

我国耐除草剂转基因作物研发与产业化应用前景

李香菊

(中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193)

摘要 基因重组技术的发展突破了作物有性杂交的限制,为培育耐除草剂作物提供了新途径。转基因作物种植产生了显著的经济效益、社会效益和生态效益,种植面积迅速增长。全球转基因作物 1996 年仅 170 万 hm^2 ,2022 年种植面积扩大到 2.022 亿 hm^2 ,增加了近 120 倍。面积最大的前 5 个国家转基因作物种植比例均在 90%以上,阿根廷种植比例接近 100%,耐除草剂性状一直是转基因作物的主要性状。2008 年,我国启动了转基因生物新品种培育科技重大专项,利用生物育种技术研发出中黄 6106、DBN8002、DBN9936、DBN9858、DBN3601T 等多个含有耐除草剂草甘膦基因的转化体,并获得农业转基因生物生产应用安全证书。2021 年—2023 年,我国在云南、内蒙古等地开展了转基因作物试点种植,结果表明,草甘膦在上述转化体及其衍生品种上应用,除草效果好、增产节本优势明显,适合不同的轮作与栽培模式。本文概述全球转基因作物的研发和商业化应用情况,分析我国农田杂草危害现状及防控需求,结合具体国情和转基因耐除草剂作物应用需求,论述其在我国产业化应用的前景,以期对转基因耐除草剂作物的研究、种植和草害可持续控制提供参考。

关键词 耐除草剂转基因作物; 草甘膦; 草害治理; 产业化种植

中图分类号: S 482.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2023473

Development of herbicide tolerant crops and their commercialization in China

LI Xiangju

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

Abstract Discovery of recombinant DNA technologies has broken the barriers of crop sexual hybridization in breeding of genetically modified herbicide-tolerant crops, which have brought significant economic, social, and ecological benefits, with a rapid increase in planting area. The global commercial growing area of genetically modified (GM) crops has made continuing growth and the total growing area expanded to 202.2 million hectares in 2022, an increase of nearly 120 times compared to those in 1996 (1.7 million hectares). Application of GM crops in the top five countries with the largest area all have a planting proportion over 90%, while Argentina has a planting rate approaching 100%. Herbicide tolerance has always been the main trait of GM crops. China launched the major special fund for National GMO New Variety Breeding Program in 2008, to develop events containing glyphosate tolerant gene, such as Zhonghuang 6106, DBN8002, DBN9936, DBN9858, DBN3601T, and obtained the approvals of agricultural GMO's safety certificate for cultivation use issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. From 2021 to 2023, China carried out the field demonstration of transgenic crops in Yunnan, Inner Mongolia and other three provinces. The results showed that the application of glyphosate on these events and cultivars not only resulted high control efficacy of weed, increased crop yield and saved cost, but also contributed to soybean-corn intercropping pattern and crop rotation. In this article, the global development and commercialization of GM crops were summarized and the situation in the demand of weed control in China was analyzed, the development and prospective strategies have been proposed, which would provide references for the research, development and management of herbicide tolerant crops.

收稿日期: 2023-09-11 修订日期: 2023-09-22

基金项目: 科技创新 2030-重大项目 (2022ZD0402102)

联系方式: E-mail: xjli@ippcaas.cn

Key words herbicide tolerant transgenic crops; glyphosate; weed control; commercialization

杂草与作物竞争生活资源,传播病虫害,分泌有毒物质,影响机械收获,降低经济效益,是严重威胁作物产量和品质的一大类有害生物。除草剂以其快速、高效、低成本在现代农业中占据重要地位。然而,最近 20 年,除草剂创制步伐缓慢,新作用靶标化合物研发不能完全满足农田杂草防控需求。

生物技术的发展突破了作物有性杂交的限制,为培育耐除草剂作物新品种提供了有效手段^[1-2]。通过生物育种把耐除草剂基因导入受体作物或对受体作物靶标基因进行编辑,显著提高受体对“目标”除草剂的耐受性,从而拓宽已有除草剂在作物上的应用范围^[3-4]。1996 年以来,转基因耐除草剂大豆、油菜、玉米、棉花等在美国、加拿大、巴西、阿根廷等国大量种植,产生了显著经济效益、社会效益和生态效益。至 2022 年,全球转基因作物种植面积达到 2.022 亿 hm^2 ^[2,4]。

我国是转基因作物研究起步较早的国家之一。20 世纪 80 年代开始进行植物转基因技术探索,国家“转基因生物新品种培育重大专项”的实施,推动了转基因生物新品种研发^[5]。目前,科研单位、企业等应用转基因技术,创制了具有自主知识产权的耐除草剂基因,研发出耐除草剂以及复合耐除草剂与抗虫性状的多个转化体,对提升我国生物育种创新能力与核心竞争力起到了重要作用。2021 年—2023 年,我国在云南、内蒙古等 5 省区开始了大豆、玉米两种转基因作物试点种植,增产、节本成效显著。

本文在对全球转基因耐除草剂作物研发和商业化应用情况进行概述的基础上,分析我国农田杂草危害现状及防控需求,结合国情和转基因产业化需求,论述转基因耐除草剂作物在我国开发利用的前景和发展策略,为转基因耐除草剂作物在我国的产业化应用提供参考。

1 全球转基因耐除草剂作物研发现状

1.1 转基因商业化态势

1996 年美国、巴西、加拿大等国家开始大面积种植转基因作物,种植面积 170 万 hm^2 ,此后转基因作物在全球种植面积逐渐扩大,到 2022 年种植面积达 2.022 亿 hm^2 ,比 1996 年增加了近 120 倍,种植

最多的前 5 个国家美国、巴西、阿根廷、加拿大、印度转基因作物面积接近饱和(表 1)^[4]。

**表 1 全球转基因植物商业化种植情况
(种植面积最大的 5 个国家)¹⁾**

Table 1 Planting areas of genetically modified plants worldwide (the top five countries)

国家 Country	作物 Crop	面积/ (百万 hm^2) Area	首次批准 种植年份 Year for cultivation use
美国 United States	大豆	71.5	1994
	玉米		1995
	棉花		1995
	油菜		1994
	甜菜		1998
	马铃薯		1998
	水稻		2006
	小麦		1998
	菊苣		1997
	亚麻		1999
巴西 Brazil	苜蓿	52.8	2005
	狗牙根		2003
	大豆		1998
阿根廷 Argentina	玉米	24.0	2007
	棉花		2008
	苜蓿		2001
加拿大 Canada	大豆	12.5	1996
	玉米		1995
	油菜		1995
	甜菜		2001
	马铃薯		1999
	棉花		2005
	亚麻		1996
印度 India	苜蓿	11.9	2005
	棉花		2002

1) 种植面积为 ISAAA 2019 年统计数字。

The data is based on statistics in 2019 from ISAAA.

耐除草剂作物是全球转基因作物研究和应用成功的典范。1994 年耐草甘膦大豆‘GTS 40-3-2’开始在美国种植,1995 年至 1996 年扩大到阿根廷、加拿大、墨西哥和乌拉圭,到目前为止,耐除草剂性状一直是转基因作物的主要性状。2019 年,单一耐除草剂作物种植面积 8 150 多万 hm^2 ,占转基因作物面积的 43%,复合耐除草剂、抗虫转基因作物 8 510 多万 hm^2 ,占 45%,因此,有 88% 的转基因作物含有耐除

草剂基因^[6]。大豆、玉米、棉花、油菜、甜菜和苜蓿是几种大面积种植的主要耐除草剂作物,其中,前 4 种作物分别占转基因作物的 48.2%、32%、13.5%和 5.3%,其他作物占 1%^[4,6]。美国 2022 年转基因作物种植面积达 7 470 万 hm²,是全球转基因作物种植面积最大的国家,其中大豆、棉花、玉米转基因品种种植比例分别为 97%、95%和 93%,油菜、甜菜种植比例近 100%,棉花和玉米为复合耐除草剂、抗虫等性状,大豆、油菜、甜菜基本是耐除草剂性状^[7]。在 44 个产业化种植转基因作物的国家和地区中,耐除草剂作物种植国 38 个^[6]。随着基因工程研究的深入,创制的转基因耐除草剂植物达 14 种。其中既有大豆、玉米、马铃薯、水稻、小麦等粮食作物,也有棉、油菜、甜菜、烟草、亚麻等经济作物,还有狗牙根、苜蓿、菊苣、康乃馨等草坪、饲草和花卉^[6,8]。

表 2 全球商业化应用的耐除草剂基因、目标除草剂及代表性转化体¹⁾

Table 2 The list of genes, target herbicides and events commercialized globally

序号 No.	基因 Gene	基因来源 Source	目标性状 Function	代表性转化体 Event
1	CP4 <i>epsps</i>	<i>Agrobacterium</i> sp.	草甘膦	GTS-40-3-2, NK603
2	<i>epsps</i>	<i>Zea mays</i>	草甘膦	GA21
3	<i>2mepsps</i>	<i>Zea mays</i>	草甘膦	FG72, HCEM485
4	<i>goxv247</i>	<i>Ochrobactrum anthropi</i>	草甘膦	MON810, GT200
5	<i>gat</i>	<i>Bacillus licheni formis</i>	草甘膦	DP356043, 98140
6	<i>bar</i>	<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	草铵膦	A5547-12, W62
7	<i>pat</i>	<i>Streptomyces viridochromogenes</i>	草铵膦	A2704-1, DBN9858
8	<i>aad-12</i>	<i>Deftia acidovorans</i>	2,4-D	DAS44406-6, 81910
9	<i>ft_t</i>	<i>Sphingobium herbicidovorans</i>	2,4-D	MON87429
10	<i>gm-hra</i>	<i>Glycine max</i>	磺酰脲类	DP305423, DP356043
11	<i>zm-hra</i>	<i>Zea mays</i>	磺酰脲类	98140
12	<i>als</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	磺酰脲类	FP967
13	<i>csr1-2</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	磺酰脲类	CV127
14	<i>AtAHAT</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	咪唑啉酮类	LBFLFK
15	<i>bxn</i>	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	溴苯腈	31707, OXY-235
16	<i>dmo</i>	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	麦草畏	MON87708, MON87419
17	<i>hppd</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	异噁唑草酮	FG72, GH811
18	<i>avhppd 03</i>	<i>Avena sativa</i>	硝磺草酮	SYHT0H2

1) 数据来源为 ISAAA 2023 年数据。

The data is based on statistics in 2023 from ISAAA.

1.3 耐草甘膦作物的研发及优势

草甘膦是内吸传导型非选择性除草剂,主要作用靶标为 5-烯醇丙酮酰莽草酸-3-磷酸合成酶(EP-SPS)。EPSPS 催化磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)和磷酸莽草酸(S3P)生成 5-烯醇式丙酮酰莽草酸 3-磷酸(EPSP)。草甘膦进入植物体后,竞争性与 EPSPS

1.2 商业化的耐除草剂基因

全球商业化应用的耐除草剂基因、目标除草剂及代表性转化体见表 2。这些基因包括耐草甘膦基因 *epsps*(5-烯醇丙酮酰莽草酸-3-磷酸合成酶基因)、*gat*(草甘膦 N-乙酰转移酶基因)、*goxv247*(草甘膦氧化还原酶基因)等,耐草铵膦基因 *pat* 和 *bar*(草铵膦乙酰转移酶基因)、耐磺酰脲类除草剂基因 *als*(乙酰乳酸合成酶基因)等。目前,转基因作物已经由单一耐除草剂向复合耐除草剂、抗虫、抗逆、品质改良等多种性状发展^[8]。例如聚合抗虫、耐草甘膦和异噁唑草酮的棉花,聚合抗虫、叠加耐草甘膦、草铵膦、麦草畏、2,4-D 的玉米,聚合耐草甘膦、耐盐大豆,耐草甘膦、品质改良油菜等。美国早在十几年前就批准了含 8 个基因具有耐草甘膦、草铵膦和抗 3 种害虫性状的玉米‘SmartStaxTM’种植^[9]。

的活性位点结合,引起蛋白质构型变化,从而抑制其与 PEP 的结合和随后的催化反应^[10-11]。大部分绿色植物不能降解草甘膦或代谢较慢,因此草甘膦防治谱非常宽泛,既能杀除杂草也能杀死常规作物。过去主要用于非耕地、宽行作物行间和作物播种前除草^[12]。1983 年,孟山都公司从土壤农杆菌

Agrobacterium tumefaciens 分离到高度耐受草甘膦的菌株(CP4 菌株,该菌株的 EPSPS 对草甘膦不敏感),1986 年,他们采用农杆菌介导转化法将 *epsps* 基因插入植物基因组获得耐草甘膦植物,随后,该公司将 CP4 *epsps* 基因导入受体大豆‘A5403’中,培育出耐草甘膦的第一代转基因大豆 GTS40-3-2 (Roundup Ready® GTS40-3-2),1996 年,经美国食品与药品管理局(FDA)批准后在美国、加拿大等地商业化种植。GTS40-3-2 是最早、应用最广泛的转基因大豆转化体,通过与其他亲本杂交等育种手段,美国目前已经培育出性状优良、高产和广适性的不同大豆品种^[13]。MON89788 为第二代耐草甘膦大豆,与 GTS40-3-2 相比,该转化体的 CP4 *epsps* 基因插入位点不同,并含有增强启动子及调控单元,提高了对草甘膦耐受性,农艺性状及产量更优异。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 种作物具有耐草甘膦性状^[6]。

耐草甘膦作物增产、节本、增效优势明显,经济、社会和生态效益显著。据 ISAAA 和美国农业科学与技术理事会核算,常规大豆除草通常使用 3~5 次除草剂,耐草甘膦大豆使用 1~2 次草甘膦即可有效控制杂草危害,除草成本比常规大豆减少 56%。从 1996 年到 2019 年,全球种植耐除草剂大豆、抗虫耐除草剂玉米和抗虫耐除草剂棉花分别增收 643 亿、170 亿美元和 22.5 亿美元^[14]。美国、巴西、阿根廷和加拿大仅种植孟山都 MON89788 大豆的衍生品种就分别增收 173.79 亿、84.87 亿、8.40 亿美元和 9.05 亿美元。草甘膦的使用还在很大程度上改变了农业种植模式,促进少耕免耕、有利于保持水土和增加作物种植密度^[14]。

2 我国研发耐除草剂作物的意义

2.1 产业需求

我国地域辽阔,不同生态类型区杂草种类差异较大。据记载,我国田园杂草有 1 400 多种,其中区域性恶性杂草 96 种,恶性杂草 37 种^[15-16]。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 0.933 亿 hm^2 次以上,形成草害的面积 0.51 亿 hm^2 次,平均减产 9.7%。以玉米为例,因杂草种类、密度、发生时间不同,不除草玉米田减产 22.7%~100%,北方春玉米不除草一般减产 50%以上,部

分地块近乎绝产^[17-19]。化学除草是农田除草的主要方式。2021 年,在全国种植业使用的 24.8 万 t(折百)农药中,除草剂占 40%以上。农村劳动力向城镇转移导致用工成本增加,农田草害防控更依赖于除草剂使用。

我国农田化学除草存在以下问题:一是农田杂草种群复杂性与除草剂防治谱较窄的矛盾。目前登记使用的除草剂品种近 200 个,但同质化品种多,大部分选择性除草剂杀草谱窄。由于杀草谱的局限,一种除草剂单用,对农田多种杂草组成的群落防效不佳,甚至 2~3 种除草剂混用也不能达到理想防效。例如大豆田精喹禾灵、烯草酮、高效氟吡甲禾灵等禾本科杂草除草剂与氟磺胺草醚、灭草松、三氟羧草醚等阔叶杂草除草剂混用,推荐剂量下对多年生杂草、蓼科 Polygonaceae、藜科 Chenopodiaceae、旋花科 Convolvulaceae 杂草等防治效果较差^[20]。农民为提高防效不得不增加阔叶杂草除草剂的剂量,作物药害风险增加,防治成本提高。二是作物安全生产需求与除草剂选择性指数低的矛盾。全球使用的大部分除草剂选择性有限,选择性指数超过 3 的品种较少。除草剂选择性指数较低或土壤残留期长,为作物安全生产带来隐患^[21]。以玉米为例,乙草胺、莠去津、烟嘧磺隆等主推除草剂均有一定安全性缺陷。烟嘧磺隆对甜玉米、糯玉米、爆裂玉米品种安全性差,安全施药窗口期窄;使用乙草胺后遇到降雨作物易发生药害,导致减产;莠去津对后茬敏感作物甜菜、油菜、大豆、瓜类等的药害风险已经凸显,影响轮作倒茬。三是作物多种栽培模式与配套除草剂缺乏的矛盾。水稻直播、抛秧栽培,玉米免耕栽培,小麦撒播等轻简化栽培种植方式下杂草在竞争中占据优势。例如玉米免耕种植时,杂草出苗早于玉米,“大龄”杂草难以防治;水稻直播栽培,千金子 *Lep-
tochloa chinensis*、杂草稻 *Oryza sativa*、李氏禾 *Leersia hexandra* 等发生加重^[17,19,21-23]。尤其是目前推广的大豆玉米带状复合种植,因缺乏两种作物共同应用的除草剂品种,在一定程度上影响了推广速度及成效^[24-25]。

提升化学除草水平在很大程度上依赖于除草剂研发领域的技术创新。但农药创制投入大、风险高、周期长。据统计,创制一个农药新品种,需要投入 3 亿美元,历时 12 年,筛选约 16 万个化合物^[26]。从 20 世纪 HPPD 抑制剂类除草剂靶标^[27]发现至今,

世界范围内没有研发出其他新作用机理的除草剂。随着生物技术的发展,发达国家把作物草害解决方案转向耐除草剂作物研发,以突破除草剂创制瓶颈。

2.2 研发耐除草剂作物的意义

采用不同育种手段,使对作物有药害的除草剂能够作为选择性除草剂应用到目标作物,对防治难治杂草起重要作用。

种植转基因耐除草剂作物,利用“目标”除草剂提高对杂草的防治效果。目前商业化的耐除草剂作物尤其是耐草甘膦作物配套使用除草剂草甘膦,杀草谱宽泛、防治效果优异。克服了乙草胺、莠去津等土壤处理剂效果易受土壤质地、有机质含量、pH、覆盖物及土壤湿度等影响的弊端,药效更稳定。尤其是对于棉田、大豆田难治的阔叶杂草藜 *Chenopodium album*、柳叶刺蓼 *Persicaria bungeana*、苘麻 *Abutilon theophrasti* 以及刺儿菜 *Cirsium arvense* var. *integrifolium*、苣荬菜 *Sonchus oleraceus* 等多年生杂草防效优于常规除草剂。

使用“目标”除草剂除草,还可以有效降低作物药害,保护环境。过去,莠去津、咪唑乙烟酸、异噁草松等除草剂每年引发多起药害案例,尤其是玉米田主要除草剂莠去津在我国使用近 50 年,东北地区连续使用莠去津的农田只能连年种植玉米,影响种植结构调整、造成局部地区地表水及地下水的污染^[21]。草甘膦、草铵膦等在土壤中残留期短、不影响后茬作物生长,且对人类、生态和环境友好^[28-29]。我国 3 年试点种植结果显示,草甘膦在转基因大豆和玉米田使用,对昆虫及土壤动物群落无不良影响^[30]。

耐除草剂作物的种植促进耕作制度的变革。作物免耕、少耕及轻简化栽培简便实用、保护环境、促进农业可持续发展,这些耕作栽培模式需要草甘膦这样的非选择性除草剂作为技术保障^[28]。国内外研究数据表明,和传统耕作相比,免耕栽培减少了铧式犁翻耕除治杂草的环节^[31],对上茬遗留的杂草和杂草的地下繁殖器官控制程度低,尤其是叶龄大的难治杂草、多年生杂草、拟态性杂草危害加重。草甘膦还能够解决大豆玉米田使用不同除草剂互相影响的问题,有利于大豆玉米间作和轮作,实现高效生产^[30]。

目前,全球耐除草剂作物多配套草甘膦、草铵膦等“目标”除草剂应用,其防治谱广、在土壤中残

留期短、药效受土壤墒情和土壤条件影响小、成本低廉、使用便捷,尤其是对常规除草剂有抗性的杂草、耐受性强的杂草效果优异,不失为适应多种耕作栽培模式、解决难治杂草、减少药害、降低成本的有效选择。

3 我国转基因耐除草剂作物研发现状与试点种植

3.1 我国耐除草剂作物研发现状

我国转基因植物研究开始于 20 世纪 80 年代,是开展这项技术研究较早的国家之一。国家“转基因生物新品种培育重大专项”的实施,推动了转基因生物新品种研发。2019 年 2 月 27 日,阿根廷政府为我国发放了转基因耐除草剂大豆 DBN-09004-6 (DBN9004) 的种植许可获得。该转化体由北京大北农生物技术有限公司研发,可耐受草甘膦和草铵膦,系采用农杆菌介导法以 pDBN4003 为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 *Streptomyces viridochromogenes* 的 *pat* 基因转入受体品种‘Jack’培育。2020 年 1 月 21 日,农业农村部发放了我国首批农业转基因生物生产应用安全证书,包括 DBN9936 玉米(抗虫耐草甘膦)、瑞丰 125 玉米(抗虫耐草甘膦)和 SHZD3201 大豆(耐草甘膦)^[32]。此后,DBN 9858 玉米(耐草甘膦、草铵膦,用作抗虫耐除草剂玉米配套使用的害虫治理庇护所种植)、中黄 6106 大豆(耐草甘膦)、DBN9004 大豆(耐草甘膦、草铵膦)等转化体分别获得不同区域生产应用安全证书。将耐除草剂(*pat*)、抗虫基因(*vip3Aa19*)复合,研发出的 DBN9501 玉米转化体与 DBN9936 杂交,创制出 DBN3601T 转化体,该转化体聚合了 *cry1Ab*、*epsps*、*vip3Aa19*、*pat* 等 4 个基因,具有耐草甘膦、草铵膦两种除草剂和高抗草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、玉米螟 *Ostrinia nubilalis*、黏虫 *Mythimna separata* 等性状。2023 年,农业农村部发放了 DBN8002 黄淮海夏大豆区生产应用安全证书,该转化体转入 *pat* 和 *mvip3Aa* 基因,具有耐草铵膦和抗鳞翅目害虫性状。

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 个玉米和 4 个大豆含有耐除草剂基因(表 3)^[32-36]。标志着我国抗虫耐除草剂玉米、大豆研发与应用进入新阶段,产业化条件已经成熟。

表 3 农业转基因生物安全证书(生产应用)批准清单

Table 3 List of approvals of agricultural GMO's safety certificate (for cultivation use) issued by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC

审批编号 Codes	申报单位 Applicant	项目名称 Certificate content	有效期/年-月-日 Validity
农基安证字(2019)第 291 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>cry1Ab</i> 和 <i>epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2019-12-02- 2024-12-02
农基安证字(2019)第 292 号	杭州瑞丰生物科技有限公司/浙江大学	转 <i>cry1Ab/cry2Aj</i> 和 <i>g10evo-epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米瑞丰 125 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2020-06-11- 2025-06-11
农基安证字(2019)第 293 号	上海交通大学	转 <i>g10evo-epsps</i> 基因耐除草剂大豆 SHZD3201 在南方大豆区生产应用的安全证书	2019-12-02- 2024-12-02
农基安证字(2020)第 195 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂玉米 DBN9858 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2020-06-11- 2025-06-11
农基安证字(2020)第 196 号	中国农业科学院作物科学研究所	转 <i>g2-epsps</i> 和 <i>gat</i> 基因耐除草剂大豆中黄 6106 在黄淮海夏大豆区生产应用的安全证书	2020-06-11- 2025-06-11
农基安证字(2020)第 214 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂玉米 DBN9858 在黄淮海夏玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 215 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂玉米 DBN9858 在南方玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 216 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂玉米 DBN9858 在西南玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 217 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂玉米 DBN9858 在西北玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 218 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>cry1Ab</i> 和 <i>epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 在黄淮海夏玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 219 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>cry1Ab</i> 和 <i>epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 在南方玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 220 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>cry1Ab</i> 和 <i>epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 在西南玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 221 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>cry1Ab</i> 和 <i>epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9936 在西北玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 223 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>vip3Aa19</i> 和 <i>pat</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 DBN9501 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2020)第 224 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>epsps</i> 和 <i>pat</i> 基因耐除草剂大豆 DBN9004 在北方春大豆区生产应用的安全证书	2020-12-29- 2025-12-28
农基安证字(2021)第 366 号	北京大北农生物技术有限公司	聚合 <i>cry1Ab</i> 、 <i>epsps</i> 、 <i>vip3Aa19</i> 、 <i>pat</i> 基因的抗虫耐除草剂玉米 DBN3601T 在西南玉米区生产应用的安全证书	2021-12-17- 2026-12-16
农基安证字(2022)第 029 号	杭州瑞丰生物科技有限公司/浙江大学	转 <i>CdP450</i> 和 <i>cp4epsps</i> 基因耐除草剂玉米 nCX-1 在南方玉米区生产应用的安全证书	2022-04-22- 2027-04-21
农基安证字(2022)第 030 号	中国种子集团有限公司	聚合 <i>cry1Ab</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>mepsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 Bt11×GA21 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2022-04-22- 2027-04-21
农基安证字(2022)第 031 号	北京大北农生物技术有限公司	聚合 <i>cry1Ab</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 Bt11×MIR162×GA21 在南方玉米区、西南玉米区生产应用的安全证书	2022-04-22- 2027-04-21
农基安证字(2022)第 032 号	中国种子集团有限公司	转 <i>mepsps</i> 基因耐除草剂玉米 GA21 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2022-04-22- 2027-04-21
农基安证字(2022)第 087 号	袁隆平农业高科技股份有限公司/中国农业科学院生物技术研究所	转 <i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1F</i> 和 <i>cp4epsps</i> 基因抗虫耐除草剂玉米 BFLA-2 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2023-01-05- 2028-01-04
农基安证字(2022)第 088 号	中国林木种子集团有限公司/中国农业大学	转 <i>maroACC</i> 基因耐除草剂玉米 CC-2 在北方春玉米区生产应用的安全证书	2023-01-05- 2028-01-04
农基安证字(2023)第 113 号	北京大北农生物技术有限公司	转 <i>mvip3Aa</i> 和 <i>pat</i> 基因的抗虫耐除草剂大豆 DBN8002 黄淮海夏大豆区生产应用安全证书	2023-04-21- 2028-04-20

3.2 我国耐除草剂作物试点种植

同一种作物转入不同耐除草剂基因对除草剂耐

受水平存在差异,相同基因转入同一受体生物时插

入位点不同创制的转化体对目标除草剂耐受性也存

在差别。

中国农业科学院植物保护研究所采用盆栽试验和田间小区试验,鉴定了上述取得生产应用安全证书的转化体对草甘膦的耐受性。结果表明,采用“目标”除草剂(41%草甘膦异丙胺盐水剂,商品名农达,含 30%草甘膦酸)150~400 g/667m²(商品量,下同),上述转化体均生长较好,大部分转化体对 41%草甘膦异丙胺盐水剂耐受程度达 800 g/667m²。2019 年—2020 年,在全国不同生态类型区的多点

试验显示,这些转化体采用草甘膦除草效果理想,150~250 g/667m² 处理剂量下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/667m²)5.3~15.5 百分点,在大豆田除草效果为 83.1%~99.8%,高于对照药剂(5%精喹禾灵乳油 75 g/667m² 与 48%灭草松水剂 150 g/667m² 混用)9~28.5 百分点(表略),玉米、大豆分别比对照药剂增产 10~20 百分点左右(表略)和 0.7~38.9 百分点(表 4),与人工除草产量无明显差异。

表 4 草甘膦和对照药剂处理后转基因耐除草剂大豆增产率¹⁾

Table 4 Yield increase rates of glyphosate tolerant soybeans applied with glyphosate compared with quizalofop-P mixed with bentazone

处理 Treatments	大豆增产率/% Yield increase rate in soybean									
	安徽 Anhui	上海 Shanghai	山东 Shandong	河北 Hebei	北京 Beijing	天津 Tianjin	黑龙江 Heilongjiang	吉林 Jilin	内蒙古 Inner Mongolia	四川 Sichuan
	SHZD3201	中黄 6106 Zhonghuang 6106	中黄 6106 Zhonghuang 6106	DBN9004	DBN9004	DBN9004	中黄 6106 Zhonghuang 6106	中黄 6106 Zhonghuang 6106	DBN9004	中黄 6106 Zhonghuang 6106
草甘膦 150 g/667m ² glyphosate 150 g/667m ²	7.3	8.4	6.0	24.3	15.4	0.7	34.2	11.6	18.4	10.7
草甘膦 200 g/667m ² glyphosate 200 g/667m ²	16.2	9.9	10.1	28.8	19.5	5.0	36.8	17.5	14.6	17.2
草甘膦 250 g/667m ² glyphosate 250 g/667m ²	21.4	13.0	14.0	23.7	18.0	11.5	38.9	21.8	13.8	14.9
对照药剂 CK	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
人工除草 Hand weeding	47.4	15.6	—	31.6	20.3	18.9	40.0	29.0	18.9	14.8

1) 表中数据为 2019 年试验结果,草甘膦使用量为每 667m² 商品量。

The field trials data in 2019 are listed. The dosages for glyphosate are grams per 667m² in product.

2021 年,转基因大豆和玉米的产业化科研试点工作在农业农村部组织下有序开展。参试转化体中黄 6106、DBN9004、DBN9936 和 DBN3601T 等均已获得生产应用安全证书,经过了近 10 年的食用安全和环境安全评价。内蒙古自治区和云南省试点结果显示,上述转化体的衍生品种对除草剂耐受性好,增产显著。43%草甘膦钾盐水剂(商品名泰草达,含 35%草甘膦)171~256.5 g/667m² 在转基因大豆田应用,除草效果达 95%以上,明显优于精异丙甲草胺土壤处理加精喹禾灵、三氟羧草醚·灭草松茎叶处理等 4 种常规除草剂推荐剂量的效果;在转基因玉米田使用,除草效果 90%左右,杀草谱明显宽于对照药剂烟嘧磺隆·硝磺草酮·莠去津,尤其是对多年生杂草狗牙根 *Cynodon dactylon*、双穗雀稗 *Paspalum distichum*、刺儿菜等防效优异。与常规品种比较,转基因大豆、玉米分别增产 12 百分点以

上和 6.7~10.7 百分点。2022 年,试点扩展到上述两个省的农户大田,从试点结果来看,转基因玉米和大豆抗虫耐除草剂性状表现突出,对草地贪夜蛾等鳞翅目害虫的防治效果在 90%以上,喷施草甘膦 1~2 次,除草效果分别为 90%左右和 95%以上,优于农户常规除草剂烟嘧磺隆·硝磺草酮·莠去津和异噁草松·精喹禾灵·氟磺胺草醚在玉米、大豆田除草的效果,作物增产 5.6%~11.6%^[37]。展示了转基因品种大面积种植的除草、增产、节本、增效潜力,另外,由于采用草甘膦除草,可有效解决大豆、玉米相邻种植时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。

4 展望

我国转基因耐除草剂作物应用前景广阔。为了更有效地发挥除草剂对杂草的防控作用及解决除草

剂使用过程中出现的诸多问题,转基因耐除草剂作物的推广种植将是我国农业生产的必然选择和确保我国粮食安全的战略需求^[9]。我国在转基因玉米、大豆新品种研发方面已经有了较多的技术储备,国际市场竞争力逐渐提高。生产应用安全证书的发放,标志着其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上述转化体的衍生品种在生产上具有广阔推广前景。2023年,我国转基因作物产业化应用范围进一步扩大到河北、内蒙古、吉林、四川、云南5个省区的20个县,并在甘肃安排制种^[37]。可以预测,将耐除草剂作物纳入草害治理体系并因地制宜地大面积推广,将在防灾减灾、增产节本、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,改善环境生物安全性等方面起到积极作用^[38]。

耐除草剂作物生产应用也将引起草害防控策略及配套“目标”除草剂管理的变革。3年试点经验表明,我国应该走一条适合中国国情的转基因作物产业化道路。在适宜生态类型区整县域种植耐除草剂作物是区域性控草模式的最佳选择。耐同一个除草剂的作物在一个区域(县、乡)相邻种植,可有效避免因“目标”除草剂漂移影响临近作物生长。小农户集中区,不同种植方式下转基因作物与常规作物相邻种植的特点决定了在这样的区域整县推进更加重要^[9,39]。“种子+除草剂+好农户+种植指导”这种推广模式或将成为转基因耐除草剂作物生产应用的主要模式^[40]。转基因耐除草剂作物管理,包括安全证书发放、品种审定、除草剂登记、种子经营许可、大面积推广等需要政府多个部门参与。在耐除草剂作物“目标”除草剂登记和应用上,需要更加关注除草剂对作物的安全性,“目标”除草剂耐受水平在4倍推荐剂量以下的转化体登记和品种审定难度较大。对获得农药登记证的配套“目标”除草剂实行特别标识,可避免除草剂误用或假冒伪劣除草剂对作物产生药害。

转基因作物产业化应用过程中持续监测杂草种群变化及抗性也是一个需要关注的课题。长期单一使用同一除草剂或作用机制类似的除草剂导致杂草种群演变及抗性杂草发展,常规除草剂如此,转基因使用的“目标”除草剂也不例外^[41-42]。目前,全球报道草甘膦抗性杂草58种,阿根廷、美国、巴西、加拿

大4个大面积种植耐草甘膦作物的国家发现了33种杂草的237个生物型对草甘膦产生抗性^[41]。从我国国情及发达国家耐除草剂作物商业化经验分析,随着同一地区连年施用草甘膦,杂草产生抗药性不可避免^[42-44]。我国已经在长期使用草甘膦的茶园、果园、非耕地发现抗草甘膦牛筋草 *Eleusine indica* 和小飞蓬 *Conyza canadensis*^[45-46]。未来5年,草甘膦将是我国耐除草剂作物田配套的主要“目标”除草剂,针对耐草甘膦作物的生物学特性、外源基因赋予的新性状以及转基因作物产业化环境中的杂草种群组成,长期开展杂草种群演变监测,构建基于监测数据的耐除草剂作物草害管理体系,制定基因轮换和除草剂轮换使用方案,科学使用配套目标除草剂,坚持良好的耕作栽培规范和多项除草措施综合应用,将为耐除草剂作物长期可持续应用提供技术支撑。

参考文献

- [1] GREEN M J. Evolution of glyphosate-resistant crop technology [J]. *Weed Science*, 2009, 57(1): 108 - 117.
- [2] GRAEF F, STACHOW U, WERNER A, et al. Agricultural practice changes with cultivation genetically modified herbicide-tolerant oil seed rape [J]. *Agricultural Systems*, 2007, 94 (1): 111 - 118.
- [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] ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2019 [EB/OL]. (2020-11-30) [2023-09-11]. <https://www.isaaa.org/resources/publication>.
- [5] 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) [2023-09-11]. <http://www.news.cn>.
- [6] ISAAA. Commercial GM trait: herbicide tolerance [DB/OL]. (2023-07-12) [2023-09-11]. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/countrylist/default.asp>.
- [7] USDA. Adoption of genetically engineered crops in the U. S [DB/OL]. (2023-07-12) [2023-09-11]. <https://www.ers.usda.gov/data-products>.
- [8] 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]. 2022, 41(6): 733 - 739.
- [9] 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.
- [10] 苏少泉. 草甘膦述评[J]. *农药*, 2005, 44(4): 145 - 149.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李香菊. 转基因大豆[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2021.
- [14] ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops in 2019;biotech crops drive socio-economic development and sustainable environment in the new frontier [DB/OL]. (2022-12-29) [2023-09-11]. <https://www.isaaa.org/resources/publication>.
- [15] 李扬汉. 中国杂草志[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [16] 强胜. 杂草学[M]. 第2版. 北京:中国农业出版社,2009.
- [17] 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.
- [18] CHAUHAN B S. Grand challenges in weed management [J/OL]. *Frontiers in Agronomy*, 2020,1:3. DOI: 10.3389/fagro.2019.00003.
- [19] 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.
- [20] 李卫东,王广祥,张弋川. 250g/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.
- [21] 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,(3):39-44.
- [22] 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.
- [23] ZHU Jinwen,WANG Jian,TOMMASO A D, et al. Weed research status, challenges, and opportunities in China [J/OL]. *Crop Protection*, 2020, 134: 104449. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.02.001.
- [24] 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.
- [25] 兰献敏,袁会珠,李香菊. 大豆玉米复合种植田间杂草的化学防除[J]. *中国农技推广*,2023,39(5):94-99.
- [26] 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
- [27] 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.
- [28] GREEN J M. Evolution of glyphosate-resistant crop technology [J]. *Weed Science*, 2009,57(1):108-117.
- [29] 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.
- [30] 重科学严监管,打好种业翻身仗 权威专家谈推进生物育种产业化应用[EB/OL]. (2021-12-24) [2023-09-11]. <http://www.people.com.cn/GB/59476/review/20211224.html>.
- [31] 李洪文,胡立峰. 保护性耕作的生态环境效应[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2008.
- [32] 2019年农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2020-01-21) [2023-09-11]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/201912/t20191230_6334015.htm.
- [33] 2020年农业转基因生物安全证书批准清单[EB/OL]. (2020-07-15) [2023-09-11]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/202006/t20200623_6347100.htm.
- [34] 2021年农业转基因生物安全证书批准清单(三)[EB/OL]. (2021-12-27) [2023-09-11]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/202112/t20211227_6385638.htm.
- [35] 2022年农业转基因生物安全证书批准清单(一)[EB/OL]. (2022-04-29) [2023-09-11]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/202204/t20220429_6398211.htm.
- [36] 2022年农业转基因生物安全证书批准清单(二)[EB/OL]. (2023-01-13) [2023-09-11]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/202301/t20230113_6418812.htm.
- [37] 农业农村部科技发展中心、全国农业技术推广服务中心负责人就推进生物育种产业化试点答记者问[EB/OL]. (2023-08-24) [2023-09-11] http://www.moa.gov.cn/gbzwfwqjd/xxdt/202308/t20230824_6434921.htm.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 李香菊. 我国转基因耐除草剂作物研发与应用[J]. *现代农药*,2023,22(1):5-10.
- [41] Weeds resistant to inhibition of enolpyruvyl shikimate phosphate synthase HRAC group 9 (Legacy G) [DB/OL] (2023-08-31) [2023-09-11]. <http://www.weedscience.org/Pages/MOA.aspx?>
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] SOLTANI N, CHARLES G, MARTIN L, et al. Economic impact of glyphosate-resistant weeds on major field crops grown in Ontario [J]. *Weed Technology*, 2023,36(5):629-635.
- [45] 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.
- [46] CHEN Jingchao,CUI Hailan,MA Xiaoyan, 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.