

张桂权. 5G 水稻的演变和发展 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 211-216.

ZHANG Guiquan. Evolution and development of five generations of rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 211-216.

# 5G 水稻的演变和发展

张桂权

(华南农业大学 农学院/广东省植物分子育种重点实验室/亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广东 广州 510642)

**摘要:** 近百年来, 随着现代稻作农业的发展, 水稻 *Oryza sativa* L. 品种不断地更新换代。根据水稻品种的遗传基础、特征特性及演变规律, 本文把水稻品种分为 5 个世代 (G)。第 1 代 (1G) 为高秆水稻, 第 2 代 (2G) 为半矮秆水稻, 第 3 代 (3G) 为亚种内杂交水稻, 第 4 代 (4G) 为亚种间渗入水稻, 第 5 代 (5G) 为亚种间杂交水稻。在 5 代水稻中, 1G 高秆水稻在 20 世纪 60 年代后被半矮秆水稻替代, 之后基本没有大面积种植。2G 半矮秆水稻、3G 亚种内杂交水稻和 4G 亚种间渗入水稻从推广应用至今仍然在使用。5G 亚种间杂交水稻即将面世。每一代水稻的出现, 都是水稻品种的一次重大创新, 都带来水稻育种和生产的变革。认识水稻世代的演变规律, 对于把握水稻的发展方向具有重要意义。

**关键词:** 水稻; 育种; 品种; 世代; 演变; 农业

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)05-0211-06

## Evolution and development of five generations of rice

ZHANG Guiquan

(College of Agriculture, South China Agricultural University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Plant Molecular Breeding/State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In recent one hundred years, rice (*Oryza sativa* L.) varieties have undergone constant upgrading with the development of modern rice farming. According to the genetic basis, characteristics and evolution of rice varieties, this paper divides rice varieties into five generations (G). The first generation (1G) is tall rice, the second generation (2G) is semi-dwarf rice, the third generation (3G) is intra-subspecific hybrid rice, the fourth generation (4G) is inter-subspecific introgression rice, and the fifth generation (5G) is inter-subspecific hybrid rice. In five generations of rice, 1G of tall rice was replaced by semi-dwarf rice after the 1960s, and no more popularly planted afterwards. 2G of semi-dwarf rice, 3G of intra-subspecific hybrid rice, and 4G of inter-subspecific introgression rice are still being used today. 5G of inter-subspecific hybrid rice is coming to be applied. The emergence of each generation of rice is a major innovation in varieties, and has brought about changes in rice breeding and production. Understanding the evolution of rice generations is helpful to grasp rice development direction.

**Key words:** rice; breed; variety; generation; evolution; agriculture

收稿日期: 2019-06-03 网络首发时间: 2019-07-24 15:25:45

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190724.1033.002.html>

作者简介: 张桂权 (1957—), 男, 教授, 博士, E-mail: [gqzhang@scau.edu.cn](mailto:gqzhang@scau.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金 (91735304, 91435207); 广州市科技计划 (201607020040)

根据江西万年仙人洞和吊桶环等遗址考古提供的线索,人类稻作农业的起源可能有约 1 万年的历史<sup>[1]</sup>。在这 1 万年的稻作农业历史中,人类创造了丰富的水稻资源,为人类提供了主要食粮。20 世纪 20 年代后,科学技术应用于稻作农业中,形成了现代稻作农业。20 世纪 50 年代后,水稻育种发生了重大变革,半矮秆水稻的培育成功和推广应用,掀起了现代农业的“绿色革命”。在近百年的稻作农业中,水稻品种不断更新换代,推动了水稻生产的发展。总结水稻品种的变化规律,有助于把握水稻演变和发展的方向,对水稻育种和水稻生产均具有积极的意义。

根据水稻品种的遗传基础、特征特性及演变规律,本文把农业生产应用的水稻分为 5 个世代(Generation, G)。

## 1 第 1 代水稻: 高秆水稻

在 20 世纪 60 年代前约 1 万年的稻作农业中,人们种植的水稻基本为高秆水稻。1926 年,丁颖<sup>[2]</sup>在广州犀牛尾发现了野生稻,并收获其与当地栽培稻的自然杂交种,以此为基础,在 1933 年育成了水稻品种‘中山 1 号’。这是中国第 1 个通过杂交育成的水稻品种。

水稻高秆品种主要从农家品种中系统选育而成。例如,1934 年原江西省农学院在南昌农业试验场从农家品种‘鄱阳早’中选得变异单穗,育成了中熟早籼品种‘南特号’。20 世纪 50 年代,‘南特号’经提纯复壮后,在江西、福建、安徽、湖南、湖北、浙江、四川、广东、广西等省(区)大面积推广应用,成为南方各省适应性最强、最受欢迎的早籼稻品种<sup>[3]</sup>。随着双季稻种植面积的扩大,‘南特号’在南方稻区广泛作为早稻种植。

高秆水稻是稻作史上种植时间最长的第 1 代(1G)水稻。因此,通常称为传统水稻,包括传统籼稻和传统粳稻。在相当长的时间里,农民通过自选自留种子的方式种植,形成所谓的“农家品种”。进入现代稻作时期,人们才有意识地通过系统选育方法选优提纯。‘南特号’是我国种植区域广、推广面积大、使用时间长的一个优良高秆水稻品种。

## 2 第 2 代水稻: 半矮秆水稻

‘矮仔占’是我国最早大面积生产应用的半矮秆水稻品种。1941 年,广西容县华侨从东南亚回国时带回一些水稻种子,次年春播种,见其长得特

别矮,称其为‘矮仔占’。1953 年,收集整理农家品种时,把‘矮仔占’列为推广品种,容县种子站对其提纯复壮后发给农户种植。由于该品种矮秆抗倒,比高秆品种普遍高产,引起了人们的关注。此事分别于 1953 年在《广西日报》和 1955 年在广西《丰收快讯》报道,更引起了区内外人士的重视<sup>[4]</sup>。该品种在 1956—1965 年为广西当家品种,该品种的生产应用显示了半矮秆品种的优势,对水稻半矮秆品种的利用起了示范作用。

1955 年,黄耀祥通过系统选育从‘矮仔占’中选出性状更为优良的‘矮仔占 4 号’,1956 年再以‘矮仔占 4 号’为母本,与生产上推广应用的高秆品种‘广场 13’杂交,于 1959 年育成了半矮秆品种‘广场矮’<sup>[5]</sup>。‘广场矮’的育成,是世界水稻育种史上一次重大突破,从此,矮化育种得到迅猛发展。20 世纪 60 年代,黄耀祥和他领导的育种小组相继育成了早籼中熟半矮秆品种‘珍珠矮’(1961 年)、早籼早熟半矮秆品种‘广解 9’(1964 年)、‘广陆矮 4 号’(1966 年),以及‘广二矮’、‘广秋矮’等晚稻半矮秆品种,逐步实现了半矮秆品种的熟期配套,使半矮秆品种在我国得到广泛的推广应用<sup>[6-7]</sup>。

1956 年,广东省潮阳县农民洪群英和洪春利从水稻高秆品种‘南特 16 号’中系统选育出半矮秆品种‘矮脚南特’。此后,该品种在我国南方稻区大面积推广应用,成为当时的主栽品种<sup>[8]</sup>。1956 年,我国台湾地区用半矮秆农家品种‘低脚乌尖’与菜园种杂交,育成了半矮秆品种‘台中本地 1 号’。国际水稻研究所用‘皮泰’与‘低脚乌尖’杂交,1966 年育成了半矮秆品种‘IR8’,该品种被誉为第 1 个高产现代品种<sup>[9]</sup>。此后,以‘IR8’为矮源育成了一批半矮秆、高产、抗病的国际稻系列品种,使半矮秆品种在东南亚地区得到广泛推广应用。

半矮秆水稻包括现代常规籼稻和现代常规粳稻,是第 2 代(2G)水稻。由于化肥工业的发展,施用化肥后高秆品种容易倒伏,自然存在的半矮秆水稻资源由于具有抗倒伏的优势而被人工选择利用。通过半矮秆水稻育种,实现了半矮秆品种的更新换代。因此,半矮秆品种的成功培育及推广应用,被称为“绿色革命”。在这场水稻矮化育种的变革中,‘矮仔占’、‘矮脚南特’、‘低脚乌尖’是重要的矮化来源。‘矮脚南特’、‘广场矮’、‘珍珠矮’、‘IR8’等是水稻矮化育种的标记性品种。

### 3 第 3 代水稻: 亚种内杂交水稻

1964 年, 袁隆平<sup>[10]</sup>在洞庭早籼品种中发现败育型雄性不育株, 揭开了我国研究水稻雄性不育系的序幕。1970 年, 李必湖等在海南发现了花粉败育野生稻株(简称“野败”), 为培育不育系打开了突破口。此后, 通过全国杂交水稻研究的协作攻关, 先后育成了一批水稻雄性不育系和保持系, 并从国外引进品种中筛选到恢复系。1973 年, 我国籼型杂交水稻实现了三系配套。1976 年, 籼型杂交水稻在全国大面积推广应用, 这是水稻育种史上矮化育种后的又一次重大突破。1981 年, 谢华安等育成了杂交水稻品种‘汕优 63’, 该品种是我国杂交水稻推广面积最大和主栽时间最长的品种<sup>[11]</sup>。

1973 年, 石明松在湖北省沙湖原种场‘农垦 58’大田中发现光敏感核不育水稻植株。此后, 他一直致力于光敏感核不育二用系研究<sup>[12]</sup>, 1985 年育成了湖北光敏感核不育水稻。1987 年, 袁隆平组织了两系法杂交水稻研究协作组开展全国性的协作攻关。1995 年, 两系法杂交水稻取得成功, 这是继三系法杂交水稻后籼型杂交水稻技术的又一重大突破。1999 年, 邹江石等育成了两系杂交水稻品种‘两优培九’, 从 2001 年起该品种在全国各地广泛推广种植, 是一个有影响的两系杂交水稻品种<sup>[11]</sup>。

在粳型杂交水稻研究方面, 1950 年日本学者胜尾清用中国红芒野生稻与日本粳稻‘藤坂 5 号’杂交育成了‘藤坂 5 号’不育系。1966 年日本学者新城长友育成了具有钦苏拉包罗 II 细胞质的包台型(BT 型)‘台中 65’不育系, 并实现了三系配套<sup>[13]</sup>。在我国, 1965 年李铮友在‘台北 8 号’品种中发现雄性不育株, 后用‘红帽缨’测交转育, 1969 年育成了我国第 1 个水稻雄性不育系: 滇 1 型粳稻‘红帽缨’不育系, 1973 年实现了粳型杂交水稻三系配套<sup>[14]</sup>。1972 年, 我国从日本引进 BT 型‘台中 65’不育系。此后, 通过杂交转育先后育成了一批 BT 型粳稻不育系。粳型杂交水稻由于制种产量低和杂种优势不太强等因素限制了其在生产上的推广应用。

亚种内杂交水稻包括籼型杂交水稻和粳型杂交水稻, 是第 3 代(3G)水稻。亚种内杂交水稻的成功, 为自花授粉作物的杂种优势利用开了先河。在这创举中, “野败”细胞质是最重要的不育细胞质源, ‘汕优 63’是 1 个标记性的杂交水稻品种。

### 4 第 4 代水稻: 亚种间渗入水稻

1986 年, 日本的 Ikehashi 和 Araki 发现了水稻的 *S5-n* 基因, 认为利用 *S5-n* 基因可以克服籼粳亚

种间的杂种不育性, 因此 *S5-n* 基因被称为广亲和基因, 携带 *S5-n* 基因的品种被称为广亲和品种<sup>[15]</sup>。*S5-n* 基因的发现, 推动了籼粳亚种间杂交育种的开展。

1989 年, 国际水稻研究所提出了新株型水稻育种计划<sup>[9]</sup>。第 1 代的新株型育种试图通过培育热带粳稻来实现, 但没有取得满意的结果。第 2 代改为通过籼粳杂交来培育新株型品种, 取得了良好效果<sup>[16]</sup>。1996 年, 我国启动了中国超级稻育种计划。该计划提出了理想株型与优势利用相结合的超级稻育种技术路线<sup>[17-18]</sup>。1998 年, 袁隆平提出超级杂交水稻育种计划。

籼粳亚种间杂交育种一直是水稻育种关心的问题。早在 20 世纪 50 年代, 杨守仁等<sup>[19]</sup>就开始籼粳稻杂交问题的研究, 认为多次杂交对克服籼粳杂种不育性效果最好。此后, 又提出通过籼粳杂交培育理想株型品种的设想。20 世纪 70 年代, 杨振玉等<sup>[20]</sup>首创“籼粳架桥”制恢技术, 育成‘C57’和‘C418’等高配合力的粳型恢复系。20 世纪 90 年代后, 籼粳杂交育种已成为水稻育种的重要手段。邓启云<sup>[21]</sup>通过粳稻渗入籼稻的策略, 育成了广适性光温敏不育系‘Y58S’, 利用该不育系育成了 100 多个两系杂交水稻品种, 该不育系已成为我国第一大两系不育系。马荣荣等<sup>[22-23]</sup>通过籼稻渗入粳稻的策略, 育成了一系列不育系和恢复系, 并组配成甬优系列的三系杂交水稻新品种, 这些品种具有很强的产量潜力。

亚种间渗入水稻, 包括渗梗常规籼稻、渗籼常规粳稻、渗梗杂交籼稻和渗籼杂交粳稻, 是第 4 代(4G)水稻。这一代水稻在 2G 和 3G 水稻的基础上, 打破了亚种的育种界限, 拓宽了遗传资源的利用, 部分利用了亚种间的杂种优势, 从而提升了品种的产量水平。这一代水稻的变革是渐变式的, 不同品种携带亚种间遗传成分差异较大。Y 两优系列品种和甬优系列品种为 4G 水稻提供了范例。

### 5 第 5 代水稻: 亚种间杂交水稻

4G 水稻只能部分利用亚种间遗传资源和杂种优势。目前还没有真正意义上的籼粳亚种间杂交水稻品种通过审定, 这是由于籼粳亚种间存在严重的杂种不育性。籼粳亚种间杂种不育性除雌性不育外, 更普通和更复杂的是雄性不育性或称花粉不育性。*S5-n* 基因只是 *S5* 座位的中性等位基因, 只能克服籼粳亚种间的雌性不育性, 不能克服籼粳亚种间的雄性不育性。

张桂权和卢永根等通过对籼粳亚种间杂种不育性进行广泛而系统的遗传分析, 鉴定了 5 个杂种花粉不育性基因座, 分别命名为 *Sa*、*Sb*、*Sc*、*Sd* 和 *Se*<sup>[24-28]</sup>。分子标记出现后, 这 5 个基因座均通过分子定位得到验证<sup>[29-37]</sup>, 其中, *Sa* 和 *Sc* 基因已被克隆<sup>[38-39]</sup>。

*S5* 雌性不育基因座以及 *Sa*、*Sb*、*Sc*、*Sd* 和 *Se* 雄性不育基因座的基因模式均为“单基因座孢子体-配子体互作模式”。在这些基因座中, 粳稻携带的 *S-i* 基因与粳稻携带的 *S-j* 基因互作, 导致携带 *S-j* 基因的雌配子或雄配子败育<sup>[15, 25]</sup>。根据这个基因模式, 粳粳亚种间杂种不育性可以通过 2 个途径克服。途径一是利用这些基因座的 *S-i* 基因替代粳稻中的 *S-j* 等位基因, 培育“粳型亲籼系”<sup>[40]</sup>。经过多年努力, 粳型亲籼系已成功培育, 证明籼粳亚种间的杂种不育性可以利用这些基因来克服<sup>[41]</sup>。途径二是利用这些基因座的 *S-n* 基因替代籼稻中的 *S-i* 等位基因, 培育“籼型广亲和系”, 或替代粳稻中的 *S-j* 等位基因, 培育“粳型广亲和系”。

近年来, 广东省植物分子育种重点实验室利用这些基因座的 *S-n* 基因替代籼稻中的 *S-i* 等位基因培育了一批对粳型不育系具有亲和性的籼型恢复系。利用这些籼型恢复系与全国各地培育的粳型不育系广泛测交, 杂种普遍具有很高的结实率。通过在全国各稻区进行广泛的种植测试, 从中筛选出一批结实率正常, 适应不同生态稻区的籼粳亚种间杂交水稻组合。在全国多个稻区的生产试验表明这些籼粳亚种间杂交水稻组合具有很强的杂种优势、很大的产量潜力、很好的推广应用前景<sup>[42]</sup>。

籼粳亚种间杂交水稻将是第 5 代 (5G) 水稻, 这

一代水稻能够充分利用籼粳亚种间的杂种优势, 使水稻的产量潜力得到进一步的挖掘和提升。籼粳亚种间杂交水稻兼有籼稻和粳稻的优良特性, 适合在籼稻和粳稻生态区种植, 打破了籼稻和粳稻种植区域的界限, 是很有发展潜力的新一代水稻。

## 6 总结与展望

本文按水稻品种的遗传基础、特征特性及演变规律把水稻划分为 5 个世代 (图 1, 表 1)。每一代水稻的出现, 都使水稻品种产生本质上的改变, 都是一次重大创新, 都带来水稻育种和生产的变革。1G 高秆水稻自 20 世纪 60 年代后被 2G 半矮秆水稻替代, 之后基本没有大面积种植。2G 半矮秆水稻、3G 亚种内杂交水稻和 4G 亚种间渗入水稻自推广应用至今仍然在使用, 出现世代重叠的状态。即使 5G 亚种间杂交水稻推广应用后, 2G 至 5G 水稻仍然处于共存的态势 (图 1)。在 5 代水稻的变革中, 只有 2G 水稻能够取代 1G 水稻。因此, 2G 半矮秆水稻的推广应用是水稻史上最重要的一次变革。3G、4G 甚至 5G 水稻的出现, 均是在前一代或多代变革的基础上, 通过进一步挖潜实现的, 是水稻品种不断提升的过程, 反映了水稻品种演变的基本规律。

5G 水稻即将面世, 这是水稻发展的必然。亚种间杂交水稻的基础研究、技术创新和产品初试已基本完成, 但大规模研制和产业化仍需各方面的努力。5G 水稻的推广应用将实现亚种间杂种优势的利用, 这将是水稻的又一次重大变革, 将给水稻生产带来新的变化。

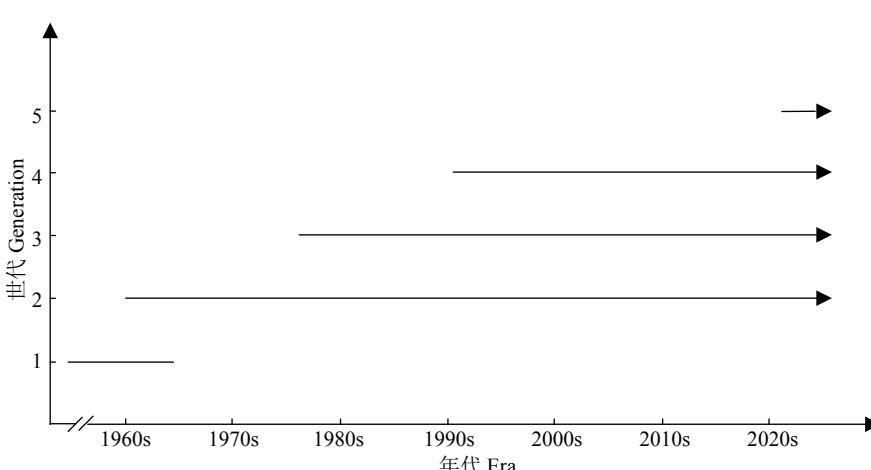


图 1 五代水稻形成及利用年代

Fig. 1 The years of formation and utilization of five generations of rice

表1 五代水稻的划分

Table 1 The division of five generations of rice

世代 Generation	名称 Name	品种类型 Type of varieties	遗传基础 Genetic basis	特征特性 Characteristic
1G	高秆水稻 Tall rice	传统籼稻 Conventional <i>indica</i> inbred rice	传统亚种基因型 Homozygous genotype of conventional subspecies	高秆 Tall stalk
		传统粳稻 Conventional <i>japonica</i> inbred rice		
2G	半矮秆水稻 Semi-dwarf rice	现代常规籼稻 Modern <i>indica</i> inbred rice	现代亚种基因型 Homozygous genotype of modern subspecies	半矮秆 Semi-dwarf stalk
		现代常规粳稻 Modern <i>japonica</i> inbred rice		
3G	亚种内杂交水稻 Intra-subspecific hybrid rice	籼型杂交水稻 <i>Indica</i> hybrid rice	亚种内杂合基因型 Heterozygous genotype of intra-subspecies	亚种内杂种优势 Heterosis of intra-subspecies
		粳型杂交水稻 <i>Japonica</i> hybrid rice		
4G	亚种间渗入水稻 Inter-subspecific introgression rice	渗粳常规籼稻 <i>Japonica</i> -introgressive <i>indica</i> inbred rice	亚种间基因渗入 Gene introgression of inter-subspecies	粗秆大穗 Thick stalk and large panicle
		渗籼常规粳稻 <i>Indica</i> -introgressive <i>japonica</i> inbred rice		
5G	亚种间杂交水稻 Inter-subspecific hybrid rice	籼粳亚种间杂交水稻 Hybrid rice of <i>indica/japonica</i>	亚种间杂合基因型 Heterozygous genotype of <i>indica/japonica</i>	亚种间杂种优势 Heterosis of inter-subspecies

## 参考文献:

- [1] 廖国良. 稻作之源江西万年仙人洞与吊桶环遗址[J]. 世界遗产, 2015(5): 110-115.
- [2] 丁颖. 广东野生稻及由野生稻育成之新种[J]. 中华农学会报, 1933, 114: 204-217.
- [3] 谢治平. 南特号的改进与栽培方法[J]. 农业科学通讯, 1955(7): 401-402.
- [4] 唐凌. 高产农作物促进民族经济融合中相关因素分析: 以容县华侨引进矮仔占水稻为例[J]. 八桂侨刊, 2008(2): 11-16.
- [5] 广东省农业科学院. 广东省水稻矮化育种工作初步总结[J]. 作物学报, 1966, 5(1): 33-40.
- [6] 黄耀祥. 水稻杂交育种“组群筛选法”之研究[J]. 广东农业科学, 1980(1): 5-13.
- [7] 黄耀祥, 陈顺佳, 陈金灿, 等. 水稻丛化育种[J]. 广东农业科学, 1983(1): 1-6.
- [8] 胡群贤. 矮脚南特亩产千斤的经验与体会[J]. 湖北农业科学, 1965(6): 24-29.
- [9] PENG S, KHUSH G S, CASSMAN K G. Evolution of the new plant ideotype for increased yield potential[C]//Breaking the yield barrier: Proceedings of a workshop on rice yield potential in favorable environments. Manila: International rice research institute, 1994: 5-20.
- [10] 袁隆平. 水稻的雄性不孕性[J]. 科学通报, 1966, 17(4): 185-188.
- [11] 曾波. 近 30 年来我国水稻主要品种更新换代历程浅析[J]. 作物杂志, 2018(3): 1-7.
- [12] 石明松. 晚粳自然两用系选育及应用初报[J]. 湖北农业科学, 1981(7): 1-3.
- [13] SHINJYO C. Genetical studies of cytoplasmic male sterility and fertility restoration in rice, *Oryza sativa* L.[J]. Sci Bull Coll Agr Univ Ryukyus, 1975, 22: 1-57.

- [14] 李铮友. 滇型杂交水稻[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1980.
- [15] IKEHASHI H, ARAKI H. Genetics of  $F_1$  sterility in remote crosses in rice[C]//Rice genetics: Proceedings of the first rice genetics symposium. Manila: International rice research institute, 1986: 119-130.
- [16] PENG S, KHUSH G S, VIRK P, et al. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential[J]. *Field Crops Res*, 2008, 108(1): 32-38.
- [17] 陈温福, 徐正进, 张龙步, 等. 北方粳型稻超高产育种理论与实践[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 869-874.
- [18] TANG L, XU Z, CHEN W, et al. Advances and prospects of super rice breeding in China[J]. *J Integr Agric*, 2017, 16(5): 984-991.
- [19] 杨守仁, 张龙步, 沈锡英, 等. 三十六年来籼粳稻杂交育种的研究及发展[J]. 沈阳农业大学学报, 1987, 18(3): 3-9.
- [20] 杨振玉, 李志彬, 东丽, 等. 中国杂交粳稻发展与展望[J]. *科学通报*, 2016, 61(35): 3770-3777.
- [21] 邓启云. 广适性水稻光温敏不育系 Y58S 的选育[J]. *杂交水稻*, 2005, 20(2): 15-18.
- [22] 马荣荣, 王晓燕, 陆永法, 等. 甬优系列杂交水稻新组合的选育和推广[J]. *宁波农业科技*, 2005(4): 4-7.
- [23] 马荣荣, 王晓燕, 陆永法, 等. 2006—2010 年甬优系列杂交水稻育种进展[J]. *宁波农业科技*, 2010(4): 13-14.
- [24] 张桂权, 卢永根. 栽培稻 (*Oryza sativa*) 杂种不育性的遗传研究 I: 等基因  $F_1$  不育系杂种不育性的双列分析[J]. *中国水稻科学*, 1989, 3(3): 97-101.
- [25] 张桂权, 卢永根. 栽培稻杂种不育性的遗传研究 II:  $F_1$  花粉不育性的基因模式[J]. *遗传学报*, 1993, 20(3): 222-228.
- [26] 张桂权, 卢永根, 刘桂富, 等. 栽培稻杂种不育性的遗传研究 III: 不同类型品种  $F_1$  花粉不育性的等位基因分化[J]. *遗传学报*, 1993, 20(6): 541-551.
- [27] 张桂权, 卢永根, 张华, 等. 栽培稻 (*Oryza sativa*) 杂种不育性的遗传研究 IV:  $F_1$  花粉不育性的基因型[J]. *遗传学报*, 1994, 21(1): 31-41.
- [28] ZHANG G, LU Y. Genetics of  $F_1$  pollen sterility in *Oryza sativa*[C]. In Rice genetics III. Manila: International rice research institute, 1996: 418-422.
- [29] 庄楚雄, 张桂权, 梅曼彤, 等. 栽培稻  $F_1$  花粉不育基因座  $S-a$  的分子定位[J]. *遗传学报*, 1999, 26(3): 213-218.
- [30] 张泽民, 张桂权. 水稻  $S-c$  座位的 PCR 标记精细定位及分子标记辅助选择[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 704-709.
- [31] LI W T, ZENG R Z, ZHANG Z M, et al. Mapping of  $S-b$  locus for  $F_1$  pollen sterility in cultivated rice using PCR based markers[J]. *Acta Bot Sin*, 2002, 44(4): 463-467.
- [32] ZHUANG C X, FU Y, ZHANG G Q, et al. Molecular mapping of  $S-c$ , an  $F_1$  pollen sterility gene in cultivated rice[J]. *Euphytica*, 2002, 127(1): 133-138.
- [33] SU J, LIU Y. Fine mapping and cloning of the gene  $S-a$  for  $F_1$  pollen sterility in cultivated rice (*Oryza sativa* L. )[J]. *Mol Plant Breed*, 2003, 1(5/6): 757-758.
- [34] YANG C Y, CHEN Z Z, ZHUANG C X, et al. Genetic and physical fine-mapping of the  $Sc$  locus conferring *indica-japonica* hybrid sterility in rice (*Oryza sativa* L. )[J]. *Chin Sci Bull*, 2004, 49(16): 1718-1721.
- [35] LI W, ZENG R, ZHANG Z, et al. Fine mapping of locus  $S-b$  for  $F_1$  pollen sterility in rice (*Oryza sativa* L. )[J]. *Chin Sci Bull*, 2006, 51(6): 675-680.
- [36] LI W, ZENG R, ZHANG Z, et al. Identification and fine mapping of  $S-d$ , a new locus conferring the partial pollen sterility of intersubspecific  $F_1$  hybrids in rice (*Oryza sativa* L. )[J]. *Theor Appl Genet*, 2008, 116(8): 915-922.
- [37] 朱文银, 李文涛, 丁效华, 等. 水稻  $F_1$  花粉不育基因  $S-e$  的初步定位[J]. *华南农业大学学报*, 2008, 29(1): 1-5.
- [38] LONG Y, ZHAO L, NIU B, et al. Hybrid male sterility in rice controlled by interaction between divergent alleles of two adjacent genes[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(48): 18871-18876.
- [39] SHEN R, WANG L, LIU X, et al. Genomic structural variation-mediated allelic suppression causes hybrid male sterility in rice[J]. *Nat Commun*, 2017, 8.
- [40] 张桂权, 卢永根. 粳型亲籼系的选育及其在杂交水稻超高产育种上的利用[J]. *杂交水稻*, 1999, 14(6): 3-5.
- [41] GUO J, XU X, LI W, et al. Overcoming inter-subspecific hybrid sterility in rice by developing *indica-compatibile japonica* lines[J]. *Sci Rep*, 2016, 6.
- [42] ZHANG G. Inter-subspecific hybrid rice: Progress and prospect[C]//中国粳稻发展战略暨超级稻二十周年研讨会论文集. 沈阳, 2016: 77-83.

## 【责任编辑 李庆玲】



张桂权, 教授, 博士生导师, 广东省植物分子育种重点实验室主任, 国务院学位委员会学科评议组成员, 中国遗传学会理事会理事。1998 年入选教育部“跨世纪优秀人才培养计划”, 2000 年获国务院特殊津贴, 2001—2010 年任华南农业大学农学院院长。2005 年被聘为“广东省高校特聘教授”(珠江学者)。长期从事作物遗传育种学科的教学和科研工作, 主要研究方向是水稻分子育种。先后获省部级科学技术奖一等奖 2 项、二等奖 2 项、三等奖 3 项。在国内外学术刊物上发表了学术论文 150 多篇, 其中在 SCI 刊物发表论文 60 多篇。主持和参加了 10 多个水稻新品种的选育, 并在华南地区大面积推广应用。2001 年获“广东省五一劳动奖章”, 2013 年获“全国五一劳动奖章”。