



## 我国转基因抗除草剂水稻的生态风险与控制

肖国樱\* 陈芬 孟秋成 周浩 李锦江 于江辉 邓力华 翁绿水

中国科学院 亚热带农业生态研究所/亚热带农业生态过程重点实验室,长沙410125

\*通讯作者, [xiaoguoying@isa.ac.cn](mailto:xiaoguoying@isa.ac.cn)

**摘要** 转基因抗除草剂水稻(*Oryza sativa*)的生态风险备受业界和公众关注。探讨其生态风险大小和收益多少,对于防范风险、明辨是非、权衡利弊、科学决策具有重要参考价值。以往研究注重单项风险分析,主要采用模拟条件分析,风险和效益的对比少、全局和集成分析不足。本文较全面地分析了转基因抗除草剂水稻的生态风险和收益,提出了控制生态风险的技术措施,对于促进我国转基因抗除草剂水稻的健康稳步发展具有现实意义。

**关键词** 转基因作物,水稻,抗除草剂,生态风险,风险控制

## Ecological Risk and Management of Herbicide-resistant Transgenic Rice (*Oryza sativa*) in China

XIAO Guo-Ying\* CHEN Fen MENG Qiu-Cheng ZHOU Hao LI Jin-Jiang YU Jiang-Hui

DENG Li-Hua WENG Lu-Shui

Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

\*Corresponding author, [xiaoguoying@isa.ac.cn](mailto:xiaoguoying@isa.ac.cn)

**Abstract** The ecological risk of transgenic herbicide-resistant rice(*Oryza sativa*) has been seriously concerned by professional and public. Evaluating the size of ecological risk and the amount of benefit has important reference value in risk precaution, distinguishing right from wrong, weight the advantage and disadvantage, and scientific policy-making. The previous researches emphasised on individual risk analysis and mainly adopted the simulated environment, but there was less on comparison of risk and benefit and deficient on global and integrated analysis. This paper has comprehensively analysed the ecological risk and benefit of transgenic herbicide-resistant rice, and put forward technical approaches to control the ecological risk, that has vital practical significance in promoting healthy and steady development of transgenic herbicide-resistant rice in China.

**Keywords** Transgenic crop, Rice, Herbicide resistance, Ecological risk, Risk management

自1983年首次从烟草(*Nicotiana tabacum*)获得转基因植株以来(Zambryskit et al., 1983),转基因作物种植面积快速增长,2013年全球转基因作物的种植面积达到1.75亿 $\text{hm}^2$ ,是现代农业史上推广最为迅速的一类作物(James, 2013)。从2011年种植面积来看,抗除草剂转基因作物占59%,复合性状转

基因作物占26%,抗虫转基因作物占15%,其余性状的转基因作物不到1%(James, 2012)。但如果把复合性状中包含的抗除草剂性状合并到抗除草剂性状一起计算,抗除草剂作物估计要占整个转基因作物面积的80%以上。可见,抗除草剂性状在转基因作物中地位十分重要。

1985年转基因抗除草剂植物首先在烟草中获得(Comai et al., 1985), 1988年获得转基因抗除草剂大豆(*Glycine max*)(Hinchee et al., 1988)。之后抗除草剂大豆成为全球种植面积最大的转基因作物, 2013年达到8 450万 $\text{hm}^2$ , 占转基因作物的48.3%, 其余较大面积种植的转基因抗除草剂作物为玉米(*Zea mays*)、油菜(*Brassica campestris*)、棉花(*Gossypium* spp.)、甜菜(*Beta vulgaris*)和苜蓿(*Medicago sativa* Linn)(James, 2013)。转基因抗除草剂水稻(*Oryza sativa*)于1992年首次获得(Cao et al., 1992; Datta et al., 1992; Li et al., 1992; Toki et al., 1992), 1999年美国批准了Avatis公司(现为Bayer公司)转Bar基因抗除草剂水稻LLRICE06和LLRICE62的商业化种植申请(APHIS, 1999), 但由于市场前景不好公司并没有大面积种植。

不同的是, 非转基因的抗除草剂水稻在美国和中南美洲均广泛种植。美国BASF公司网站(<http://agproducts.basf.us/products/clearfield-rice.html>)和美国RiceTec公司网站(<http://www.ricetec.com/Products/Hybrids/clearfield#>)都有关于抗除草剂咪唑草烟(imazethapyr)的Clearfield™水稻的介绍; RiceTec公司目前主推的品种Clearfield XL729、Clearfield XL745、Clearfield XP756和Clearfield XP4534均为抗除草剂的杂交水稻。2011年杂交水稻面积占美国水稻种植面积的50%, 其中RiceTec公司的抗除草剂杂交水稻占美国杂交稻市场份额的76%, 占中南美洲市场份额的90% ([http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_5a3c6ad90102d8.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_5a3c6ad90102d8.html))。在抗除草剂水稻应用方面, 非转基因远远走在转基因的前面。

转基因和非转基因水稻抗除草剂的性状是类似的, 二者所带来的生态风险和收益也是类似的。评估和控制转基因抗除草剂水稻在我国的生态风险, 是科技界、政府和公众关心的重要问题。本文就此提出看法, 希望能抛砖引玉。

## 1 杂草化风险分析

水稻变杂草, 常人看来是一件不可能的事情。但是从历史来看, 水稻确实是在人类选择下由自生自灭的杂草驯化为依人类而生的作物; 从理论来看, 也不能排除改变几个基因使作物变为杂草的可能性。因此, 评估转基因水稻杂草化风险还是必要的。

杂草区别于作物的最显著特征可归纳为: 1) 繁

殖能力强; 2) 落粒性强; 3) 种子具有长短不一的休眠期; 4) 种子生存能力强; 5) 人类不宜长期食用。因此, 当转基因抗除草剂水稻在繁殖能力、落粒性、种子休眠性、种子越冬能力、营养品质等方面和一般水稻没有本质区别, 即处在常规水稻的变异范围之内, 就可以判定其和常规水稻一样杂草化风险很小。蒋显斌(2010)对抗除草剂水稻Bar68-1的生存竞争能力进行了检测, 发现与生存竞争力相关的主要农艺性状(分蘖数、株高、结实率、产量、再生能力等)均与对照没有显著差别, 有显著差异的性状(如剑叶宽、穗长和穗粒数)也在水稻性状变异范围之内; 说明转基因和非转基因水稻间生存竞争能力没有本质差异。崔荣荣等(2012)比较了农田生态环境下明恢86B、明恢86和杂交稻组合汕优63的生存竞争能力、繁育能力、落粒性、种子生存能力、越冬能力等; 结果表明, 无论在适宜季节还是非适宜季节, 明恢86B和明恢86的生存竞争能力和繁殖力都低于杂交稻组合汕优63, 明恢86B的生存竞争力和繁殖力都略低于明恢86, 种植了常规水稻明恢86、汕优63以及转基因抗草铵膦水稻明恢86B的试验田中第2年没有见到种子越冬发芽产生的自生苗; 说明转基因抗草铵膦水稻明恢86B在中国南京地区环境条件下演化为杂草的可能性较小。

转基因抗除草剂作物的杂草化风险受到质疑的原因是, 如果该作物成为杂草, 除草剂就对其失去作用。加拿大油菜地里发现个别油菜植株抗3种除草剂, 被称为“超级杂草”而受到质疑, 但其本质还是油菜, 能被另外一些除草剂杀死, 如大田常用的除草剂2,4-D(贾士荣, 金芜军, 2003)。同样, 转Bar基因的抗除草剂水稻Bar68-1、明恢86B等抗草铵膦, 但能被草甘膦、百草枯、甲噻磺隆等除草剂杀死。因此, 能抵抗所有除草剂的超级杂草和作物是不存在的。

## 2 种属间基因飘移风险分析与控制

水稻自身并不会变为杂草, 但如果能把抗除草剂基因转移到杂草中, 使杂草抗除草剂, 那就会缩短抗除草剂基因的经济寿命, 降低使用抗除草剂基因的收益。稻田生态系统中和水稻亲密接触的其他科属植物主要有稗(*Echinochloa oryzoides* (Ard.) Flritsch)、无芒稗(*E. crusgalli* var. *mitis*)、西来稗(*E. crusgalli* var. *zelayensis* (H. B. K.) Hitchc.)、旱稗(*E.*

*hispidula* (Retz.) Nees)、长芒稗(*E. caudata* Roshev.)、水莎草(*Juncellus serotinus* (Rottb.) C. B. Clarke)、异形莎草(*Cyperus difformis* L.)、牛毛毡(*Eleocharis yokoscensis* (Franchet & Savatier) Tang & F. T. Wang)、鸭舌草(*Monochoria vaginalis* (Burm. F.) Presl)、雨久花(*M. korsakowii* Regel et Maack)等。但其与水稻存在生殖隔离,不能经过传粉方式转移基因。如无芒稗与水稻亲缘关系较近,但是转 **Bar** 基因水稻花粉在无芒稗柱头上不能正常萌发生长、更不能穿过柱头,去雄无芒稗人工授以转 **Bar** 基因水稻花粉不能结实(宋小玲等, 2002a)。同样有证据表明,转基因抗除草剂水稻和稗草长期共存不会发生基因渗入(Wang et al., 2006)。因此,不存在转基因抗除草剂水稻通过传粉方式将抗除草剂基因转至稻属以外植物的风险。

世界上的稻属有 21 个野生种和 2 个栽培种。原产于中国的稻属植物有普通野生稻、药用野生稻、疣粒野生稻和亚洲栽培稻(即水稻)。自然条件下,药用野生稻和疣粒野生稻与水稻杂交不亲和、不能结实。人工授粉情况下,转基因水稻的花粉虽能在药用野生稻柱头上萌发生长并伸入柱头,但最终不能产生杂交种(宋小玲等, 2002b)。一般认为普通野生稻交配系统是风媒异交和自交的混合型,异交结实率不高。普通野生稻与水稻能够异交结实,但是大部分研究表明,抗除草剂水稻与野生近缘种的异交率一般小于 1% (Kumar et al., 2008)。但也有较高的报道,如 1.3 hm<sup>2</sup>(广州)和 1.8 hm<sup>2</sup>(三亚)的转基因抗除草剂水稻与普通野生稻相邻种植,顺风条件下转基因抗除草剂水稻向普通野生稻的基因飘移距离分别为 50 和 250 m、基因飘移频率最大值分别达到 18.00% 和 11.24% (Wang et al., 2006)。这些研究结果都是在人为造成相邻生长、人为控制花期相遇条件下取得的,而自然条件下的情况又怎样呢?

江西东乡野生稻是我国最北边的普通野生稻,原位群落抽穗从 8 月下旬开始至 11 月上中旬停止(余丽琴等, 2007),其花期与东乡当地种植的晚稻花期相遇,但保护点内禁止耕种、也没有水稻分布(吴瑞娟等, 2008)。湖南江永普通野生稻生长在四面环山山间盆地中的十多个自然荒塘里,茶陵普通野生稻生长在四周环山的湖里湿地,都是 9 月中旬始穗,茶陵普通野生稻终花期在 10 月中旬、江永普通野生稻在 11 月中旬(雷驰, 刘丽, 2006);当地种植

的晚稻安全齐穗期一般在每年 09-15,普通野生稻和晚稻虽有花期重叠,但普通野生稻保护点内禁止耕种、附近也不允许水稻种植。云南普通野生稻仅在景洪和元江县发现过,景洪的普通野生稻几乎绝迹,元江普通野生稻生长在海拔 780 m 的山塘中,周边没有栽培稻(戴陆园等, 2001);最近报道显示,元江、景洪两地均建立了原生境保护点;福建只在漳浦县发现有普通野生稻,也已经建立原生境保护点(王家祥等, 2009)。普通野生稻保护点内禁止耕种,周边缓冲区不允许水稻种植,因此,江西、湖南、云南、福建 4 省理论上不存在转基因抗除草剂水稻向普通野生稻飘移基因的可能性。

原产广西的普通野生稻抽穗从每年 08-24 开始至 12-1 结束(李容柏, 1994),覆盖广西晚稻花期。广西普通野生稻分布较广,5 个面积较大的地方分别建立了 3 个物理隔离式保护点和 2 个生计替代式保护点(陈成斌等, 2012),但还有较多零星分布的普通野生稻没有被隔离保护(王家祥等, 2009; 陈成斌等, 2012)。原产广东和海南的普通野生稻在广州自然条件下,每年 09-21 前始穗的占 5.6%, 09-21 至 10-10 始穗的占 76.2%, 10-10 以后始穗的占 18.2% (庞汉华, 陈成斌, 2002),普通野生稻花期覆盖广东晚稻花期。广东高州已经建立普通野生稻保护点,但雷州、遂溪、恩平、惠阳、增城、惠来等地普通野生稻尚未保护(王家祥等, 2009)。海南万宁普通野生稻抽穗期从每年 10-21 前后至 11-20 左右,与当地晚稻再生穗花期相遇(董轶博等, 2008)。文昌、琼海、万宁和儋州已建立普通野生稻原生境保护点,但还有三亚、琼山、澄迈等地普通野生稻尚未保护(王家祥等, 2009)。由此可见,广西和广东存在转基因抗除草剂晚稻向未保护普通野生稻飘移基因的可能性,海南存在转基因抗除草剂晚稻的再生稻向未保护普通野生稻飘移基因的可能性。为了保证普通野生稻的纯洁性,三省未保护的普通野生稻分布点周边至少 250 m 内应禁止种植转基因抗除草剂晚稻。

自然界物种普遍杂居,基因渐渗是物种进化动力之一。转基因抗除草剂水稻由于具有人工加入的新性状,保险起见,不能种在普通野生稻的附近。但常规栽培稻作为普通野生稻驯化的产物,相邻而居应该是很自然的事情。现在普通野生稻地盘越来越小,建立保护点很有必要,但保护点周边缓冲区要允许适量的常规水稻种植。基因飘移不

是洪水猛兽,人为限制物种间基因交流也违反自然规律。纯洁的物种、遗传多样性不丰富的物种最容易受到自然力量的毁灭性打击。过度保护导致生境恶化、物种退化的例子也很多。

### 3 种内基因飘移风险分析和控制

水稻属于自花授粉作物,种内异交率低。种质库中选绿叶鞘、柱头外露率达70.8%的品种GB 90-2为花粉受体,同花期的紫叶鞘品种为花粉供体,穗子夹在一起的异交率为0.83%,间株混合种植的异交率为0.5%,间行种植的异交率为0.25%,每箱8株、间箱种植的异交率为0,平均异交率小于0.4%(Reaño, Pham, 1998)。种植面积为667 m<sup>2</sup>的转基因抗除草剂杂交早稻香125S/Bar68-1作为花粉源,同花期的杂交早稻香125S/D68作为花粉受体,测得最大异交率为0.295%、花粉最大有效飘移距离小于30 m(肖国樱, 2009)。种植面积为640 m<sup>2</sup>的转基因抗除草剂常规稻作为花粉源,杂交稻培杂双七、粤杂922作为花粉受体,测得顺风条件下最大基因飘移率分别为0.037%和0.045%、花粉最大有效飘移距离分别为40和30 m(Jia et al., 2007)。由此可见,自然条件下正常可育水稻间异交率小于0.4%、花粉有效飘移距离不超过40 m。

欧盟国家奥地利的纯净种子法规定,常规种子中转基因种子污染阈值为0.1%(薛达元, 2009)。由于水稻异交率随距离增加而急剧下降(Jia et al., 2007),可育水稻品种间异交率保证低于0.1%阈值的距离不会超过5 m(贾士荣等, 2014)。美国的商品水稻种子繁殖必须和其他水稻品种隔离6 m(薛达元, 2009)。三系杂交水稻保持系和恢复系的原原种纯度要求不小于99.95%,提纯繁殖时要求隔离20 m以上(袁隆平, 陈洪新, 1988)。国外杂交稻并不普及,国内不仅杂交稻面积大,而且转基因水稻也不乏杂交稻和杂交稻亲本。因此,建议正常可育的转基因水稻原种繁殖的隔离距离不把常规稻和杂交稻亲本分开处理,统一隔离距离为20 m。

如果花粉受体为不育系,则基因飘移率和飘移距离都会增大。如博A、中9A、GD-1S和培矮64S作为花粉受体,测得最大基因飘移率分别为36.116%、32.651%、8.81%和3.145%,花粉最大有效飘移距离分别为40、150、50和60 m(Jia et al., 2007)。面积为78.5 m<sup>2</sup>的转基因抗除草剂常规稻作

为花粉源,博A作为花粉受体,测得最大基因飘移率为86.73%、主风向上0~19 m的平均基因飘移率为26.24%(Yuan et al., 2007)。当花粉源小(4 m<sup>2</sup>)、花粉受体为部分可育的两系不育系时,最大有效飘移距离小于9 m,最大基因飘移频率为4.518%(肖国樱, 2009)。三系杂交水稻不育系的原原种纯度要求不小于99.98%,三系不育系提纯繁殖时要求隔离700 m以上;杂交水稻制种空间隔离距离,山区和丘陵区50 m以上、平原区100 m以上,时间隔离为制种田后抽穗的间隔20 d以上、制种田先抽穗的间隔25 d以上(袁隆平, 陈洪新, 1988)。从繁殖、制种、产量、劳动力供应、隔离条件等多方面考虑,繁殖和制种地点一般选取隔离条件好的山区和丘陵区,花期一般不与大面积生产重叠。因此建议:1)转基因杂交水稻制种隔离距离100 m,花期隔离时间20 d,二者配合使用时可适当降低标准;2)转基因水稻三系不育系原种提纯繁殖以距离隔离700 m、花期隔离25 d为好;3)转基因水稻两系不育系原种提纯和繁殖可降低标准,隔离距离50 m或隔离时间20 d足够满足纯度需求,因为冷水串灌或高海拔特殊条件下繁殖时不育系育性较好、自花授粉占绝对优势。

多数国家对转基因成分标识设置了阈值,欧盟为0.9%、澳大利亚/新西兰/以色列等为1%、韩国为3%、日本/中国台湾为5%(薛达元, 2009)。基于以上异交率和阈值数据,转基因抗除草剂水稻不需要与常规水稻隔离,大面积生产的常规水稻就能达到欧盟最严格的阈值要求。我国法规中规定需要标识,但没有规定阈值,由此造成转基因成分技术检出限有悖法规公正性和权威性,可操作性差。如甲地检出转基因成分、而乙地由于技术水平限制不能检出,转甲基因的0.05%就能检出、而转乙基因的可能要0.07%才能检出。我国是否需要实行转基因成分的标识和阈值管理,值得商榷。因为合法上市的转基因稻谷既然食用安全性没有问题,那么强制标识和设置阈值也就没有技术上的必要性。无论是零阈值标识,还是某种定量阈值标识,都会增加生产、流通和销售链条上的检测与标识成本,降低转基因稻谷市场竞争力,不仅会给转基因稻谷的生产者和消费者带来负担,也会间接推高非转基因稻谷的价格,最终损害全体消费者利益。当然,如果将其作为平衡转基因水稻和非转基因水稻利益和贸易保护的工具有,保护相对弱势的传统水稻产业

和产品,确实可以在眼下获得返老还童、留驻青春的风光效果,但从长远来看,会削弱整个水稻产业的生产能力和稻谷在国际市场上的竞争力,导致稻谷生产成本居高不下,最终推高国家维护口粮绝对安全的成本。

#### 4 杂草稻的基因飘移风险和后代适合度分析

尽管世界上关于杂草稻起源的观点尚不统一,但我国杂草稻起源于栽培稻、应归类到亚洲栽培稻的结论一致(许聪,吴万春,1996;马殿荣等,2008;邵菁等,2011;王黎明等,2012)。因此,转基因抗除草剂水稻与杂草稻之间的基因飘移属于种内基因飘移的范围。美国杂草稻(红稻)也属于亚洲栽培稻,其12种生物型与抗除草剂咪草烟的常规稻间最大基因飘移率变幅为0.03%~0.25%(Shivrain et al., 2008)。多项研究表明转基因水稻向杂草稻的基因飘移率变幅大多数在0.01%~0.90%,与向栽培品种的基因飘移率在数量级上基本相同,今后对杂草稻的基因飘移研究应侧重考虑转基因是否会增加新的风险(贾士荣等,2014)。

Oard等(2000)研究表明,抗草铵膦转基因水稻/红稻的 $F_2$ 群体与非转基因水稻/红稻的 $F_2$ 群体相比,植株活力、分蘖能力、种子休眠性和种子产量在每个地点均没有显著差异;植株高度和成熟期在一个地点虽然存在显著差异,但数值没有超过父本红稻的数值。Zhang等(2003)研究发现,抗草铵膦转基因水稻和红稻的杂交种植株高、生育期特长、正常生长季节不能结实; $F_2$ 群体中抗草铵膦基因分离符合孟德尔显性单基因分离规律;抗草铵膦的*Bar*基因存在没有增加杂交种或其后代的适合度和种子繁殖能力,有效的管理能延长抗除草剂技术的经济寿命。Zhang等(2008)研究表明,抗除草剂咪草烟水稻和红稻的杂种 $F_1$ 代在株高、始穗期和7个生殖相关性状上变异水平高,在株高、始穗期、有效穗、穗长和每穗总粒数方面杂种相对抗除草剂咪草烟水稻具有杂种优势;虽然杂种产量普遍低于抗除草剂咪草烟水稻,但有1个杂种的每穗实粒数还是比抗除草剂咪草烟水稻多;自然杂交和人工杂交产生的 $F_2$ 群体在所有检测性状上变异广泛,少部分 $F_2$ 植株繁殖种子能力较强,需要加强管理以减少杂交种及其后代的产生。Olguin等(2009)研究表明,抗除草剂转基因水稻和各类哥斯达黎加杂草稻的杂

种 $F_1$ 代表型差异大,杂种在营养性状、总粒数和穗长上具有正优势,但结实率明显低于亲本,是负优势。左娇等(2010)研究发现,2种抗除草剂转基因水稻和2种杂草稻的杂交代、回交代与相应的杂草稻相比适合度没有明显差异,大多数杂交种的适合度和回交代相差不大,个别杂交种的适合度没有回交代高。Chun等(2011)研究发现,抗除草剂转基因水稻与杂草稻杂交 $F_2$ 代中存在抗性基因纯合的个体在株高和种子产量上明显高于亲本和杂合体的现象。刘胜男(2013)研究表明,转基因抗除草剂水稻与我国6种类型杂草稻杂交,移栽方式下丹东、沈阳、肇庆杂草稻的 $F_1$ 代的适合度显著大于相应杂草稻的,另外3类由常州、泰州、湛江杂草稻产生的 $F_1$ 代的适合度与相应杂草稻无显著差异;直播方式下沈阳杂草稻的 $F_1$ 代的适合度显著大于沈阳杂草稻的,丹东和肇庆杂草稻 $F_1$ 代的适合度与相应杂草稻相当,其余3类 $F_1$ 代的适合度显著小于相应杂草稻的;丹东和沈阳杂草稻 $F_2$ 代的适合度显著大于相应杂草稻的,其余 $F_2$ 代的适合度显著小于或与相应杂草稻的相当;直播和移栽种植方式下丹东和沈阳杂草稻 $F_3$ 代的适合度均显著大于相应杂草稻的,移栽种植方式下湛江和肇庆杂草稻 $F_3$ 代的适合度显著大于相应杂草稻的,直播种植方式下常州和肇庆杂草稻 $F_3$ 代的总适合度显著小于相应杂草稻的,其余所有 $F_3$ 代的适合度与杂草稻之间没有显著差异。Wang等(2014)研究表明,2个选育品种(明恢86和转*Epsps*基因的明恢86)与4个杂草稻杂交的 $F_2$ 代中,过表达水稻自身*Epsps*基因的 $F_2$ 代比非转基因 $F_2$ 代的单株种子数增加48%~125%,EPSPS蛋白水平、色氨酸含量、光合速率、种子萌发率也相应较高。

从以上抗除草剂水稻/杂草稻的杂种后代适合度研究结果来看,虽然有关于外源基因增加杂交种后代适合度的报道(Zhang et al., 2008; Chun et al., 2011; 刘胜男, 2013; Wang et al., 2014),但转基因抗除草剂水稻与杂草稻产生的杂交种及其后代的性状变化水平均没有超出水稻种内杂种所产生的杂种优势或杂种劣势水平。如籼爪交杂种理论产量超亲优势最大可达671.72%、最小为-100%、变异系数167.32%,粳爪交杂种理论产量超亲优势最大可达316.14%、最小为-100%、变异系数177.359%(肖国樱,袁隆平,2009)。从已有的研究结果来看,杂草稻后代适合度有高有低,符合水稻种内杂交产生

后代的性状变化规律,外源基因的加入并未改变和超越这种规律。今后值得重点关注的问题:1)如何减少、乃至消除田间杂草稻;2)如何避免杂草稻与转基因抗除草剂水稻异交;3)如何避免异交后代的落粒和越冬繁殖。

## 5 利用抗除草剂水稻技术控制杂草稻的风险和效益分析

杂草稻广泛分布于世界各地的水稻产区。我国水稻栽培过去讲究精耕细作,杂草稻很少发生。但随着免耕、抛秧、直播等水稻轻简栽培技术的广泛采用,杂草稻危害日趋严重。我国已有25个省市发现杂草稻危害,尤以辽宁、宁夏、江苏中南部以及广东湛江地区危害严重,江苏苏中地区杂草稻平均发生率为麦套稻(59.8%)>直播稻(34.5%)>抛栽稻(5.6%)>移栽稻(2.2%)(梁帝允,强胜,2011)。湖南省植物保护研究所2008年组织我国杂草科学专家在该省水稻主产区宁乡、赫山区和环洞庭湖区进行调查,发现约有2.67万 $\text{hm}^2$ 常规稻稻田遭受不同程度的杂草稻危害,但在杂交稻种植田/区很少发生或基本不发生杂草稻危害,这可能归功于杂交稻育种和种子生产过程中的严格控制。本文认为,我国近10多年杂草稻危害日益严重的原因,主要是农民自留种子不纯、耕作粗放、没有有效的化学防除方法所致。

抗除草剂水稻和杂草稻能够异交,存在抗除草剂基因失效的风险。但是不去使用抗除草剂水稻的话,固然不会产生这种风险,可是也没有任何收益,只能任由杂草稻的危害扩大和稻谷产量的损失。现在也不能用除草剂去杀杂草稻(包括野生稻),因为能杀死杂草稻(野生稻)的除草剂也能杀死普通水稻。如果使用抗除草剂水稻导致杂草稻通过外源基因飘移获得了除草剂抗性的话,那么这种除草剂就失效了,那也只是回到了原点,但农民已经获得了这期间的收益。更何况还可以用另外基因赋予的别的除草剂抗性来治理杂草稻。美国是杂草稻危害严重的国家,阿肯色州的红稻危害导致每 $\text{hm}^2$ 平均损失近300美元(Shivrain et al., 2008)。美国运用抗除草剂咪草烟的水稻,很好的实现了杂草和杂草稻的防治,2008年抗咪草烟的常规水稻和杂交种占阿肯色和路易斯安那州水稻的40%(Shivrain et al., 2008);2011年抗咪草烟的杂交稻占

了美国水稻的50% ([http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_5a3c6ad90102d8.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_5a3c6ad90102d8.html))。快速增长的抗咪草烟水稻给美国人带来了简便治理杂草稻的实惠,减少了杂草稻造成的产量损失。美国2002年开始大面积使用抗咪草烟水稻至今已有12年,还没有看到抗咪草烟水稻失效的报道。假如将来有一天抗咪草烟水稻失效了,美国人还有转 $\text{Bar}$ 基因抗草铵膦的转基因水稻可供使用,又能治理杂草稻至少十几年。我国转基因抗虫棉花在整个研发和推广过程中也遇到了类似的风险警示,转基因抗虫棉从1997年开始大面积推广至今已有18年了,还没有发现棉铃虫田间种群对转 $\text{Bt}$ 基因棉花产生高水平抗性(刘晨曦等,2010),农民获得了18年的可观收益,棉田的农药载荷也减轻了18年。

抗除草剂水稻和普通野生稻、杂草稻的异交率数据均是在人为设置的理想条件下获得的,自然界的外源基因飘移频率受到花期、花时、风向、距离等影响不可能有这么高。转 $\text{Bar}$ 基因抗除草剂水稻使用灭生性除草剂草铵膦除草的较佳时期为5~6叶期(孙光辉,2013)和分蘖末期(周浩等,2013),如此时田间杂草稻被杀死那就没有外源基因飘移的可能性,如此时杂草稻只是受到伤害的话,也会导致其生长缓慢、花期推迟或花器官受损,很难与生长未受影响的转基因水稻花期相遇、完成异交。由此可见,利用抗除草剂水稻技术控制杂草稻的效益远大于风险,只要除草剂使用得当,抗除草剂水稻技术不仅提供了防除杂草稻的简单、有效方法,同时也防止了外源基因向杂草稻的飘移。

## 6 转基因抗除草剂水稻对非靶标生物多样性的影响分析

针对转 $\text{Bar}$ 基因抗除草剂水稻品系LLRICE06和LLRICE62对非靶标生物影响的多点实验结果表明,没有发现其对田间益虫、鸟类和其他经常出没田间的物种具有毒性,这些物种的群体水平在转基因水稻和非转基因水稻之间没有显著差异(APHIS, 1999)。转 $\text{Bar}$ 基因抗除草剂水稻 $\text{Bar68-1}$ 对非靶标生物稻飞虱、叶蝉、盲蝽和蜘蛛田间自然种群的影响与非转基因水稻基本相同(蒋显斌,肖国樱,2010a),并且对稻田叶冠层节肢动物的群落组成和多样性无显著影响(蒋显斌,肖国樱,2010b),对非靶标生物稻纵卷叶螟自然群落的影响

也与非转基因水稻基本一致(蒋显斌, 肖国樱, 2011); 褐飞虱在转基因水稻 Bar68-1 上的取食量、着虫率和产卵选择率与非转基因对照相比差异不显著(黄芊等, 2013)。转基因水稻对于土壤生态系统是否产生显著影响尚未得出确切的结论(谷荣辉等, 2014)。抗草甘膦的转基因油菜在生长季对根际微生物种类、数量和群落结构有显著影响, 但影响短暂且易恢复; 而抗草铵膦的转基因油菜、玉米和甜菜对根际微生物无显著影响(张艳军等, 2013)。

由此可见, 转基因抗除草剂水稻对于稻田生物多样性存在一定影响, 但是否显著因情况而定, 还没有发现普遍规律。稻田是一个复杂的生态系统, 其中生物种类、群落时刻处于变化之中, 水稻品种更替会产生各种影响。只要生物多样性的变化不降低稻田的可持续生产能力, 包括转基因抗除草剂水稻在内的任何品种更换都是可以接受的, 这应当成为稻田生态系统生物多样性研究的出发点和评判标准。

## 7 杂草抗性风险和环境效益分析

稻田杂草抗性是由于长期使用单一除草剂造成的。抗除草剂水稻的应用, 造成稻田长期使用单一除草剂, 加大了杂草产生抗性的风险。但由于转基因抗除草剂水稻对应的除草剂草甘膦和草铵膦低毒、低残留, 相比原来稻田常用除草剂二氯喹啉酸、苄嘧磺隆、吡嘧磺隆、氰氟草酯等更环保, 减少了除草剂残留带来的环境风险。如: 草甘膦在湘、桂、闽土壤中的半衰期小于 2 d(王彦辉等, 2010), 草铵膦在土壤中的半衰期为 3~7 d(苏少泉, 2005)。但二氯喹啉酸在不同土壤中的平均理论半衰期为 29.7 d(张倩, 2013), 有的残效期达 1 年以上(尹冬等, 2012), 苄嘧磺隆在土壤中的半衰期为 13~59 d(程玲等, 2008; 张倩, 2013), 吡嘧磺隆和氰氟草酯在不同土壤中的平均理论半衰期分别为 9 和 6.4 d(张倩, 2013)。

值得庆幸的是, 杂草对草甘膦不容易产生抗性(Kumar et al., 2008), 抗草铵膦的杂草更少。检索杂草科学网站([www.weedscience.org](http://www.weedscience.org)) 近期资料汇总如下: 全球稻田杂草产生除草剂抗性的有 142 例, 其中抗乙酰乳酸合成酶(acetolactate synthase, ALS)抑制剂的 84 例、抗乙酰辅酶 A 羧化酶(acetyl-

coA carboxylase, ACCase)抑制剂的 28 例、抗光合系统 II (photosystem II, PS II)抑制剂的 26 例、抗合成生长素的 17 例、抗脂类合成抑制剂的 5 例、抗长链脂肪酸合成抑制剂的 3 例、抗纤维素酶抑制剂的 1 例、抗类胡萝卜素合成抑制剂的 1 例、抗草甘膦的 1 例(多种抗性的分开统计); 稻田中至今没有发现抗草铵膦的杂草。所有农田中共发现抗草甘膦的杂草 30 例, 抗草铵膦的 2 例, 比率均很低。因此, 只要抗性治理措施得当, 稻田杂草很难产生草铵膦和草甘膦抗性, 转基因抗除草剂水稻的使用年限也将大大延长。此外, 在同时抗草甘膦和抗草铵膦的转基因水稻田中交替使用草铵膦和草甘膦, 或者抗草甘膦和抗草铵膦的转基因水稻轮作, 均可大大降低长期使用单一除草剂带来的杂草抗性风险(Deng et al., 2014)。

## 8 问题与展望

我国的转基因抗除草剂水稻生态风险研究在过去 10 多年发展较快, 积累了大量的数据, 在国际上产生了重要影响。但由于转基因水稻不能随意种植, 研究均在模拟环境条件下进行。如把本来不生长在一起的野生稻和转基因水稻人为放在很近的距离内研究, 人为调整播种期造成野生稻、杂草稻和转基因水稻的开花期同步。与实际情况相比, 这些模拟条件下得到的基因飘移数据肯定被高估, 风险也被人为放大。最重要的是, 这种高估和放大在文献中几乎不被提及, 这是转基因水稻生态风险评价中由于研究条件限制产生的不可忽视的系统误差, 今后的研究应该予以客观披露。

任何事物都具有两面性, 优劣总是形影相随。转基因抗除草剂水稻的生态风险不能忽视, 但其所带来的生态效益也是生态风险评估的重要组成部分, 需要加以客观分析和全面评价。转基因抗除草剂水稻的应用会导致除草剂用量减少、除草剂残留降低, 但其生态效益至今还很少有文章涉及。生态风险评估既要评价生态风险, 也要评价生态收益, 既要有单项风险分析, 也要有全面总体评价, 只有全面、公正、客观的评估才能成就评价的权威性和指导意义。

转基因抗除草剂水稻的生态风险评价是一个全新领域, 不仅涉及生态学, 还涉及农学、分子生物学等。如对于栽培稻和野生稻、籼稻和粳稻的杂交

后代分离情况和后代表现,我国水稻工作者积累了大量工作经验和数据,但对于生态学工作者来说还是近年才涉及的新课题;对于杂草稻,水稻育种者多从稻种资源角度去考虑其利用价值,开展过杂草稻资源的杂交利用工作,其后代变异规律也比较清楚,但很少关注其带来的生态风险。加强生态学和农学工作者的交流和配合,相互借鉴经验和数据,将对今后转基因抗除草剂水稻的生态风险评价产生很好的促进作用。

## 9 总结

尽管改变少数基因使水稻演变为杂草的可能性很小,但评估转基因抗除草剂水稻杂草化风险是必要的。稻属内只有普通野生稻能与水稻进行种间有性杂交。由于保护点所建立的地理隔离,各省保护点内普通野生稻理论上不存在转基因抗除草剂水稻基因飘移的可能性;但桂、粤、琼还有些普通野生稻分布点未被保护,其周边至少 250 m 内应禁止种植转基因抗除草剂晚稻。水稻是自花授粉作物,一般自然条件下正常可育水稻间异交率小于 0.4%、花粉有效飘移距离不超过 40 m。要获得纯度达标的种子,正常可育的转基因水稻原种提纯繁殖的隔离距离为 20 m;转基因杂交水稻制种隔离距离 100 m,花期隔离时间 20 d,二者配合使用时可适当降低标准;转基因水稻三系不育系原种提纯繁殖以距离隔离 700 m、花期隔离 25 d 为好;转基因水稻两系不育系原种提纯繁殖可降低标准,隔离距离 50 m 或隔离时间 20 d 足够满足纯度需求。转基因抗除草剂水稻不需要与常规水稻隔离,大面积生产的常规水稻谷就能达到欧盟最严格的阈值标准。实行转基因水稻的标识和阈值管理,可增加其生产、流通和销售环节的成本,平衡转基因水稻和非转基因水稻之间的商业利益,方便贸易保护,但会推高国家维护口粮绝对安全的成本。转基因抗除草剂水稻与杂草稻能够异交,且所产生后代的性状变化水平没有超出水稻种内杂交后代性状变异范围。利用抗除草剂水稻技术控制杂草稻的效益远大于风险。只要除草剂使用得当,抗除草剂水稻技术不仅提供了防除杂草稻的简单、有效方法,也同时防止了外源基因向杂草稻的飘移。评判转基因抗除草剂水稻田生物多样性优劣的标准是生物多样性的变化不降低稻田的稻谷可持续生产能

力。转基因抗除草剂水稻技术的应用,加大了杂草产生抗性的生态风险,减少了除草剂残留带来的环境风险,但杂草对草铵膦和草甘膦不易产生抗性、且抗性风险可通过交替使用草铵膦和草甘膦来降低。生态风险和生态效益的客观评价,生态学和农学的交流和借鉴,将对今后转基因抗除草剂水稻的生态风险评价产生很好的促进作用。

## 参考文献

- 陈成斌,张烨,曾华忠,等. 2012. 广西野生稻保护进展与思考[J]. 植物遗传资源学报, 13(2): 293-298. (Chen C B, Zhang Y, Zeng H Z, et al. 2012. Progress and thinking of conservation of wild rice in Guangxi [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 13(2): 293-298.)
- 程玲,李俊凯,王勇. 2008. 不同控制条件下土壤中苄嘧磺隆的残留动态初探[J]. 长江大学学报(自然科学版), 5(2): 61-63. (Cheng L, Li J K, Wang Y. 2008. Dynamics analysis of bensulfuron-methyl in soil under controlled environmental conditions [J]. Journal of Yangtze University (Nature Science Edit), 5(2): 61-63.)
- 崔荣荣,韦颖,孟攀潘,等. 2012. 抗草铵膦转基因水稻明恢 86B 杂草化潜力评价[J]. 中国水稻科学, 26(4): 467-475. (Cui R R, Wei Y, Meng P P, et al. 2012. Assessment on potential weediness of transgenic glufosinate-resistant rice Minghui 86B [J]. Chinese Journal of Rice Science, 26(4): 467-475.)
- 戴陆园,黄兴奇,张金渝,等. 2001. 云南省野生稻资源保存保护现状[J]. 植物遗传资源科学, 2(3): 45-48. (Dai L Y, Huang X Q, Zhang J Y, et al. 2001. Current status of wild rice resources conservation in Yunnan Province[J]. Plant Genetic Resources, 2(3): 45-48.)
- 董轶博,孔华,彭于发,等. 2008. 海南万宁普通野生稻居群开花习性和生殖特性研究[J]. 植物遗传资源学报, 9(2): 218-222. (Dong Y B, Kong H, Peng Y F, et al. 2008. Flowering and reproduction habits of *Oryza rufipogon* in Wanning city of Hainan Province [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 9(2): 218-222.)
- 谷荣辉,成功,李建钦,等. 2014. 转基因水稻对土壤性质及土壤生物的影响[J]. 云南农业大学学报, 29(3): 448-457. (Gu R H, Cheng G, Li J Q, et al. 2014. Effects of transgenic rice on properties and soil organisms [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 29(3): 448-457.)
- 黄芊,凌炎,蒋显斌,等. 2013. 转 *Bar* 基因水稻及草铵膦对褐飞虱取食和产卵行为的影响[J]. 南方农业学报, 44(7): 1110-1114. (Huang Q, Ling Y, Jiang X B, et al. 2013.

- Impacts of transgenic rice with **Bar** gene and glufosinate on feeding and oviposition behavior of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stal [J]. Journal of Southern Agriculture, 44(7): 1110-1114.)
- James C. 2012. 2011 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, 32(1): 1-14. (James C. 2012. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2011[J]. China Biotechnology, 32(1): 1-14.)
- 贾士荣, 金芑军. 2003. 国际转基因作物的安全性争论——几个事件的剖析[J]. 农业生物技术学报, 11(1): 1-5. (Jia S R, Jin H J. 2003. International debate on genetically modified crops: Scientific review on several cases of debate [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 11(1): 1-5.)
- 贾士荣, 袁潜华, 王丰, 等. 2014. 转基因水稻基因飘流研究十年回顾[J]. 中国农业科学, 47(1): 1-10. (Jia S R, Yuan Q H, Wang F, et al. 2014. What we have learnt in ten years' study of rice transgene flow [J]. Scientia Agricultura Sinica, 47(1): 1-10.)
- 蒋显斌. 2010. 转 **Bar** 基因抗除草剂水稻 Bar68-1 的生态风险评估[D]. 博士学位论文, 中国科学院研究生院, 导师: 肖国樱. (Jiang X B. 2010. Ecological risk assessment of genetically modified herbicide tolerant rice Bar68-1 with **Bar** gene [D]. Dissertation for Ph.D., Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Supervisor: Xiao G Y.)
- 蒋显斌, 肖国樱. 2010a. 抗除草剂转基因水稻对二种刺吸性害虫和二种天敌的影响[J]. 昆虫知识, 47(6): 1128-1133. (Jiang X B, Xiao G Y. 2010a. Effects of genetically modified herbicide tolerant rice (*Oryza sativa*) on population density of two sucking insect pests and two natural enemies in rice fields [J]. Chinese Bulletin of Entomology, 47(6): 1128-1133.)
- 蒋显斌, 肖国樱. 2010b. 转基因抗除草剂水稻对稻田叶冠层节肢动物群落多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 18(6): 1277-1283. (Jiang X B, Xiao G Y. 2010b. Diversity of arthropod community in the canopy of genetically modified herbicide-tolerant rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 18(6): 1277-1283.)
- 蒋显斌, 肖国樱. 2011. 抗除草剂转基因水稻对稻纵卷叶螟田间自然种群的影响[J]. 植物保护, 37(2): 50-54. (Jiang X B, Xiao G Y. 2011. Effects of genetically modified herbicide-tolerant rice on natural populations of rice leaf roller [J]. Plant Protection, 37(2): 50-54.)
- 雷驰, 刘丽. 2006. 湖南野生稻原生境现状及其保护对策[J]. 作物研究, 20(2): 187-189. (Lei C, Liu L. 2006. Status of origin place and protection strategy of wild rice in Hunan [J]. Crop Research, 20(2): 187-189.)
- 李容柏. 1994. 普通野生稻抽穗特性的调查研究[J]. 作物品种资源, (4): 13-15. (Li R B. 1994. Study on heading date of common wild rice (*Oryza rufipogon*) [J]. Crop Germplasm Resources, (4): 13-15.)
- 梁帝允, 强胜. 2011. 我国杂草稻危害现状及其防控对策[J]. 中国植保导刊, 31(3): 21-24. (Liang D Y, Qiang S. 2011. The current hazards and control methods of weedy rice in China [J]. China Plant Protection, 31(3): 21-24.)
- 刘晨曦, 李云河, 高玉林, 等. 2010. 棉铃虫对转 **Bt** 基因抗虫棉花的抗性机制及治理[J]. 中国科学: 生命科学, 40(10): 920-928. (Liu C X, Li Y H, Gao Y L, et al. Cotton bollworm resistance to **Bt** transgenic cotton: A case analysis [J]. Science China: Life Sciences, 2010, 53: 934-941.)
- 刘胜男. 2013. 抗草铵膦转基因水稻与不同类型杂草稻 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 的适合度研究[D]. 硕士学位论文, 南京农业大学, 导师: 宋小玲. (Liu S N. 2013. Research on fitness of F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> hybrids between glufosinate-resistant transgenic rice and each of different weedy rice accessions [D]. Thesis for M.S., Nanjing Agricultural University, Supervisor: Song X L.)
- 马殿荣, 李茂柏, 王楠, 等. 2008. 中国辽宁省杂草稻遗传多样性及群体分化研究[J]. 作物学报, 34(3): 403-411. (Ma D R, Li M B, Wang N, et al. 2008. Genetic diversity and population differentiation of weedy rice in Liaoning province of China [J]. Acta Agronomica Sinica, 34(3): 403-411.)
- 庞汉华, 陈成斌. 2002. 中国野生稻资源[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, pp. 100-101. (Pang H H, Chen C B. 2002. China Wild Rice Resources [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, pp. 100-101.)
- 邵菁, 戴伟民, 张连举, 等. 2011. 江苏省中部地区杂草稻遗传多样性及其起源分析[J]. 作物学报, 37(8): 1324-1332. (Shao J, Dai W M, Zhang L J, et al. 2011. Genetic diversity and origin of weedy rice in central region of Jiangsu province, China [J]. Acta Agronomica Sinica, 37(8): 1324-1332.)
- 宋小玲, 强胜, 刘琳莉, 等. 2002a. 通过转 **Bar** 基因水稻与稗草杂交的亲合性研究评价基因漂移[J]. 中国农业科学, 35(10): 1228-1231. (Song X L, Qiang S, Liu L L, et al. 2002a. Assessment on gene flow through detection of sexual compatibility between transgenic rice with **Bar** gene and *Echinochloa crusgalli* var. *mitis* [J]. Scientia Agricultura Sinica, 35(10): 1228-1231.)
- 宋小玲, 强胜, 刘琳莉, 等. 2002b. 药用野生稻 (*Oryza officinalis*)

- lis Wall)和转 *Bar* 基因水稻(*Oryza sativa* L.)花粉杂交的基因漂移[J]. 南京农业大学学报, 25(3): 5-8.(Song X L, Qiang S, Liu L L, et al. 2002b. Gene flow of pollen cross between *Oryza officinalis* Wall and transgenic rice with *Bar* gene [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 25(3): 5-8.)
- 苏少泉. 2005. 草铵膦述评[J]. 农药, 44(12): 529-532.(Su S Q. 2005. Glufosinate review [J]. Chinese Journal of Pesticides, 44(12): 529-532.)
- 孙光辉. 2013. 抗草铵膦转基因水稻向杂草稻和栽培稻的基因漂移及其田间除草剂施用技术研究[D]. 硕士学位论文, 南京农业大学, 导师: 宋小玲.(Sun G H. 2013. Risk assessment on gene flow from glufosinate-resistant transgenic rice to weedy rice and cultivated rice and the study on herbicide application techniques in glufosinate-resistant transgenic rice field [D]. Thesis for M.S., Nanjing Agricultural University, Supervisor: Song X L.)
- 王家祥, 陈友桃, 黄娟, 等. 2009. 中国普通野生稻(*Oryza rufipogon* Griff.)原生境保护与未保护居群的遗传多样性比较[J]. 作物学报, 35(8): 1474-1482.(Wang J X, Chen Y T, Huang J, et al. 2009. Comparison of genetic diversity between *in-situ* conserved and non-conserved *Oryza rufipogon* populations in China [J]. Acta Agronomica Sinica, 35(8): 1474-1482.)
- 王黎明, 李战胜, 高旭华, 等. 2012. 杂草稻、栽培稻及野生稻的遗传多样性比较[J]. 华中农业大学学报, 31(3): 275-280.(Wang L M, Li Z S, Gao X H, et al. 2012. Genetic diversities among weedy rices, cultivated rices and wild rices [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 31(3): 275-280.)
- 王彦辉, 李欣, 周小毛, 等. 2010. 草甘膦铵盐在苧麻田的残留及消解动态[J]. 农药学报, 12(2): 201-206.(Wang Y H, Li X, Zhou X M, et al. 2010. Residue and field decline study of glyphosate-ammonium in ramie field [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 12(2): 201-206.)
- 吴瑞娟, 金卫根, 饶军. 2008. 东乡野生稻原生地植被分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 36(6): 2429-2430.(Wu R J, Jin W G, Rao J. 2008. Studies on vegetation distribution in origin place of Dongxiang wild rice [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 36(6): 2429-2430.)
- 肖国樱. 2009. 抗除草剂转基因水稻花粉漂移距离及生态风险分析[J]. 杂交水稻, 24(4): 78-80.(Xiao G Y. 2009. The drift distance of pollen from herbicide resistant transgenic rice and ecological risk assessment [J]. Hybrid Rice, 24(4): 78-80.)
- 肖国樱, 袁隆平. 2009. 爪哇稻及其亚种间杂种优势研究[M]. 北京: 科学出版社, pp. 40-41.(Xiao G Y, Yuan L P. 2009. *Javanica* Rice and Heterosis of Inter-subspecific Hybrids [M]. Beijing: Science Press, pp. 40-41.)
- 许聪, 吴万春. 1996. 杂草稻的分类地位和利用途径探讨[J]. 海南大学学报自然科学版, 14(2): 146-151.(Xu C, Wu W C. 1996. A study on taxonomic position and utilization of weedy rices [J]. Natural Science Journal of Hainan University, 14(2): 146-151.)
- 薛达元. 2009. 转基因生物安全与管理[M]. 北京: 科学出版社, pp. 95, 245-247.(Xue D Y. 2009. Biosafety and Regulation for Genetically Modified Organisms [M]. Beijing: Science Press, pp. 95, 245-249.)
- 尹冬, 曾勇军, 章建其, 等. 2012. 稻烟轮作区二氯喹啉酸残留对烤烟药害研究进展[J]. 江西农业学报, 24(8): 38-40.(Yin D, Zeng Y J, Zhang J Q, et al. 2012. Research advance in phytotoxicity of quinclorac residue to flue-cured tobacco in rice-tobacco rotation area [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 24(8): 38-40.)
- 余丽琴, 徐巧玲, 邱兵余, 等. 2007. 原、异位保存东乡野生稻主要农艺性状的比较研究[J]. 植物遗传资源学报, 8(1): 99-101.(Yu L Q, Xu Q L, Qiu B Y, et al. 2007. Comparative studies on the main agronomic characteristics between *in-situ* and *ex-situ* conserved wild rice populations in Dongxiang [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 8(1): 99-101.)
- 袁隆平, 陈洪新. 1988. 杂交水稻育种栽培学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, pp. 159, 168, 210.(Yuan L P, Chen H X. 1988. Breeding and Cultivation of Hybrid Rice [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, pp. 159, 168, 210.)
- 张倩. 2013. 常用稻田除草剂对烟草生长的影响及其在土壤中的残留降解[D]. 硕士学位论文, 中国农业科学院研究生院, 导师: 李义强.(Zhang Q. 2013. Effects of typical herbicides in paddy on tobacco growth and their degradation dynamics in soil [D]. Thesis for M.S., Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Supervisor: Li Y Q.)
- 张艳军, 谢明, 彭德良. 2013. 转基因作物对土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 24(9): 2685-2690.(Zhang Y J, Xie M, Peng D L. 2013. Effects of transgenic crops on soil microorganisms: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 24(9): 2685-2690.)
- 周浩, 杨益善, 唐俐, 等. 2013. 草铵膦在转基因抗除草剂杂交稻直播栽培中的应用效果[J]. 作物研究, 27(5): 427-430.(Zhou H, Yang Y S, Tang L, et al. 2013. Application effect of glufosinate in direct seeding cultivation of transgenic herbicide resistant hybrid rice [J]. Crop Research, 27(5): 427-430.)
- 左娇, 强胜, 宋小玲. 2010. 温室条件下抗除草剂转基因水稻与杂草稻杂交和回交后代的适合度分析[J]. 中国水稻

- 科学, 24(6): 608-616.(Zou J, Qiang S, Song X L. 2010. Fitness of progenies between transgenic rice and weedy rice under greenhouse conditions [J]. Chinese Rice Science, 24(6): 608-616.)
- APHIS (Animal and Plant Health Inspection Service), USDA. 1999. Docket No. 98-126-2: Availability of determination of nonregulated status for rice genetically engineered for glufosinate herbicide tolerance [EB/OL]. Federal register, 64(80): 22595.
- Cao J, Duan X, McElroy D, et al. 1992. Regeneration of herbicide resistant transgenic rice plants following microprojectile-mediated transformation of suspension culture cells [J]. Plant Cell Reports, 11: 586-591.
- Chun Y J, Kim D I, Park K W, et al. 2011. Gene flow from herbicide-tolerant GM rice and the heterosis of GM rice-weed F<sub>2</sub> progeny [J]. Planta, 233: 807-815.
- Comai L, Facciotti D, Hiatt W R, et al. 1985. Expression in plants of a mutant *aroA* gene from *Salmonella typhimurium* confers tolerance to glyphosate [J]. Nature, 317: 741-744.
- Datta S K, Datta K, Soltanifar N, et al. 1992. Herbicide-resistant *indica* rice plants from IRRI breeding line IR72 after PEG-mediated transformation of protoplasts [J]. Plant Molecular Biology, 20: 619-629.
- Deng L H, Weng L S, Xiao G Y. 2014. Optimization of *epsps* gene and development of double herbicide tolerant transgenic PGMS rice [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 16(1): 217-228.
- Hinchee M A W, Connor-Ward D V, Newell C A, et al. 1988. Production of transgenic soybean plants using *Agrobacterium*-mediated DNA transfer [J]. Nature Biotechnology, 6: 915-922.
- James C. 2013. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2013 [J/OL]. ISAAA brief No. 46. ISAAA: Ithaca, NY.
- Jia S R, Wang F, Shi L, et al. 2007. Transgene flow to hybrid rice and its male sterile lines [J]. Transgenic Research, 16(4): 491-501.
- Kumar V, Bellinder R R, Brainard D C, et al. 2008. Risks of herbicide-resistant rice in India: A review [J]. Crop Protection, 27: 320-329.
- Li Z, Hayashimoto A, Murai N. 1992. A sulfonylurea herbicide resistance gene from *Arabidopsis thaliana* as a new selectable marker for production of fertile transgenic rice plants [J]. Plant Physiology, 100: 662-668.
- Oard J, Cohn M A, Linscombe S, et al. 2000. Field evaluation of seed production, shattering, and dormancy in hybrid populations of transgenic rice (*Oryza sativa*) and the weed, red rice (*Oryza sativa*) [J]. Plant Science, 157: 13-22.
- Olguin E R S, Arrieta-Espinoza G, Lobo J A, et al. 2009. Assessment of gene flow from a herbicide-resistant *indica* rice (*Oryza sativa* L.) to the Costa Rican weedy rice (*Oryza sativa*) in tropical America: Factors affecting hybridization rates and characterization of F<sub>1</sub> hybrids [J]. Transgenic Research, 18: 633-647.
- Reaño R, Pham J L. 1998. Does cross-pollination occur during seed regeneration at the international rice GenBank? [J]. International Rice Research Notes, 23(3): 5-6.
- Shivrain V K, Burgos N R, Gealy D R, et al. 2008. Maximum outcrossing rate and genetic compatibility between red rice (*Oryza sativa*) biotypes and Clearfield™ rice [J]. Weed Science, 56: 807-813.
- Toki S, Takamatsu S, Nojiri C, et al. 1992. Expression of a maize ubiquitin gene promoter-*bar* chimeric gene in transgenic rice plants [J]. Plant Physiology, 100: 1503-1507.
- Wang F, Yuan Q H, Shi L, et al. 2006. A large-scale field study of transgene flow from cultivated rice (*Oryza sativa*) to common wild rice (*O. rufipogon*) and barnyard grass (*Echinochloa crusgalli*) [J]. Plant Biotechnology Journal, 4(6): 667-676.
- Wang W, Xia H, Yang X, et al. 2014. A novel 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate (EPSP) synthase transgene for glyphosate resistance stimulates growth and fecundity in weedy rice (*Oryza sativa*) without herbicide [J]. New Phytologist, 202: 679-688.
- Yuan Q H, Shi L, Wang F, et al. 2007. Investigation of rice transgene flow in compass sectors by using male sterile line as a pollen detector [J]. Theoretical and Applied Genetics, 115: 549-560.
- Zambryskit P, Joost H, Genetelol C, et al. 1983. Ti plasmid vector for the introduction of DNA into plant cells without alteration of their normal regeneration capacity [J]. The EMBO Journal, 2(12): 2143-2150.
- Zhang N, Linscombe S, Oard J. 2003. Out-crossing frequency and genetic analysis of hybrids between transgenic glufosinate herbicide-resistant rice and the weed, red rice [J]. Euphytica, 130: 35-45.
- Zhang W, Linscombe S D, Oard J H. 2008. Genetic and agronomic analyses of red rice-clearfield hybrids and their progeny produced from natural and controlled crosses [J]. Euphytica, 164: 659-668.