum, enhancing the control efficacy, raising the crop safety, improving the environment and simplifying the cultivation models, etc.. The usages of GM crops in the United States, Brazil, Argentina, Canada and other countries is near saturation. The commercialization of herbicide-tolerant crops represented by glyphosate-tolerant crops has brought significant economic, social and ecological benefits to farmers in countries planting GM crops. With the support of the major special fund for national GMO new variety breeding program of PRC, biotechnologies are applied to the breeding of herbicide-tolerant crops in order to develop various insect/herbicide-tolerant corn and herbicide-tolerant soybean events in China. Among them, 11 types of maize events and 3 types of soybean events containing herbicide-tolerant genes, such as 'DBN9936' 'DBN9858' and 'Zhonghuang 6106', obtained approvals of agricultural GMOs safety certificate (for cultivation use) issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. The results of demonstration showed that application of the above events matched with glyphosate had excellent weeding effect, increased yield and saved cost, and contributed to soybean-corn intercropping pattern and crop rotation. Based on overview of the demands of herbicide-tolerant crops for weed prevention and control, the study summarized the progress on

收稿日期:2023-01-29

基金项目:科技创新2030-重大项目(2022ZD0402102)

作者简介:李香菊(1963—),女,河北沧州人,博士,研究员,主要从事杂草生物学与防除研究工作。E-mail: xjli@ippcaas.cn

development and experimental planting of herbicide-tolerant crops and discussed prospect for the application of herbicide-tolerant crops in China, aiming to provide reference for application and management of target herbicide on GM herbicide-tolerant crops.

Key words: genetically modified herbicide-tolerant crop; glyphosate; commercial planting

从有农耕史以来,人类不断与草害做斗争。除草剂改变了靠人工、畜力和机械除草的状况,以其快速、高效及低成本的优势在现代农业中占据重要地位^[1]。然而,由于新作用靶标化合物发现趋难,除草剂创制进入瓶颈时期。通过育种手段提高作物对除草剂的耐受能力,利用过去不能用在“目标”作物的除草剂选择性防治耐除草剂作物田杂草已成为除草技术的新尝试。

基因重组技术为培育耐除草剂作物提供了有效途径^[2]。采用分子生物学方法把某些生物或人工合成的耐除草剂基因导入受体植物基因组中,使受体表达耐除草剂性状,以此突破生物有性杂交限制。由于转入耐除草剂基因,“目标”除草剂对作物的安全性提高,故可作为选择性除草剂使用且不伤害作物^[3-4]。

20世纪90年代后期,北美和南美地区广泛种植耐除草剂作物从而获得较大经济效益和社会效益^[5]。我国转基因作物研究始于20世纪80年代^[6]。2008年,国家启动转基因生物新品种培育科技重大专项,将转基因技术应用于耐除草剂作物育种,研发出了具有自主知识产权的耐除草剂基因和多个转化体。随着产业化发展能力的不断提升和国家政策的完善,不久的将来,耐除草剂作物将被纳入我国杂草治理体系。基于此,本文在概述草害防控对耐除草剂作物需求的基础上,总结耐除草剂作物研发与试验种植成果,论述耐除草剂作物在我国的应用前景,以期对转基因耐除草剂作物的目标除草剂使用与管理提供参考。

1 我国草害防控对除草剂的需求

1.1 我国农田化学除草现状与问题

杂草是引起作物减产的重要农业有害生物之一。据国外文献报道,不除草对作物的产量损失可高达100%^[6]。我国田园杂草1400多种,其中造成危害的130余种,恶性杂草37种,区域性恶性杂草96种^[7-8]。据全国农业技术推广服务中心统计,我国农田杂草常年发生面积达14亿亩次以上,形成草害的面积为7.65亿亩次,平均减产9.7%,而实际生产中,因草害防控不利引起的作物减产远高于上述数字^[6-9]。

草害防控在很大程度上依赖于除草剂的应用。目前,我国主要作物玉米、水稻、小麦和大豆的化学除草面积率达100%。2021年,在全国种植业使用量24.8万t(折百)的农药中,除草剂占40%以上。如果离开化学除草,我国粮食安全将没有保障。

作物轻简化栽培、除草剂单一和超量使用、联合收割机跨区作业以及地区间贸易增加等原因导致我国农田杂草群落演替加剧,杂草对除草剂抗性和耐受性增强,作物药害频发,从而影响农业增产和农民增收,尤其是难治杂草数量增加和除草剂药害问题对目前的杂草治理技术体系提出了挑战。与20世纪80年代杂草普查结果相比,我国农田杂草具有区系种类多样化、杂草群落结构复杂化和难治杂草种群密度增加等特点^[1]。例如,北方玉米田连年使用烟嘧磺隆、莠去津等除草剂,部分田块以由马唐(*Digitaria Sanguinalis*) + 稗(*Echinochloa crusgalli*) + 反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)、龙葵(*Solanum nigrum*) + 稗 + 马唐和铁苋菜(*Acalypha australis*) + 马唐 + 稗等为优势群落演变成以鸭跖草(*Commelina communis*)、萝藦(*Metaplexis japonica*)、野黍(*Eriochloa villosa*)、止血马唐(*Digitaria ischaemum*)、豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)、三裂叶豚草(*Ambrosia trifida*)和问荆(*Equisetum arvense*)等难治杂草为优势种^[9]。稻田和麦田杂草对乙酰乳酸合成酶(ALS)、乙酰辅酶A羧化酶(ACCCase)抑制剂的抗性发展迅速;大豆田中的反枝苋等对原卟啉原氧化酶(PPO)类抑制剂的抗性严重,用目前登记的除草剂推荐剂量防治困难^[10-11];麦田中的节节麦(*Aegilops tauschii*)、稻田杂草稻等分别与水稻和小麦近缘,缺乏选择性除草剂;除草剂药害事件屡屡发生,尤其是连年使用莠去津、咪唑乙烟酸等残留期长的除草剂导致后茬只能连作,以上已成为部分地区种植结构调整的限制因素。

1.2 草害防控对除草剂的需求

除草剂在农业生产中发挥着重要作用。然而,作物田登记使用的是选择性除草剂,其不能完全满足高效、安全的生产需求。(1)目前创制的大部分选择性除草剂杀草谱相对较窄。由于杀草谱的限制,一种除草剂单用或2~3种除草剂混用,对农田复杂

的杂草群落防效仍不理想。例如,大豆田主打除草剂精异丙甲草胺、精喹禾灵和氟磺胺草醚等在混用推荐剂量下对禾本科杂草防效好,对阔叶杂草防效较差,尤其是对藜科、蓼科、旋花科和部分多年生杂草效果不佳^[2]。(2)部分除草剂品种选择性指数较低或土壤残留期长影响作物生长。例如,我国登记在玉米田的除草剂有效成分达40多个^[13],主推产品莠去津、乙草胺、烟嘧磺隆、硝磺草酮及其复配制剂的市场占有量与使用面积均为80%以上^[9],但乙草胺、烟嘧磺隆对部分玉米品种选择性指数低,存在隐形药害;莠去津对后茬敏感作物大豆、油菜和甜菜等的药害风险凸显。此外,大豆田咪唑乙烟酸、异噁草松和氟磺胺草醚等对后茬敏感作物药害频繁发生^[14]。(3)作物轻量化栽培需要配套除草剂。在水稻抛秧、直播,玉米免耕和小麦撒播等种植方式和粗放的管理模式下,杂草防治难度增加,尤其是拟态性杂草发生严重。例如,将水稻直播栽培,稻田中的千金子(*Leptochloa chinensis*)、杂草稻(*Oryza sativa*)、李氏禾(*Leersia hexandra*)等发生加重,部分直播稻田中千金子占禾本科杂草的比例由20世纪90年代的25%上升至84.2%~95.6%^[10]。(4)小宗作物缺乏安全高效的除草剂。因此,生产上迫切需要研发防治谱宽、药效理想、对作物选择性指数高、无土壤残留危害、使用技术简便、成本低廉和环境风险低的除草剂新品种。

2 国外转基因耐除草剂作物的研发

2.1 转基因耐草甘膦作物

农药创制是一个高投入、高风险和长周期的过程。据统计,创制一个除草剂新品种需要合成约16万个化合物,投资3亿美元,耗时超过12年^[15]。发现HPPD除草剂靶标^[16]以来,近30年世界上未发现其他新作用机理的除草剂。基于除草剂创制的瓶颈,发达国家把作物田草害的解决方案转向耐除草剂作物的研发,草甘膦作为“目标”除草剂成为首选。

草甘膦是内吸传导型非选择性茎叶处理除草剂,其主要作用靶标为莽草酸合成途径中的5-烯醇丙酮莽草酸-3-磷酸合成酶(EPSPS)。由于受到草甘膦对EPSPS的抑制,经其催化由磷酸烯醇丙酮酸与莽草酸-3-磷酸向5-烯醇丙酮莽草酸-3-磷酸的转化过程停止,植物体内酪氨酸、色氨酸和苯丙氨酸的生物合成受阻。草甘膦进入植物体优先与EPSPS的活性位点结合,使其构型发生变化,从而抑制其与磷酸烯醇丙酮酸的结合和随后的催化反应^[17-18]。

大部分绿色植物对草甘膦不能降解或代谢较慢,因此草甘膦几乎能杀死所有一年生杂草、多年生杂草、部分灌木和常规作物。过去主要在非耕地、果园行间和作物播种前使用草甘膦^[19]。

1983年,孟山都公司及华盛顿大学的研究人员从土壤农杆菌(*Agrobacterium tumefaciens*)中分离到高度耐受草甘膦的CP4菌株,于1986年成功将其*epsps*基因(编码5-烯醇丙酮莽草酸-3-磷酸合成酶)插入植物基因组中从而获得耐草甘膦植物。1996年,美国、加拿大和阿根廷等5个国家开始商业化种植耐草甘膦大豆‘GTS 40-3-2’。该转化体含CaMV e35S启动子,2个拷贝的增强子及来自于矮牵牛*epsps*基因的叶绿体转运肽序列。2007年,该公司研发出产量性状更好的第二代耐草甘膦大豆‘MON89788’,这一转化体与‘GTS 40-3-2’含有相同*epsps*基因,但其插入位点与‘GTS 40-3-2’不同,并含有增强启动子及调控单元,提高了*epsps*的表达量且具有更优异的农艺性状及产量。之后,转入其他基因的耐草甘膦作物也相继产业化,如转入*gat*基因(编码草甘膦-N-乙酰转移酶)、*gox*基因(编码草甘膦氧化酶)而产生具有不同耐受机制的耐草甘膦大豆、玉米和油菜等^[20]。耐草甘膦作物的研发成功使草甘膦这一非选择性除草剂在作物田的应用成为现实。由于草甘膦具有杀草迅速、防治谱宽泛、除草效果好、使用技术简便、成本低廉、不影响下茬作物种植等优点,到目前为止,耐草甘膦性状仍然是转基因作物的主要性状,全球14种耐除草剂作物(植物)中有9种具有耐草甘膦性状^[21]。

2.2 其他转基因耐除草剂作物

除了耐草甘膦性状以外,研究人员还研发出了耐其他除草剂的转基因作物,包括转入*bar*或*pat*基因的耐草铵膦棉花、大豆、玉米、油菜、水稻、甜菜和菊苣;转入*aad12*基因的耐2,4-D棉花、大豆和玉米;转入*dmo*基因的耐麦草畏棉花、大豆、玉米和油菜;转入*AtAHAS*基因的耐甲氧咪草烟油菜;转入不同基因耐磺酰脲类除草剂玉米(*gm-hra*)、大豆(*csr1-2*和*gm-hra*)、棉花(*S4-HrA*)、亚麻(*als*)和康乃馨(*surB*);转入*avhppd-03*基因的耐硝磺草酮大豆;转入*hppdPF W336*基因的耐异噁唑草酮棉花和大豆;转入*bxn*基因的耐溴苯腈棉花、油菜和烟草等。另外,耐除草剂的多个基因叠加从而耐受不同类别除草剂以及耐除草剂与抗虫、品质改良等基因复合使植物获得多种转基因性状的转化体也相继商业化^[21]。

从1996年转基因作物首次商业化以来,耐除草

剂性状始终是转基因作物的主要性状。到2019年,世界转基因作物种植面积达1.904亿 hm^2 ,美国、巴西、阿根廷、加拿大和印度转基因作物的应用率接近饱和^[22]。2022年,美国耐除草剂转基因大豆、玉米(含耐除草剂/抗虫复合性状)和棉花(含耐除草剂/抗虫复合性状)的种植面积率分别达95%、93%和95%,耐除草剂转化体中耐受草甘膦、草铵膦的转化体占90%以上^[23]。

2.3 转基因耐除草剂作物的优势

耐除草剂作物田能够使用杀草谱宽泛、原来作物对其敏感的除草剂来防治杂草,提高了难治杂草和抗性杂草的防治效果,避免了作物因长残留除草剂药害和除草剂隐形药害而减产,也促进了耕作制度的变革。

耐除草剂作物增产、节本和增效,为种植国带来显著经济、社会和生态效益。从1996年开始种植耐草甘膦作物以来,全球种植耐除草剂大豆、玉米(耐除草剂/抗虫)和棉花(耐除草剂/抗虫)分别增收643亿、170亿和22.5亿美元。在上述3种作物增收数据中,增产的贡献率分别占54%、36%和27%,节支的贡献率分别占45%、64%和63%^[22]。美国、巴西、阿根廷和加拿大种植耐除草剂大豆和油菜,其产量高、品质好、价格低,在国际市场的竞争力显著提升,因此这些国家成为大豆和油菜的生产和出口大国,仅种植第二代的耐草甘膦大豆上述四国就分别增收173.79亿美元、84.87亿美元、8.40亿美元和9.05亿美元。此外,耐除草剂作物的种植促进了巴西农业种植模式的改变,靠草甘膦除草能有效实行少耕免耕,增加大豆种植密度,大豆平均增产达26%,保护了农田环境和水土^[22]。

3 我国转基因耐除草剂作物的研发与产业化前景

3.1 我国耐除草剂作物的研发

在转基因生物新品种培育科技重大专项资金支持下,我国研发出了多个具有自主知识产权的耐除草剂转化体。截至目前,农业农村部发放13个玉米转化体和4个大豆转化体的农业转基因生物生产应用安全证书,其中11个玉米转化体和3个大豆转化体含有耐除草剂基因^[24-28]。

2019年2月27日,‘DBN-09004-6’(‘DBN9004’)获得阿根廷政府的正式种植许可。该转化体为采用农杆菌介导法以pDBN4003载体将来自于土壤农杆菌的*epsps*基因和来自于绿产色链霉菌的*pat*基因

(编码草铵膦乙酰转移酶)转入受体品种‘Jack’,可耐受草甘膦和草铵膦。2020年1月21日,农业农村部发布2019年农业转基因生物安全证书批准清单,抗虫/耐草甘膦玉米‘DBN9936’(转入*cry1Ab*和*epsps*基因)、抗虫/耐草甘膦玉米‘瑞丰125’(转入*cry1Ab/cry2Aj*和*g10evo-epsps*基因),耐草甘膦大豆‘SHZD3201’(转入*g10evo-epsps*基因)均获得生产应用安全证书^[24]。2020年7月15日,耐草甘膦/草铵膦玉米‘DBN9858’(转入*epsps*和*pat*基因)和耐草甘膦大豆‘中黄6106’(转入*g2-epsps*和*gat*基因)分别获得北方春玉米区和黄淮海夏大豆区生产应用安全证书。其中,‘DBN9858’在用于抗虫/耐除草剂玉米配套使用的害虫治理庇护所种植,以防止害虫对转基因玉米品种产生抗性。‘DBN9858’和抗虫/耐除草剂玉米衍生品种配套应用,在提供绿色高效虫害、草害防控的同时,还能有效延缓靶标害虫抗性。‘中黄6106’是采用农杆菌介导法转化大豆子叶节,将含有*g2-epsps*和*gat*基因表达框的载体转化‘中黄10’大豆从而获得耐草甘膦大豆转化体。抗虫/耐除草剂玉米‘DBN9501’(转入*vip3Aa19*和*pat*基因)和耐草甘膦/草铵膦大豆‘DBN9004’也于该批次获得生产应用安全证书。2021年12月27日,聚合*cry1Ab*、*epsps*、*vip3Aa19*、*pat*基因的抗虫/耐除草剂玉米‘DBN3601T’获得在西南玉米区生产应用的安全证书。该转化体由‘DBN9936’和‘DBN9501’杂交转育,耐受草甘膦和草铵膦2种除草剂,抗虫机制增加,对草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)具有高度抗性。2022年和2023年,农业农村部2个批次发放了5个耐除草剂转化体生产应用安全证书,分别是耐啶嘧磺隆/草甘膦玉米‘nCX-1’(转入*CdP450*和*cp4epsps*基因),耐草甘膦玉米‘GA21’(转入*mepsps*基因)、抗虫/耐草甘膦玉米‘Bt11×GA21’(聚合*cry1Ab*、*pat*和*mepsps*基因)、抗虫/耐草甘膦/耐草铵膦玉米‘Bt11×MIR162×GA2’(聚合*cry1Ab*、*pat*、*vip3Aa20*和*mepsps*基因)、抗虫/耐除草剂玉米‘BFL4-2’(转入*cry1Ab*、*cry1F*和*cp4epsps*基因)以及耐草甘膦玉米‘CC-2’(转入*maroACC*基因)^[24-28]。

3.2 我国耐除草剂作物的产业化

自转基因重大专项实施以来,研究人员采用盆栽试验和田间小区试验对C0010.1.1(‘DBN9858’)、C0030.3.5(‘DBN9936’)、12-5(‘瑞丰125’)、CC-2等玉米转化体和S4003.3.14(‘DBN9004’)、ZH10-6(‘中黄6106’)等大豆转化体进行了草甘膦耐受性鉴定。结果表明,上述转化体在41%异丙胺盐水剂

(农达,含30%草甘膦酸) 150~400 g/667 m² (商品量,下同) 施药剂量下均生长良好,大部分转化体耐受800 g/667 m²的剂量。

2019—2020年,研究人员在东北、西北、黄淮、长江流域及西南不同生态类型区12个省(市)对上述转化体进行了多点田间小区试验。结果表明,这些转化体对草甘膦耐受性好,草甘膦田间除草效果理想:41%异丙胺盐水剂150~250 mL/667 m²处理在玉米田除草效果达90%~95%,高于对照药剂4%烟嘧磺隆悬浮剂75 g/m²处理的5.3~15.5个百分点,比对照药剂增产10~20个百分点;在大豆田除草效果达95%左右,高于对照药剂(5%精喹禾灵乳油75 g/667 m²混用48%灭草松水剂150 g/667 m²)的9~28.5个百分点,比对照药剂增产2.3~38.9个百分点。

2021—2022年,农业农村部组织开展了转基因大豆和玉米的产业化试点工作。参加试点种植的‘中黄6106’‘DBN9004’‘DBN9936’‘DBN3601T’和‘瑞丰125’等均已获得生产应用安全证书,并经过了近10年的食用安全和环境安全评价。2021年试点结果显示,上述转基因品种对除草剂表现出较好的耐受性,增产显著,草甘膦除草效果理想。转基因大豆应用43%草甘膦钾盐水剂(泰草达,含35%草甘膦) 171~256.5 g/667 m²于田间施药1次,除草效果可达95%以上,明显优于大豆喷施4种除草剂(精异丙甲草胺土壤处理加精喹禾灵、三氟羧草醚·灭草松茎叶处理)的效果。转基因玉米施用43%草甘膦钾盐水剂1次,除草效果在90%左右,与对照药剂(烟嘧磺隆·硝磺草酮·莠去津)的防效持平或稍低于对照药剂,但草甘膦杀草谱明显宽于对照药剂,尤其是对多年生杂草狗牙根(*Cynodon dactylon*)、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)、刺儿菜(*Cirsium arvense*)等防效优异。测产结果表明,转基因玉米增产达6.7~10.7个百分点;转基因大豆增产达12个百分点以上^[29]。2022年试点结果显示,在不同种植主体、不同地理条件和不同生产水平下,转基因大豆、玉米性状稳定,除草、增产、节本增效和生态效益明显。喷施草甘膦推荐剂量1~2次,转基因大豆田除草效果达95%以上,明显优于农户对常规大豆喷施常规除草剂异噁草松·精喹禾灵·氟磺胺草醚的效果;转基因玉米田除草效果一般可达90%左右,与农户对常规玉米喷施常规除草剂烟嘧磺隆·硝磺草酮·莠去津的防效持平。由于使用同一种低残留除草剂,可有效解决大豆田、玉米田使用不同除草剂互相影响的问题,

有利于大豆-玉米带状复合种植和后茬作物轮作。

3.3 我国耐除草剂作物应用的前景

转基因耐除草剂大豆、抗虫/耐除草剂玉米生产应用安全证书的发放,标志着我国转基因产业化应用条件已经成熟。田间试验及试点种植良好的表现预示着这些获得安全证书转化体的衍生品种在生产上具有广阔的推广前景。转基因耐除草剂作物商业化将是有效解决我国除草剂使用过程中出现的诸多问题的一种新手段,也是提升粮食产业国际竞争力的有力措施。可以预测,我国耐除草剂作物草害治理体系的大面积推广将在增产、节本和减少作物药害,提升产品竞争力,促进种植结构调整,减少机械作业碳排放,提高环境生物安全性等方面起到积极作用^[30]。

耐除草剂作物种植也将引起草害防控技术及目标除草剂管理的变革。一是由于耐除草剂作物及草甘膦的特性,“种子+除草剂+种植指导”这种备受农户欢迎的模式或将成为转基因耐草甘膦作物研发种业和除草剂研发企业经营的主要模式。采用标识制度对获得登记证的配套“目标”除草剂实行特别标识,可避免除草剂误用产生药害。二是在适宜种植区整县域推进耐除草剂作物种植将成为区域性控草模式的最佳选择。我国有2.4亿农户,一家一户式的微型家庭农场面积平均只有0.5 hm²。在如此小的面积上配置多种作物、多个品种及不同种植方式共存是我国农业的特点,这一特点决定了我国在耐除草剂作物的种植管理和“目标”除草剂应用技术上更加严格^[31-32]。试点种植结果也证实,转同一种基因的作物相邻种植和间套种,不会因“目标”除草剂漂移或误用影响其他作物的生长。三是转基因耐除草剂作物田杂草种群监测及抗性治理将成为一个持续研究的课题。国外转基因作物商业化实践证实,长期单一使用草甘膦导致杂草种群变化及抗草甘膦杂草演变^[33-36]。美国1996年开始大面积种植耐草甘膦大豆,2000年、2004年和2005年在大豆田分别监测到抗草甘膦小飞蓬(*Conyza canadensis*)、豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)、三裂叶豚草(*Ambrosia trifida*)、长芒苋(*Amaranthus palmeri*)和糙果苋(*Amaranthus tuberculatus*)。在全球发现的56种抗草甘膦杂草中,美国、巴西、阿根廷和加拿大4个大面积种植耐草甘膦作物的国家监测到31种,其中23种生长在草甘膦使用历史最长的大豆田^[33]。我国虽然尚未大面积种植耐草甘膦作物,但也在非耕地监测到抗草甘膦小飞蓬(*Conyza canadensis*)和牛筋草

(*Eleusine indica*)^[37-38]。从国情及国外耐除草剂作物商业化经验来看,未来5年,草甘膦将是我国耐除草剂作物田主要应用的“目标”除草剂。随着耐除草剂作物的广泛种植,在同一地区连年施用草甘膦,杂草将不可避免地产生抗药性。长期跟踪杂草种群变化,在种群监测结果及抗性治理理念的指导下,构建耐除草剂作物草害治理体系;根据区域性杂草种类、发生规律及种植模式,有选择地种植单基因、基因叠加或基因复合的耐除草剂作物,科学使用草甘膦或“草甘膦+”配套除草剂,辅助综合控草技术措施,将为耐除草剂作物的可持续发展提供技术保障。

参考文献

- [1] 李香菊.近年我国农田杂草防控中的突出问题与治理对策[J].植物保护, 2018, 44(5): 77-84.
- [2] GREEN M J. Evolution of glyphosate-resistant crop technology[J]. Weed Science, 2009, 57(1): 108-117.
- [3] 苏少泉.世界耐草甘膦大豆的新进展[J]. 农药, 2007, 46(2): 73-76.
- [4] Commercial GM traits list[EB/OL]. (2022-12-31) [2022-12-31]. <http://www.isaaa.org/resources>.
- [5] 董峻.在稳慎中坚定前行——我国农业转基因研发成效综述[EB/OL]. (2019-12-30)[2022-12-30]. <http://www.news.cn>
- [6] CHAUHAN B S. Grand challenges in weed management [J]. Frontiers in Agronomy, 2020, 1: 3.
- [7] 李扬汉. 中国杂草志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [8] 强胜. 杂草学 第二版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [9] 李香菊, 崔海兰, 陈景超, 等. 东北玉米田除草剂减施增效技术途径探讨[J]. 玉米科学, 2021, 29(3): 92-99.
- [10] 梁帝允, 刘都才, 王凤乐, 等. 2015年我国部分稻区杂草抗药性概况及治理建议[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(2): 57-59.
- [11] ZHU J, WANG J, TOMMASO A D, et al. Weed research status, challenges, and opportunities in China[J]. Crop Protection, 2020, 134: 104449.
- [12] 李卫东, 王广祥, 张弋川. 250 g/L氟磺胺草醚水剂对大豆田阔叶杂草的防治效果[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(18): 10934-10935.
- [13] 毛连纲, 袁善奎, 李富根, 等. 基于登记用量分析我国四大主粮作物田除草剂的登记现状[J]. 植物保护学报, 2020, 47(5): 962-972.
- [14] 李香菊, 杨殿贤, 赵郁强, 等. 除草剂对作物产生药害的原因及治理对策[J]. 农药科学与管理, 2007, 25(3): 39-44.
- [15] 芦志成, 张鹏飞, 李慧超, 等. 中国农药创制概述与展望[J]. 农药学报, 2019, 21(S1): 551-579.
- [16] LEE D L, PRISBYLLA M P, CROMARTIE T H, et al. The discovery and structural requirements of inhibitors of p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase[J]. Weed Science. 1997, 45(5): 601-609.
- [17] 苏少泉. 草甘膦述评[J]. 农药, 2005, 44(4): 145-149.
- [18] 朱国念, 楼正云, 孙锦荷. 草甘膦对水生生物的毒性效应及环境安全性研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学学报), 2000, 26(3): 309-312.
- [19] CERDEIRA A L, DUKE S O. The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35: 1633-1658.
- [20] 李东阳, 肖冰, 张旭冬, 等. 转基因耐除草剂大豆发展现状与展望[J]. 大豆科学, 2022, 41(6): 733-739.
- [21] ISAAA. Commercial GM trait: herbicide tolerance[DB/OL]. [2022-12-29]. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/gmtrait>.
- [22] 国际农业生物技术应用服务组织. 2019年全球生物技术/转基因作物商业化发展态势[J]. 中国生物工程杂志, 2021, 41(1): 114-119.
- [23] USDA. Adoption of genetically engineered crops in the U.S [DB/OL]. [2022-12-29]. <https://www.ers.usda.gov/data-products>.
- [24] 农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2020-1-21) [2022-12-30]. <http://www.moa.gov.cn>.
- [25] 农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2020-7-15) [2022-12-30]. <http://www.moa.gov.cn>.
- [26] 农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2021-12-27) [2022-12-30]. <http://www.moa.gov.cn>.
- [27] 农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2022-4-29) [2022-12-30]. <http://www.moa.gov.cn>.
- [28] 农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2023-1-13) [2023-1-15]. <http://www.moa.gov.cn>.
- [29] 重科学严监管,打好种业翻身仗[EB/OL]. (2021-12-24) [2022-12-30]. <http://www.people.com.cn/GB/59476/review/20211224.html>.
- [30] 于惠林, 吴孔明. 中国转基因大豆的产业化策略[J]. 生物技术通报, 2023, 39(1): 1-15.
- [31] 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, 2001, 37(6): 32-37.
- [32] 李云河, 彭于发, 李香菊, 等. 转基因耐除草剂作物的环境风险及管理[J]. 植物学报, 2012, 47(3): 197-208.
- [33] Weeds resistant to inhibition of enolpyruvyl shikimate phosphate synthase HRAC group 9 (Legacy G)[DB/OL]. [2022-12-30]. <http://www.weedscience.org/Pages/MOA.aspx?>
- [34] CULPEPPER A S, GREY T L, VENCILL W K, et al. Glyphosate-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) confirmed in Georgia[J]. Weed Science, 2006, 54(4): 620-626.
- [35] YOUNG B G, KNEPP A W, WAX L M, et al. Glyphosate translocation in common lambsquarters (*Chenopodium album*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) in response to ammonium sulfate [J]. Weed Science, 2003, 51(1): 151-156.
- [36] DILLIOTT M, SOLTANI N, HOOKER D C, et al. Strategies to improve the control of glyphosate-resistant horseweed (*Erigeron canadensis*) with glufosinate applied preplant to soybean[J]. Weed Technology, 2022, 36(2): 289-294.
- [37] 吴加军, 宋小玲, 强胜, 等. 抗草甘膦小飞蓬检测方法的建立[J]. 江苏农业科学, 2006(6): 187-189.
- [38] CHEN J, CUI H, MA X, et al. Distribution differences in the EPSPS gene in chromosomes between glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible goosegrass (*Eleusine indica*) [J]. Weed Science, 2020, 68(1): 33-40.

(责任编辑:高蕾)