



转基因耐除草剂大豆发展现状与展望

李东阳^{1,2}, 肖冰³, 张旭冬¹, 张秀杰¹, 梁晋刚¹

(1. 农业农村部科技发展中心, 北京 100176; 2. 中国农业科学院 棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室, 河南 安阳 45500; 3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:转基因耐除草剂大豆是大豆产业发展的重要动力,其大规模应用将给大豆田间杂草管理带来革命性的变化,并产生显著的经济和社会效益。当前,生物育种技术是现代农业科技创新的重点,也是国际科技竞争和经济竞争的重要领域。本文根据国际农业生物技术应用服务组织(International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, ISAAA)的数据和我国农业农村部公布的审批信息,介绍转基因耐除草剂大豆的全球发展概况和在中国的审批情况,并综述我国在相关方面的研究进展,最后提出推进转基因耐除草剂大豆在我国研发和应用的相关建议。
关键词:转基因大豆;耐除草剂;生物育种;安全审批;监测治理

Development Status and Prospect of Genetically Modified Herbicide Tolerant Soybean

LI Dong-yang^{1,2}, XIAO Bing³, ZHANG Xu-dong¹, ZHANG Xiu-jie¹, LIANG Jin-gang¹

(1. Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100176, China; 2. State Key Laboratory of Cotton Biology, Institute of Cotton Research/Chinese Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Genetically modified herbicide tolerant (GMHT) soybean has become an important thruster for the development of soybean industry. The widespread adoption of GMHT soybean has brought revolutionary changes to weed management and significant economic and social benefits. At present, biological breeding technology has become the focus of modern agricultural scientific innovation, and it is an important competitive field of science and economy. Based on the biotech/GM Approval Database of ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications) and the approval information published by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, this paper introduced the global development status and approval information of GMHT soybeans in China, and reviewed the research progress of GMHT soybean in China. In addition, some suggestions were raised for promoting the research and application of GMHT soybean in China.
Keywords: genetically modified soybean; herbicide tolerance; biological breeding; security approvals; monitoring and regulation

大豆[*Glycine max* (Linn.) Merr.], 又称黄豆, 原产于中国, 是世界上重要的油料作物和高蛋白粮食饲料兼用作物, 在我国普遍种植, 种植面积仅次于水稻、玉米和小麦^[1-3]。我国是世界上最重要的大豆主产国之一, 但随着我国经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高, 加工业、食品业、畜牧业等产业对大豆的需求量也不断增加, 我国逐渐成为大豆消费第一大国和大豆进口第一大国^[1,3-4], 如国家统计局数据显示 2020 年我国大豆进口量为 10 033 万 t, 而 2020 年我国大豆产量为 1 960.18 万 t。我国大豆需求量不断增加, 但国内大豆产量增长缓慢。在此形势下, 国外转基因大豆对中国大豆产业造成了巨大的冲击, 如何发展中国大豆产业, 已成为人们

关注的焦点^[5]。

转基因大豆是世界大豆主产国大豆产业发展的主要动力^[6], 尤其是转基因耐除草剂大豆的出现给杂草管理带来了革命性的变化, 使得杂草管理变得简便有效, 大大减少了杂草管理成本, 并增加了农田产量, 带来了显著的经济效益, 也因此得到了大规模的推广应用^[7-8]。2019 年全球转基因大豆的种植面积为 9 190 万 hm², 占全球转基因作物种植面积的 48%, 占全球大豆种植面积的 74%^[9]。

转基因大豆的研究在我国起步较晚, 但通过国家的大力支持, 我国在转基因大豆研发工作上取得了巨大进展, 转基因大豆育种技术逐渐成为体系化, 一些关键的功能基因得到挖掘, 一批具有自主

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 农业科研杰出人才培养计划(2021 年); 转基因生物新品种培育重大专项(2016ZX08012003)。

第一作者: 李东阳(1992—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事转基因植物环境安全评价研究。E-mail: hzaulidongyang@163.com。

通讯作者: 张秀杰(1974—), 女, 博士, 正高级农艺师, 主要从事转基因检测技术研究。E-mail: zhxj7410@sina.com;

梁晋刚(1987—), 男, 博士, 高级农艺师, 主要从事转基因检测技术研究。E-mail: liangjingang@agri.gov.cn。

知识产权的转基因大豆转化体被育成^[5,8]。

当前,生物育种技术是现代农业科技创新的重点,是国际科技竞争和经济竞争的关键领域,我国生物育种技术的发展正处在关键时期^[10-11]。2019年,农业农村部印发的大豆振兴计划提到“加快生物技术在育种上的应用,提升大豆良种繁育能力,释放大豆良种的增产潜能”,2020年末,中央经济工作会议提出“尊重科学、严格监管,有序推进生物育种产业化应用”,2021年中央一号文件指出要加快实施农业生物育种重大科技项目,2021年3月十三届全国人大四次会议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展规划第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中更是将生物育种列为未来需要加强原创性和引领性的科技攻关前沿领域。

2019年12月以来,我国自主研发的转 *g10evo-epsps* 基因耐除草剂大豆 SHZD3201、转 *epsps* 和 *pat* 基因耐除草剂大豆 DBN9004、转 *g2-epsps* 和 *gat* 基因耐除草剂大豆中黄 6106 等 3 个转化事件已经获得农业转基因生物安全证书(生产应用),如能顺利推进产业化应用,将大豆杂草高效管理提供新的途径,降低大豆种植成本,提升我国大豆竞争力。本文综述了转基因耐除草剂大豆的发展现状,探讨转基因耐除草剂大豆的可持续应用问题,以期为我国转基因耐除草剂大豆的发展提供参考。

1 世界转基因耐除草剂大豆商业化概况

1.1 转基因耐除草剂大豆种植情况

自 1994 年美国开始批准商业化种植转基因大豆以来,其得到了迅速发展,种植面积不断增加,分布范围不断扩大。经过近 30 多年的发展,截止 2019 年,全球转基因大豆的种植面积达到 9 190 万 hm²,是目前种植面积最大、份额最高的转基因作物^[9]。

转基因大豆的主要种植国为美国、巴西、阿根廷,2019 年这 3 个国家的种植面积分别为 3 043 万、3 510 万和 1 750 万 hm²,总计 8 303 万 hm²,占全球转基因大豆总种植面积的 90.34%,此外加拿大、巴拉圭、南非、玻利维亚、乌拉圭等也是转基因大豆的

主要种植国^[9]。

1.2 转基因耐除草剂大豆转化事件安全审批

根据 ISAAA GM Approval Database^[12] 统计,截止 2022 年 2 月,全球共有 43 个转基因大豆转化事件通过审批或处于审批中,其中具有耐除草剂性状的转化事件为 39 个,占转基因大豆转化事件的 90.69%。其中,包含单一商业化性状的转化事件有 10 个,包含两个商业化性状的有 20 个,包含 3 个商业化性状的有 8 个,包含 4 个商业化性状的有 1 个。这些转化事件主要由孟山都(14 个)、拜耳(8 个)、杜邦(6 个)、陶氏(5 个)、巴斯夫(4 个)和 INDEAR(1 个)等公司开发。

对于 39 个具有耐除草剂性状的转化事件,共计审批 109 个种植安全证书,通过种植审批并获得种植安全证书最多的 5 个国家依次为日本(23 个)、美国(21 个)、加拿大(18 个)、巴西(15 个)和阿根廷(14 个),获得种植安全证书最多的 7 个转化事件分别为 GTS 40-3-2(12 个)、CV127(7 个)、A2704-12(6 个)、A5547-127(6 个)、DAS44406-6(5 个)、FG72(5 个)、MON89788(5 个)。

1.3 目标除草剂

目前,具有耐除草剂性状的大豆转化事件的目标除草剂主要包括 8 种(类),分别为草甘膦(glyphosate)、草铵膦(glufosinate)、2,4-D(2,4-dichlorophenoxyacetic acid)、磺酰脲类(sulfonylurea-based herbicides)、麦草畏(dicamba)、异噁唑草酮(isoxaflutole)、咪唑啉酮类(imidazolinone herbicides)和硝磺草酮(mesotrione)等。涉及到的耐除草剂基因分别为:耐草甘膦基因 *cp4 epsps*、*2mepsps* 和 *gat4601*,耐草铵膦基因 *bar* 和 *pat*,耐 2,4-D 基因 *aad-12*,耐磺酰脲类除草剂基因 *gm-hra*,耐麦草畏基因 *dmo*,耐异噁唑草酮基因 *hppdPF W336* 和 *hppdPf4Pa*,耐咪唑啉酮类除草剂基因 *csr1-2*,耐硝磺草酮基因 *avhppd-03*。其中 *cp4 epsps* 基因和 *pat* 基因是转基因耐除草剂大豆中应用最广泛的基因,分别在 19 和 14 个转化事件中表达(表 1)。

表 1 转基因耐除草剂大豆涉及的基因概况

Table 1 Overview of genes involved in genetically modified herbicide tolerant (GMHT) soybean

功能	基因	产物	基因来源	转化事件数量
Function	Gene	Product	Gene source	Events number
草甘膦耐受性	<i>cp4 epsps</i>	5-烯醇丙酮酸莽草酸-3-磷酸合酶	根瘤农杆菌株 CP4	19
Glyphosate tolerance		5-enolpyruvulshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) enzyme	<i>Agrobacterium tumefaciens</i> strain CP4	
	<i>2mepsps</i>	双突变型 EPSPS 修饰合酶	玉米	
		5-enolpyruvyl shikimate-3-phosphate synthase enzyme (double mutant version)	<i>Zea mays</i>	4
	<i>gat4601</i>	草甘膦 N-乙酰转移酶	地衣芽胞杆菌	1
		Glyphosate N-acetyltransferase enzyme	<i>Bacillus licheniformis</i>	
草铵膦耐受性	<i>pat</i>	膦丝菌素 N-乙酰转移酶	绿色产色链霉菌	14
Glufosinate tolerance		Phosphinothricin N-acetyltransferase (PAT) enzyme	<i>Streptomyces viridochromogenes</i>	
	<i>bar</i>	膦丝菌素 N-乙酰转移酶	吸水链霉菌	2
		Phosphinothricin N-acetyltransferase (PAT) enzyme	<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	
2,4-D 耐受性	<i>aad-12</i>	芳氧基链烷酸酯双加氧酶 12 蛋白	代尔夫特食酸菌	4
2,4-D tolerance		Aryloxyalkanoate di-oxygenase 12 (AAD-12) protein	<i>Delftia acidovorans</i>	
磺酰脲类耐受性	<i>gm-hra</i>	改良乙酰乳酸合酶	大豆	3
Sulfonyleurea herbicide tolerance		Modified acetolactate synthase (ALS) enzyme	<i>Glycine max</i>	
麦草畏耐受性	<i>dmo</i>	麦草畏单加氧酶	嗜麦芽窄食单胞菌株 DI-6	8
Dicamba tolerance		Dicamba mono-oxygenase enzyme	<i>Stenotrophomonas maltophiliast</i> rain DI-6	
	<i>hppdPF W336</i>	改良对羟基苯丙酮酸双加氧酶	荧光假单胞菌菌株 A32	2
异噁唑草酮耐受性		Modified p-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD) enzyme	<i>Pseudomonas fluorescens</i> strain A32	
Isoxaflutole tolerance	<i>hppdPf4Pa</i>	改良对羟基苯丙酮酸双加氧酶	荧光假单胞菌	1
		Modified p-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD) enzyme	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	
咪唑啉酮类耐受性	<i>csr1-2</i>	改良乙酰羧酸合成酶大亚基	拟南芥	1
Imidazolinone herbicides tolerance		Modified acetohydroxyacid synthase large subunit (AtAHASL)	<i>Arabidopsis thaliana</i>	
硝磺草酮耐受性	<i>ahhppd-03</i>	对羟基苯丙酮酸双加氧酶	燕麦	1
Mesotrione tolerance		P-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase	Oat (<i>Avena sativa</i>)	

2 中国转基因耐除草剂大豆概况

2.1 转基因大豆进口情况

大豆是我国重要的油料作物和高蛋白粮食饲料兼用作物^[4],随着我国经济的不断发展,国内大豆市场需求量巨大且不断增加,但国内大豆产量有效供给远远不足,对进口大豆依赖性巨大^[13]。

在进口的大豆中,多数为来源于巴西、美国、阿根廷种植的转基因大豆^[14]。我国目前向 14 个转基因耐除草剂大豆颁发了农业转基因大豆安全证书(进口),允许其进口用作加工原料。我国政府于 2004 年首次批准发放农业转基因大豆安全证书(进口)作为加工原料,首个获得批准的大豆转化体为孟山都公司开发的抗除草剂大豆 GTS40-3-2(表 2)。

表 2 我国 2004—2020 年农业转基因耐除草剂大豆安全证书(进口)批准清单
Table 2 Approval list of safety certificate (import) of GMHT soybean in China (2004—2020)

序号 Number	转化体 Event	外源基因 Exogenous gene	目标性状 Target trait	中国首次批准时间 Time of first approval in China	批准国家/地区数量 Number of approved countries/ regions	食用安全证书获批数量 Number of food safety certificates approved	饲用安全证书 获批数量 Number of food safety certificates approved	种植安全证书 获批数量 Number of approved cultivation safety certificates
1	耐除草剂大豆 DRN-09004-6	<i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4), <i>pat</i>	草铵膦、草甘膦耐受性	2020 年 6 月	2	1	1	2
2	耐除草剂大豆 DAS44406-6	<i>aad-12</i> , <i>2mepsps</i> , <i>pat</i>	草铵膦、草甘膦、2,4-D 耐受性	2018 年 12 月	18	16	12	5
3	耐除草剂大豆 SYHT0H2	<i>pat</i> , <i>auhppd-03</i>	草铵膦、硝磺草酮耐受性	2018 年 12 月	17	17	10	4
4	品质性状改良耐除草剂大豆 MON87705	<i>fatb1-A</i> , <i>fad2-1A</i> (sense and antisense), <i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4)	草甘膦耐受性、改性油/脂肪酸	2017 年 6 月	17	16	12	3
5	耐除草剂大豆 FG72	<i>2mepsps</i> , <i>hppdPF</i> W336	草甘膦、异噁唑草酮耐受性	2016 年 12 月	19	19	11	5
6	耐除草剂大豆 MON87708	<i>dmo</i> , <i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4) (Selection Marker/Reporter)	草甘膦、麦草畏耐受性	2015 年 12 月	17	15	12	4
7	耐除草剂大豆 A5547-127	<i>pat</i> <i>gm-hra</i>	草铵膦耐受性	2014 年 12 月	23	19	17	6
8	品质改良抗除草剂大豆 305423 × GTS40-3-2	(Selection Marker/Reporter), <i>gm-fad2-1</i> (partial sequence), <i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4)	草甘膦、磺酰脲类耐受性,品质改良	2014 年 12 月	12	11	9	3
9	抗虫耐除草剂大豆 MON87701 × MON89788	<i>cry1Ac</i> , <i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4)	草甘膦耐受性、抗鳞翅目害虫	2013 年 6 月	16	15	12	4
10	抗除草剂大豆 CV127	<i>csr1-2</i>	咪唑啉酮类耐受性	2013 年 6 月	22	19	15	7
11	抗除草剂大豆 356043	<i>gm-hra</i> , <i>gat4601</i>	草甘膦、磺酰脲类耐受性	2010 年 12 月	16	14	11	3
12	耐除草剂大豆 MON89788	<i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4)	草甘膦耐受性	2008 年 8 月	26	23	17	5
13	抗除草剂大豆 A2704-12	<i>pat</i>	草铵膦耐受性	2007 年 12 月	25	21	18	6
14	抗除草剂大豆 GTS40-3-2	<i>cp4 epsps</i> (<i>aroA</i> :CP4)	草甘膦耐受性	2004 年 2 月	29	25	20	12

2.2 转基因耐除草剂大豆研发现状

虽然目前我国还未批准转基因耐除草剂大豆的商业化种植,但我国早在 20 世纪 80 年代就开始转基因作物相关的研究和探索,在国家的大力支持下,转基因耐除草剂大豆的研究取得了很多进展^[15-16]。许多具有自主知识产权的新基因、新转化体得以问世,如 Guo 等^[17-18]成功培育出转 *G2-EPSPS* 和 *GAT* 基因的耐除草剂大豆转化体 GE-J16 和 ZH10-6;Xiao 等^[19]成功培育出转 *G10-EPSPS* 基因的大豆转化体;浙江大学培育出转 *G10-EPSPS* 基因耐草甘膦大豆 ZUTS-33^[20-21];翁嘉慧等^[22]将 *AM79-EPSPS* 基因转入大豆

获得了具有耐草甘膦性状的大豆转化体。

2019 年以来,转基因耐除草剂大豆 DBN9004、中黄 6106 和 SHZD3201 等 3 个国产转化事件相继获得农业转基因生物安全证书(生产应用),有力推进了我国转基因大豆的研发应用。转 *g2-epsps* 和 *gat* 基因耐除草剂大豆中黄 6106 获得在北方春大豆区和黄淮海夏大豆区生产应用的安全证书,转 *epsps* 和 *pat* 基因耐除草剂大豆 DBN9004 获得在北方春大豆区生产应用的安全证书,转 *g10evo-epsps* 基因耐除草剂大豆 SHZD3201 获得在南方大豆区生产应用的安全证书(表 3)。

表 3 我国大豆农业转基因耐除草剂生物安全证书(生产应用)批准清单
Table 3 Approval list of biosafety certificate (cultivation) of GMHT soybean in China

序号 Number	转化体 Event	外源基因 Exogenous gene	目标性状 Target trait	首次批准时间 Time of first approval	研发单位 Research and development unit
1	耐除草剂大豆 DBN9004	<i>epsps</i> , <i>pat</i>	草铵膦、草甘膦耐受性	2020 年 12 月	北京大北农生物技术有限公司
2	耐除草剂大豆中黄 6106	<i>g2-epsps</i> , <i>gat</i>	草甘膦耐受性	2020 年 6 月	中国农业科学院作物科学研究所
3	耐除草剂大豆 SHZD3201	<i>g10evo-epsps</i>	草甘膦耐受性	2019 年 12 月	上海交通大学

3 我国转基因耐除草剂大豆研发和应用的启示

3.1 加强具有自主知识产权新基因和新转化体的研发

生物育种技术是最前沿的育种技术,通过新基因的不断挖掘,使遗传资源得到了极大丰富,人类因此获得了巨大的经济效益、社会效益和生态效益^[23]。但由于种种原因,我国目前具有自主知识产权的耐除草剂基因和耐除草剂大豆转化体较少,核心专利成果缺乏,与国际先进水平存在一定差距,容易受到制约,不利于我国对粮食安全的保障^[24-26]。虽然我国在转基因耐除草剂大豆研发方面存在一定不足,但具有巨大的潜力。我国具有世界上最丰富的大豆种质资源^[27]和最广阔的市场,十分有利于新基因挖掘和新转化体研发,未来我国在大豆转基因方面有巨大的发展潜力。

此外,我国目前开发的转基因大豆转化体主要为草甘膦耐受性和草铵膦耐受性,而具有多种除草剂耐受性、多种性状复合的耐除草剂作物的研发已逐渐成为国际生物育种的趋势,我国应跟随该发展趋势,加强对具有复合性状的转基因大豆转化体的研发^[28]。

3.2 加强农业生态环境变化监测

转基因耐除草剂大豆的广泛应用,使得大豆田间的杂草得到了高效和简捷的管理和控制,大大减少了生产成本,创造了良好的经济效益,但是转基因耐除草剂作物可能带来的环境安全风险始终是世界各国争议的焦点。大量研究表明,转基因耐除草剂作物不会对农业生态环境产生直接的影响,但转基因耐除草剂作物的长期种植可能会导致耕作方法、农田管理措施发生一定的改变,进而改变农业生态环境现状^[28-29]。随着转基因耐除草剂作物种植面积的不断扩大,以草甘膦为代表的除草剂使用量逐渐增加^[29-30]。除草剂的大量长期使用,会带来一定的残留问题,但实际生产中的除草剂超范围超量使用等也在加重除草剂残留问题^[30]。

为了保障转基因作物的可持续发展,除了系统化的安全评价外,在转基因作物种植区域应进行长期的农业生态环境监测,在转基因耐除草剂作物种植区应加强对除草剂及其代谢产物的风险监测。长期监测不仅有利于更加科学的政策监管,也有利于深入了解转基因作物对环境的长期影响^[31]。

3.3 制定有效的杂草抗性监测与治理策略

草甘膦和草铵膦是转基因耐除草剂作物主要的目标除草剂,在大豆生产中存在广泛应用。但随

着草甘膦和草铵膦的长期大规模应用,杂草的抗药性问题逐渐变得严重,对农业的可持续发展产生巨大威胁,降低了转基因耐除草剂作物的价值^[7]。此外,转基因耐除草剂作物的推广使得草甘膦、草铵膦等灭生性除草剂发挥了巨大作用,间接降低了新除草剂靶标位点和新型除草剂的研发积极性。目前已至少 30 年没有引入新的除草剂靶标位点,而迫切需要新的作用模式的除草剂,从而预防和缓解作物抗药性^[32]。

可持续杂草管理是可持续农业的基础^[33],为了我国农业可持续发展和转基因耐除草剂作物的有效使用,有必要制定有效的杂草抗性监控网络,统筹使用多种杂草管理技术,采用更全面的杂草管理方式,积极推进抗性杂草治理,并不断加强新型除草剂研发,以达到杂草的有效管理并同时保证新技术的可持续发展^[33-34]。

参考文献

[1] 查霆, 钟宣伯, 周启政, 等. 我国大豆产业发展现状及振兴策略[J]. 大豆科学, 2018, 37(3): 458-463. (ZHA T, ZHONG X B, ZHOU Q Z, et al. Development status of China's soybean industry and strategies of revitalizing[J]. Soybean Science, 2018, 37(3): 458-463.)

[2] SHI Z, ZOU S, LU C, et al. Evaluation of the effects of feeding glyphosate-tolerant soybeans (CP4 EPSPS) on the testis of male Sprague-Dawley rats[J]. GM Crops & Food. 2019, 10(3): 181-190.

[3] 刘来盘, 刘标. 耐除草剂转基因大豆对花粉生活力的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(5): 736-740. (LIU L P, LIU B. Effects of transgenic glyphosate-tolerate soybean on pollen viability [J]. Soybean Science, 2018, 37(5): 736-740.)

[4] 崔宁波, 刘望. 全球大豆贸易格局变化对我国大豆产业的影响及对策选择[J]. 大豆科学, 2019, 38(4): 629-634. (CUI N B, LIU W. The impact and countermeasures option of global soybean trade pattern change on China's soybean industry[J]. Soybean Science, 2019, 38(4): 629-634.)

[5] 肖琴, 李建平, 刘冬梅. 转基因大豆冲击下的中国大豆产业发展对策[J]. 中国科技论坛, 2015(6): 137-141. (XIAO Q, LI J P, LIU D M. Development countermeasures of China's soybean industry under the impact of genetically modified soybean [J]. Forum on Science and Technology in China, 2015(6): 137-141.)

[6] 余永亮, 梁慧珍, 王树峰, 等. 中国转基因大豆的研究进展及其产业化[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 143-150. (YU Y L, LIANG H Z, WANG S F, et al. Research progress and commercialization on transgenic soybean in China[J]. Soybean

Science, 2010, 29(1): 143-150.)

[7] DUKE S O. Perspectives on transgenic, herbicide-resistant crops in the United States almost 20 years after introduction[J]. Pest Management Science, 2015, 71(5): 652-657.

[8] 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. (LI Y H, LI X J, PENG Y F. Global development of herbicide-tolerant transgenic crops and a strategic prospect for China[J]. Plant Protection, 2011, 37(6): 32-37.)

[9] 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. (ISAAA. Global status of commercialized biotech/gm crops in 2019; Biotech crops drive socio economic development and sustainable environment in the new frontier[J]. China Biotechnology, 2021, 41(1): 114-119.)

[10] 黄大昉. 我国农作物生物育种发展战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(3): 315-321. (HUANG D F. Strategic analysis for the development of crop bio-breeding in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(3): 315-321.)

[11] 储成才. 转基因生物技术育种: 机遇还是挑战? [J]. 植物学报, 2013, 48(1): 10-22. (CHU C C. Biotech crops: opportunity or challenge? [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2013, 48(1): 10-22.)

[12] ISAAA. ISAAA's GM Approval Database [EB/OL]. (2021-08-05) [2021-12-20]. <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/default.asp>.

[13] 姚林. 中美贸易摩擦下的中国大豆产业现状与发展趋势[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 10-14. (YAO L. Current situation and development trend of China's soybean industry under Sino-US trade friction [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(2): 10-14.)

[14] 安鹏天, 雷早娟. 进境转基因大豆知多少[J]. 中国海关, 2021(5): 29. (AN P T, LEI Z J. Introduction to imported genetically modified soybean [J]. China Customs, 2021(5): 29.)

[15] 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 H L, JIA F, QUAN Z H, et al. Effects of glyphosate on weed control, soybean safety and weed occurrence in transgenic herbicide-resistant soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(6): 1166-1177.)

[16] 张凤, 贺晓云, 黄昆仑, 等. 转基因耐除草剂大豆的食用安全评价研究进展[J]. 生物技术进展, 2021, 11(4): 489-495. (ZHANG F, HE X Y, HUANG K L, et al. Food safety evaluation of transgenic herbicide tolerant soybean[J]. Current Biotechnology, 2021, 11(4): 489-495.)

[17] GUO B, GUO Y, HONG H, et al. Identification of genomic insertion and flanking sequence of G2-EPSPS and GAT transgenes in soybean using whole genome sequencing method[J]. Frontiers

in Plant Science, 2016, 7: 1009.

[18] GUO B, GUO Y, HONG H, et al. Co-expression of *G2-EPSPS* and glyphosate acetyltransferase *GAT* genes conferring high tolerance to glyphosate in soybean[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 847.

[19] XIAO P, LIU Y, CAO Y. Overexpression of *G10-EPSPS* in soybean provides high glyphosate tolerance [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(8): 1851-1858.

[20] 刘来盘, 沈文静, 薛堃, 等. 转 *g10-epsps* 基因耐除草剂大豆 ZUTS-33 对农田生物多样性的影响[J]. *应用生态学报*. 2020, 31(1): 122-128. (LIU L P, SHEN W J, XUE K, et al. Impacts of herbicide-resistant soybean ZUTS-33 with *g10-epsps* gene on field biodiversity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 122-128.)

[21] 陆玲鸿, 韩强, 李林, 等. 以草甘膦为筛选标记的大豆转基因体系的建立及抗除草剂转基因大豆的培育[J]. *中国科学:生命科学*, 2014, 44(4): 406-415. (LU L H, HAN Q, LI L, et al. Establishment of an efficient transformation protocol for soybean using glyphosate as selective agent and the development of glyphosate-tolerant transgenic soybean lines[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(4): 406-415.)

[22] 翁嘉慧, 楼亿圆, 徐京, 等. 转 *AM79-EPSPS* 基因抗草甘膦大豆遗传稳定性分析[J]. *农业生物技术学报*, 2019, 27(9): 1550-1559. (WENG J H, LOU Y Y, XU J, et al. Genetic stability analysis of transgenic *AM79-EPSPS* glyphosate resistant soybean (*Glycine max*) [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2019, 27(9): 1550-1559.)

[23] 焦悦, 韩宇, 杨桥, 等. 全球转基因玉米商业化发展态势概述及启示[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(4): 164-176. (JIAO Y, HAN Y, YANG Q, et al. Commercialization development trend of genetically modified maize and the enlightenment [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(4): 164-176.)

[24] 崔宁波, 张正岩. 转基因大豆研究及应用进展[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(8): 1111-1124. (CUI N B, ZHANG Z Y. Advance of research and application of transgenic soybean [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2016, 25(8): 1111-1124.)

[25] 张玉池, 王晓蕾, 徐文蓉, 等. 国内外抗除草剂基因专利的分

析[J]. *杂草学报*, 2017, 35(2): 1-22. (ZHANG Y C, WANG X L, XU W R, et al. Analysis on the patents of herbicide resistance gene at home and abroad [J]. *Weed Science*, 2017, 35(2): 1-22.)

[26] 苗润莲. 基于专利分析的转基因大豆技术现状研究[J]. *大豆科学*, 2015, 34(4): 723-730. (MIAO R L. Study on genetically modified soybean technology development status based on patent analysis [J]. *Soybean Science*, 2015, 34(4): 723-730.)

[27] 赵朝森, 赵现伟, 孙丽萍, 等. 不同来源大豆种质资源的田间鉴定与筛选[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(11): 1-10. (ZHAO C S, ZHAO X W, SUN L P, et al. Field identification and selection of excellent soybean germplasm resources from different origins [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(11): 1-10.)

[28] 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. (LI Y H, PENG Y F, LI X J, et al. Ecological risks of herbicide-tolerant genetically modified crops and associated management [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(3): 197-208.)

[29] BONNY S. Herbicide-tolerant transgenic soybean over 15 years of cultivation: Pesticide use, weed resistance, and some economic issues. The case of the USA [J]. *Sustainability*, 2011, 3(9): 1302-1322.

[30] MYERS J P, ANTONIOU M N, BLUMBERG B, et al. Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: A consensus statement [J]. *Environmental Health*, 2016, 15: 19.

[31] 梁晋刚, 张旭冬, 毕研哲, 等. 转基因抗虫玉米发展现状与展望[J]. *中国生物工程杂志*, 2021, 41(6): 98-104. (LIANG J G, ZHANG X D, BI Y Z, et al. Development status and prospect of genetically modified insect resistant maize [J]. *China Biotechnology*, 2021, 41(6): 98-104.)

[32] HEAP I, DUKE S O. Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide[J]. *Pest Management Science*, 2018, 74(5): 1040-1049.

[33] GREEN J M. The benefits of herbicide-resistant crops [J]. *Pest Management Science*, 2012, 68(10): 1323-1331.

[34] GREEN J M. Current state of herbicides in herbicide-resistant crops[J]. *Pest Management Science*, 2014, 70(9): 1351-1357.