

◆ 专论:转基因与农药(特约稿) ◆

全球转基因作物研发与产业化应用

王旭静¹, 王艳青², 唐巧玲¹, 焦悦^{3*}, 王志兴^{1*}

(1. 中国农业科学院生物技术研究所 农业农村部农业转基因生物安全评价(分子)重点实验室, 北京 100081; 2. 先正达集团中国, 北京 100069; 3. 农业农村部科技发展中心, 北京 100176)

摘要:转基因技术作为农业科技发展的前沿技术,是农业领域发展速度最快、应用范围最广的高新技术,为保障粮食安全注入了新动能,自诞生之日起就备受关注。自1996年起,全球转基因作物的商业化应用迅猛发展,2019年全球转基因作物的种植面积为1.904亿hm²,比1996年增加了112倍。转基因作物的产业化应用带来了巨大的经济效益和社会价值,1996—2018年间产生了2 249亿美元的经济效益,惠及1 600万~1 700万农民,保护了生物多样性和生态环境安全。本文综述了全球转基因作物的研发和产业化应用现状,详细介绍了美国、巴西、阿根廷、南非、欧盟及中国等具有代表性国家或地区的转基因作物产业化应用情况,并对转基因作物的应用前景进行了展望。

关键词:转基因作物;研发;应用;育种

中图分类号:S-1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2023.01.003

Development and Application of Transgenic Crops in Globe

WANG Xujing¹, WANG Yanqing², TANG Qiaoling¹, JIAO Yue^{3*}, WANG Zhixing^{1*}

(1. Biotechnology Research Institute, CAAS, Key Lab on Safety Assessment of Agricultural GMO (Molecular) MARA, Beijing 100081, China; 2. Syngenta Group China, Beijing 100069, China; 3. Development Center for Science and Technology, MARA, Beijing 100176, China)

Abstract: As the frontier technology of agricultural science development, transgenic technology is a high-tech with the fastest development speed and the widest application range in the agricultural field. It has injected new kinetic energy to ensure food security, and has attracted much attention since it was invented. Since 1996, the commercial application of genetically modified crops in the world has developed rapidly. The planting area of genetically modified crops in the world was 190.4 million hectares in 2019. It increased by more 112 times than that of in 1996. The industrialized application of genetically modified crops has brought huge economic benefits and social values. It generated an economic benefit of USD 224.9 billion from 1996 to 2018, which benefited 16 million to 17 million farmers, and protected biodiversity and ecological environment security. In this paper, the research, development and industrial application of genetically modified crops in the world were summarized, and the industrial application of genetically modified crops in representative countries or areas, such as the United States, Brazil, Argentina, South Africa, the European Union and China, were introduced in detail, and the application prospect of genetically modified crops was prospected.

Key words: transgenic crop; development; application; breeding

转基因育种作为农业育种3.0版,是以分子生物学理论为基础,以DNA重组技术为核心,将抗虫、耐除草剂、高产、提高营养品质等功能基因导入受体

生物,培育出具有目标新性状且能稳定遗传的作物新品种^[1]。20世纪80年代初,转基因生物首次被提出,并定义为利用基因重组技术获得的含有外源DNA

收稿日期:2022-12-30

作者简介:王旭静(1974—)女,河北保定人,博士,研究员,主要从事转基因生物安全研究工作。E-mail: wangxujing@caas.cn

通信作者:王志兴(1965—)男,河北晋州人,博士,研究员,主要从事转基因生物安全研究工作。E-mail: wangcotton@126.com

共同通信作者:焦悦(1985—)女,山西平遥人,博士,研究员,主要从事转基因生物安全评价研究工作。E-mail: jiaoyue@agri.gov.cn

的生物^[2]。1983年,通过农杆菌介导法获得了具有卡那霉素抗性的转基因烟草,标志着转基因作物育种的开端^[3]。1996年转基因玉米、大豆和棉花开始大规模商业化种植,随后转基因作物的研发和应用迅猛发展,转基因技术成为了农业科技史上发展速度最快、应用范围最广的高新技术,目前已有71个国家和地区批准了32种作物541个转化体的商业化应用,带来了巨大的社会效益和经济效益^[4]。

1 国际转基因作物的研发现状

1.1 耐除草剂转基因作物

*epsps*基因编码5-烯醇式丙酮莽草酸-3-磷酸合酶,该基因突变或过量表达能够抑制草甘膦与EPSP的结合从而赋予植物耐受草甘膦除草剂的特性。1995年,Padgett等^[5]利用来源于农杆菌菌株CP4的*cp4-epsps*基因培育出了首例耐除草剂转基因大豆‘40-3-2’,目前*cp4-epsps*已成为应用最广的耐草甘膦基因,含有此基因的9种作物玉米、大豆、棉花、油菜、苜蓿、马铃薯、匍茎剪股颖、甜菜和小麦分别有89、19、16、16、4、4、1、2、1个转化体,均已获批准商业化应用。Lebrun等^[6]对玉米*epsps*基因定向诱变后获得了对草甘膦具有高耐受力的*mepsps*基因,并利用此基因培育出了耐草甘膦玉米品种‘GA21’。此外,通过将草甘膦降解或*N*-乙酰化也能赋予转基因作物耐受草甘膦的特性,如利用草甘膦*N*-乙酰转移酶的*gat4601*和*gat4621*基因、编码草甘膦氧化酶的*goxv247*基因培育出了耐草甘膦转基因玉米、大豆和甜菜^[7-8]。

来源于吸水链霉菌(*Streptomyces hygroscopicus*)的*bar*和来源于产绿色链霉菌(*Streptomyces viridochromogene*)的*pat*基因都编码草铵膦乙酰CoA转移酶(PAT),能赋予转基因作物耐草铵膦特性^[9]。利用*bar*基因已成功培育出耐草铵膦的转基因油菜(27个)、菊苣(3个)、棉花(18个)、玉米(7个)、水稻(3个)和大豆(2个)共60个商业化应用的转化体,利用*pat*基因已成功培育出转基因油菜(2个)、棉花(4个)、玉米(158个)、大豆(14个)和甜菜(1个)共179个商业化应用的转化体。

此外,研究者们还培育出了耐受2,4-D、咪唑啉酮类和硝磺草酮等除草剂的转基因大豆、棉花和油菜。例如,巴斯夫将来自燕麦的编码对羟基苯丙酮酸双加氧酶的基因*avhppd-03*导入大豆,获得了耐硝磺草酮的转基因大豆^[10];将拟南芥编码乙酰羟酸合酶大亚基的基因*crs1-2*导入大豆,获得了耐咪唑

啉酮类除草剂的转基因大豆;将编码芳氧基链烷酸双加氧酶12(AAD-12)蛋白的基因*aad12*导入大豆,成功培育出了耐2,4-D除草剂的转基因大豆^[11]。

1.2 抗虫转基因作物

作物在生长过程中会受到多种虫害的影响,世界每年因虫害造成的损失约为13%^[12]。利用转基因技术将抗虫基因导入作物可以赋予其抵抗害虫的能力。研究者们挖掘出了Bt杀虫基因、植物凝集素基因、 α -淀粉酶基因、蛋白酶抑制剂基因等不同来源的抗虫基因^[13],其中应用最多的抗虫基因是来自于苏云金芽胞杆菌(*Bacillus thuringiensis*)的*Bt*基因及其重组基因。

*cry*和*vip*基因是2种在转基因作物研发中常用的*Bt*基因。*cry*基因最早于1981年分离获得(*cryIAa1*),目前已克隆了798个*cry*基因^[14],其中对鳞翅目害虫具有杀虫活性的基因包括*cryIAb*、*cryIAc*、*cryIA105*、*cryIAF*、*cry2Ab*等基因,对鞘翅目害虫具有杀虫活性的基因包括*cry3B1*、*cry34/35Ab1*等^[15-16]。*Vip*蛋白为苏云金芽胞杆菌的营养期杀虫蛋白,于1996年从苏云金芽胞杆菌AB88菌株的上清液中首次被发现,目前已发现超过177种的*Vip*蛋白^[14,17]。研究发现,*Vip3A*对草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)和小地老虎(*Agrotis ipsilon*)等鳞翅目害虫具有特异的杀虫活性,但对玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)、致倦库蚊(*Culex pipiens quinquefasciatus*)等具有很低的杀虫活性,与*Cry*蛋白的杀虫谱具有较高的互补性^[18-19]。利用*cry*和*vip*基因已成功培育出抗虫转基因玉米、棉花、大豆、甘蔗、水稻等9种转基因作物,涉及的基因包括*cryIAb*、*cryIAc*、*vip3A20*等14个基因。

1.3 品质改良转基因作物

通过调控植物脂肪酸代谢途径关键酶基因表达,可以提高作物营养价值,如杜邦公司利用反义技术沉默编码 Δ^2 -油酸去饱和酶的基因*Gmfad2-1*,获得了油酸含量可高达80%的转基因高油酸大豆‘DP-305423-1’^[20];孟都公司通过RNAi技术沉默掉大豆*fatB*和*fad2*基因,获得了油酸含量可达70%的转基因大豆‘MON8705’;Nuseed公司在油菜中同时表达与脂肪酸代谢相关的*Lackl-delta12D*、*Picpa-omega-3D*、*Micpu-delta-6D*等6个基因,获得了高DHA含量的转基因油菜‘NS-B50027-4’,并于2018年在澳大利亚和美国获批用于商业化种植^[21]。二氢吡啶二羧酸合酶是赖氨酸生物合成途径中的关键酶,过表达编码此酶的*cordapA*基因提高了玉米的赖氨酸含量,培育出了高赖氨酸转基因玉米^[22]。通过

RNAi技术敲除 δ 和 γ -胡萝卜素相关基因 $e-lyc$ 和 $b-lyc$,同时过量表达八氢番茄红素相关基因 Psy 和1-氨基环丙烷-1-羧酸合酶相关基因 acc ,培育出了粉红色果肉耐储藏的转基因菠萝‘EF2-114’。此外,利用转基因技术还培育出了防褐化的转基因苹果、马铃薯,降低木质素含量的转基因苜蓿,棉酚含量低的转基因棉花,延迟成熟的转基因甜瓜和番茄、蓝色转基因康乃馨、矮牵牛和玫瑰,提高维生素A含量的黄金大米,高油酸向日葵,降低尼古丁含量的转基因烟草等。

1.4 抗非生物胁迫转基因作物

非生物胁迫影响植物的生长发育,给全球农业带来重大损失^[23]。预计到2050年,地球上将有超过50%的地区缺水,培育抗旱作物十分重要^[24]。研究者利用来自细菌的冷休克蛋白B编码基因 $cspB$ 培育出了耐旱转基因玉米^[25];将受环境因素(干旱、盐碱等)和植物激素(乙烯、水杨酸)等诱导表达的、来自向日葵的转录因子 $Hahb-4$ 基因导入小麦和大豆,培育出了耐旱转基因小麦和大豆^[26-27];将编码胆碱脱氢酶的基因导入甘蔗,培育出了耐旱转基因甘蔗。

1.5 抗病转基因作物

RNAi是植物中存在的一种天然保护机制,研究者利用RNAi技术已成功培育出多种抗病毒转基因作物^[28-29]。利用RNAi技术将病毒的衣壳蛋白(CP)基因导入植物体内已经成功地培育出了抗病毒转基因马铃薯、甘蔗、烟草、黄瓜和木瓜^[30-35]。此外,病毒的复制酶基因也被用于抗病毒转基因作物的培育,如Bonfim等^[36]利用RNAi技术在菜豆中表达菜豆金色花叶病毒(BGMV)的复制酶基因 $ac1$,培育出了抗病毒菜豆;利用木瓜环斑病毒的复制酶基因 $prsv_rep$ 培育出了高抗环斑病毒的转基因木瓜‘华农1号’^[37];Shepherd等^[38]通过在玉米中表达条纹病

毒复制相关蛋白基因 rep ,可获得抗条纹病毒病的转基因玉米。

1.6 复合性状转基因作物

复合性状能够满足农民的多元化需求,已成为转基因作物的研发趋势。研究者们以获得安全证书的转化体为亲本,通过杂交育种的方法将不同的转化体组合在一起,培育出多基因抗虫、抗虫耐除草剂等复合性状转基因作物,如孟山都和陶氏益农公司合作培育出了含有6个抗虫基因($cry1A.105$ 、 $cry2Ab$ 、 $cry1F$ 、 $cry3Bb1$ 、 $cry34Ab1/cry35Ab1$ 、 $dvSnf7$)、同时抗鳞翅目和鞘翅目多个害虫的转基因玉米SmartStax Pro[®]^[39]。据ISAAA统计,在批准商业化应用的四大转基因作物中,有17个转基因油菜、26个转基因棉花、192个转基因玉米和17个转基因大豆为复合性状。

2 国外转基因作物产业化应用

2.1 全球转基因作物产业化应用概况

1983年首例转基因作物抗卡那霉素烟草问世,1994年延迟成熟的转基因番茄商业化应用,1996年转基因作物开始大面积种植以来,转基因作物的商业化应用迅猛发展。1996—2019年全球转基因作物种植面积增加了112倍,累计达到27亿多公顷。2019年,全球转基因农作物种植面积为1.904亿 hm^2 ,99%为转基因玉米、大豆、棉花和油菜,其他小规模种植的作物还有苜蓿、甜菜、木瓜、土豆、南瓜、胡椒、苹果、菠萝、甘蔗和红花,主要性状为抗虫、耐除草剂和抗虫耐除草剂。全球转基因玉米、大豆、棉花和油菜的采用率分别为31%、74%、79%和27%;美国、巴西、阿根廷和南非等29个地区种植了转基因作物(表1)。此外,1996—2019年,欧盟、日本、韩国等42个地区进口转基因产品(表2)^[4]。

表1 全球商业化应用转基因作物的国家和地区

地区	作物种类	种植面积/万 hm^2
美国	苜蓿*、玉米*、大豆*、棉花*、油菜*、甜菜*、马铃薯*、西葫芦*、木瓜*、苹果*、菊苣、匍茎剪股颖、亚麻、西瓜、矮牵牛、菠萝、李子、水稻、玫瑰、甘蔗、烟草、番茄、小麦	7 150
巴西	大豆*、玉米*、棉花*、甘蔗*、豇豆、桉树、小麦	5 280
阿根廷	苜蓿*、棉花*、玉米*、大豆*、马铃薯*、小麦	2 400
加拿大	大豆、油菜、玉米*、甜菜*、苜蓿*、马铃薯*、苹果、棉花、亚麻、木瓜、菠萝、水稻、西葫芦、甘蔗、番茄	1 250
印度	棉花*、大豆	1 190
巴拉圭	棉花*、玉米*、大豆*	410
中国	棉花*、木瓜*、油菜、玉米、矮牵牛、杨树、水稻、大豆、甜菜、甜椒、番茄	320
南非	棉花*、玉米*、大豆*、油菜、水稻	270
巴基斯坦	棉花*、玉米	250

(续表 1)

地区	作物种类	种植面积/万hm ²
玻利维亚	大豆*	140
乌拉圭	玉米*、大豆*	120
菲律宾	玉米*、苜蓿、油菜、棉花、茄子、马铃薯、水稻、大豆、甜菜	90
澳大利亚	棉花*、油菜*、红花*、苜蓿、康乃馨、玉米、马铃薯、水稻、玫瑰、大豆、甜菜、小麦	60
缅甸	棉花*	30
苏丹	棉花*	20
墨西哥	棉花*、大豆*、苜蓿、油菜、玉米、马铃薯、水稻、甜菜、番茄	20
西班牙	玉米*	10
哥伦比亚	棉花*、玉米*、康乃馨、亚麻、水稻、玫瑰、大豆、甜菜、小麦	10
越南	玉米*、大豆	10
洪都拉斯	玉米*、水稻	<10
智利	玉米*、油菜、大豆	
马拉维	棉花*	<10
孟加拉国	茄子*	<10
哥斯达黎加	棉花*、玉米*、大豆*、菠萝*	<10
埃斯瓦蒂尼	棉花*	<10
埃塞俄比亚	棉花*	<10
印度尼西亚	甘蔗*、玉米、马铃薯、大豆	<10
尼日利亚	棉花*、豇豆*、玉米、大豆、小麦	<10
葡萄牙	玉米*	<10

注：*为2019年实际种植的转基因作物。

表 2 1996—2019 年批准转基因产品进口的国家

地区	作物种类
布基纳法索	棉花
古巴	玉米
埃及	玉米
欧盟(26国)	阿根廷油菜、棉花、康乃馨、玉米、马铃薯、大豆、甜菜、烟草
伊朗	玉米、水稻、大豆
日本	苜蓿、油菜、康乃馨、棉花、玉米、木瓜、马铃薯、玫瑰、大豆、甜菜
马来西亚	阿根廷油菜、康乃馨、棉花、玉米、马铃薯、大豆
新西兰	苜蓿、阿根廷油菜、棉花、玉米、马铃薯、水稻、大豆、甜菜、小麦
挪威	康乃馨
巴拿马	玉米
俄罗斯	玉米、马铃薯、水稻、大豆、甜菜
新加坡	苜蓿、阿根廷油菜、棉花、玉米、马铃薯、大豆、甜菜
韩国	苜蓿、阿根廷油菜、棉花、玉米、马铃薯、大豆、甜菜
瑞士	玉米、大豆
泰国	玉米、大豆
土耳其	玉米、大豆
赞比亚	玉米

转基因作物的种类从1996年的6种拓展到包括水稻、小麦、西葫芦、苹果、茄子和水果等在内的32种。转基因作物的目标性状从单性状向着品质改良、

耐旱、多性状复合等方向发展。2009年,美国批准了含有8个基因、具有抗多种害虫和耐2种除草剂特性的转基因玉米应用于生产,2015年美国批准了品质改良的转基因马铃薯、防褐变转基因苹果产业化;2020年阿根廷批准了抗旱转基因小麦;2021年菲律宾批准了黄金水稻和耐旱茄子的商业化应用。

2.2 代表性国家转基因作物产业化应用

2.2.1 美国转基因作物的产业化应用

美国在转基因产业化方面一直走在世界最前列。1986年美国开始进行转基因作物田间试验,1994年延熟转基因番茄‘Flavr Savr’作为第一例商业化应用的转基因产品进入市场销售阶段,1996年美国开始大面积种植转基因作物。目前美国已批准了23种转基因作物商业化应用,包括玉米、大豆、棉花、油菜、甜菜、苜蓿、苹果、马铃薯、水稻、玫瑰、南瓜、甘蔗、烟草、番茄、小麦、菊苣、匍茎剪股颖、亚麻、甜瓜、木瓜、矮牵牛、菠萝和李子等,批准的转化体有216个。

美国一直处于转基因作物商业化应用的首位,种植的转基因作物以耐除草剂、抗虫、抗虫耐除草剂复合性状的转基因玉米、大豆和棉花为主。据美国国家农业统计局(NASS)和农业部经济研究局(USDA EPS)统计,2022年,美国转基因作物的种植

面积为7 480万 hm^2 。其中,转基因玉米的种植面积为3 326.76万 hm^2 ,采用率为93%,81%转基因玉米具有抗虫耐除草剂复合性状;转基因大豆的种植面积为3 459.71万 hm^2 ,采用率为95%,95%转基因大豆具有耐除草剂性状;转基因棉花的种植面积为480.10万 hm^2 ,采用率为95%,86%转基因棉花具有抗虫耐除草剂复合性状。此外,2022年种植的转基因作物还包括油菜、甜菜、苜蓿、苹果等,其中转基因油菜和甜菜的采用率近乎100%。

2.2.2 巴西转基因作物的产业化应用

巴西是1996年开始种植转基因作物的六国之一,已批准了7种作物106个转化体的商业化应用,包括转基因玉米55个、转基因棉花23个、转基因大豆18个、转基因豌豆1个、转基因桉树2个,转基因甘蔗6个和转基因小麦1个,其中转基因小麦于2021年只批准了食用、饲用和加工,转基因豌豆于2011年批准,2020年开始种植^[40-41]。

巴西转基因作物的种植面积位居世界第2位,2021年的种植面积超过5 600万 hm^2 ;种植的转基因作物主要是大豆、玉米和棉花,其转基因作物采用率分别为98%、88%和80%^[41]。种植转基因作物的性状主要是耐除草剂、抗虫和抗虫耐除草剂复合3种类型,其中耐除草剂性状占65%,抗虫性状占19%,抗虫耐除草剂复合性状占16%^[40]。

2.2.3 阿根廷转基因作物的产业化应用

阿根廷在1996年批准转基因耐草甘膦大豆‘40-3-2’的商业化种植^[42]。截至目前,阿根廷已批准了7种作物50个转化体的商业化应用,包括转基因玉米17个,转基因大豆17个、转基因棉花10个、转基因苜蓿3个、转基因红花1个、转基因马铃薯1个和转基因小麦1个^[43]。其中,我国大北农集团研发的转基因大豆‘DBN09004-6’于2019年在阿根廷批准应用,耐旱转基因小麦‘HB4’于2020年10月批准商业化应用^[44]。

阿根廷转基因作物种植面积位居全球第3,2019年种植面积为23.99亿 hm^2 ,占全球转基因作物种植面积的13%。种植的转基因作物为玉米、大豆、棉花和苜蓿,其中转基因大豆、玉米和棉花的采用率分别为100%、99%和100%;转基因苜蓿于2019年首次种植,种植面积为1 000 hm^2 。转基因作物的性状为抗虫耐除草剂,转基因玉米近93%为抗虫耐除草剂复合性状,约7%为单性状;转基因大豆80%为耐除草剂单性状,20%为复合性状;100%转基因棉花为抗虫耐除草剂复合性状^[4]。

2.2.4 南非转基因作物的产业化应用

南非1997年批准了抗虫棉‘MON1076’‘MON531’和‘MON757’的商业化应用^[45]。至2021年,南非共批准了5种作物72个转化体的应用,包括转基因油菜5个、转基因棉花10个、转基因玉米42个、转基因水稻2个和转基因大豆14个,其中66个批准食用和饲用,22个批准种植(主要是玉米、大豆和棉花)^[46]。

南非转基因作物的种植面积一直处于世界前十,非洲第一的位置。南非于1998年开始种植转基因棉花和玉米,种植面积约为1.5万 hm^2 ,随后种植面积逐年上升^[47]。2019年,转基因玉米、大豆和棉花的种植面积分别约为190万、69.4万和4.4万 hm^2 。3种转基因作物的采用率分别为转基因玉米84.6%,转基因大豆95%和转基因棉花100%^[4]。2021—2022年农业生产季,转基因作物的种植面积约为310万 hm^2 ,其中转基因玉米的种植面积约为230万 hm^2 ,占比74%,种植的品种特性80%为抗虫耐除草剂复合性状;转基因大豆为78.5万 hm^2 ,占比25%,种植的品种特性均为耐除草剂性状;转基因棉花为1.6万 hm^2 ,占比1%,种植的品种特性95%为抗虫耐除草剂,剩余5%为单一性状^[48]。

2.2.5 菲律宾转基因作物产业化应用

菲律宾在2002年批准了转Bt玉米的商业化应用,目前已有9种作物129个转化体,批准用于食用、饲用、加工或种植,包括转基因苜蓿4个、转基因油菜6个、转基因棉花16个、转基因茄子1个、转基因玉米64个、转基因马铃薯11个、转基因水稻2个、转基因大豆24个和转基因甜菜1个。2021年7月批准了黄金水稻的商业化种植、转Bt茄子的食用、饲用和加工,使菲律宾成为第一个批准黄金水稻种植的国家,第二个批准抗虫茄子直接食用的国家^[49]。

菲律宾是第一个种植转基因作物的东南亚国家,自2003年开始种植转基因玉米,目前仍然只有转基因玉米的商业化种植,几乎均为抗虫耐除草剂复合性状,种植面积从2003年的10 769 hm^2 增加到2021年的677 544 hm^2 ^[49]。

2.2.6 欧盟转基因作物的产业化应用

欧盟批准商业化种植的只有转基因玉米‘MON810’,种植转基因作物的国家只有葡萄牙和西班牙。葡萄牙自2005年开始种植转基因玉米,种植面积为1 000 hm^2 ,2019年的种植面积降为4 753 hm^2 ,种植转基因作物的地区为4个^[50]。西班牙自1998年开始种植抗虫转基因玉米‘MON810’,2021年的

种植面积为96 606 hm²,种植的地区有12个,其中阿拉贡和加泰罗尼亚2个地区的种植面积最大,分别占到42%和34%^[51]。

此外,欧盟批准了8种作物115个转化体用于食用、饲用和加工,包括转基因油菜14个、转基因棉花15个、转基因康乃馨7个、转基因玉米55个、转基因马铃薯1个、转基因大豆22个、转基因甜菜和烟草各1个。据统计,欧盟每年都要进口约3 000万t的大豆和豆粕,1 000万~2 000万t的玉米和玉米加工副产品,以及250万~500万t的油菜籽和菜粕,其中转基因大豆产品占到了90%~95%,转基因玉米产品占20%~25%,转基因油菜籽约占25%^[4]。

3 我国转基因作物的研发与产业化应用

3.1 我国转基因作物的研发

我国转基因作物的研发始于20世纪80年代,1990年开始,先后研发出了转乙炔形成酶(EFE)反义基因的耐储藏番茄,转CMV-CP基因的抗病毒番茄和甜椒、转*chs*基因的改变花色的转基因矮牵牛、转*xa21*基因抗白叶枯病水稻、转*Bt-cryIA*和*Bt+SCK*基因抗虫水稻、转*PRSV*复制酶基因抗病毒番木瓜、转合成*Bt GFM cryIA*杀虫基因抗虫棉等自主研发成果,其中转合成*Bt GFM cryIA*杀虫基因抗虫棉的成功研制,使我国成为拥有自主知识产权抗虫棉的第2个国家^[52-53]。目前,我国转基因作物研发与应用稳步推进。

近20年来,在国家的长期战略部署下,在转基因新品种培育重大专项等项目的大力资助下,我国已建立起涵盖从基因克隆到品种选育全链条的研发体系。在基因挖掘方面,克隆了一批优良功能基因,如水稻多分蘖基因*d53*^[54]、抗病基因*pigm*和*fhb7*^[55-56]、抗虫基因*cry9Cbl*^[57]、养分高效基因*ngr5*^[58]等;在遗传转化方面,建立了洁净DNA转化^[59]、多基因转化^[60]、外源基因删除^[61]等转化技术,构建了小麦^[62]、玉米^[63]等作物的高效遗传转化体系;在新种质创制方面,培育出一批具有重要应用前景的抗虫、耐除草剂、抗旱等转基因新品系,如转*g2-aroA*和*gat*的耐草甘膦大豆^[64]、转*cryIAb/cry2Aj*和*g10-evo*基因的抗虫耐除草剂玉米^[65]等。

3.2 我国转基因作物的产业化应用

我国已批准了棉花、番茄、矮牵牛、辣椒、番木瓜、水稻、玉米和大豆共8种作物的生产应用安全证书,其中转基因玉米和大豆自2019年以来共批准了14个转化体,包括3个耐除草剂转基因大豆、6个抗

虫耐除草剂玉米、2个抗虫转基因玉米和3个耐除草剂转基因玉米。此外,我国还批准了转基因大豆(10个耐除草剂、3个抗虫、2个品质改良、2个品质改良和耐除草剂复合、1个抗虫耐除草剂复合)、棉花(3个抗虫、4个耐除草剂、2个抗虫耐除草剂复合)、玉米(9个抗虫耐除草剂复合、6个抗虫、5个耐除草剂、1个耐旱、1个品质改良)、油菜(6个耐除草剂、3个控制育性)、番木瓜(1个抗病毒)、甜菜(1个耐除草剂)6种作物60个转化体用作进口加工原料。

我国是转基因技术应用最早的国家之一,从1997年开始种植转基因抗虫棉,转基因作物的种植面积居世界第4位,2006年我国转基因作物的种植面积从第4降至第6位,目前我国转基因作物的种植面积位居世界第7位,实际种植的转基因作物只有抗虫棉和抗病毒番木瓜,2019年我国种植了3 170万hm²的抗虫棉,12 125 hm²的抗病毒番木瓜(采用率为85%)^[4]。

4 转基因作物产业化应用带来的社会价值

增加作物产量,带来巨大经济效益。1996—2018年,转基因种植国获得的经济收益为2 249亿美元,其中获益最多的4个国家依次是美国(959亿美元)、阿根廷(281亿美元)、巴西(266亿美元)、印度(243亿美元)。2016年全球转基因作物经济效益为172亿美元,占2016年全球作物保护市场709亿美元的24.3%,占全球商业种子市场560.2亿美元的30.7%。预计全球生物技术种子的市场价值到2022年末和到2025年末将分别增长8.3%和10.5%。2018年全球转基因作物经济效益为189亿美元,其中发展中国家的份额更高(占比54%),达102亿美元,发达国家的收益为87亿美元。

保护生物多样性,改善环境。1996—2018年,转基因种植园节约了2.31亿hm²的土地,仅2018年就节约了2 430万hm²土地,保护了生物多样性。抗虫转基因作物的大面积种植,减少了杀虫剂的使用,从1996—2018年的23年间,共减少了7.76亿kg杀虫剂的使用,相当于农药使用量降低了8.3%,2018年就减少农药用量5 170万kg(农药使用量降低8.6%);1996—2018年将使用农药对环境的影响(环境影响指数,EIQ)降低了18.3%,仅2018年就降低了19%。此外,转基因作物的种植使生产方式向轻简化转变,通过降低农药生产和土地耕作过程中的燃料消耗而减少了二氧化碳排放,2018年就减少二氧化碳排放230亿kg,相当于马路上的汽车减少了1 530万辆^[4]。

5 展望

转基因技术作为一项农业科技发展的前沿技术,帮助1 600万~1 700万农民摆脱了贫困,对提高作物产量、保障粮食安全做出了重要贡献。随着组学技术的发展、生物数据的积累、遗传转化技术的建立以及生物技术的迭代升级,转基因作物涉及的种类和性状将会更加多元化,转基因作物的研发也将向抗虫、耐除草剂、抗旱、营养高效等多性状复合以及基因编辑和代谢途径重构等的方向发展,相信转基因技术必将为促进农业可持续发展提供新动力。

参考文献

- [1] 林敏. 农业生物育种技术的发展历程及产业化对策[J]. 生物技术进展, 2021, 11(4): 405-417.
- [2] PETRI W. Transgenic organisms and development[J]. Nature, 1982, 299(5882): 399-400.
- [3] FRALEY R T, ROGERS S G, HORSCH R B, et al. Expression of bacterial genes in plant cells[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80(15): 4803-4807.
- [4] ISAAA. Global status of commercialized Biotech/GM crops in 2019 [R]. Ithaca: ISAAA, 2019.
- [5] PADGETTE S R, KOLACZ K H, DELANNAY X, et al. Development, identification and characterization of a glyphosetolerant soybean line[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1451-1461.
- [6] LEBRUN M, SAILLAND A, FREYSSINET G. Mutated 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase, gene coding of said protein and transformed plants containing said gene: WO, 97/04103 [P]. 1997-02-06.
- [7] MCNAUGHTON J, ROBERTS M, RICE D, et al. Nutritional equivalency evaluation of transgenic maize grain from event DP-O98140-6 and transgenic soybeans containing event DP-356043-5: laying hen performance and egg quality measures[J]. Poultry Science, 2011, 90(2): 377-389.
- [8] GMO, MULLINS E, BRESSON J L, et al. Assessment of genetically modified oilseed rape GT73 for placing on the market of isolated seed protein for food under regulation (EC) no. 1829/2003 (application EFSA-GMO-RX-026/2) [J/OL]. EFSA Journal, 2022, 20(11): e07590.
- [9] 张宏军, 倪汉文, 周志强, 等. 抗草铵膦转基因作物及其生物安全性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(5): 54-60.
- [10] KRAMER C M, LAUNIS K L, TRABER M G, et al. Vitamin E levels in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] expressing a p-hydroxyphenylpyruvate gene from oat (*Avena sativa* L.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(15): 3453-3457.
- [11] 李东阳, 肖冰, 张旭冬, 等. 转基因耐除草剂大豆发展现状与展望[J]. 大豆科学, 2022, 41(6): 733-739.
- [12] 宋相杰. Bt转基因抗虫植物的研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2017, 47(2): 55-56; 59.
- [13] 刘一杰, 薛永常. 植物抗虫基因工程的研究进展[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(6): 873-878.
- [14] 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.
- [15] FRANK D L, ZUKOFF A, BARRY J, et al. Development of resistance to *eCry3.1Ab*-expressing transgenic maize in a laboratory-selected population of western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2013, 106(6): 2503-2513.
- [16] HUANG F N. Resistance of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, to transgenic *Bacillus thuringiensis Cry1F* corn in the Americas: lessons and implications for Bt corn IRM in China [J]. Insect Science, 2021, 28(3): 574-589.
- [17] ESTRUCH J J, WARREN G W, MULLINS M A, et al. Vip3A, a novel *Bacillus thuringiensis* vegetative insecticidal protein with a wide spectrum of activities against lepidopteran insects [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(11): 5389-5394.
- [18] CHAKROUN M, BEL Y, CACCIA S, et al. Susceptibility of *Spodoptera frugiperda* and *S. exigua* to *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa insecticidal protein [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2012, 110(3): 334-339.
- [19] DONOVAN W P, DONOVAN J C, ENGLEMAN J T. Gene knockout demonstrates that *vip3A* contributes to the pathogenesis of *Bacillus thuringiensis* toward *Agrotis ipsilon* and *Spodoptera exigua* [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2001, 78(1): 45-51.
- [20] DELANEY B, APPENZELLER L M, MUNLEY S M, et al. Subchronic feeding study of high oleic acid soybeans (Event DP-3Ø5423-1) in Sprague-Dawley rats [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(12): 3808-3817.
- [21] ISAAA. Global status of commercialized Biotech/GM crops in 2018 [R]. Ithaca: ISAAA, 2018.
- [22] 刘婷婷, 全涛, 黄昆仑. 转基因玉米的研究进展和食用安全性评价[J]. 生物技术进展, 2022, 12(4): 523-531.
- [23] VERMA A K. Abiotic stress and crop improvement: current scenario [J]. Advances in Plants Agriculture Research, 2016, 4(4): 345-346.
- [24] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought [J]. Science, 2020, 368(6488): 266-269.
- [25] CASTIGLIONI P, WARNER D, BENSON R J, et al. Bacterial RNA chaperones confer abiotic stress tolerance in plants and improved grain yield in maize under water-limited conditions [J].

- Plant Physiology, 2008, 147(2): 446-455.
- [26] GONZALEZ F G, CAPELLA M, RIBICHICH K F, et al. Field-grown transgenic wheat expressing the sunflower gene *HaHB4* significantly outyields the wild type[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(5): 1669-1681.
- [27] RIBICHICH K F, CHIOZZA M, ÁVALOS-BRITEZ S, et al. Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HB4 [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71(10): 3142-3156.
- [28] JAHROMI M G, RAHNAMA H, MOUSAVI A, et al. Comparative evaluation of resistance to potato virus Y (PVY) in three different RNAi-based transgenic potato plants[J]. Transgenic Research, 2022, 31(3): 313-323.
- [29] HUNG Y H, SLOTKIN R K. The initiation of RNA interference (RNAi) in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2021, 61: 102014
- [30] HAN S J, CHO H S, YOU J S, et al. Gene silencing-mediated resistance in transgenic tobacco plants carrying potato virus Y coat protein gene [J]. Molecules and Cells, 1999, 9(4): 376-383.
- [31] BEACHY R N, LOESCH-FRIES S, TUMER N E. Coat protein-mediated resistance against virus infection[J]. Annual Review of Phytopathology, 1990, 28: 451-472.
- [32] GOLDBACH R, BUCHER E, PRINS M. Resistance mechanisms to plant viruses: an overview[J]. Virus Research: An International Journal of Molecular and Cellular Virology, 2003, 92(2): 207-212.
- [33] WILSON T M. Strategies to protect crop plants against viruses: pathogen-derived resistance blossoms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1993, 90(8): 3134-3141.
- [34] LAWSON C, KANIEWSKI W, HALEY L, et al. Engineering resistance to mixed virus infection in a commercial potato cultivar: resistance to potato virus X and potato virus Y in transgenic russet burbank[J]. Nature Biotechnology, 1990, 8:127-134.
- [35] FITCH M M M, MANSHARDT R M, GONSALVES D, et al. Virus resistant papaya derived from tissues bombarded with the coat protein gene of papaya ringspot virus[J]. Biotechnology, 1992, 10: 1466-1472.
- [36] BONFIM K, FARIA J C, NOGUEIRA E O, et al. RNAi-mediated resistance to bean golden mosaic virus in genetically engineered common bean (*Phaseolus vulgaris*)[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2007, 20(6): 717-726.
- [37] 李华平, 张曙光, 饶雪琴, 等. 抗病毒转基因番木瓜华农1号的安全性评价[C]//中国植物病理学会2007年学术年会论文集. 2007: 209-212.
- [38] SHEPHERD D N, MANGWENDE T, MARTIN D P, et al. Maize streak virus-resistant transgenic maize: a first for Africa[J]. Plant Biotechnology Journal, 2007, 5(6): 759-767.
- [39] HEAD G P, CARROLL M W, EVANS S P, et al. Evaluation of SmartStax and SmartStax PRO maize against western corn rootworm and northern corn rootworm: efficacy and resistance management[J]. Pest Management Science, 2017, 73(9): 1883-1899.
- [40] AQUINO C. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2021-09-27) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Brasilia_Brazil_10-20-2021.pdf.
- [41] AQUINO C. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2022-09-27) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2022-0064.pdf.
- [42] 李梦杰, 贺晓云, 全涛, 等. 阿根廷转基因作物安全管理制度概况及进展[J]. 生物技术进展, 2021, 11(6): 676-687.
- [43] BICKFORD R. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2022-12-27) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_AR2022-0023.pdf.
- [44] YANKELEVICH A. Agricultural biotechnology annual [R/OL]. (2021-01-26) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_10-20-2020.
- [45] JAMES C. Global status of transgenic crops in 1997[M]. Ithaca: ISAAA, 1997.
- [46] 黄耀辉, 焦悦, 叶纪明. 转基因作物在南非的应用及对我国的启示[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(5): 163-172.
- [47] ISAAA. Global status of commercialized Biotech/GM crops in 1998[R]. Ithaca: ISAAA, 1998.
- [48] ESTERHUIEN D. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2022-11-14) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Pretoria_South%20Africa%20-%20Republic%20of_SF2022-0033.pdf.
- [49] NOJICA-SEVILLA F. Agricultural biotechnology annual [R/OL]. (2022-11-14) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Manila_Philippines_RP2022-0058.pdf.
- [50] GUERRERO M, SPECIALIST A. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2017-11-06) [2022-12-22]. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Agricultural%20Biotechnology%20Annual%202017_Madrid_Portugal_11-6-2017.pdf.
- [51] GUERRERO M. Agricultural biotechnology annual[R/OL]. (2022-11-14) [2022-12-22]. <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural%20Bio>

- technology%20Annual_Madrid_Spain_SP2022-0025.pdf.
- [52] 黄大昉. 我国转基因作物育种发展回顾与思考[J]. 生物工程学报, 2015, 31(6): 892-900.
- [53] 张锐, 王远, 孟志刚, 等. 国产转基因抗虫棉研究回顾与展望[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(4): 32-42.
- [54] JIANG L, LIU X, XIONG G, et al. DWARF 53 acts as a repressor of strigolactone signalling in rice[J]. Nature, 2013, 504(7480): 401-405.
- [55] DENG Y, ZHAI K, XIE Z, et al. Epigenetic regulation of antagonistic receptors confers rice blast resistance with yield balance[J]. Science, 2017, 355(6328): 962-965.
- [56] WANG H, SUN S, GE W, et al. Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies *Fusarium* head blight resistance in wheat[J]. Science, 2020, 368(6493): eaba5435.
- [57] SHAN Y, SHU C, HE K, et al. Characterization of a novel insecticidal protein Cry9Cb1 from *Bacillus thuringiensis*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(13): 3781-3788.
- [58] WU K, WANG S, SONG W, et al. Enhanced sustainable green revolution yield via nitrogen-responsive chromatin modulation in rice[J]. Science, 2020, 367(6478): eaaz2046.
- [59] 赵艳, 邓春泉, 邓丽蝶. 洁净DNA转化获得2mG2-*epsps*基因单拷贝整合的抗草甘膦水稻[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 15-22.
- [60] WANG X J, SU Y Y, DONG Y F, et al. A novel double T-DNA system for producing stack and marker-free transgenic plants[J]. Biologia Plantarum, 2016, 60(4): 767-773.
- [61] 秦利军, 李启龙, 赵德刚. 叶片衰老诱导FLP重组酶删除转基因烟草外源基因的研究[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(6): 90-97.
- [62] WANG K, SHI L, LIANG X, et al. The gene *TaWOX5* overcomes genotype dependency in wheat genetic transformation[J]. Nature Plants, 2022, 8(2): 110-117.
- [63] 刘艳. 农杆菌介导的玉米遗传转化技术的优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [64] 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.
- [65] LIU M M, ZHANG X J, GAO Y, et al. Molecular characterization and efficacy evaluation of a transgenic corn event for insect resistance and glyphosate tolerance[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2018, 19(8): 610-619.

(责任编辑: 金兰)

2023年全国油菜主要病虫害发生趋势预报

据全国农技中心组织各省(区、市)测报技术人员和有关专家,根据冬前病虫害发生基数、油菜种植情况和冬春季气候条件等因素综合分析,预计2023年全国油菜病虫害总体中等发生,发生面积1.07亿亩次,重于上年。其中,菌核病在西南、长江中游和江南秋播油菜种植区偏重发生;霜霉病、蚜虫中等发生。

一、发生趋势

油菜菌核病发生面积4 500万亩,其中,四川、湖北、安徽、湖南、江西偏重发生,西南、长江中下游其他秋播油菜产区、河南中等发生,陕西偏轻发生。油菜霜霉病发生面积2 250万亩,西南、长江中下游、江南秋播油菜产区大部中等发生,安徽、河南、陕西偏轻及以下程度发生。油菜蚜虫发生面积2 900万亩,西南油菜产区、湖南、湖北、江苏、河南中等发生,长江中下游和江南秋播油菜其他地区、陕西、甘肃偏轻发生。此外,油菜病毒病在西南和长江中下游油菜产区偏轻及以下程度发生;油菜黄条跳甲、茎象甲、潜叶蝇在湖南、湖北、陕西、甘肃,黑缝叶甲、露尾甲、角野螟在湖南、陕西、甘肃等油菜产区会造成一定程度的危害;油菜根肿病在四川、湖南、湖北、安徽等部分油菜产区有一定程度发生。

二、预测依据

(一) 病虫害基数满足中等以上程度发生条件

1. 油菜菌核病在油菜主产区连年大面积发生,菌源丰富。
2. 蚜虫冬前发生普遍,部分地区虫口数量偏高。
3. 油菜霜霉病常年发生面积稳定,冬前有一定程度发生。

(二) 油菜品种抗性不高、苗株抗逆性不强,寄主条件有利于病虫害发生

2022年全国秋播油菜面积超过1亿亩,各地大面积种植油菜品种以双低高产甘蓝型为主,对菌核病、霜霉病、蚜虫和病毒病等主要病虫害的抗性较差。据全国农技中心油菜生产技术会商分析显示,经历夏秋连旱、入冬以来光温条件转好以及多次有效降雨等天气过程,截至2022年12月29日,长江中下游地区油菜苗情转化速度较快,但苗架基础不稳,苗株抗逆性不高,有利于病虫害的发生。

(三) 冬春季天气条件总体有利于油菜病虫害的发生

据国家气候中心预测,2022年冬季,全国秋播油菜主产区冬季气温接近常年或偏高,其中上海、江苏、浙江、安徽、江西东北部、河南东部、湖北东北部等地偏高1~2℃,有利于蚜虫等虫源基数增加。2023年春季,秋播油菜主产区气温偏高,部分地区降水较常年同期偏多,尤其是湖南西北部、重庆、四川东北部、陕西南部等地偏多2~5成,有利于油菜菌核病的发生流行。

(来源:病虫害测报处)