

中国转基因大豆的产业化策略

于惠林 吴孔明

(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: 大豆是事关人民生活和社会经济发展的重要农产品之一, 提高大豆生产水平和增加自给能力, 是中国农业生产必须解决的重大问题。由于中国耕地资源不足的限制, 科技创新是提升大豆生产能力的唯一出路。转基因育种是推动大豆生产发展的颠覆性技术, 对美国、巴西和阿根廷等世界主产国大豆产业的发展发挥了重要作用。经过 20 多年的科技创新, 中国转基因耐除草剂和抗虫育种技术已经成熟, 这些产品的产业化种植可显著降低大豆生产成本和提升单产水平。基于中国转基因大豆技术发展进度和大豆生产的国情特点, 我们提出了采用如下策略科学有序推进产业化工作。一是, 在产品应用时间上, 按照单一耐草甘膦除草剂、多个基因耐草甘膦和草铵膦等多种除草剂, 以及耐除草剂与抗虫等复合性状等产品, 依次推进相关种子的产业化; 二是, 在产品区域布局上, 按照靶标杂草和害虫的地理分布特点顶层设计各种耐除草剂和抗虫大豆产品的种植区域; 三是, 在生物安全管理上, 研发应用抗性杂草和害虫种群监测与治理技术, 延长转基因产品的使用寿命。同时, 还要加强野生大豆资源的保护工作, 降低转基因大豆基因漂移对野生大豆生物多样性的影响。

关键词: 转基因大豆; 耐除草剂; 抗虫性; 产业化; 生物安全

DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2022-0667

Commercialization Strategy of Transgenic Soybean in China

YU Hui-lin WU Kong-ming

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

Abstract: Soybean is one of the most important agricultural products that are closely related to people's life and economic and social development. At present, the improvement of soybean production level and increasing soybean self-sufficiency rate are major problems that must be solved in China's agricultural development. Due to the shortage of cultivated land resources in China, scientific and technological innovation is the only way to improve soybean production capacity. Transgenic breeding is a key technology to promote the development of soybean production, and it has played an important role in the development of soybean industry in the world's major producers such as the United States, Brazil and Argentina. In last 20 years, the breeding techniques of herbicide-tolerant and insect-resistant soybean have obtained a great progress and some products can be used for commercialization in China. And the commercial planting of transgenic soybeans can significantly reduce productive cost and raise soybean yield. Based on the developmental progress of transgenic soybean techniques and the characteristics of soybean production in China, the following strategy is suggested to boost the commercialization scientifically and orderly. Firstly, in terms of product application, based on the single trait product for glyphosate tolerance, and the products with multiple genes for two or more herbicide tolerant traits such as glyphosate and glufosinate tolerance, as well as for stacking of herbicide tolerance and insect resistance traits, the commercialization of the above seeds should be conducted in order. Secondly, in terms of product regional layout, based on occurrence and regional distribution characteristics of target weeds and pests, top-level design of growing zones to herbicide-tolerant and insect-resistant soybean products should be performed. Thirdly, in terms of biosafety management, population monitoring and management techniques for resistant weeds and pests should be developed to extend service period of genetically modified products. In the meantime, the conservation of wild soybean germplasm resources should be strengthened to reduce the negative impact on biodiversity of wild soybean caused by gene flow from transgenic soybean in natural eco-system.

Key words: transgenic soybean; herbicide tolerance; insect resistance; commercialization; biosafety

收稿日期: 2022-05-30

基金项目: 国家转基因重大专项 (2019ZX08012004)

作者简介: 于惠林, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 转基因作物环境安全评价; E-mail: hlyu@ippcaas.cn

通讯作者: 吴孔明, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 植物保护; E-mail: wukongming@caas.cn

大豆既可直接食用,又可提供食用油和饲料蛋白,是事关人民生活和社会经济发展的重要农产品之一。近五年来,中国年均大豆的需求量约为1.1亿t,主要从国外进口,2021年全国大豆产量1 640万t,进口高达9 651.8万t^[1],约占世界大豆贸易量的75%^[2]。随着中国社会经济的发展,人民生活水平不断提高,大豆的供需矛盾将更加突出。提高大豆生产水平,增加自给能力,是中国农业生产必须解决的重大问题。

大豆生产能力的提升,一是增加播种面积,二是提高单产水平。中国耕地资源十分有限,在不减少玉米等粮食作物播种面积的前提下,采取大豆玉米复合种植的生产模式是增加大豆播种面积的主要途径,但除草剂使用等问题成为了这种生产模式大面积应用的限制性因素。就大豆产量水平而言,2021年全球平均亩产187 kg,美国和巴西分别为230 kg和223 kg,而中国仅为130 kg^[1]。影响大豆产量的因素很多,其中转基因种子的使用是不可忽视的重要因素之一。中国如果使用耐除草剂转基因作物育种技术,既能通过解决大豆玉米复合种植杂草防治问题从而增加播种面积,又能提高大豆单产水平。为此,我们综述了全球转基因大豆的研发与应用最新进展,并基于中国国情阐述对转基因大豆商业化种植的观点。

1 国外转基因大豆的产业化过程

1.1 转基因大豆的研发历史

至2021年10月,全球共有40个转基因大豆转化事件获得商业化种植许可^[3],转基因大豆产品开发,已从转单个耐草甘膦基因第一代产品发展到转多基因、叠加了2-3个目标性状的第三代产品。转基因大豆研发历程从性状上可分为耐除草剂、抗虫和品质改良3类(表1-表3)。

1.1.1 耐除草剂(herbicide-tolerant, HT)大豆 耐除草剂是转基因大豆最重要的性状,已获得商业化种植许可的有36个转化体,涉及8种除草剂和12个基因。耐受的除草剂(及耐受基因)主要为草甘膦(*cp4 epsps*、*2mepsps*、*gat4601*)、草铵膦(*pat*、*bar*)、麦草畏(*dmo*)、磺酰脲类(*gm-hra*)、2,4-D(*aad-12*)、异噁唑草酮(*hppdPFw336*、*hppdPf4Pa*)、

硝磺草酮(*avhppd-03*)和咪唑啉酮类(*csr1-2*)(表1)。

转单基因耐除草剂大豆,是开发最早的一类农产品。1994年孟山都公司研发的第一代耐除草剂大豆GTS40-3-2(Roundup ReadyR GTS40-3-2)在美国获得商业化种植许可。该转化体被转入来源于土壤农杆菌CP4菌株(*Agrobacterium tumefaciens* strain, *aroA* CP4)的*cp4 epsps*基因而获得对草甘膦的耐受性。目前已获29个国家(地区)批准种植或用于加工原料,是获批许可最多的转化体。2015年专利过期后,孟山都(现拜耳)公司逐步淘汰相关产品,但一些机构仍然利用该转化事件开展育种工作^[4]。2007年孟山都公司研发的第二代耐除草剂大豆产品MON89788(RReady2Yield™)在美国和加拿大获批商业化种植许可,该转化体含有和GTS 40-3-2相同的*cp4 epsps*基因,但使用了不同的启动子和调控原件,将该基因插入到受体品种A3244中,增强了该基因在敏感组织中的表达量,并将高产育种和耐草甘膦性状进行联合,第二代产品比第一代产品产量提高了7%-11%^[5-6]。该产品于2009年在美国商业化种植^[7],目前已获26个国家(地区)批准种植或用于加工原料^[3]。

耐草铵膦大豆,在1996-1998年有7个转化体获得商业化种植许可,该类产品商品名为Liberty Link® soybean。代表产品A2704-12和A5547-127,均转入来源于绿产色链霉菌(*Streptomyces viridochromogenes*)的*pat*基因,由艾格福(AgrEvo)公司研发(现分别归属巴斯夫(BASF)和拜耳)于2009年在美国上市,主要用于防治抗草甘膦杂草,如长芒苋和糙果苋等^[7]。两个转化体目前在25个和23个国家(地区)分别获批用于种植和加工原料^[3]。耐草铵膦大豆在治理杂草对草甘膦抗药性方面发挥了重要作用,可与耐其他除草剂性状复合培育耐多种除草剂的大豆品种^[7]。2009年,巴斯夫研发的转单基因耐咪唑啉酮类除草剂大豆CV127(Cultivance)获巴西商业化种植许可,目前已有22个国家(地区)批准种植和作为加工原料^[3]。耐两种以上除草剂的转基因大豆如表1所示,其中陶氏益农研发的DAS44406-6(*aad-12*、*2mepsps*和*pat*基因聚合后耐2,4-D、草甘膦和草铵膦)于2013年和2014年获得加拿大和美国商业化种植许可^[3]。

表 1 全球转基因耐除草剂大豆转化事件及商业化概况

Table 1 Transgenic herbicide-tolerant soybean events and their commercial situation in the world						
No.	目标性状 Target trait	研发机构 Developer	转化事件 Events	商品名称 Trade name	转入基因 Gene introduced	商业化种植批准（年份） Approved for commercial planting（Year）
1	耐草甘膦 Glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	GTS 40-3-2 (40-3-2)	Roundup Ready™ soybean	<i>cp4 epsps</i>	美国 USA（1994），加拿大 Canada（1995），墨西哥 Mexio（1996），乌拉圭 Uruguay（1996），阿根廷 Argentina（1996），巴西 Brazil（1998），南非 South Africa（2001），哥斯达黎加 Costa Rica（2001），巴拉圭 Paraguay（2004），玻利维亚 Bolivia（2005），日本 Japan（2005），智利 Chile（2007）
2	耐草甘膦 Glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON89788	Genuity® Roundup Ready 2 Yield™	<i>cp4 epsps</i>	美国 USA（2007），加拿大 Canada（2007），乌拉圭 Uruguay（2007），哥斯达黎加 Costa Rica（2008），日本 Japan（2008）
3	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	A2704-21	Liberty Link® soybean	<i>Pat</i>	美国 USA（1996）
4	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	A5547-35	Liberty Link® soybean	<i>pat</i>	美国 USA（1996）
5	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	W62	Liberty Link™ soybean	<i>bar</i>	美国 USA（1996）
6	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	W98	Liberty Link™ soybean	<i>bar</i>	美国 USA（1996）
7	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	A5547-127	Liberty Link® soybean	<i>pats</i>	美国 USA（1998），加拿大 Canada（1999），日本 Japan（2006），巴西 Brazil（2010），阿根廷 Argentina（2011），乌拉圭 Uruguay（2012）
8	耐草铵膦 Glufosinate tolerance	巴斯夫 BASF	A2704-12	Liberty Link® soybean	<i>pat</i>	美国 USA（1996），加拿大 Canada（1999），日本 Japan（2006），巴西 Brazil（2010），阿根廷 Argentina（2011），乌拉圭 Uruguay（2012）
9	耐咪唑啉酮类除草剂 Imidazolinone herbicide tolerance	巴斯夫 BASF	CV127	Cultivance	<i>csr1-2</i>	巴西 Brazil（2009），阿根廷 Argentina（2013），加拿大 Canada（2012），日本 Japan（2013），巴拉圭 Paraguay（2014），美国 USA（2014）
10	耐草铵膦和非生物因子抗性 Glufosinate tolerance and antibiotic resistance	拜耳作物科学 Bayer CropScience	GU262	Liberty Link™ soybean	<i>Pat, bla</i>	美国 USA（1998）
11	耐磺酰脲类除草剂和草甘膦 Sulfonyleurea herbicide and glyphosate tolerance	杜邦 DuPont	DP356043	Optimum GAT™	<i>gm-hra, gat4601</i>	美国 USA（2008），加拿大 Canada（2009），日本 Japan（2009）
12	耐麦草畏和草甘膦 Dicamba and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87708	Genuity® Roundup Ready™ 2 Xtend™	<i>dmo, cp4 epsps</i>	加拿大 Canada（2012），日本 Japan（2013），美国 USA（2015），巴西 Brazil（2016）
13	耐草甘膦和麦草畏 Glyphosate and dicamba tolerance	孟山都 Monsanto	MON87708 × MON89788		<i>dmo, cp4 epsp</i>	哥伦比亚 Colombia（2012），乌拉圭 Uruguay（2012），日本 Japan（2014），巴西 Brazil（2017）

续表 Continued

No.	目标性状 Target trait	研发机构 Developer	转化事件 Events	商品名称 Trade name	转入基因 Gene introduced	商业化种植批准 (年份) Approved for commercial planting (Year)
14	耐 2,4-D 和草铵膦 2,4-D and glufosinate tolerance	陶氏益农 DOW Agroscience	DAS68416-4		<i>aad-12</i> , <i>pat</i>	加拿大 Canada (2012), 日本 Japan (2014), 美国 USA (2014), 巴西 Brazil (2015)
15	耐草甘膦和异噁唑草酮 Glyphosate and isoxaflutole tolerance	巴斯夫 BASF	FG72		<i>2mepsps</i> , <i>hppdPF W336</i>	加拿大 Canada (2012), 阿根廷 Argentina (2018), 巴西 Brazil (2015), 日本 Japan (2016), 美国 USA (2013)
16	耐草甘膦和增产 Glyphosate tolerance and enhanced photosynthesis/Yield	孟山都 Monsanto	MON87712		<i>cp4 epsps</i> , <i>bbx32</i>	美国 USA (2013)
17	耐 2,4-D、草甘膦和草铵膦 2,4-D, glyphosate and glufosinate tolerance	陶氏益农 Dow AgroScience	DAS44406-6		<i>aad-12</i> , <i>2mepsps</i> , <i>pat</i>	加拿大 Canada (2013), 美国 USA (2014), 阿根廷 Argentina (2015), 巴西 Brazil (2015), 日本 Japan (2015)
18	耐 2,4-D、草甘膦和草铵膦 2,4-D, glyphosate and glufosinate tolerance	陶氏益农 Dow AgroScience	DAS68416-4 × MON89788		<i>aad-12</i> , <i>cp4</i> <i>epsps</i> , <i>pat</i>	加拿大 Canada (2013), 日本 Japan (2014)
19	耐草铵膦和硝磺草酮 Glufosinate and mesotrione tolerance	巴斯夫 BASF	SYHT0H2	Herbicide- tolerant Soybean line	<i>pat</i> , <i>avhppd-03</i>	加拿大 Canada (2014), 美国 USA (2014), 日本 Japan (2016), 阿根廷 Argentina (2017)
20	耐草甘膦、异噁唑草酮和 草铵膦 Glyphosate tolerance, isoxaflutole tolerance and glufosinate tolerance	拜耳作物 科学 Bayer CropScience	Liberty Link® GT27™	FG72 x A5547-127	<i>2mepsps</i> , <i>hppdPF W336</i> , <i>pat</i>	巴西 Brazil (2015), 日本 Japan (2016), 阿根廷 Argentina (2018)
21	耐草铵膦、麦草畏和草甘 膦 Glufosinate, dicamba and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87708 × MON89788 × A5547-127		<i>pat</i> , <i>dmo</i> , <i>cp4</i> <i>epsps</i>	日本 Japan (2017)
22	耐草甘膦和抗旱 Glyphosate tolerance and drought stress tolerance	罗萨里奥农业生 物技术研究所 INDEAR	HB4 × GTS 40-3-2		<i>cp4 epsps</i> , <i>hahb-4</i>	阿根廷 Argentina (2018), 巴西 Brazil (2019)
23	耐草甘膦和草铵膦 Glyphosate and glufosinate tolerance	罗萨里奥农业生 物技术研究所 INDEAR	DBN9004		<i>cp4 epsps</i> , <i>pat</i>	阿根廷 Argentina (2019), 中国 China (2020)

注：数据来源：<https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>，此表中未包含与品种改良、抗虫性状复合的耐除草剂大豆转化事件
Note: Data source: <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>, Not include the events of herbicide tolerant soybeans stacked with insect resistance or modified product quality in the table

1.1.2 抗虫 (insect-resistant, IR) 大豆 孟山都公司首次将抗虫基因 *Cry1Ac* 转入到大豆中，研发的抗虫大豆 MON87701 和 IR/HT 大豆 MON87701 × MON89788 (Intacta™ Roundup Ready™ 2 Pro) 于 2010 年，分别在加拿大和巴西获得商业化种植许可。Intacta™ 产品被认为是第二代转基因大豆，其将抗虫和耐除草剂两大目标性状聚合在一个大豆品种中，有效地防治了杂草和鳞翅目害虫，是转基因大豆研发的一个重要里程碑^[8-9]。目前抗虫 (包括 IR/HT

复合性状) 转化事件有 7 个，抗虫基因均来源于苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis*)，涉及的基因有 *Cry1Ac*、*cry1A.105*、*cry2Ab2*、*cry1F* 和 *cry14Ab-1.b* (表 2)。2018 年孟山都公司通过杂交筛选而获得的 MON87751 × MON87701 × MON87708 × MON89788 (Intacta 2 Xtend) 在巴西获得商业化种植许可，该品系同时将 5 个基因聚合在一起，具有抗虫、耐草甘膦和麦草畏的特性，被认为是第三代转基因大豆，现知识产权归属拜耳公司。该转化体 2021 年 6 月在

表 2 全球转基因抗虫大豆转化事件及商业化概况

Table 2 Transgenic insect-resistant soybean events and their commercial situation in the world						
No.	目标性状 Target trait	研发机构 Developer	转化事件 Events	商品名称 Trade name	转入基因 Gene introduced	商业化种植批准（年份） Approved for commercial planting（Year）
1	鳞翅目害虫 resistance Lepidopteran insect resistance	孟山都 Monsanto	MON87701		<i>Cry1Ac</i>	加拿大 Canada（2010），美国 USA（2010），阿根廷 Argentina（2016）
2	抗鳞翅目害虫和耐草甘膦 resistance and glyphosate tolerance Lepidopteran insect resistance and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87701 × MON89788	Intacta™ Roundup Ready™ 2 Pro	<i>cry1Ac</i> , <i>cp4 epsps</i>	巴西 Brazil（2010），阿根廷 Argentina（2012），乌拉圭 Uruguay（2012），巴拉圭 Paraguay（2013）
3	鳞翅目害虫 insect resistance Lepidopteran insect resistance	孟山都 Monsanto	MON87751		<i>cry1A.105</i> , <i>cry2Ab2</i>	加拿大 Canada（2014），美国 USA（2014），巴西 Brazil（2017）
4	抗鳞翅目害虫和耐草铵膦 resistance and glufosinate tolerance Lepidopteran insect resistance and glufosinate tolerance	陶氏益农 Dow AgroScience	DAS81419		<i>cry1Ac</i> , <i>cry1F</i> , <i>pat</i>	美国 USA（2014），加拿大 Canada（2014），阿根廷 Argentina（2016），巴西 Brazil（2016）
5	耐 2,4-D、草甘膦、草铵膦和抗鳞翅目害虫 2,4-D, glyphosate and glufosinate tolerance and lepidopteran insect resistance 2,4-D, glyphosate and glufosinate tolerance and lepidopteran insect resistance	陶氏益农 Dow AgroScience	DAS81419 × DAS44406	Conkesta Enlist E3™ Soybean	<i>aad-12</i> , <i>2mepsps</i> , <i>Cry1Ac</i> , <i>cry1F</i> , <i>pat</i>	阿根廷 Argentina（2016），巴西 Brazil（2017）
6	鳞翅目害虫、耐麦草畏和草甘膦 resistance, dicamba and glyphosate tolerance Lepidopteran insect resistance, dicamba and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87751 × MON87701 × MON87708 × MON89788		<i>cry1A.105</i> , <i>cry2Ab2</i> , <i>cry1Ac</i> , <i>dmo</i> , <i>cp4 epsps</i>	巴西 Brazil（2018）
7	抗虫和耐异噁唑草酮 isoxaflutole tolerance Nematode resistance and isoxaflutole tolerance	巴斯夫 BASF	GMB151		<i>cry14Ab-1.b</i> , <i>hppdP4Pa</i>	美国 USA（2022）

数据来源（Data source）：<https://www.isaaa.org/gmaprovaldatabase/>

巴西上市，表现出优良的抗虫和除草效果^[10-11]。

1.1.3 品质改良大豆 目前已获得商业化种植许可的品质改良大豆有 9 个转化事件，均为改良油 / 脂肪酸含量转基因大豆。涉及的基因有 5 个，分别为 *gm-fad2-1*、*fatb1-A*、*fad2-1A*、*Pj.D6D* 和 *NcFad3*（表 3）。油酸占大豆总脂肪酸含量的 20% 左右，其性质稳定、抗氧化作用强、有益健康^[12-13]，因此，提高油酸含量是大豆品种改良的重要方面。1997 年杜邦（DuPont）公司研发的高油酸大豆 260-05（G94-1，G94-19，G168）在美国获批种植，其含有大豆来源的 *gmfad2-1* 基因，通过沉默 *fad2-1* 基因，抑制了内

源 δ-12 去饱和酶的产生，阻止油酸形成亚油酸，该转化体使大豆种子中油酸含量提高到 80%^[3]。2009 年杜邦公司研发的高油酸与耐磺酰脲类除草剂复合性状大豆 DP305432（Treus™，Plenish™）在加拿大获批商业化种植。2011 年孟山都公司研发的 2 个品质改良大豆 MON87769 和 MON87705 分别在加拿大和美国获商业化种植许可。MON87769 富含硬脂酸 SDA（常规大豆中未含有），其 SDA 占总脂肪酸含量的 20%–30%，与鱼油中 SDA 类似，可作为动物性 omega-3 脂肪酸替代品，从 MON 87769 中提取的 SDA omega-3 大豆油可广泛用于有益人类健康的食

表 3 全球转基因品质改良大豆转化事件及商业化概况

Table 3 Transgenic modified quality soybean events and their commercial situation in the world						
No.	目标性状 Target trait	研发机构 Developer	转化事件 Events	商品名称 Trade name	转入基因 Gene introduced	商业化种植批准（年份） Approved for commercial planting (Year)
1	改良油 / 脂肪酸、抗生素抗性，视觉标记 Modified oil/fatty acid, antibiotic resistance, visual marker	杜邦 DuPont	260-05 (G94-1, G94-19, G168)		<i>gm-fad2-1</i> (silencing locus), <i>bla</i> , <i>uidA</i>	美国 USA (1997), 加拿大 Canada (2000)
2	耐草甘膦、磺酰脲类除草剂和改良油 / 脂肪酸 Glyphosate tolerance, sulfonyleurea herbicide tolerance, modified oil/fatty acid	杜邦 DuPont	DP305423 × GTS 40-3-2		<i>cp4 epsps</i> , <i>gm-hra</i> , <i>gm-fad2-1</i> (partial sequence)	加拿大 Canada (2009), 日本 Japan (2012), 阿根廷 Argentina (2015)
3	耐磺酰脲除草剂和改良油 / 脂肪酸 Sulfonyleurea herbicide tolerance and modified oil/fatty acid	杜邦 DuPont	DP305423	Treus™, Plenish™	<i>gm-hra</i> , <i>gm-fad2-1</i> (partial sequence)	加拿大 Canada (2009), 美国 USA (2010), 日本 Japan (2010)
4	改良油 / 脂肪酸和耐草甘膦 Modified oil/fatty acid and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87769		<i>Pj.D6D</i> , <i>NcFad3</i> , <i>cp4 epsps</i>	加拿大 Canada (2011), 美国 USA (2012), 日本 Japan (2014)
5	改良油 / 脂肪酸和耐草甘膦 Modified oil/fatty acid and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87705	Vistive Gold™	<i>fatb1-A</i> (sense and antisense segments), <i>fad2-1A</i> (sense and antisense), <i>cp4 epsps</i>	美国 USA (2011), 加拿大 Canada (2011), 日本 Japan (2013)
6	改良油 / 脂肪酸和耐草甘膦 Modified oil/fatty acid and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87705 × MON89788		<i>fatb1-A</i> (sense and antisense segments), <i>fad2-1A</i> (sense and antisense), <i>cp4 epsps</i>	日本 Japan (2013)
7	改良油 / 脂肪酸和耐草甘膦 Modified oil/fatty acid and glyphosate tolerance	孟山都 Monsanto	MON87769 × MON89788		<i>Pj.D6D</i> , <i>NcFad3</i> , <i>cp4 epsps</i>	日本 Japan (2015)
8	改良油 / 脂肪酸、耐草甘膦和麦草畏 Modified oil/fatty acid, glyphosate tolerance and dicamba tolerance	孟山都 Monsanto	MON87705 × MON87708 × MON89788		<i>fatb1-A</i> (sense and antisense segments), <i>fad2-1A</i> (sense and antisense), <i>cp4 epsps</i> , <i>dmo</i>	加拿大 Canada (2015), 日本 Japan (2017)
9	耐麦草畏、草甘膦和改良油 / 脂肪酸 Dicamba tolerance, glyphosate tolerance and modified oil/fatty acid	杜邦 DuPont	DP305423 × MON87708 × MON89788		<i>dmo</i> , <i>cp4 epsps</i> , <i>gm-fad2-1</i> (partial sequence)	日本 Japan (2018)

注：数据来源（Data source）：<https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>

品中^[3]。而 MON87705 改良大豆种子中油酸含量大于 70%，且转入的 *cp4 epsps* 基因使其植株具有耐草

甘膦的特性。上述 4 个品质改良大豆于 2017 年在美国开始商业化种植^[3, 14]。

1.2 转基因大豆的商业化种植

自1996年开始种植转基因耐草甘膦大豆GTS40-3-2以来,转基因大豆的种植面积从50万 hm^2 已增至2019年的9 190万 hm^2 ,其中耐除草剂大豆6 430万 hm^2 ,抗虫和耐除草剂大豆(IntactaTM)2 760万 hm^2 。种植转基因大豆的国家有11个,巴西、美国 and 阿根廷种植面积最大^[15],2019年巴西种植3 510万 hm^2 、美国种植3 043万 hm^2 、阿根廷种植1 753万 hm^2 ^[15]。和美国不同,巴西、阿根廷、乌拉圭和巴拉圭4个国家主要种植IntactaTM,2019年种植面积分别为2 170万 hm^2 、410万 hm^2 、152万 hm^2 和36.3万 hm^2 。

与常规育种大豆相比,转基因抗除草剂大豆促成了除草方式的变革,除草模式由原来多次使用多种选择性除草剂,改为1-2种广谱除草剂。这种简化的除草方式降低了除草成本,提高了除草效率,增加了大豆的产量^[16]。转基因大豆的种植给农户带来了可观的经济效益。2018年全球种植耐除草剂大豆(不包括IntactaTM大豆)经济效益47.8亿美元,1996-2018年23年间总的经济效益达到642.1亿美元,其中包括阿根廷和巴拉圭在大豆收获后种植第二茬作物收益^[17]。2018年,美国农户种植第一代耐除草剂大豆获得2.39亿美元的收益,种植第二代耐除草剂大豆增收25.5亿美元^[18]。巴西、阿根廷、乌拉圭和巴拉圭4个南美国2013-2018年种植IntactaTM大豆累积增收102.4亿美元^[18]。

2 中国转基因大豆产业化的意义

中国大豆生产水平与美国等国家相比存在较大差距,除了受大豆品种遗传改良缓慢和耕地质量较差等因素影响外,还与未采用转基因技术有密切的关系。如在美国种植耐除草剂大豆,可将大豆耕、耙、播、施肥和除草等多项作业一次操作完成,这种集约化和专业化的生产模式极大地降低了生产成本。相比传统大豆,转基因大豆单产水平高、品质好,更具国际竞争力,经济效益十分显著^[19-20]。大豆属土地密集型产品,传统大豆亩产较低,美国 and 巴西通过转基因技术提升了产业水平,占据了世界大豆产业的制高点^[20-21]。中国大豆的生产,除东北等地采用规模化种植模式外,多为小农户小规模种

植,病虫害害的防控工作涉及千家万户,化学农药管理难、用量大,除草剂药害、防治成本高和产量损失大等问题十分突出^[22]。

2.1 转基因大豆产业化有助于控制农业生物灾害

中国大豆种植区主要集中在黑龙江、内蒙古、安徽、河南、四川和吉林等省(区)^[23],草害和虫害是影响各地大豆产量和品质的重要因素。据全国农技推广服务中心统计,大豆虫害发生种类240余种,每年造成10%-15%的产量损失^[13],2019年全国大豆虫害发生7.33千万亩次,防治后仍然造成产量损失10.47万t。大豆田杂草种类120余种^[13],2019年我国大豆草害发生面积7千万亩次,防治后仍然造成损失12.84万t。

大豆害虫以食心虫、苜蓿夜蛾、斜纹夜蛾和草地螟等鳞翅目害虫为主^[13],其中草地螟是东北大豆的重大害虫,2008年草地螟2代幼虫在华北和东北7省大豆种植区大发生,引发了大豆期货市场的震荡^[24-25]。随着东北地区大豆振兴计划推进,大豆种植面积逐年增加,2022年黑龙江省大豆种植面积预计增加约66.67万 hm^2 ^[26],这将加大草地螟区域性灾变的风险。北方春大豆产区如黑龙江省等地,长期采用土壤封闭+苗后使用选择性除草剂的化学除草技术防治杂草,因除草剂连年超量使用而使杂草产生抗性,并带来后茬作物药害严重等突出问题^[27-30]。

与常规大豆相比,转基因抗虫大豆对草地螟等鳞翅目害虫有较高的抗性,基本不需要使用化学农药^[31-35]。耐草甘膦转基因大豆田喷施草甘膦对杂草防除效果显著高于常规化学除草技术^[15, 36-37]。因此,种植转基因抗虫和耐除草剂大豆可高效、低成本控制虫草的发生危害,提高大豆产量和减少农药使用量。

2.2 转基因大豆产业化有助于农业绿色发展

在我国北方春大豆产区如黑龙江省,大豆田广泛施用氟磺胺草醚、氯嘧磺隆、异噁草松等化学除草剂,但残留期长且对后茬玉米、小麦、谷子等敏感作物药害严重,限制了大豆与后茬作物的轮作^[38-40],成为影响农业种植结构调整的主要因素。此外,长期大量使用长残留除草剂,既污染环境又

增加了人畜健康风险^[38]。转基因耐除草剂大豆施用草甘膦或草铵膦等对环境友好、低残留除草剂,对后茬作物安全^[41-42],并因显著减少除草剂使用量而降低了对环境的影响^[43]。据统计,美国种植耐除草剂大豆23年间,除草剂用量减少了3.33万t^[43],除草剂对环境的影响商数(EIQ)降低了20.20%。全球种植转基因耐除草剂大豆23年间,除草剂用量有0.1%(约0.5万t活性成分)的小幅增加,这主要是发展中国家(巴西、巴拉圭和乌拉圭等)除草剂使用范围扩大引起的。总体上,由于使用对环境友好除草剂的增加,EIQ降低了12.90%^[43]。中国种植转基因耐除草剂大豆,可解决大豆田长残留除草剂对后茬作物药害问题,促进粮豆轮作生产模式的推广,利于农业生产的绿色发展。

大豆玉米带状复合种植属于绿色低碳种植模式,每亩可多收大豆50-75 kg,且利用豆根瘤菌的固氮培肥作用可减施纯氮4-6 kg,实现用地养地相结合的目标^[44-45]。玉米大豆带状复合种植模式是提高中国大豆产能、促进农业可持续发展的有效途径^[46]。2021年中国玉米大豆带状复合种植面积46.67万hm²,2022年农业农村部在全国16个省(市、区)组织推广应用约103.33万hm²^[46]。该种植模式由于缺乏兼用型除草剂,一体化控草是“卡脖子”技术难题。除草只能采用苗后定向喷施玉米和大豆专用型除草剂的办法,除草时期要求严格并极易产生药害^[45]。如把耐草甘膦转基因玉米和大豆同时种植,或采用耐玉米田除草剂(硝磺草酮、麦草畏、异噁唑草酮等)转基因大豆与玉米搭配种植,可解决一体化控草的难题,将促进玉米大豆带状复合种植模式的推广应用。

2.3 转基因大豆产业化有助于提高中国大豆竞争力

影响大豆生产成本的因素很多,但防虫控草和产量是主要因素之一。2019和2020年,中国大豆每亩总成本分别为686.33元和720.52元^[23],而同期美国大豆按汇率折算分别为572.61元/亩和564.92元/亩^[47]。据统计,美国农户种植的第一代耐除草剂大豆与常规大豆相比,控草成本每公顷可减少25-85美元^[18],2013-2018年巴西、阿根廷、

乌拉圭和巴拉圭4个国家农户种植抗虫耐除草剂大豆(Intacta™),平均每公顷可减少杀虫剂和除草剂成本19-33美元^[17]。与常规大豆相比,转基因大豆单产更高。美国1991-1995年种植非转基因大豆平均亩单产为161 kg,而1996-2021年种植转基因大豆的平均亩产增加到201 kg,转基因大豆的种植对提高产量发挥了主要作用^[48]。全球种植转基因大豆的23年间共增收2.78亿t,相当于1230万hm²大豆的产量^[49]。此外,转基因大豆与常规育种技术的结合还提高了出油率和油脂成分的改变,如提高油酸的含量等,这也增加了大豆生产的健康价值和经济效益^[50-51]。中国2021年开展了耐除草剂大豆产业化试点工作,结果表明除草成本可降低50%以上,且大豆产量增加了12%^[52]。中国大豆每亩单产较美国和巴西等国低60-100 kg^[11],如种植转基因大豆,则有助于缩小与先进国家的产量差距,增强国产大豆的市场竞争力。

3 推动中国转基因大豆产业化应加强的工作措施

转基因大豆的产业化是涉及科技创新、农业生产、科学普及和国际贸易等诸多方面的系统工程,需多措并举、综合推进。

3.1 规划国产转基因大豆产业化路线图

2008年启动的“转基因生物新品种培育重大专项”推动了中国转基因大豆的研发工作,目前已研发了一批具有自主知识产权、具备产业化应用前景的耐除草剂、抗虫和品质改良大豆新品系^[53-56]。2019-2021年农业农村部发放了转*g10evo-epsps*基因耐除草剂大豆SHZD3201在南方大豆区生产应用安全证书、转*epsps*和*pat*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和转*g2-epsps*和*gat*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^[57]。其中,大北农公司研发的耐除草剂大豆DBN9004已于2019年在阿根廷获批种植,2020年获中国批准用于进口加工原料安全证书^[3, 57]。此外,*Vip3Aa+pat*、*cryIAC/Ab*、*cryIIem*等转基因大豆转化事件研发工作进展顺利,为产业化提供了后备产品^[58-61]。

2021年农业农村部在内蒙古自治区开展了转

基因耐除草剂大豆产业化的试点工作,结果已证明转基因大豆具有高效防治杂草和显著的增产增收作用^[52]。基于目前我国转基因大豆技术发展进度和我国大豆生产的国情特点,国内产业化应在内蒙试点的基础上,从东北地区逐步向华北、华中和南方大豆种植区发展。在产品应用上,应按耐草甘膦除草剂单一性状、多基因耐草甘膦和草铵膦等多种除草剂、耐除草剂与抗虫等复合性状和品质改良性状产品顺序,顶层设计产业化路线图,依次制定针对性政策和有序推进相关工作。国外可优先在阿根廷等南美国家产业化,并逐步向其他国家推广。

3.2 构建转基因大豆的可持续利用技术体系

害虫杂草可以对杀虫毒素和除草剂产生抗性,这是影响转基因大豆产业发展的重要因素,因此要科学使用各种耐除草剂和抗虫大豆产品。在中国北方春大豆产区,苘麻、铁苋菜、鸭跖草、打碗花和问荆等是常发优势杂草,田间和室内药效试验已表明草甘膦对上述几种杂草防效相对较差^[62-66],应在该产区种植耐草甘膦+草铵膦大豆。在东南春夏秋大豆产区和华南四季大豆产区,小飞蓬和牛筋草是常发杂草,但已出现草甘膦抗性^[67-69]。因此,在南方大豆产区,应种植耐草甘膦+草铵膦、耐草甘膦+草铵膦+麦草畏或耐草甘膦+草铵膦+2,4-D(麦草畏和2,4-D对抗草甘膦小飞蓬有较好防除效果)等耐多种除草剂大豆^[70-71]。如种植耐草甘膦单一性状大豆,为保证除草效果,应搭配使用其他作用方式的化学除草剂补充防治。黄淮海夏大豆产区尚未发现抗草甘膦牛筋草和小飞蓬等杂草,可推广种植耐草甘膦大豆。鉴于玉米、大豆和棉花有多种共同的靶标害虫,应综合考虑不同作物的抗虫基因布局和产品研发工作,避免因同一地区、同时种植转同种抗虫基因玉米、大豆和棉花而加大害虫抗性风险。

要研发抗性杂草和害虫种群监测与治理技术,建立中国特色的抗性治理体系。针对耐除草剂大豆转化体,持续监测优势杂草对靶标除草剂的抗性程度。一旦发现杂草产生抗性,要采取多种管理措施相结合的形式进行综合治理^[7, 72-77]。在害虫抗性监测治理方面,要研究不同生态区域主要靶标害虫

的敏感基线和抗性基因频率,持续监测主要害虫对Bt蛋白的抗性程度。当抗性基因频率增加后,需结合其他防治措施来进行补充防治^[14, 31, 78]。由于我国大豆种植地区和玉米种植区高度重叠,可统筹安排转基因抗虫玉米与大豆的抗性监测与治理工作,实施适合我国国情的“高剂量/庇护所”抗性治理策略^[79]。

3.3 加强中国野生大豆的资源保护与利用工作

野生大豆具有抗逆、繁殖系数大、蛋白质高等优良性状,这些性状所携带的优良基因是大豆育种的宝贵基因资源^[80-84]。我国是野生大豆重要起源地,野生大豆种质资源十分丰富^[85-86]。在田间自然条件下,耐除草剂大豆如*epsps*等外源基因可漂移至野生大豆^[87-92],虽漂移最远距离为10 m,漂移率小于万分之一^[90],但杂交后代可育^[93]。转基因大豆外源基因漂移会影响野生大豆种质资源的生物多样性。空间隔离是控制转基因大豆外源基因逃逸的有效策略^[94]。巴西专家建议在转基因大豆种植区域设定10 m以上的隔离带,阻断外源基因的逃逸^[95]。韩国学者建议,在基因漂移率0.01%的阈值下,转基因与野生大豆之间的有效空间隔离距离至少为37.7 m^[96]。因野生大豆在中国分布广泛,如长期大规模种植转基因大豆,其外源基因向野生大豆的漂移将难以避免。

为了降低生产活动和生态环境对野生大豆原生境的影响^[97-98],中国政府通过长期的努力,已建设了野生大豆种质资源库和原位保护区^[98-99],这为转基因大豆的产业化奠定了坚实的基础。要制定适合我国国情的控制转基因大豆外源基因向野生大豆漂移可能产生风险的管理措施,进一步加大野生大豆的保护力度,如增加野生大豆原生境保护区的数量和面积、加强对野生大豆种质资源库和资源数据库建设、加快资源普查和抢救性收集工作等。此外,还要加大野生大豆功能基因挖掘和知识产权保护工作,强化野生大豆资源管理的法制建设。

3.4 打造产学研一体化的转基因大豆研发体系

转基因大豆产业化的根基是生物育种科技创新能力,而中国转基因大豆的创新能力和西方发达国家还有较大的差距^[100]。目前中国研发的转基因大

豆产品还处在跟跑阶段,转基因大豆科技创新自立自强还任重道远。要构建一流的大豆生物育种技术体系,必须实现创新链与产业链的一体化,解决长期存在的基础理论发现、高新技术突破、传统育种技术集成创新和商业化应用工作的碎片化与孤岛化问题。

长期以来,中国的大豆科技创新力量主要集中在科研机构 and 高等院校,企业主要做种子的营销工作,基本不具备科技创新能力。近年来,北京大北农科技公司等企业生物育种科技创新能力有了长足的发展,为构建以企业为主体的转基因大豆商业化研发平台奠定了基础。要通过体制机制创新,整合科研单位、大学和企业科技资源,重构中国大豆生物育种科技创新体系,打造具有国际竞争力的大型种业企业,用转基因技术推动大豆种业的快速发展。

参考文献

- [1] United States Department of Agriculture. World agricultural production [R]. Washington DC : United States Department of Agriculture, 2022.
- [2] World Agricultural Outlook Board. World Agricultural Supply and Demand Estimates [R]. Washington DC : United States Department of Agriculture, 2022.
- [3] International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). GM Approval Database [DB]. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>, 2022.
- [4] Picking Beans. A look at the many 2019 herbicide-tolerant soybean options [EB/OL]. <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/crops/article/2018/10/02/look-many-2019-herbicide-tolerant>, 2018-02-10/2022-05-30.
- [5] Green JM, Castle LA. Transitioning from single to multiple herbicide-resistant crops [M] //Glyphosate Resistance in Crops and Weeds. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2010 : 67-91.
- [6] Clive James. 2008 年全球生物技术 / 转基因作物商业化发展态势——第一个十三年 (1996—2008) [J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29 (2) : 1-10.
James C. Global status of commercialized biotech/GM Crop : 2008-the first thirteenth years, 1996-2009 [J]. China Biotechnol, 2009, 29 (2) : 1-10.
- [7] Nandula VK. Herbicide resistance traits in maize and soybean : current status and future outlook [J]. Plants (Basel), 2019, 8 (9) : 337.
- [8] Bernardi O, Malvestiti GS, Dourado PM, et al. Assessment of the high-dose concept and level of control provided by MON 87701 × MON 89788 soybean against *Anticarsia gemmatilis* and *Pseudoplusia includens* (Lepidoptera : Noctuidae) in Brazil [J]. Pest Manag Sci, 2012, 68 (7) : 1083-1091.
- [9] Justiniano W, Fernandes MG, Viana CLTP, et al. Intacta RR2 PRO® (MON87701 × MON89788) for management of the main target and non-target insects in soybeans [J]. Global Journal of Biology, Agriculture & Health Sciences, 2014, 3 : 11-18.
- [10] Leonardo Gottens. Intacta 2XTend soybean launched in Brazil : Interview with Natália Carvalho from Bayer [EB/OL]. <https://news.agropages.com/News/NewsDetail---39432.htm>, 2021-06-16/2022-05-30.
- [11] Bacalhau FB, Dourado PM, Horikoshi RJ, et al. Performance of genetically modified soybean expressing the Cry1A. 105, Cry2Ab2, and Cry1Ac proteins against key lepidopteran pests in Brazil [J]. J Econ Entomol, 2020, 113 (6) : 2883-2889.
- [12] 程浩, 金杭霞, 盖钧镒, 等. 转基因技术与大豆品质改良 [J]. 遗传, 2011, 33 (5) : 431-436.
Cheng H, Jin HX, Gai JY, et al. Transgenic technology and soybean quality improvement [J]. Hereditas, 2011, 33 (5) : 431-436.
- [13] 李香菊. 转基因大豆 [M]. 北京 : 中国农业科学技术出版社, 2021.
Li XJ. Transgenic soybean [M]. Beijing : China Agricultural Science and Technology Press, 2021.
- [14] ISAAA. Global status of commercialized botech/GM crops in 2017 : biotech crops adoption surges as economic benefits accumulate in 22 years [M]. ISAAA Brief No. 53. Ithaca, NY : ISAAA, 2017.
- [15] ISAAA. Global status of commercialized botech/GM crops in 2019 : biotech crops drive socioeconomic development and sustainable environment in the new frontier [M]. ISAAA Brief No. 55. Ithaca, NY : ISAAA, 2019.
- [16] Brookes G. Weed control changes and genetically modified herbicide tolerant crops in the USA 1996-2012 [J]. GM Crops Food, 2014, 5 (4) : 321-332.
- [17] Brookes G, Barfoot P. GM crop technology use 1996-2018 : farm income and production impacts [J]. GM Crops Food, 2020, 11 (4) : 242-261.

- [18] Brookes G, Barfoot P. GM crops : global socio-economic and environmental impacts 1996-2018 [M]. Dorchester : PG Economics Ltd, UK, 2020.
- [19] 曹永强,王昌陵,王文斌,等.国内外大豆产业、科技现状浅析与我国大豆产业发展思考 [J]. 辽宁农业科学, 2019 (6): 44-48.
- Cao YQ, Wang CL, Wang WB, et al. Analysis of domestic and foreign soybean industry and science and technology and thinking on the development of soybean industry in China [J]. Liaoning Agric Sci, 2019 (6): 44-48.
- [20] 梁丹辉,曲春红.中国大豆产业发展的经济学分析 [M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2020.
- Liang DH, Qu CH. Economic analysis of soybean industry development in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020.
- [21] 李晓俐.巴西大豆产业发展的启示 [J]. 宁夏农林科技, 2014, 55 (4): 44-45, 48.
- Li XL. Enlightenment on the Brazilian soybean industry development [J]. Ningxia J Agric For Sci Technol, 2014, 55 (4): 44-45, 48.
- [22] 陈慧.大豆发展现状及对策分析 [J]. 南方农业, 2022, 16 (2): 179-181.
- Chen H. Analysis of development status and countermeasures in soybean [J]. South China Agric, 2022, 16 (2): 179-181.
- [23] 中华人民共和国农业农村部.全国重点农产品市场信息平台 [DB/OL]. <http://ncpsccx.moa.gov.cn/product-web/#/sing?headingIndex=true&item=1>, 2022-05-30.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National key agricultural products market information platform [DB/OL]. <http://ncpsccx.moa.gov.cn/product-web/#/sing?headingIndex=true&item=1>, 2022-05-30.
- [24] 陈智勇,张智,张云慧.草地螟的发生为害与监测预警技术研究进展 [J]. 应用昆虫学报, 2021, 58 (3): 552-564.
- Chen ZY, Zhang Z, Zhang YH. Progress in research on monitoring and forecasting the occurrence of the beet webworm, *Loxostege sticticalis* [J]. Chin J Appl Entomol, 2021, 58 (3): 552-564.
- [25] 姜玉英,张跃进,杨宝胜,等.草地螟 2008 年越冬虫源分布特点和 2009 年发生趋势分析 [J]. 中国植保导刊, 2009, 29 (1): 39-41.
- Jiang YY, Zhang YJ, Yang BS, et al. Distribution characteristics of overwintering insect source of *Loxostege sticticalis* in 2008 and its occurrence trend in 2009 [J]. China Plant Prot, 2009, 29 (1): 39-41.
- [26] 黑龙江省人民政府办公厅.黑龙江省人民政府办公厅关于印发 2022 年黑龙江省扩种大豆工作方案的通知 (黑政办发 [2022] 2 号) [EB/OL]. <https://new.qq.com/omn/20220214/20220214A00WMO00.html>, 2022-02-14.
- General Office of Heilongjiang Province People's Government. General Office of Heilongjiang Province People's Government issued on the notification of work program of expanding Heilongjiang province soybean planting in 2022 (Hei zheng ban fa [2022] No. 2) [EB/OL]. <https://new.qq.com/omn/20220214/20220214A00WMO00.html>, 2022-02-14.
- [27] 杨隆华.乙草胺、氟磺胺草醚对大豆根瘤固氮和碳代谢的影响 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2010.
- Yang LH. Acetochlor and fomesafen effect on nitrogen fixation and carbon metabolism in soybean [D]. Harbin : Northeast Agricultural University, 2010.
- [28] 崔书芳.黑龙江省大豆田反枝苋对氟磺胺草醚的抗性研究 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- Cui SF. Study on resistance of *Amaranthus retroflexus* L to fomesafen of soybean field in Heilongjiang Province [D]. Harbin : Northeast Agricultural University, 2016.
- [29] 滕春红,王星茗,崔书芳,等.黑龙江省大豆田反枝苋对氟磺胺草醚的抗性机制研究 [J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 197-201.
- Teng CH, Wang XM, Cui SF, et al. Resistance mechanisms of *Amaranthus retroflexus* to fomesafen in soybean fields in Heilongjiang Province [J]. Plant Prot, 2019, 45 (5): 197-201.
- [30] 冯曦茹.黑龙江省大豆田反枝苋对咪唑乙烟酸的抗性机制研究 [D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
- Feng XR. Study on resistance mechanism of *Amaranthus retroflexus* L. to imazethapyr of soybean field in Heilongjiang Province [D]. Harbin : Northeast Agricultural University, 2020.
- [31] Horikoshi RJ, Dourado PM, Berger GU, et al. Large-scale assessment of lepidopteran soybean pests and efficacy of Cry1Ac soybean in Brazil [J]. Sci Rep, 2021, 11 (1): 15956.
- [32] 单大鹏,王晓云,洪志鹏,等.转 *CryIIa* 基因抗虫大豆对鳞翅目靶标害虫的抗性分析 [J]. 东北农业大学学报, 2021, 52 (5): 1-9.

- Shan DP, Wang XY, Hong ZP, et al. Analysis of resistance of transgenic *CryIIa* insect-resistant soybean to lepidopteran target pests [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2021, 52 (5): 1-9.
- [33] Dourado PM, Bacalhau FB, Amado D, et al. High susceptibility to CryIAc and low resistance allele frequency reduce the risk of resistance of *Helicoverpa armigera* to Bt soybean in Brazil [J]. *PLoS One*, 2016, 11 (8): e0161388.
- [34] Yu HL, Li YH, Li XJ, et al. Expression of CryIAc in transgenic Bt soybean lines and their efficiency in controlling lepidopteran pests [J]. *Pest Manag Sci*, 2013, 69 (12): 1326-1333.
- [35] MacRae TC, Baur ME, Boethel DJ, et al. Laboratory and field evaluations of transgenic soybean exhibiting high-dose expression of a synthetic *Bacillus thuringiensis* cryIA gene for control of Lepidoptera [J]. *J Econ Entomol*, 2005, 98 (2): 577-587.
- [36] Reddy KN. Glyphosate-resistant soybean as a weed management tool: opportunities and challenges [J]. *Weed Biol Manag*, 2001, 1 (4): 193-202.
- [37] 于惠林, 贾芳, 全宗华, 等. 施用草甘膦对转基因抗除草剂大豆田杂草防除、大豆安全性及杂草发生的影响 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53 (6): 1166-1177.
- Yu HL, Jia F, Quan ZH, et al. Effects of glyphosate on weed control, soybean safety and weed occurrence in transgenic herbicide-resistant soybean [J]. *Sci Agric Sin*, 2020, 53 (6): 1166-1177.
- [38] 张可鑫. 5 种大豆田除草剂残留的垂直分布及对后茬作物生长的影响 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- Zhang KX. Vertical distribution of residues of five soybean herbicides and their effects on the growth of subsequent crops [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.
- [39] 陶波, 郭静, 白杰. 土壤中氟磺胺草醚残留对后茬玉米生长及其酶活性的影响 [J]. *植物保护学报*, 2020, 47 (1): 215-216.
- Tao B, Guo J, Bai J. Effects of fomesafen residues in soil on the growth and enzyme activities of later crop maize [J]. *J Plant Prot*, 2020, 47 (1): 215-216.
- [40] 王险峰, 关成宏, 辛明远. 我国长残效除草剂使用概况、问题及对策 [J]. *农药*, 2003, 42 (11): 5-10.
- Wang XF, Guan CH, Xin MY. Long residual herbicides in China-current status, problems and solutions [J]. *Pesticides*, 2003, 42 (11): 5-10.
- [41] 陈拓. 油菜施用草铵膦残留及对后茬作物水稻的影响研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- Chen T. Study on application of glufosinate residues in rape and the effect on rice of later crops [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [42] Kaniserry R, Gairhe B, Kadyampakeni D, et al. Glyphosate: its environmental persistence and impact on crop health and nutrition [J]. *Plants (Basel)*, 2019, 8 (11): 499.
- [43] Brookes G, Barfoot P. Environmental impacts of genetically modified (GM) crop use 1996-2013: impacts on pesticide use and carbon emissions [J]. *GM Crops Food*, 2015, 6 (2): 103-133.
- [44] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24 (4): 403-415.
- Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives [J]. *Chin J Eco Agric*, 2016, 24 (4): 403-415.
- [45] 杨文钰. 玉米-大豆带状复合种植技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- Yang WY. Planting technology of maize-soybean strip intercropping [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [46] 王田. 走大豆玉米兼容发展之路—大豆玉米带状复合种植模式观察 [N]. *农民日报*, 2022-01-23.
- Wang T. Taking the road of compatible development of soybean and corn -- observation of planting mode of soybean and corn strip intercropping [N]. *Farmers' Daily*. 2022-01-23.
- [47] United States Department of Agriculture. Commodity costs and returns [EB/OL]. <https://www.ers.usda.gov/data-products/commodity-costs-and-returns>, 2022-03-02.
- [48] Buysse D. Organic data-national agricultural statistics service [J]. *Crop Manag*, 2013, 12 (1): 1-2.
- [49] Conrow J. New study: GMO crops reduce pesticide use, greenhouse gas emissions [EB/OL]. <https://allianceforscience.cornell.edu/blog/2020/07/new-study-gmo-crops-reduce-pesticide-use-greenhouse-gas-emissions/>, 2020-07-27.
- [50] Ates MA, Bukowski M. Oil Crops Outlook: December 2021. USDA, Economic Research Service, December 13, 2021 [R]. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=102820>.
- [51] 马玉龙. 浅议大豆后熟期对出油率的影响 [J]. *农村实用科技信息*, 2012 (6): 18.

- Ma YL. The effect of soybean store maturation period on oil yield [J]. NongCun ShiYong KeJi XinXi, 2012 (6): 18.
- [52] 于文静. 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]. 新华社, 2021-12-23. <https://xhpfmapi.xinhuanet.com/vh512/share/10482302?channel=weixin>.
- Yu WJ. Attach importance to science and strict supervision, and fight to create a turnaround in the seed industry—Authoritative experts talk about promoting the industrialization of biological breeding [EB/OL]. Xinhua News Agency, 2021-12-23. <https://xhpfmapi.xinhuanet.com/vh512/share/10482302?channel=weixin>.
- [53] Guo BF, Hong HL, Sun LP, et al. Transcriptome analysis reveals differing response and tolerance mechanism of EPSPS and GAT genes among transgenic soybeans [J]. Mol Biol Rep, 2021, 48 (11): 7351-7360.
- [54] Qin D, Liu XY, Miceli C, et al. Soybean plants expressing the *Bacillus thuringiensis* cry8-like gene show resistance to *Holotrichia parallela* [J]. BMC Biotechnol, 2019, 19 (1): 66.
- [55] Xiao PY, Liu Y, Cao YP. Overexpression of G10-EPSPS in soybean provides high glyphosate tolerance [J]. J Integr Agric, 2019, 18 (8): 1851-1858.
- [56] Guo BF, Guo Y, Hong HL, et al. Identification of genomic insertion and flanking sequence of G2-EPSPS and GAT transgenes in soybean using whole genome sequencing method [J]. Front Plant Sci, 2016, 7: 1009.
- [57] 中华人民共和国农业农村部. 转基因权威关注 [EB/OL]. <http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/>.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Transgenesis authority concerned [EB/OL]. <http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgz/spxx/>.
- [58] 韩超, 于彩虹, 谢香庭, 等. 用于检测大豆植物 DBN8007 的核酸序列及其检测方法: CN111247255A [P]. 2020-06-05.
Han C, Yu CH, Xie XT, et al. Nucleotide sequence for detecting soybean plant DBN8007 and detecting method thereof: CN111247255A [P]. 2020-06-05.
- [59] 韩超, 于彩虹, 谢香庭, 等. 用于检测大豆植物 DBN8002 的核酸序列及其检测方法: CN111406117A [P]. 2020-07-10.
Han C, Yu CH, Xie XT, et al. Nucleotide sequence for detecting soybean plant DBN8002 and detecting method thereof: CN111406117A [P]. 2020-07-10.
- [60] 钱雪艳, 苏颖, 姚瑶, 等. 农杆菌介导抗虫基因 Cry1Ac/Ab 转化大豆的研究 [J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39 (5): 527-533.
Qian XY, Su Y, Yao Y, et al. Soybean transformation with insect-resistant Cry1Ac/ab mediated by *Agrobacterium tumefaciens* [J]. J Jilin Agric Univ, 2017, 39 (5): 527-533.
- [61] 陈秀华, 柏锡, 潘欣, 等. 转 *cry IIem* 基因大豆的培育及抗虫性检测 [J]. 大豆科学, 2009, 28 (6): 959-963.
Chen XH, Bai X, Pan X, et al. Cultivation of *cry IIem* gene transformed soybean and insect resistant assay [J]. Soybean Sci, 2009, 28 (6): 959-963.
- [62] 贾芳. 玉米田主要阔叶杂草对草甘膦耐受水平及耐受机理研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
Jia F. Sensitivity of main broadleaf weeds to glyphosate in maize fields and the mechanism of tolerance to glyphosate [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [63] 刘小龙. 铁苋菜 (*Acalypha australis* L.) 对草甘膦的耐受性机理研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
Liu XL. Study on the tolerant mechanism of *Acalypha australis* L. to glyphosate [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [64] 刘延. 田旋花和打碗花对草甘膦的耐药性研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
Liu Y. Investigating glyphosate tolerance in field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.) and ivy glorybind (*Calystegia hederacea* wall.) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [65] 张宏军. 问荆 (*Equisetum arvense*) 的生物学特性和化学防除 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2000.
Zhang HJ. Biology and chemical control of *Equisetum arvense* [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2000.
- [66] 张宏军, 金岩, 杨卫东, 等. 草甘膦抗性杂草的田间监测 [J]. 杂草科学, 2010, 28 (1): 30-32.
Zhang HJ, Jin Y, Yang WD, et al. Field testing of glyphosate-resistant weeds [J]. Weed Sci, 2010, 28 (1): 30-32.
- [67] 杨彩宏, 田兴山, 冯莉, 等. 牛筋草对草甘膦的抗性 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (10): 2093-2098.
Yang CH, Tian XS, Feng L, et al. Resistance of *Eleusine indica* gaertn to glyphosate [J]. Sci Agric Sin, 2012, 45 (10): 2093-

- 2098.
- [68] 刘慧雄, 戴良英. 生物测定法测定棉田牛筋草对草甘膦的抗药性[J]. 现代农业科技, 2015 (2): 133, 144.
- Liu HX, Dai LY. Determination of resistance of *Eleusine indica* to glyphosate with bioassay [J]. Mod Agric Sci Technol, 2015 (2): 133, 144.
- [69] 胡奎. 湖北省柑橘园杂草发生特点、抗草甘膦监测及化防技术研究[D]. 荆州: 长江大学, 2015.
- Hu K. Study on the occurrence characteristic, glyphosate-resistance level and chemical control technology of weeds in the *Citrus* orchard in Hubei Province [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015.
- [70] Byker HP, Soltani N, Robinson DE, et al. Control of glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) with dicamba applied preplant and postemergence in dicamba-resistant soybean [J]. Weed Technol, 2013, 27 (3): 492-496.
- [71] Eubank TW, Poston DH, Nandula VK, et al. Glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) control using glyphosate-, paraquat-, and glufosinate-based herbicide programs [J]. Weed Technol, 2008, 22 (1): 16-21.
- [72] Houston MM, Barber LT, Norsworthy JK, et al. Evaluation of preemergence herbicide programs for control of protoporphyrinogen oxidase-resistant *Amaranthus palmeri* in soybean [J]. Int J Agron, 2021, 2021: 6652382.
- [73] Mausbach J, Irmak S, Sarangi D, et al. Control of acetolactate synthase inhibitor/glyphosate-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in isoxaflutole/glufosinate/glyphosate-resistant soybean [J]. Weed Technol, 2021, 35 (5): 779-785.
- [74] Shyam C, Chahal PS, Jhala AJ, et al. Management of glyphosate-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in 2,4-D-, glufosinate-, and glyphosate-resistant soybean [J]. Weed Technol, 2021, 35 (1): 136-143.
- [75] Scruggs E, Flessner M, Holshouser D. Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) control in soybeans [M]. Blacksburg: Virginia Tech. Virginia Cooperative Extension, 2020.
- [76] Braz GBP, Oliveira RS Jr, Zobiolo LHS, et al. Sumatran fleabane (*Conyza sumatrensis*) control in no-tillage soybean with diclosulam plus halauxifen-methyl [J]. Weed Technol, 2017, 31 (2): 184-192.
- [77] Adegasa FS, Correia NM, da Silva AF, et al. Glyphosate-resistant (GR) soybean and corn in Brazil: past, present, and future [J]. Adv Weed Sci, 2022, 40 (spe1): e0202200102.
- [78] Marques LH, Santos AC, Castro BA, et al. Field evaluation of soybean transgenic event DAS-81419-2 expressing Cry1F and Cry1Ac proteins for the control of secondary lepidopteran pests in Brazil [J]. Crop Prot, 2017, 96: 109-115.
- [79] 李国平, 吴孔明. 中国转基因抗虫玉米的商业化策略[J]. 植物保护学报, 2022, 49 (1): 17-32.
- Li GP, Wu KM. Commercial strategy of transgenic insect-resistant maize in China [J]. J Plant Prot, 2022, 49 (1): 17-32.
- [80] Li YH, Zhou GY, Ma JX, et al. *De novo* assembly of soybean wild relatives for pan-genome analysis of diversity and agronomic traits [J]. Nat Biotechnol, 2014, 32 (10): 1045-1052.
- [81] Li RF, Wang D, Li Z, et al. Research progress on the genetic diversity of wild soybean in China [J]. Agric Sci Technol, 2017, 18 (12): 2326-2330, 2334.
- [82] Liu YC, Du HL, Li PC, et al. Pan-genome of wild and cultivated soybeans [J]. Cell, 2020, 182 (1): 162-176. e13.
- [83] Chen J, Li Q, Zhang PM, et al. Cloning and functional characterization of two *GsSnRK1* gene promoters from wild soybean [J]. Plant Biotechnol Rep, 2021, 15 (5): 627-639.
- [84] Jiang BJ, Chen L, Yang CY, et al. The cloning and CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of a male sterility gene *MS1* of soybean [J]. Plant Biotechnol J, 2021, 19 (6): 1098-1100.
- [85] 徐豹. 中国野生大豆 (*G. soja*) 研究十年 [J]. 吉林农业科学, 1989, 14 (1): 5-13.
- Xu B. A decade of wild soybean (*G. soja*) research in China [J]. J Jilin Agric Sci, 1989, 14 (1): 5-13.
- [86] 庄炳昌. 中国野生大豆研究二十年 [J]. 吉林农业科学, 1999, 24 (5): 3-10.
- Zhuang BC. Researches on wild soybean (*Glycine soja*) in China for twenty years [J]. Jilin Agric Sci, 1999, 24 (5): 3-10.
- [87] 刘标, 薛莹, 刘来盘, 等. 转基因大豆向野生大豆基因漂移研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36 (7): 833-841.
- Liu B, Xue K, Liu LP, et al. Progress on the gene flow from genetically modified soybeans to wild soybeans [J]. J Ecol Rural Environ, 2020, 36 (7): 833-841.
- [88] 刘标, 薛莹, 刘来盘, 等. 转 EPSPS+PAT 基因大豆向非转基因大豆的基因漂移研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36 (3): 367-373.

- Liu B, Xue K, Liu LP, et al. Research on the gene flow from transgenic EPSPS+PAT soybean S4003. 14 to non-transgenic soybeans [J]. J Ecol Rural Environ, 2020, 36 (3): 367-373.
- [89] 李向华, 王克晶. 半野生大豆起源及野生大豆稀有性状来源的形态学证据 [J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21 (6): 1357-1371.
- Li XH, Wang KJ. Morphological evidence of the origin of semi-wild soybean and the rare traits in wild soybean [J]. J Plant Genet Resour, 2020, 21 (6): 1357-1371.
- [90] 陈新, 严继勇, 高兵. 野生大豆抗草甘膦基因漂移的初步研究 [J]. 中国油料作物学报, 2004, 26 (2): 89-91.
- Chen X, Yan JY, Gao B. Preliminary study on roundup ready soybean's round-up ready gene move to wild soybean [J]. Chin J Oil Crop Scievs, 2004, 26 (2): 89-91.
- [91] Kim HJ, Kim DY, Moon YS, et al. Gene flow from herbicide resistant transgenic soybean to conventional soybean and wild soybean [J]. Appl Biol Chem, 2019, 62: 54.
- [92] 陈新, 王长永, 朱成松, 等. 转基因抗草甘膦大豆安全性评价及对环境影响的检测 [J]. 江苏农业科学, 2003, 31 (6): 36-40.
- Chen X, Wang CY, Zhu CS, et al. Safety evaluation and environmental impact detection of transgenic glyphosate-resistant soybean [J]. Jiangsu Agric Sci, 2003, 31 (6): 36-40.
- [93] Mizuguti A, Yoshimura Y, Matsuo K. Flowering phenologies and natural hybridization of genetically modified and wild soybeans under field conditions [J]. Weed Biol Manag, 2009, 9 (1): 93-96.
- [94] Mizuguti A, Ohigashi K, Yoshimura Y, et al. Hybridization between GM soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) and wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) under field conditions in Japan [J]. Environ Biosafety Res, 2010, 9 (1): 13-23.
- [95] Abud S, de Souza PIM, Vianna GR, et al. Gene flow from transgenic to nontransgenic soybean plants in the Cerrado region of Brazil [J]. Genet Mol Res, 2007, 6 (2): 445-452.
- [96] Yook MJ, Park HR, Zhang CJ, et al. Environmental risk assessment of glufosinate-resistant soybean by pollen-mediated gene flow under field conditions in the region of the genetic origin [J]. Sci Total Environ, 2021, 762: 143073.
- [97] 王栋, 丁汉凤, 王效睦, 等. 山东省野生大豆种质资源保护利用现状分析 [J]. 农学学报, 2016, 6 (12): 23-29.
- Wang D, Ding HF, Wang XM, et al. Protection and utilization of wild soybean germplasm resources in Shandong Province [J]. J Agric, 2016, 6 (12): 23-29.
- [98] 韩天富, 周新安, 关荣霞, 等. 大豆种业的昨天、今天和明天 [J]. 中国畜牧业, 2021 (12): 29-34.
- Han TF, Zhou XN, Guan RX, et al. Past, now and future of soybean seed industry [J]. China Animal Ind, 2021 (12): 29-34.
- [99] 王有福, 朱飞宇, 罗佳, 等. 野生大豆资源利用研究进展 [J]. 现代农业科技, 2021 (23): 30-32.
- Wang YF, Zhu FY, Luo J, et al. The research progress in utilization of wild soybean resources [J]. Mod Agric Sci Technol, 2021 (23): 30-32.
- [100] 许智宏. 我国转基因生物产业化亟待突破 [EB/OL]. 科学网, 2021-03-26. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/3/455088.shtm>.
- Xu ZH. Urgent breakthrough in the industrialization of genetically modified organisms in China [EB/OL]. Science Net. cn, 2021-03-26. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/3/455088.shtm>.

(责任编辑 李楠)