

我国转基因抗虫耐除草剂玉米产业化应用面临的机遇与挑战

李敏^{1,2}, 王磊¹, 邹俊杰^{1*}

1.中国农业科学院生物技术研究所, 北京 100081;

2.西北农林科技大学生命科学院, 陕西 杨凌 712100

摘要: 玉米是我国重要的粮食作物和饲料作物,虫害和杂草防治是我国玉米生产面临的重大瓶颈问题。转基因抗虫耐除草剂玉米的应用能够减少农药使用量,在提高玉米产量、提升玉米收获品质方面具有重要作用。自1996年国外转基因抗虫耐除草剂玉米商业化应用以来,有效控制了玉米螟和草地贪夜蛾等鳞翅目害虫的为害,降低了除草成本,经济效益、社会效益和生态效益十分显著。对近10年来全球和我国转基因抗虫耐除草剂玉米的产业化发展现状进行了综述,分析了我国转基因抗虫耐除草剂玉米产业化面临的机遇与挑战,并为加快推进我国转基因玉米产业化应用提供了建议。

关键词: 转基因玉米; 抗虫; 耐除草剂; 产业化

DOI: 10.19586/j.2095-2341.2022.0183

中图分类号: Q943.2, S513

文献标志码: A

Opportunities and Challenges for the Industrial Application of Transgenic Insect-resistant and Herbicide-tolerant Maize in China

LI Min^{1,2}, WANG Lei¹, ZOU Junjie^{1*}

1. Biotechnology Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Shaanxi Yangling 712100, China

Abstract: Maize is an important food and forage crop in China, and the prevention and control of insect pests and weeds is a major bottleneck problem faced by maize production in China. The application of transgenic insect-resistant and herbicide-tolerant maize can reduce the usage of pesticides and play an important role in improving corn yield and harvest quality. Since the commercial application of transgenic insect-resistant and herbicide-tolerant maize abroad in 1996, the lepidoptera pests such as corn borer and fall armyworm have been effectively controlled, and the weeding cost has been reduced, with remarkable economic, social and ecological benefits. Here, the development status of transgenic insect-resistant and herbicide-tolerant maize in the world and China in the past ten years was summarized, the opportunities and challenges faced by the industrialization of transgenic insect-resistant and herbicide-tolerant maize in China were analyzed, and some suggestions were provided for accelerating the industrialization application of transgenic maize in China.

Key words: transgenic maize; insect resistance; herbicide tolerance; industrialization

玉米是全球三大粮食作物之一,也是重要的畜牧业饲料作物,在保障世界粮食有效供给中占重要地位^[1]。虫害防控和杂草防治是我国玉米产业发展的重大瓶颈问题,玉米螟、棉铃虫、草地贪夜蛾等害虫还会加重玉米穗腐病等病害的发生,造成玉米产量和品质的重大损失^[2]。喷施农药等

传统防治手段不仅易产生抗药性,降低防效,还会带来环境恶化等一系列问题^[3]。转基因技术作为有效、可持续发展的害虫防治新方法,是培育抗虫玉米新品种的主要途径^[4]。

Bt (*Bacillus thuringiensis*) 是一种革兰氏阳性昆虫病原菌,能产生多种伴孢晶体,主要活性物质

收稿日期: 2022-11-07; 接受日期: 2022-12-16

基金项目: 国家转基因生物新品种培育重大专项(2018ZX08003-03B); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610392020001)。

联系方式: 李敏 E-mail: lm18004268711@163.com; *通信作者 邹俊杰 E-mail: zoujunjie@caas.cn

是杀虫晶体蛋白,由 *cry* 基因和 *cyt* 基因编码,对鳞翅目、鞘翅目和一些半翅目等害虫具有高度的杀虫特异性^[5]。营养期杀虫蛋白(vegetative insecticidal proteins, Vips)也同样具有高效特异的杀虫活性^[6]。利用生物工程技术将 Bt 基因导入玉米中,可获得转基因抗虫玉米。自 1983 年首次获得转基因植物以来,一大批抗虫、耐除草剂等转基因作物被成功选育^[7]。转 Bt 蛋白基因的抗虫玉米在 1996 年开始大规模商业化种植,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)报道,2019 年有 14 个国家种植了转基因玉米,种植面积达 6 090 万 hm^2 ,是除转基因大豆以外,应用最多的转基因作物^[8]。

转基因玉米作为生物育种领域的重要成果之一,节本增效优势显著。抗虫和耐除草剂性状大幅减少了农药的使用,降低了生产成本,同时由于害虫为害小,玉米不易滋生霉菌,提高了作物的产量和品质^[9-10]。通过种植转基因玉米,顺应了简化耕作方式、节省耕作时间和减少人力投入的时代需求,改变了传统的耕作模式,有利于保护生态环境,实现生态效益和经济效益的双重提高^[11]。2021 年我国启动了转基因玉米产业化试点工作,转基因玉米产业化应用迎来了新纪元,这必将对我国农业生产方式带来革命性的变革,对保障国家粮食安全具有十分重要的意义。

1 全球转基因抗虫耐除草剂玉米产业化进展

1990 年,美国孟山都公司和迪卡公司率先开始抗虫玉米的研究,利用基因枪技术把外源基因导入玉米品种,成功获得了带有抗虫性状的转基因玉米^[12]。随后,Bt 蛋白基因被广泛应用到玉米转基因技术中,转基因玉米自交系和杂交育种迅速发展起来。1995 年,瑞士先正达公司相继得到 BT176 和 BT11 转化事件,推动了全球转基因玉米的商业化浪潮。自美国在 1996 年首次开始转基因玉米的商业化生产^[13],孟山都、杜邦先锋以及拜耳等公司推出的 MON810、DBT418、TC1507、MON863、59122、MIR162、BT10、5307 等转基因抗虫玉米品种便大量涌现,并以这些材料为基础进

行杂交,成功获得含有多个抗虫基因聚合性状的转基因玉米(<https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/eventslist/default.asp>)。自 1996 年到现在,转基因抗虫玉米产业化大致经历了 3 个阶段:第 1 阶段(1996—2009 年)为主要种植具有单个 *Cry* 基因的抗虫玉米;第 2 阶段(2010—2016 年)为种植具有不同作用方式的多个 *Cry* 基因的抗虫玉米;第 3 个阶段(2017 年—现在)为种植 *Cry* 抗虫基因、*Vip* 抗虫基因和 RNA 干扰技术(RNA interference, RNAi)叠加防治多个靶标害虫的抗虫玉米^[14]。转基因耐除草剂玉米的耐除草剂类型主要分为 5 类,第 1 类为草甘膦抗性,包括 *mepsps*、*2mepsps*、*cp4 epsps*、*epsps grg23ace5*、*gat4621*、*goxv247* 基因;第 2 类为草铵膦抗性,包括 *pat*、*pat (syn)*、*bar* 基因;第 3 类为 2,4-D 和精喹禾灵类除草剂抗性,含 *aad-1* 基因;第 4 类为乙酰乙酸合成酶类除草剂抗性,含 *zm-hra* 基因;第 5 类为麦草畏抗性,含 *dmo* 基因。其中耐草甘膦、耐草铵膦为主要的耐除草剂性状。

据 ISAAA 统计,目前全球共有 244 个转基因玉米转化事件通过审批,其中有 210 个含有抗虫性状的转化体,是应用最多的商业化性状之一^[15]。在已经实现商业化生产的转基因玉米中,有 192 个同时包含抗虫和耐除草剂这 2 种性状的转化体,占 79%,这说明复合抗性的转基因玉米逐渐受到青睐^[15]。2007 年,孟山都和陶氏公司通过相互交叉授权生物技术特征,合作推出了新型玉米杂交种——SmartStax[™],含有 8 个外源基因(6 个抗虫基因和 2 个耐除草剂基因),是一个具有多种害虫抗性和双重除草剂耐性的复合性状产品^[16]。随后,先正达公司先后开发了 BT11×MIR162×MIR604 和 BT11×MIR162×MIR604×GA21 玉米转化体,可以同时防治地上和地下害虫。孟山都公司还研发了聚合 10 个不同基因的产品,并于 2017 年开始批准入市。随着抗性基因的不断挖掘和拓展,Bt 基因种类逐渐增多,如抗鞘翅目昆虫的 *cry3*、*cry34*、*cry35* 类基因已成功应用到商业化生产中,同时,经过人工合成的密码子优化基因开始出现,如 *mcry1F*、*mcry3A*、*cry1A.105* 等^[17]。2012—2022 年十年间,全球获得批准种植的转基因抗虫耐除草剂玉米转化体有 71 个,包括 4 个抗虫玉米、13 个耐除草剂玉米、54 个聚合抗虫耐除草剂玉米,复合抗虫耐除草剂玉米占了 76%,复合抗虫耐除草

剂玉米成为未来转基因玉米商业化应用的趋势, 增加(表1)。
抗虫基因和抗虫种类以及耐除草剂类型也在不断

表1 2012—2022年全球转基因抗虫耐除草剂玉米事件批准种植清单

Table 1 Global genetically modified insect-resistant and herbicide-tolerant maize biosafety certificates for cultivation between 2012 and 2022

序号	转化事件	引入基因	目标性状	首次批准种植时间	批准种植国家数量	研发机构
1	MON87460×MON89034×NK603	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>cspB</i> 、 <i>nptII</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性,耐旱性	2012	1	孟山都
2	MON87460×NK603	<i>cp4 epsps</i> 、 <i>cspB</i> 、 <i>nptII</i>	草甘膦抗性,耐旱性	2012	1	孟山都
3	MON87460×MON89034×MON88017	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>nptII</i> 、 <i>cspB</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦抗性,耐旱性	2012	1	孟山都
4	MON87427	<i>cp4 epsps</i>	草甘膦抗性	2012	5	孟山都
5	DAS40278	<i>aad-1</i>	2,4-D、精喹禾灵类除草剂抗性	2012	5	陶氏益农
6	VCO-01981-5	<i>epsps grg23ace5</i>	草甘膦抗性	2013	3	Genective S.A.
7	5307	<i>ccry3.1Ab</i> 、 <i>pmi</i>	抗鞘翅目昆虫	2013	5	先正达
8	TC1507×MON810×NK603×MIR604	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫、草甘膦和草铵膦抗性	2013	1	杜邦
9	TC1507×MON810×MIR162×NK603	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫、草甘膦和草铵膦抗性	2013	3	杜邦
10	NK603×MON810×4114×MIR604	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1F</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>goxv247</i> 、 <i>nptII</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫、草甘膦和草铵膦抗性	2013	2	先正达和孟山都
11	MON89034×TC1507×NK603×DAS40278	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>aad-1</i>	抗鳞翅目昆虫、草甘膦、草铵膦、2,4-D、精喹禾灵类除草剂抗性	2013	4	陶氏
12	MON89034×TC1507×MON88017×59122×DAS40278	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>aad-1</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦、草铵膦、2,4-D、精喹禾灵类除草剂抗性	2013	2	陶氏
13	MON87427×MON89034×TC1507×MON88017×59122	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2013	1	孟山都
14	MON87427×MON89034×NK603	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cp4 epsps</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2013	1	孟山都
15	MON87427×MON89034×MON88017	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cp4 epsps</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦抗性	2013	2	孟山都
16	5307×MIR604×Bt11×TC1507×GA21×MIR162	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2013	4	先正达
17	5307×MIR604×Bt11×TC1507×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和抗鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2013	2	先正达
18	5307	<i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>pmi</i>	抗鞘翅目害虫	2013	5	先正达
19	HCEM485	<i>2mepsps</i>	草甘膦抗性	2013	2	斯泰种业
20	4114	<i>cry1F</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和抗鞘翅目昆虫,草铵膦抗性	2013	3	杜邦
21	TC1507×MON810×MIR604×NK603	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i> 、 <i>nptII</i> 、 <i>goxv247</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2014	2	杜邦
22	TC1507×MON810×MIR162	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>goxv247</i> 、 <i>nptII</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2014	3	杜邦

续表

序号	转化事件	引入基因	目标性状	首次批准 批准种植 时间	批准 种植 数量	研发机构
23	MIR162×TC1507×GA21	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2014	1	先正达
24	MIR162×TC1507	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2014	2	先正达
25	Bt11×TC1507×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2014	2	先正达
26	Bt11×TC1507	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2014	2	先正达
27	Bt11×MIR162×TC1507	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫、草铵膦抗性	2014	1	先正达
28	Bt11×MIR162	<i>cry1Ab</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草铵膦抗性	2014	3	先正达
29	MZHG0JG	<i>2mepsps</i> 、 <i>pat</i>	草甘膦和草铵膦抗性	2015	3	先正达
30	TC1507×MIR162×NK603	<i>cry1F</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2015	2	杜邦
31	MON87411	<i>cry3Bb1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i>	抗鞘翅目昆虫,草甘膦抗性	2015	5	孟山都
32	MON810×MIR162	<i>cry1Ab</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫	2015	2	杜邦
33	MIR162×NK603	<i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2015	2	杜邦
34	MIR162×GA21	<i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2015	2	先正达
35	GA21×T25	<i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>bla</i>	草甘膦和草铵膦抗性	2016	1	先正达
36	MZIR098	<i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>pat</i>	抗鞘翅目昆虫,草铵膦抗性	2016	3	先正达
37	MON89034×TC1507×NK603×MIR162×DAS40278	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>aad-1</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦、草铵膦、2,4-D、精喹禾灵类除草剂抗性	2016	2	陶氏益农
38	MON89034×TC1507×NK603×MIR162	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2016	4	陶氏益农
39	MON89034×GA21	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>mepsps</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2016	2	先正达
40	MON87427×MON89034×MIR162×NK603	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2016	3	孟山都
41	MON810×MIR162×NK603	<i>cry1Ab</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2016	1	杜邦
42	MIR162×MON89034	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫	2016	2	先正达
43	Bt11×MON89034×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性、	2016	1	先正达
44	Bt11×MIR162×MON89034×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2016	3	先正达
45	Bt11×MIR162×MON89034	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2016	2	先正达
46	3272×Bt11×MIR604×TC1507×5307×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i> 、 <i>amy797E</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性,改良α-淀粉酶	2016	1	先正达
47	MON87419	<i>pat</i> 、 <i>dmo</i>	草铵膦和麦草畏抗性	2016	4	孟山都
48	MON87427×MON89034×TC1507×MON87411×59122×DAS40278	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1F</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>aad-1</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦、草铵膦、2,4-D、精喹禾灵类除草剂抗性	2017	3	孟山都
49	MON87427×MON89034×TC1507×MON87411×59122	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1F</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性	2017	1	孟山都
50	MON87427×MON89034×MIR162×MON87411	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫、草甘膦抗性	2017	3	孟山都
51	MON87427×MON87460×MON89034×TC1507×MON87411×59122	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1F</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>cspB</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫,草甘膦和草铵膦抗性,耐旱性	2017	1	孟山都

续表

序号	转化事件	引入基因	目标性状	首次批准 批准种植 时间	批准 种植 数量	研发机构
52	Bt11×MIR162×MIR604× MON89034×5307×GA21	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1Ab</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草甘膦和草铵膦抗性	2017	2	先正达
53	3272×Bt11×59122× MIR604×TC1507×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>amy797E</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草甘膦和草铵膦抗性,改良 α-淀粉酶	2017	1	先正达
54	MON87427×MON89034× TC1507×MON87411× 59122×MON87419	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cry34Ab1</i> 、 <i>cry35Ab1</i> 、 <i>dvsnf7</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>dmo</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草甘膦、草铵膦和麦草畏除 草剂抗性	2018	1	孟山都
55	MON87427×MON89034× MON810×MIR162× MON87411×MON87419	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry1Ab</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cry3Bb1</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>dmo</i> 、 <i>goxv247</i> 、 <i>nptIII</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草甘膦、草铵膦和麦草畏除 草剂抗性	2018	1	孟山都
56	MON87427×MON89034× MIR162×MON87419× NK603	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>dmo</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦、草 铵膦和麦草畏除草剂抗性	2018	1	孟山都
57	MON87427×MON87419× NK603	<i>cp4 epsps</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>dmo</i>	草甘膦、草铵膦和麦草畏除 草剂抗性	2019	1	孟山都
58	MIR162×MON89034×GA21	<i>cry1A.105</i> 、 <i>cry2Ab2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2019	1	孟山都
59	MIR162×MIR604×TC1507× 5307×GA21	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>mepsps</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草甘膦和草铵膦抗性	2019	1	先正达
60	MIR162×MIR604×TC1507× 5307	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草铵膦抗性	2019	1	先正达
61	MIR162×MIR604×TC1507	<i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草铵膦抗性	2019	1	先正达
62	MIR162×MIR604	<i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫	2019	1	先正达
63	DBN9936	<i>cry1Ab</i> 、 <i>epsps</i> (<i>Ag</i>)	抗鳞翅目昆虫,草甘膦抗性	2019	1	大北农
64	Bt11×MON89034	<i>cry1Ab</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目昆虫,草铵膦抗性	2019	1	先正达
65	BT11×MIR162×MIR604× TC1507×5307	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3A(a)</i> 、 <i>mcry3</i> <i>A</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和抗鞘翅目昆虫, 草甘膦抗性	2019	1	先正达
66	BT11×MIR162×MIR604× TC1507	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry1Fa2</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草铵膦抗性	2019	1	先正达
67	BT11×MIR162×MIR604	<i>cry1Ab</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mcry3A</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>pmi</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草铵膦抗性	2019	1	先正达
68	Bt11×5307	<i>cry1Ab</i> 、 <i>ecry3.1Ab</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目和鞘翅目昆虫, 草铵膦抗性	2019	1	先正达
69	DBN9501	<i>vip3A(a)</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目昆虫,草铵膦抗性	2020	1	大北农
70	DBN9858	<i>epsps</i> (<i>Ag</i>)、 <i>pat</i>	草甘膦和草铵膦抗性	2020	1	大北农
71	DP202216	<i>zmm28</i> 、 <i>mo-pat</i>	提高产量,草铵膦抗性	2020	1	陶氏益农

注:数据来自 ISAAA (<https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/crop/default.asp?CropID=6&Crop=Maize>) 2022。

2 我国转基因抗虫耐除草剂玉米研究进展

我国是全球第二大玉米生产国,玉米总产量和种植面积仅次于美国^[18]。国家统计局调查数据显示,2021年我国玉米产量27 255万t,占谷物总产量的43%^[19]。近年来,随着我国人口数量逐年

增加,可用耕地面积越来越少,而人们对粮食的需求也由数量需求转变为质量需求^[20]。为满足人们的粮食需求,国外玉米大量进口,导致国内玉米单价下跌,打击了农民种植玉米的积极性,玉米田病虫害和杂草也造成产量和品质的重大损失,使我国玉米在国际竞争中处于劣势^[21]。转基因抗虫耐除草剂玉米凭借抗虫耐除草剂性能突出、产量

高、品质好等优势,必将成为我国玉米产业的主力军。

我国转基因玉米研究起步略晚^[22],20世纪90年代至21世纪初,我国处于对转基因玉米转化方法的探索阶段。这一阶段,丁群星等先后采用子房注射法、基因枪法、超声波介导技术及花粉管通道法将抗虫基因导入玉米受体,培育出可育转化体植株、转基因抗虫玉米自交系及杂交组合^[23-27]。自2008年以来,在国家转基因重大专项的支持下,我国转基因玉米研究水平逐步跨入国际先进行列^[13]。复合性状转基因玉米也是我国转基因玉米的研究热点,2002年通过共转化法导入 *cry1Ab* 和 *bar* 基因,成功获得了部分抗虫耐除草剂的转基因植株,开创了复合性状转基因玉米的先河^[28]。随着转基因技术地不断成熟,双价抗虫耐除草剂玉米及新的转化方法(农杆菌介导法)也开

始涌现^[29-30],标志着中国转基因玉米研究逐渐在世界范围内崭露头角。

目前,我国已获得了众多具有知识产权的转基因抗虫耐除草剂玉米的优良转化体,这为培育具有突破性的玉米新品种创造了条件。2019—2022年农业农村部发放了11个转基因抗虫耐除草剂玉米转化体生产应用安全证书(表2),包括北京大北农生物技术有限公司的DBN9936、DBN9858、DBN9501、DBN3601T,杭州瑞丰生物科技有限公司与浙江大学的瑞丰125,杭州瑞丰生物科技有限公司的浙大瑞丰8和nCX-1,中国林木种子集团有限公司和中国农业大学的ND207,中国种子集团有限公司的GA21、Bt11×GA21和Bt11×MIR162×GA21。我国在转基因抗虫耐除草剂玉米研发方面取得的巨大进展,为转基因玉米产业化应用奠定了品种基础。

表2 我国转基因抗虫耐除草剂玉米生物安全证书(生产应用)批准情况

Table 2 Genetically modified insect-resistant and herbicide-tolerant maize biosafety certificates for cultivation in China

序号	转化体名称	引入基因	目标性状	首次批准时间	研发机构
1	DBN9936	<i>cry1Ab</i> 、 <i>epsps</i>	抗鳞翅目害虫、草甘膦抗性	2019年12月	北京大北农生物技术有限公司
2	瑞丰125	<i>cry1Ab</i> / <i>cry2Aj</i> 、 <i>g10evo-epsps</i>	抗鳞翅目害虫、草甘膦抗性	2019年12月	杭州瑞丰生物科技有限公司、浙江大学
3	DBN9858	<i>epsps</i> 、 <i>pat</i>	草甘膦抗性、草铵膦抗性	2020年6月	北京大北农生物技术有限公司
4	DBN9501	<i>vip3Aa19</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目害虫、草铵膦抗性	2020年12月	北京大北农生物技术有限公司
5	ND207	<i>mCry2Ab</i> 、 <i>mcry1Ab</i>	抗鳞翅目害虫	2021年12月	中国林木种子集团有限公司、中国农业大学
6	浙大瑞丰8	<i>cry1Ab</i> 、 <i>cry2Ab</i>	抗鳞翅目害虫	2021年12月	杭州瑞丰生物科技有限公司
7	DBN3601T	<i>cry1Ab</i> 、 <i>epsps</i> 、 <i>vip3Aa19</i> 、 <i>pat</i>	抗鳞翅目害虫、草甘膦抗性、草铵膦抗性	2021年12月	北京大北农生物技术有限公司
8	nCX-1	<i>CdP450</i> 、 <i>cp4epsps</i>	草甘膦抗性、草铵膦抗性	2022年4月	杭州瑞丰生物科技有限公司
9	GA21	<i>mepsps</i>	草甘膦抗性	2022年4月	中国种子集团有限公司
10	Bt11×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>mepsps</i>	抗鳞翅目害虫、草甘膦抗性、草铵膦抗性	2022年4月	中国种子集团有限公司
11	Bt11×MIR162×GA21	<i>cry1Ab</i> 、 <i>pat</i> 、 <i>vip3Aa20</i> 、 <i>mepsps</i>	抗鳞翅目害虫、草甘膦抗性、草铵膦抗性	2022年4月	中国种子集团有限公司

注:数据来自转基因权威关注(<http://www.moa.gov.cn/ztzl/zjyqwgzl/>)2022。

3 我国转基因抗虫耐除草剂玉米产业化面临的机遇

3.1 国家高度重视生物育种产业化

我国是农业大国,粮食安全是“国之大者”,是保障国家安全的首要前提。习近平总书记强调,要下决心把民族种业搞上去,抓紧培育具有自主

知识产权的优良品种,从源头上保障国家粮食安全^[31]。转基因技术作为全球发展最成熟、应用最广泛的生物育种技术,成为我们必须抢占的科技制高点^[31]。2008年,我国启动农业领域唯一的科技重大专项——国家转基因生物新品种培育重大专项。自此,农业转基因研发进入快速发展期。经过多年努力,我国已成为继美国之后第二大研

发国,实现了从局部创新到“自主基因、自主技术、自主品种”的整体跨越,为转基因产业化应用打下了坚实基础^[31]。2016年中央一号文件中提出,要加强农业转基因技术研发和监管,在确保安全的基础上慎重推广。2020年中央经济工作会议提出,要尊重科学、严格监管,有序推进生物育种产业化应用。2021年中央一号文件提出,要加快实施农业生物育种重大科技项目^[32]。2022年中央一号文件明确指出,在严格监管、风险可控的前提下,加快推进生物育种产业化步伐^[33]。从“大胆研发、谨慎推广”到“加快生物育种产业化步伐”,我国生物育种产业化正在迎来前所未有的机遇。

3.2 转基因产业化应用配套制度不断完善

2021年11月12日,农业农村部对《主要农作物品种审定办法》《农作物种子生产经营许可管理办法》《农业植物品种命名规定》和《农业转基因生物安全评价管理办法》的部分条款进行修改,并发布了征求意见稿^[34]。这四部法规的修订,是转基因品种审定的配套规程,畅通了转基因作物产业化应用通道。《2021年农业转基因生物监管工作方案》《关于鼓励农业转基因生物原始创新和规范生物材料转移转让转育的通知》等政策性文件的出台,释放了我国将在严格农业转基因生物安全评价基础上,为全面产业化做准备的重要信号^[35-36]。2022年3月1日,新修正的《中华人民共和国种子法》(新种子法)正式实施,明确了国家支持生物育种技术研究和对相关知识产权的保护^[37]。同月,农业农村部组织制定了《除草剂防治转基因耐除草剂玉米田杂草田间药效试验准则》,保障了转基因耐除草剂作物用除草剂登记试验和登记管理的规范性^[38]。国家农作物品种审定委员会制定了国家级转基因大豆、玉米品种的审定标准,并在6月份发布实施^[39]。转基因产业化配套规章制度的逐步健全,为我国转基因玉米等作物的产业化应用提供了制度保障。

3.3 转基因作物产业化试点工作成效显著

据《科技日报》报道,为解决当前农业生产中面临的草地贪夜蛾和草害问题,我国在2021年对已获得生产应用安全证书的转基因抗虫耐除草剂玉米开展了产业化试点工作,试点成效显著。就转基因抗虫耐除草剂玉米来说,一是试点转基因品种性状良好,防虫效果显著。转基因玉米对草地贪夜蛾的防治效果高达95%,大幅降低了防虫

成本。同时,转基因玉米籽粒中霉菌毒素的含量低,品质也好。二是试点的转基因玉米不会对生产环境造成不良影响。同时,种植转基因玉米减少了杀虫剂的使用,有利于生物多样性^[40]。产业化试点转基因作物增产增效和生态效果显著,对我国转基因作物产业化有巨大的推动作用,标志着我国转基因作物产业化的新纪元即将到来。

3.4 社会公众对转基因的认知度逐步提高

转基因技术专业性强,事关食用安全 and 环境安全等公众关心的问题,社会关注度高。利用传统媒体出版转基因科学普及读物,以及通过网站、微信、微博、今日头条、视频软件等新媒体平台进行多种形式的转基因科普宣传,提高了转基因科普的有效性和覆盖面^[41]。社会各界、院士专家积极传播科学知识,澄清谣言谬误,解答公众疑惑,普遍提高了公众对转基因的科学认知水平。

4 我国转基因抗虫耐除草剂玉米产业化面临的挑战和对策

4.1 原始创新能力有待提高

当今世界种业竞争实质是科技竞争,核心是生物育种技术的竞争。生物育种是打好种业翻身仗的重要武器。生物育种快速领先发展的重要基础是生物技术等关键核心技术的应用,而国内多数生物育种的基础研究还处于“跟跑”阶段,难以支撑关键核心技术的开发。从现状来看,国内转化技术缺乏原始创新,抗虫基因大多是在国外已有种类的基础上进行改造或融合,对外依存度较高,新基因的挖掘程度不够^[17,42-43]。此外,由于国内转基因的研发主要集中在科研单位及高校,大型种业公司寥寥无几,再加上企业创新体系和科企结合的力度不足,导致我国转基因产品迭代升级较为缓慢。同时,无论是科研院校还是企业大多偏向应用型研究,研究内容存在重叠,尚未形成分工明确、协作互促的发展模式^[44]。国际一流种业公司育种技术已进入智能分子设计育种“4.0时代”,而中国作为世界用种量第一的国家,仍处于追赶状态^[45]。因此,我国在生物育种研发创新方面仍面临着一定的压力。

为推进转基因作物步入产业化的快车道,加快生物育种步伐,我国亟需解决正面临的重大挑

战:一是要加大原始创新力度,加强优异种质资源的发掘与利用^[46];二是要加大资金倾斜扶持力度,统筹支持不同领域的科研力量;三是要深化科企融合机制,将种质资源、育种人才、推广技术、资金支持等诸多要素进行聚合^[47];四是要加大生物育种前沿技术的应用与探索,以全基因组选择、基因编辑、染色体工程、分子设计育种等关键技术作为主要的攻关方向,为我国生物育种的发展注入科技动力^[48]。

4.2 以企业为主体的产业化推广方式尚需完善

企业是市场的主体,也是科技创新的主体。拜耳、科迪华等跨国种业公司具备丰富的种质资源和技术储备,在生物育种研发和产业化方面竞争优势明显。我国生物育种研发是以政府投资的公益性研究机构为主,主要科研力量是科研机构 and 高等院校,种业企业普遍存在创新能力不足、核心技术缺乏等问题,还缺乏具有自主知识产权、自主品牌和较强核心竞争力的高科技创新企业,以企业为主体的产业化推广模式尚需完善。在转基因作物产业化推进过程中,企业应该成为转基因作物产业化的主体,通过建立转基因产业化市场运行机制,充分发挥大型高科技企业作用,强化企业在产业化推广中的主体地位,培养其在品种推广、生产种植、技术指导和加工销售中的能力。此外,还需要政府发挥好政策保障和监管指导的功能。

4.3 转基因产业化管理措施亟需进一步健全

转基因玉米获得生产应用安全证书后仍不能进行商业化种植,需进入作物种子新品种审定流程,该阶段耗时较长,此后还需要获得生产许可证和经营许可证^[49]。因此,应加快转基因作物审批登记、农药登记等工作,加快完善转基因产业化配套规章制度。转基因作物种植作为一项新的技术,一方面要制定转基因种植管理规范,确保转基因作物种植过程全程可控。目前,我国尚未出台专门针对转基因作物种植监管的法律文件,监管法律规范性不足,监管部门职责不明确,不利于保障种业健康和稳定发展^[50]。因此,需要建立一套比较完备的转基因作物产业化应用监管执法体系,保障转基因作物从种植、收获、加工的全流程可监控,确保流向清晰,去向明确。同时要严厉打击非法制种、非法经营和非法销售行为,创造良好的市场环境。另一方面,要建立科研单位、企业和农技推广部门的技术支撑体系。无论是政府科研

机构,还是技术推广者,都在转基因作物的快速传播和种植中发挥关键作用。通过参观示范田和技术培训等形式,农民可以认识并接纳转基因技术,进而成为该技术的最初种植者和受益者,从而引领更多农民加入改变耕作方式的智慧农业中^[51]。同时针对转基因抗虫玉米,需加强对病虫害发生的动态监测,明确靶标害虫的敏感基线和抗性基因频率,并制定有效的转基因抗虫玉米种植策略和靶标害虫抗性治理对策^[14]。

4.4 社会舆论环境仍然复杂

转基因不仅仅是一个技术问题,也是社会舆论问题。通过科普类文章以及媒体平台客观公正的宣传,向大众普及有关转基因重要性和安全性的知识,引导科学的舆论导向,为中国生物育种技术的发展与产业化营造良好的社会氛围^[52]。虽然转基因的舆论氛围持续向好,但是舆论环境仍然复杂,仍有极少数人恶意攻击抹黑转基因。因此,应发挥主流媒体的作用,开展全方位和全媒体的科普宣传。另外,还要加强对地方领导干部的培训,把思想统一到党中央关于生物育种产业化的决策部署上来。同时,要培养一支懂科学会科普的专家队伍,利用微博、微信、抖音、今日头条等新媒体,开展有针对性的科普宣传,扩大科普宣传覆盖面,进一步提高公众的认知和接受程度。

参 考 文 献

- [1] 刘桂玲,陈举林,李平海.转基因玉米的研究进展与展望[J]. 中国农学通报,2004,20(4):36-38.
- [2] 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.
- [3] 吴孔明.中国草地贪夜蛾的防控策略[J]. 植物保护,2020,46(2):1-5.
- [4] 王奎,王泽宇,束长龙,等.害虫对 *Bt* 杀虫蛋白抗性相关受体蛋白互作网络分析[J]. 植物保护学报,2021,48(6):1-16.
- [5] WANG F, QU S, LIN J, et al. Identification of Cyt2Ba from a new strain of *Bacillus thuringiensis* and its toxicity in *Bradysia difformis*[J]. Curr. Microbiol., 2020, 77(10):2859-2866.
- [6] 束长龙,张凤娇,黄颖,等.*Bt* 杀虫基因研究现状与趋势[J]. 中国科学:生命科学,2016,46(5):548-555.
- [7] 殷亦情,张博.*Bt* 毒蛋白在转基因玉米的研究进展[J]. 南方农机,2018,49(3):88,92.
- [8] 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.
- [9] 孙卓婧,张安红,叶纪明.转基因作物研发现状及展望[J]. 中国农业科技导报,2018,20(7):11-18.
- [10] 段灿星,孙素丽,朱振东.全球转基因作物的发展状况[J]. 科

- 技传播,2020,12(24):29-31,48.
- [11] 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.
 - [12] GORDON-KAMM W J, SPENCER T M, MANGANO M L, et al. Transformation of maize cells and regeneration of fertile transgenic plants[J]. Plant Cell, 1990, 2(7): 603-618.
 - [13] 谢树章,雷开荣,林清.转Bt毒蛋白基因玉米的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(7):1-5.
 - [14] 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.
 - [15] 张水梅,杨帆,赵宁,等.我国转基因玉米研发进展[J].农业科技管理,2022,41(5):72-76.
 - [16] MARRA M C, PIGGOTT N E, GOODWIN B K. The anticipated value of SmartStax™ for US corn growers[J]. Agbioforum, 2010, 13(1):1-12.
 - [17] 黎裕,王天宇.玉米转基因技术研发与应用现状及展望[J].玉米科学,2018, 26(2):1-15,22.
 - [18] 沈平,章秋艳,林友华,等.推进我国转基因玉米产业化的思考[J].中国生物工程杂志,2016,36(4):24-29.
 - [19] 中国经济报.粮食产量再创新高 畜牧业生产稳定增长[EB/OL].(2022-01-18)[2022-12-03]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202201/18/t20220118_37264981.shtml.
 - [20] 周旭.玉米螟转基因防治研究进展[J].南方农业, 2018,12(35):7-8.
 - [21] 卜华虎,任志强,肖建红,等.玉米抗虫研究进展[J].中国农学通报,2019,35(30):145-149.
 - [22] 李文跃,曹士亮,于滔,等.作物转基因技术、种植现状及安全性[J].黑龙江农业科学,2020,(10):124-128.
 - [23] 丁群星,谢友菊,戴景瑞,等.用子房注射法将Bt毒蛋白基因导入玉米的研究[J].中国科学,1993,23(7):707-713.
 - [24] 王国英,杜天兵,张宏,等.用基因枪将Bt毒蛋白基因转入玉米及转基因植株再生[J].中国科学,1995,25(1):71-76.
 - [25] 张宏,王国英,谢友菊,等.超声波介导法转化玉米愈伤组织及可育转基因植株的获得[J].中国科学,1997,27(2):162-167.
 - [26] 王罡,杜娟,张艳华.花粉管通道法将Bt杀虫基因导入玉米自交系的研究[J].玉米科学,2002,10(1):36-37.
 - [27] 李慧芬,刘翔,曲强,等.转抗虫融合基因(*cryIAC3-cpti*)玉米(*Zea mays* L.)植株的获得及其抗虫性分析[J].自然科学进展,2002,12(1):36-40.
 - [28] 朱常香,宋云枝,张杰道,等.抗虫、抗除草剂转基因玉米的获得及遗传研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2002, 33(2):120-125.
 - [29] 杨召军,郎志宏,张杰,等.转Bt *cryIAb/cryIIc* 双价基因抗虫玉米的研究[J].中国农业科技导报,2012,14(4):39-45.
 - [30] 孙越,刘秀霞,李丽莉,等.抗亚洲玉米螟、抗草甘膦转基因玉米的培育[J].农业生物技术学报,2015,23(1):52-60.
 - [31] 中国纪检监察报.转基因技术为保障粮食安全注入新动能[EB/OL].(2021-10-16)[2022-11-05].<https://jjjeb.ccdi.gov.cn/epaper/index.html?guid=1449079758112423937>.
 - [32] 新华社.中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见[EB/OL].(2021-02-21)[2022-11-03].http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/21/content_5588098.htm.
 - [33] 江枝英.科学理性看待转基因加快推进生物育种产业化应用[J].江西农业, 2022(9):6-7.
 - [34] 农民日报.科学监管有序推进生物育种产业化应用[EB/OL].(2022-01-25)[2022-11-05]. https://szb.farmer.com.cn/2022/20220125/20220125_002/20220125_002_1.htm.
 - [35] 农业农村部.农业农村部办公厅关于印发2021年农业转基因生物监管工作方案的通知[EB/OL].(2021-01-28)[2022-11-05]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/zjyqwgz/zxjz/202101/t20210128_6360650.htm.
 - [36] 农业农村部.农业农村部办公厅关于鼓励农业转基因生物原始创新和规范生物材料转移转让转育的通知[EB/OL].(2021-02-28)[2022-11-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202102/t20210218_6361738.htm.
 - [37] 中国人大网.全国人民代表大会常务委员会关于修改《中华人民共和国种子法》的决定[EB/OL].(2021-12-24)[2022-11-05]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/202112/6605a0a463ef4b5096763d35f9dbc2a0.shtml>.
 - [38] 农业农村部.农业农村部办公厅关于印发除草剂防治转基因耐除草剂玉米田、大豆田杂草田间药效试验准则的通知[EB/OL].(2021-03-11)[2022-11-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202203/t20220310_6391556.htm.
 - [39] 农业农村部.国家农作物品种审定委员会关于印发国家级转基因大豆玉米品种审定标准的通知[EB/OL].(2021-06-08)[2022-11-05]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/nybzj1/202206/t20220608_6401924.htm.
 - [40] 科技日报.农业农村部:我国转基因品种产业化应用试点有序进行[EB/OL].(2022-01-21)[2022-11-05]. http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2022-01/21/content_529643.htm?div=-1.
 - [41] 王玉英,唐巧玲,温小杰,等.我国转基因科学普及读物的现状与演进[J].农业科技管理,2022,41(2):44-48.
 - [42] 何伟,祝蕾,刘欣泽,等.玉米遗传转化与商业化转基因玉米开发[J].中国生物工程杂志,2021,41(12):13-23.
 - [43] 黎裕,徐辰武,秦峰,等.玉米生物育种:现状与展望[J].中国基础科学,2022,(4):18-28.
 - [44] 王术坤,韩磊.中国种业发展形势与国际比较[J].农业现代化研究,2022,43(5):814-822.
 - [45] 黄耀辉,焦悦,吴小智,等.生物育种对种业科技创新的影响[J].南京农业大学学报,2022, 45(3):413-421.
 - [46] 崔爱民,张久刚,张虎,等.我国玉米生产现状及发展变革[J].中国农业科技导报,2020,22(7):10-19.
 - [47] 韩杨,宁夏,张云华.我国农业生物技术及产业发展态势与方向[J].发展研究,2021,38(5):33-41.
 - [48] 马小倩,杨涛,张全,等.水稻育种技术研究现状与展望[J].中国农业科技导报,2022(1):24-30.
 - [49] 吴珊,庞俊琴,庄军红,等.我国转基因作物的研发与安全管理[J].中国农业科技导报,2020,22(11):11-16.
 - [50] 廖炜.转基因农作物种植监管法律保护问题研究[J/OL].分子植物育种,2022,1-11[2022-10-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220424.1942.024.html>.
 - [51] 项诚,王晓兵,黄季焜.转基因抗虫棉在中国的推广和传播途径研究[J].中国生物工程杂志,2016,36(11):109-115.
 - [52] 侯军岐,黄珊珊.全球转基因作物发展趋势与中国产业化风险管理[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2020,20(6):104-111.