

回顾与展望

黄大昉 中国农业科学院生物研究所研究员。长期致力于农业生物技术研究，历任美国康奈尔大学 BTI 研究所访问科学家、中国农业科学院生物技术研究研究所所长、国家高技术研究发展计划 (863 计划) 生物领域专家委员会委员、国家重大基础研究计划 (973 计划) 项目首席科学家、农业领域咨询专家组组长、国家科技重大专项“转基因农业生物新品种培育” 监督评估组成员、战略性新兴产业发展规划专家咨询委员会委员、农业转基因生物安全委员会副主任委员等职务。



我国转基因作物育种发展回顾与思考

黄大昉

中国农业科学院生物研究所, 北京 100081

黄大昉. 我国转基因作物育种发展回顾与思考. 生物工程学报, 2015, 31(6): 892-900.

Huang DF. Review of transgenic crop breeding in China. Chin J Biotech, 2015, 31(6): 892-900.

摘要: 文章综述了近 30 年来我国转基因作物育种发展历程和基本经验, 并以实例说明我国已初步建成了世界上为数不多的转基因育种创新和产业开发体系, 包括基因发掘、遗传转化、良种培育、产业开发, 应用推广以及安全评价等关键环节; 棉花、水稻、玉米等作物转基因研究创新能力得到进一步提升, 初步形成了自己的研究特色和比较优势。本文对转基因作物育种当前存在的问题与面临的挑战进行了分析, 提出了推进重大研究成果产业化、加快重大专项实施和自主创新、加强转基因科学传播等三点建议。

关键词: 转基因作物, 农作物育种, 生物技术, 中国发展综述

Review of transgenic crop breeding in China

Dafang Huang

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

Abstract: The development history and fundamental experience of transgenic crops (Genetically modified crops) breeding in

Received: January 4, 2015; **Accepted:** January 23, 2015

Corresponding author: Dafang Huang. Tel: +86-10-62896113; E-mail: huangdafang@caas.cn

网络出版时间: 2015-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20150227.1143.009.html>

China for near 30 years were reviewed. It was illustrated that a scientific research, development and industrialization system of transgenic crops including gene discovery, transformation, variety breeding, commercialization, application and biosafety assessment has been initially established which was few in number in the world. The research innovative capacity of transgenic cotton, rice and corn has been lifted. The research features as well as relative advantages have been initially formed. The problems and challenges of transgenic crop development were discussed. In addition, three suggestions of promoting commercialization, speeding up implementation of the Major National Project of GM Crops, and enhancing science communication were made.

Keywords: transgenic crop, crop breeding, biotechnology, achievement review in China

以转基因技术为核心的生物技术的兴起是现代农业科学领域最伟大的事件。其中,转基因植物(又称遗传修饰植物)问世已超过30年,实现规模化应用也已近20年,转基因作物种类、种植面积、加工食物种类和应用人群迅速扩大。据国际农业生物技术服务组织(ISAAA)统计,2014年全球转基因作物种植面积已达到1.815亿 hm^2 ,与产业化发展之初的1996年相比,19年间面积增长了106倍,堪称农业科技发展史上的奇迹^[1]。转基因生物育种已成为新的农业科技革命的强大动力和科技创新的重要方向,其扩大应用已成为科学发展的必然。

1 我国转基因作物育种的发展历程

1.1 863计划开辟转基因育种新天地

我国转基因作物育种研究始于20世纪80年代。当时,世界新技术革命大潮汹涌澎湃,分子生物学和生物技术方兴未艾。1983年世界首例转基因植物——烟草的问世,在我国生物和农业科技界激起巨大反响,许多人为植物分子生物学和农业转基因技术所吸引,纷纷投身这一充满挑战、也充满希望的研究领域。1986年,我国改革开放的总设计师邓小平亲自批准组织实施国家高技术研究发展规划(863计划),并发出“发展高科技,实现产业化”的号召。他还精

辟指出:“将来农业问题的出路,最终要由生物工程来解决,要靠尖端技术”^[2]。在863计划的召唤下,许多满怀报国激情、学有所成的农业和生物学者争相回国,并带动越来越多的青年才俊艰苦创业、奋力开拓,我国转基因作物育种研究从此破土而出,并迅速成为现代农业科技发展的前沿。

863计划实施之初就将生物技术领域列为高技术七大领域之首。生物领域下设3个主题,在第一主题(101主题)的6个项目中,转基因植物为第一项目(代号101-01)。后来,抗虫棉花等转基因作物育种又列为生物领域重大关键技术和成果转化项目(代号Z17)。

1.2 转基因育种风生水起初显成效

由于在植物细胞生物学和组织培养方面有许多工作积累并能抓住新的发展机遇从高点切入,我国转基因植物研究很快在基因克隆、植物遗传转化等关键技术上取得突破。1990年以后转乙烯形成酶EFE反义基因的耐储藏番茄(华中农业大学研发)^[3]、转黄瓜花叶病毒外壳蛋白基因(CMV-CP)的抗病毒番茄和甜椒(北京大学研发)^[4-5]、转查尔酮合酶基因(CHS)改变花色的矮牵牛(北京大学研发)^[6]、抗虫转基因烟草(中国科学院微生物研究所研发)^[7]等一批转基因植物接连问世。其中,转烟草花叶病毒

外壳蛋白基因 (TMV-CP)、转黄瓜花叶病毒外壳蛋白基因 (CMV-CP) 及卫星 RNA 的抗病毒烟草 (北京大学、中国科学院微生物研究所分别研发)^[8-9]迅速从实验室走向田间, 一度成为世界上种植规模最大的转基因作物。这一时期研究活跃、进展迅速, 虽然番茄、甜椒和矮牵牛等转基因植物后来未能同育种技术深度结合而走向市场, 但重要的是这些阶段性成果显示了农业生物技术发展的巨大潜力, 也反映出我国科学家的智慧和活力, 为国内转基因育种产业以后的发展奠定了良好的基础。

1.3 转基因抗虫棉在激烈的国际竞争中走向产业化

随着试验研究不断积累和深入, 863 计划的目标从最初的跟踪模仿迅速转向自主创新和跨越发展。拥有自主知识产权的转 *Bt-CryIA* 和 *CpTI* 基因抗虫棉 (中国农业科学院生物技术研究所研发) 于 1997 年获得安全证书并率先实现产业化, 成为我国独立发展转基因育种, 打破跨国公司垄断, 抢占国际生物技术制高点的成功事例, 是整个 863 计划生物领域的一大亮点^[10]。截至 2012 年底, 我国转基因棉花种植率已达 95%, 河北、山东、河南、安徽等植棉大省已达 100%。受益农民总数超过 1 000 万, 棉农累计增收超过 939 亿元, 仅 2012 年就超过 135 亿元。抗虫棉的应用不仅挽救了岌岌可危的棉花生产, 而且大大减轻了棉铃虫对玉米、大豆等作物的危害, 总受益面积达 2 200 万 hm^2 ^[11]; 由于棉花杀虫剂用量降低了 70%–80%, 我国农业生态环境得到显著改善。抗虫棉不仅在国内占有绝对优势, 而且技术出口印度、巴基斯坦

等国, 在国际生物育种领域争得了一席之地 (图 1)。



图 1 抗虫三系杂交棉银棉 8 号

Fig. 1 Three line hybrid cotton (Yinmian 8) with pest resistance.

抗虫棉的成功也有力促进了国内转基因育种领域的拓展。转 *Xa21* 基因抗白叶枯病水稻 (中国农业科学院生物技术研究所研发)^[12]、转 *Bt-CryIA* 和 *Bt+SCK* 基因抗虫水稻 (华中农业大学、中国科学院遗传与发育生物学研究所分别研发)^[13]、转 *PRSV* 复制酶基因抗病毒番木瓜 (华南农业大学研发)^[14]、转 *Bt-cryIAC* 基因抗虫欧洲黑杨 (中国林业科学院与中国科学院微生物研究所合作研发)^[15]等自主研发成果相继推出, 标志着中国农业生物技术研究开始向国际前沿挺进。

1.4 安全管理为转基因育种提供有力保障

我国是较早实施转基因生物安全管理的国家之一。早在 1993 年, 国家科委就颁布了《基因工程安全管理办法》; 1996 年, 农业部制定并实施《农业生物基因工程安全管理实施办法》;

2001年,国务院制定并实施《农业转基因生物安全管理条例》。相关部门先后制定了5个配套规章和多个评价导则或指南;建立了由农业部主管,共12个部门组成的农业转基因生物安全部际联系会议制度;组成了由相关领域专家参加的国家农业转基因生物安全委员会和管理标准化技术委员会。有关法律法规和技术管理规程适合我国国情并与国际接轨,涵盖了转基因研究、试验、加工、经营、进口以及产品标识等各个环节。由于始终坚持科学评估和依法监管,我国转基因试验研究和生产应用从未发生过任何食品安全和环境安全事故。实践证明:转基因育种安全风险完全可控;经过科学评估、依法审批的转基因作物同非转基因作物一样安全。

1.5 重大专项给转基因育种创新注入新的活力

进入新世纪之后,世界粮食安全形势日趋严峻,进一步推动了农业生物技术研究产业化进程,全球形成了转基因“三F”作物(即Fiber

纤维作物、Feed饲料作物和Food粮食作物)的基本格局。除了863计划以外,国家重大基础研究计划(973计划)、战略性新兴产业计划、科技部专项计划等也给予转基因育种更大支持。特别是列为我国中长期科技发展规划16个国家科技重大专项之一的《转基因生物新品种培育》2008年实施后,棉花、水稻、玉米、小麦、大豆等五大作物实现了转基因育种与常规育种技术的深度结合,自主创新研究快速发展^[16]。其中,转*Cry1Ab/IAc*融合基因的抗虫水稻“华恢1号”及杂交种“Bt汕优63”(华中农业大学研发,图2)^[17]、转植酸酶*Phy A2*基因的BVLA430101玉米自交系(中国农业科学院生物技术研究所与奥瑞金公司联合研发,图3)^[18]于2009年获得农业部颁发的安全证书,成为我国转基因育种技术水平全面提升的重要里程碑。随后,在加快抗虫水稻和植酸酶玉米品种选育的同时,拥有自主知识产权的三系杂交和优质抗虫棉、抗虫和抗除草剂转基因玉米、转人血清白蛋白基因水稻^[19]、转*WYMV-Nib8*基因

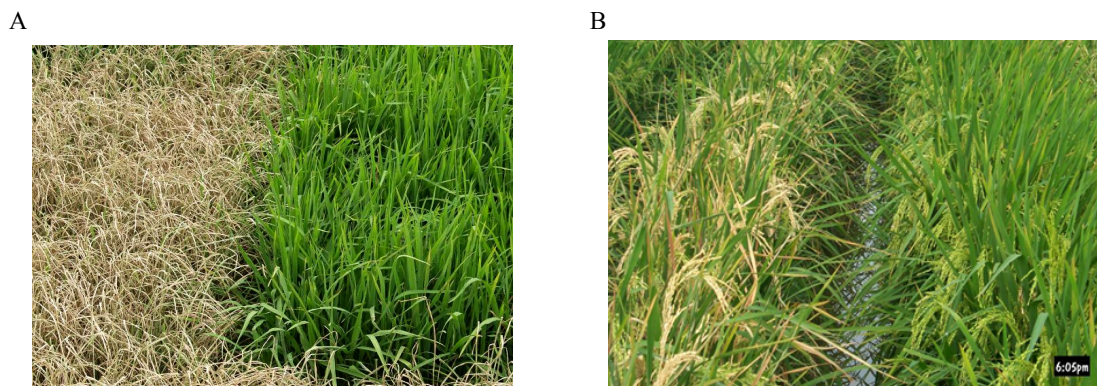


图2 转Bt基因抗虫水稻(Bt汕优63)与非转基因水稻田间生长情况比较

Fig. 2 Growth comparison between Bt rice (Bt Shanyou 63) and non-Bt rice control in field trial. (A) Seedling stage. (B) Heading stage.



图3 转植酸酶基因玉米蠡玉 35

Fig. 3 Phytase corn (Liyu 35) in field trail.

抗黄花叶病毒病小麦、转 *DREB* 基因节水耐旱小麦等一批功能多样、应用潜力巨大的转基因作物成果纷纷展现。此外，水稻、玉米、小麦、大豆规模化遗传转化^[20]、转基因生物安全评价^[21]、小麦、水稻基因组编辑^[22]等关键技术取得新的突破，研究应用达到了国际先进水平。在基因组学研究的有力推动下，重要功能基因发掘研究也取得了显著成效。例如，我国近 5 年鉴定克隆了 165 个 *BT-cry* 基因和 37 个 *Bt-vip* 基因，占全世界新登录 *BT* 杀虫蛋白基因总数的一半以上。水稻抗褐飞虱基因 *Bph14*、抗稻瘟病基因 *PigM*、抗草甘膦基因 *EPSPS-2mg2*、水稻理想株型基因 *IPA1*、棉花优质纤维基因 *iaaM* 和 *RRM2* 等均显示出良好的应用前景，耐旱耐盐、氮磷钾养分高效利用等基因的研究不断深入，为转基因育种下一步发展提供了必要的技术储备^[23]。

1.6 转基因作物育种自主研发体系基本建成

经过 20 多年的努力，尽管我国转基因育种

整体实力与跨国公司还有相当大的差距，但应看到，我国已拥有一支上万名科技人员组成的研发队伍；初步建成了世界上为数不多的、包括基因发掘、遗传转化、良种培育、产业开发、应用推广以及安全评价等关键环节在内的转基因育种创新和产业开发体系；已拥有抗病虫、抗除草剂、优质抗逆等一大批功能基因及相关核心技术的自主知识产权；棉花、水稻、玉米等作物转基因研究创新能力进一步提升，初步形成了自己的特色和比较优势。此外，创世纪、奥瑞金、大北农、中国种子集团等一批创新型生物育种企业先后诞生并迅速成长，成为我国现代种业发展进步的重要标志。

2 我国转基因作物育种的基本经验

2.1 高瞻远瞩，果断决策

现阶段我国高新技术的推进离不开国家的战略决策和政府部门的组织协调。正是基于保障粮食安全和提高科技竞争力的战略需求，我国历届领导人都大力支持包括转基因作物育种在内的农业生物技术的发展。从 863 计划到转基因新品种国家科技重大专项，这一战略决策始终如一，没有改变。

当年抗虫棉研究上马后仅用不到国外公司一半的研发周期就取得了重大突破，接着而来的问题是要不要大力推广应用国产抗虫棉？当时国内有些人并不看好我国独立研制的抗虫棉，迟迟不愿推广这项技术。社会上也有人散布“抗虫棉污染环境”等谣言，企图阻止转基因技术的发展。美国孟山都公司趁机提出抽取收益 60% 的“基因专利使用费”等苛刻条件，抢先将国外抗虫棉产品打入植棉大省河北和安徽，迅速

控制了当地棉种市场并扬言“三年占领华北，五年占领中国”。就在我国独立开发的第一个大宗转基因产品——抗虫棉生死存亡的关键时刻，时任国务院总理的朱镕基亲临中国农业科学院生物技术研究所，与从事抗虫棉研发的科技人员亲切会见，发出了“加快推广国产抗虫棉”的号召，终于使我国抗虫棉跨入了产业化发展的快车道，仅用 5 年时间就实现了市场占有率的逆转。

2.2 勇于创新，敢于竞争

“创新是民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力”。在转基因作物育种发展过程中，科技人员对这句话有深刻体会。面对农业生产的重大需求和技术市场国际竞争的巨大压力，我们痛切感到，转基因核心技术和成果买不来更要不来，唯有横下一条心，立足自主创新，敢于参与国际竞争。

抗虫棉之所以能 5 年取得技术突破、10 年覆盖全国市场，靠的正是一种顶天立地、敢为人先的拼搏精神和一丝不苟、务实求新的科学态度。转基因育种重大专项实施 6 年，由于重视创新人才的引进和培养、大力支持自主创新、着力推进上游研究与下游品种选育紧密结合，目前已获得一大批可用于生产的棉花、水稻、玉米、大豆和小麦转基因育种材料。虽然由于产业发展政策方面的原因，许多成果目前未能推广应用，但这些产品的安全性评价已有明确结论，其技术创新水平和育种潜力已充分显现。只要有坚定的决心、充分的自信和正确的指挥，不失时机地推动产业发展，我们不仅能够与国外公司抗衡，而且有望争得发展先机，抢占技

术制高点，促进转基因育种科研水平的进一步提升。

2.3 科学管理，体制创新

科学管理和体制创新是转基因育种成功的关键。例如，863 计划实施之初至 2000 年曾大胆进行过以专家委员会（组）工作机制为核心的改革探索，明确“专家委员会（组）是实施计划技术指挥与行政合一的机构”。除科技政策、发展规划、管理制度等重大问题由科技部统一决策外，具体项目则由具有资源调配能力、相对独立的专业性管理机构——中国生物工程发展中心组织和实施。研究课题评审、研究目标确定、技术路线选择、研究进度把握、工作绩效考核、研究经费分配等则放手由同行技术和管理专家组成的领域专家委员会负责与操作。专家委员会成员选拔标准是学风正派、做事公道、不承担研究课题，不仅有较高学术造诣，而且有较强的战略思维与指挥能力。在项目管理中专家委员会与行政部门密切配合，尤其重视宏观战略研究，着力做好“顶层设计”；确定重大和重点项目，提出需要联合攻关的技术关键；严格公正选拔优势单位和优势个人，大胆选拔和使用青年优秀人才；积极引导上游基因研究与下游育种生产应用紧密结合。正是管理理念的突破和体制机制的创新，才保证了上下协力同心，有效调动和发挥了科技人员的积极性，加快了转基因作物育种研究和产业化发展进程。这一经验值得认真总结和借鉴。

2.4 做大产业开拓市场

商业化育种是农作物种业发展的必由之路。转基因育种的价值最终必须接受市场检验

并通过规模化生产来实现。然而,国内“产学研”体制分割、农业企业规模小、经济实力不强、中试转化力量仍很薄弱,要在这样的基础上进行高新技术成果转化确实是个难题。但是,在国家政策支持下,在实践中勇于探索以企业为主体、以市场为导向、产学研结合的新路,多年来已积累了不少推进产业发展的新经验、新模式。例如,研究所以专利技术入股与企业组建合资公司、企业获得技术转让加快成果转化、企业引进国内外专业人才加强独立研发、企业与院校共建研究中心等。一批新型种子企业从高点切入,有力推动了种业发展和市场开拓,也为转基因育种的研究开发创造了有利条件。

3 我国转基因作物育种存在的问题与面对的挑战

3.1 当务之急是推进重大研究成果产业化

我国转基因作物育种研究开发几乎与国际同步,经过多年努力已获得一批研究达到国际先进水平、安全性完全有保障、产业发展潜力巨大、可以冲击国际技术前沿并与国外公司抗衡的成果,但遗憾的是由于受到“转基因安全”争议的负面影响,这些成果未能及时走向推广应用。然而,不进则退。产业化的滞缓必然导致科技竞争力的下降。近10年全球转基因技术发展日新月异,而我国生物育种整体水平与美国的差距重新拉大,发展速度与应用面积竟落到巴西、阿根廷、印度等发展中国家之后。特别是美国孟山都公司一举在全球收购了50多家种子公司,大力发展以转基因技术为核心的商业化育种体系,目前已占有世界转基因种子90%的专利权和多种作物种子70%以上的市场

份额,已成为跨国企业的龙头老大。我国科技竞争地位的削弱最终也导致农业对国际市场整体依赖程度不断增加,难以阻挡国外转基因作物产品大举进入,以致部分农产品市场陷入了受制于人的被动局面。

国内外实践已充分证明,转基因作物育种已处于战略机遇期,发展势不可挡,产业化的实现只是时间问题;加快推进有利于抢占市场先机和制高点,延误时间只会坐失良机而付出更大代价。当前应突破不符合科学、不适于发展需要的管理程序,尽快修订现行管理办法,简化和加快安全审批进程,做好转基因安全评价与品种管理的协调和衔接。对已有成果的技术成熟度、生物安全评价进展、知识产权地位、经济社会生态效益、开发应用前景、产学研结合现状、国内外竞争力等要素进行综合评估,选择发展最为紧迫的农作物,制定切实可行的、推进产业发展的“路线图”和“时间表”并付诸行动,力争3-5年内有较大突破^[24-25]。

3.2 加快重大专项实施与自主创新

实施科技重大专项是党中央、国务院着眼国家长远发展,推动自主创新,抢占科技制高点,实现经济发展方式转变做出的一项重大前瞻性、战略性决策,是我国新时期科技工作的重中之重。《转基因生物新品种培育》是列入我国中长期科技发展规划(2006-2020年)的16个国家重大科技专项之一,也是农业领域唯一的重大专项。尽管由于社会对“转基因安全”等问题认识不一,专项实施过程中遇到了一些困难和阻力,但重大专项的方向、定位和重大战略意义毋庸置疑,其提升农业科技创新水平的显著成效有目共睹,继续推进实施的决心不应有

任何动摇。当前要进一步做好战略规划,立足当前,兼顾长远,决不可削弱对重点研究课题和重大成果转化项目的支持力度。

3.3 加强转基因科学传播和舆论正面引导

转基因生物育种本是一项利国利民、惠及长远的先进农业技术,对“转基因安全”问题国内外主流科学界已有明确结论,但因受到反科学、伪科学流言的蛊惑和妖魔化转基因舆论的干扰,社会上非理性思维一度盛行,影响了公众对转基因科学的认知。因此,加强科学传播和科普宣传在当前具有特殊重要性和紧迫性。有关管理部门应加大转基因科普宣传力度,旗帜鲜明地进行舆论正面引导;科学界应加强与公众和媒体进行沟通交流,更多担当传递科学正能量的历史责任。

致谢:感谢郭三堆、林拥军和刘素霞课题组分别提供图片 1、2 和 3。感谢贾士荣、陈章良、许智宏先生细阅全文并提出宝贵意见。

REFERENCES

- [1] James C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA) Brief No. 47, Ithaca, NY, 2014.
- [2] Deng XP. The Selected Works of Deng Xiaoping, Volume 3. Beijing: People's Publishing House, 1993: 275 (in Chinese).
邓小平. 邓小平文选. 第三卷. 北京: 人民出版社, 1993: 275.
- [3] Ye ZB, Li HX, Zhou GL. Genetic transformation of antisense cDNA of polygalacturonase in tomato and transgenic plant regeneration. *Acta Horti Sin*, 1994, 21(3): 305–306 (in Chinese).
叶志彪, 李汉霞, 周国林. 番茄多聚半乳糖醛酸酶反义 cDNA 克隆的遗传转化与转基因植株再生. *园艺学报*, 1994, 21(3): 305–306.
- [4] Cheng YH, Wu G, Wang JW, et al. Transgenic tomatoes expressing cucumber mosaic virus coat protein are resistant to the virus. *Acta Botan Sin*, 1997, 39(1): 16–21 (in Chinese).
程英豪, 吴光, 王继伟, 等. 表达黄瓜花叶病毒外壳蛋白的转基因番茄抗黄瓜花叶病毒侵染. *植物学报*, 1997, 39(1): 16–21.
- [5] Zhu YX, Ouyang WJ, Zhang YF, et al. Transgenic sweet pepper plants from *Agrobacterium* mediated transformation. *Plant Cell Rep*, 1996, 16(1/2): 71–75.
- [6] Shao L, Li Y, Yang MZ, et al. Gene expression of chalcone synthase a (chsa) in flower colour alterations and male sterility in transgenic petunia. *Acta Botan Sin*, 1996, 38(7): 517–524 (in Chinese).
邵莉, 李毅, 杨美珠, 等. 查尔酮合酶基因对转基因植物花色和育性的影响. *植物学报*, 1996, 38(7): 517–524.
- [7] Tian YC, Qin XF, Xu BY, et al. Insect resistance of transgenic tobacco plants expressing δ -endotoxin gene of bacillus thuringiensis. *Chin J Biotech*, 1991, 7(1): 1–10 (in Chinese).
田颖川, 秦晓峰, 许丙寅, 等. 表达苏云金杆菌 δ -内毒素基因的转基因烟草的抗虫性. *生物工程学报*, 1991, 7(1): 1–10.
- [8] 赵淑珍, 王昕, 王革娇, 等. 由卫星互补 DNA 单体和双体基因构建的抗黄瓜花叶病毒的转基因番茄. *中国科学: B 辑*, 1990, (7): 708–713.
- [9] Yie Y, Zhao F, Zhao SZ, et al. High resistance to cucumber mosaic virus conferred by satellite RNA and coat protein in transgenic commercial tobacco cultivar G-140. *Molec Plant-Micr Inter*, 1992, 5(6): 460–465.
- [10] Jia SR, Guo SD, An DC, et al. *Transgenic Cotton*. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] Wu KM, Lu YH, Feng HQ, et al. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. *Science*, 2008, 321(5896): 1676–1678.
- [12] Wu JD, Yang JB, Xu CW, et al. Study on resistance gene to bacterial blight Xa21 transgenic rice and their hybrid combinations. *Acta Agric Sin*, 2001, 27(1): 29–35 (in Chinese).
吴家道, 杨剑波, 许传万, 等. 水稻抗白叶枯病基因 Xa21 转基因水稻及其杂交稻研究. *作物学*

- 报, 2001, 27(1): 29–35.
- [13] Zhu Z. Research and development of highly insect-resistant transgenic rice. *Bull Chin Acad Sci*, 2001, (5): 353–357 (in Chinese).
朱祯. 高效抗虫转基因水稻的研究和开发. *中国科学院院刊*, 2001, (5): 353–357.
- [14] Feng LX, Ruan XL, Zhou GH, et al. Evaluation of resistance to PRSV and selection of homogeneous line on the transgenic papaya plants. *J Zhongkai Agrotech Coll*, 2005, (4): 12–15 (in Chinese).
冯黎霞, 阮小蕾, 周国辉, 等. 转基因番木瓜抗病性测定和纯合系的获得. *仲恺农业技术学院学报*, 2005, (4): 12–15.
- [15] Tian YC, Li TY, Mang KQ, et al. Insect tolerance of transgenic *Populus nigra* plants transformed with *Bacillus thuringiensis* toxin gene. *Chin J Biotech*, 1993, 9(4): 291–297 (in Chinese).
田颖川, 李太元, 莽克强, 等. 抗虫转基因欧洲黑杨的培育. *生物工程学报*, 1993, 9(4): 291–297.
- [16] The State Council. The national medium and long-term program for scientific and technological development (2006–2020) (in Chinese).
国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006–2020 年).
- [17] Tu JM, Zhang GA, Datta K, et al. Field performance of transgenic elite commercial hybrid rice expressing *Bacillus thuringiensis* δ -endotoxin. *Nat Biotechnol*, 2000, 18: 1101–1104.
- [18] Chen RM, Zhang CY, Yao B, et al. Corn seeds as bioreactors for the production of phytase in the feed industry. *J Biotechnol*, 2013, 165(2): 120–126.
- [19] He Y, Ning TT, Yang DC, et al. Large-scale production of functional human serum albumin from transgenic rice seeds. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(7): 19078–19083.
- [20] Wan JM, Li Y. Efficient, safe and large-scale transgenic technology: opportunities and challenges. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(21): 4139–4140 (in Chinese).
万建民, 黎浴. 高效、安全、规模化转基因技术: 机会和挑战. *中国农业科学*, 2014, 47(21): 4139–4140.
- [21] Li YH, Peng YF, Hallerman EM, et al. Biosafety management and commercial use of genetically modified crops in China. *Plant Cell Rep*, 2014, 33(4): 565–573.
- [22] Wang YP, Cheng X, Shan QW, et al. Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. *Nat Biotechnol*, 2014, 32: 947–951.
- [23] Chong K, Xu ZH. Investment in plant research and development bears fruit in China. *Plant Cell Rep*, 2014, 33(4): 541–550.
- [24] Huang DF. Agricultural transgenic technology and biosafety management//Seminar of the 11th National People's Congress standing committee. Beijing: Democracy and Rule of Law Publishing House, 2013: 261–274 (in Chinese).
黄大昉. 农业转基因技术和安全管理//十一届全国人大常委会专题讲座 (2010 年 6 月 25 日). 北京: 中国民主法制出版社, 2013: 261–274.
- [25] Chen XY, Yang CQ, Jia HP. Issues confronting GMO crops in China. *J Huazhong Agric Univ*, 2014, 33(6): 118–120.

(本文责编 郝丽芳)