

5 份粳型亲粳种质的生物学特性及育种利用

韦新宇, 张受刚, 许旭明, 卓伟, 马彬林
(三明市农业科学研究院水稻研究所, 福建三明 365500)

摘要: 本研究以 5 份自主选育的粳型亲粳种质明恢 413、明恢 1616、明恢 1707、明恢 512 和明恢 509 为研究材料, 通过对其生物学特性和育种利用进行研究和评价, 以期为今后开展粳型亲粳种质资源的选育和籼粳亚种间杂种优势的利用提供理论参考。生物学特性研究结果表明: 5 份粳型亲粳种质的播始历期偏长, 株高适中, 直立穗型, 穗子小, 着粒密, 单株有效穗数多, 结实率均在 75% 以上, 千粒重中等。程式指数判定表明, 明恢 413、明恢 1616、明恢 1707、明恢 512 的籼粳属性为偏粳; 明恢 509 的籼粳属性为粳。5 份粳型亲粳种质均具有良好的亲粳性, 与籼型两系不育系测交 F_1 的结实率均在 75% 以上, 最高可达 89.80%; 同时能够恢复野败型、印水型、K 型等籼型三系不育系, 测交 F_1 的结实率均在 80% 以上, 其恢复谱广、恢复力强。光合特性分析表明, 其剑叶在生育后期能够保持较高的光合速率, 利于籽粒的充实饱满。5 份粳型亲粳种质的杂种优势表现: 除播始历期、株高和千粒重外, 在穗长、单株有效穗数、每穗总粒数、结实率、一次枝梗数和二次枝梗数等性状上均表现出明显的竞争优势。其中, 穗长、一次枝梗数、二次枝梗数和每穗总粒数所表现出的竞争优势均超过 10%。利用明恢 1616、明恢 1707 与籼型两系不育系华 1037S 配组, 育成了籼粳亚种间杂交稻新组合华两优 3716 和华两优 3707, 区试表现较好, 较对照增产明显, 相继通过福建省农作物品种审定。因此, 本研究中 5 份粳型亲粳种质具有良好的亲粳性且恢复谱广, 在籼粳亚种间杂种优势的利用方面具有良好的应用前景。

关键词: 粳型亲粳种质; 籼粳属性; 亲粳性; 恢复谱; 杂种优势

Biological Characteristics and Breeding Utilization of Five Indica-Compatible Japonica Germplasms

WEI Xin-yu, ZHANG Shou-gang, XU Xu-ming, ZHUO Wei, MA Bin-lin
(Rice Research Institute, Sanming Academy of Agricultural Sciences, Fujian Sanming 365500)

Abstract: In this study, the biological characteristics and breeding applicability of five indica-compatible japonica germplasm (Minghui413, Minghui1616, Minghui1707, Minghui512 and Minghui 509) have been studied, which will provide theoretical reference for the future breeding of indica-compatible japonica germplasm and the heterosis utilization of the indica-japonica inter-subspecific hybrids. Five germplasm showed longer growth period, moderate plant height, erect panicle type, small panicle, dense grain setting, increased effective panicles per plant, high setting percentage (>75%) and medium grain size. The analysis using the Cheng's indexes showed that Minghui413, Minghui1616, Minghui1707 and Minghui512 belonged to japonicalinous, while Minghui509 belonged to japonica. In addition, these germplasm showed a good indica compatibility. For instance, the seed setting rate of F_1 by crossing with the two-line indica sterile line was >75% with a highest value of 89.80%. These germplasm are able to restore the fertility of indica CMS lines (WA type, YS type, and K type), and the seed setting rate was >80%. Moreover, the flag leaves of the five germplasm

收稿日期: 2021-05-28 修回日期: 2021-10-30 网络出版日期: 2021-06-23

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210528003>

第一作者研究方向为水稻遗传育种, E-mail: wxy1209@163.com

通信作者: 许旭明, 研究方向为水稻遗传育种, E-mail: fj63xxm@sina.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-01); 福建省自然科学基金项目 (2018J01141); 三明市科技计划项目 (2019-N-4)

Foundation projects: China Agriculture Research System (CARS-01), Fujian Provincial Natural Science Foundation (2018J01141), Sanming Municipal Science and Technology Project (2019-N-4)

accessions could maintain a higher photosynthetic rate in the later period of growth and breeding, beneficial to the filling and fullness of grains. Except DSH (Duration from seeding to heading), plant height and 1000-grain weight, the heterosis of five indica-compatible japonica germplasms showed competitive performance in panicle length, effective panicle per plant, total grain number per panicle, seed setting rate, number of primary branch rachis and number of secondary branch rachis per panicle. Among them, panicle length, primary branch rachis number, secondary branch rachis number and total grain number per panicle all showed more than 10% competitive advantage. Indica-japonica hybrid rice Hualiangyou3716 and Huanliangyou3707, developed from two-line indica sterile line Hual037S and the indica-compatible japonica germplasms Minghui1616 and Minghui1707 were registered and released by Fujian Provincial Crop Variety Appraisal Committee. The yield production of these two varieties was significantly higher than that of the control. Therefore, this study reported the five indica-compatible japonica germplasm accessions, which showed good indica compatibility and broad restoring spectrum with a good prospect in the subspecies heterosis utilization.

Key words: indica-compatible japonica germplasm; indica and japonica differentiation; indica compatibility; restoring spectrum; heterosis

在新冠肺炎疫情的影响下,粮食安全问题又日渐成为世界各国关注的焦点。只有立足粮食基本自给,掌握粮食安全主动权,才能走好中国特色的粮食安全之路。水稻作为我国的主要粮食作物,无疑是制约国家粮食安全的主要因素。将来的水稻生产和销售市场最为需要的依然是多抗、广适、优质、高产的水稻新品种。长期的育种实践表明,水稻新品种要想在产量、品质、抗性上有较大的突破,取决于育种材料的发现与创新。目前从水稻杂种优势利用的发展趋势来看,水稻产量水平要取得较大幅度的提高,籼粳亚种间杂种优势的利用被认为是最有效的途径之一^[1-2],而决定其成功的关键是籼粳特异亲和种质的创制与利用^[3]。

由于籼稻与粳稻属于不同的亚种,双方亲缘关系较远,杂种 F_1 具有很强的生物学优势,但同时也存在亚种间生殖隔离障碍,其杂种 F_1 普遍结实率低。因此,籼粳杂种优势利用的关键是解决籼粳杂种 F_1 的低结实率问题,只有这样才能将籼粳亚种间强大的生物学优势转化成高效的产量优势,真正实现水稻籼粳杂种优势的有效利用。从籼粳杂种优势在生产上的实际应用来说,并不一定要求某个品种对籼型和粳型品种同时具有良好的广亲和性。只要培育对籼型品种有良好亲和性的粳型品种,或培育对粳型品种有良好亲和性的籼型品种,便可以达到克服籼粳杂种不育性的目的。在此基础上,张桂权等^[4-8]提出了特异亲和基因的理论。他们认为,通过籼粳交或粳籼交,可以把控制栽培稻亚种间杂种育性的籼型特异亲和基因聚合到粳型品系中去,培育出一种新的水稻种质资源——粳型亲籼系。这为

开展水稻籼粳亚种间育种,实现籼粳亚种间杂种优势利用开辟了新的途径^[9]。本研究以5份自主选育的粳型亲籼种质为试验材料,对其主要农艺性状、籼粳属性、亲籼性、恢复谱、光合特性等生物学特性进行研究,并结合“籼不粳恢”籼粳亚种间杂种优势利用新途径对其进行育种利用评价,以期为粳型亲籼种质的选育和籼粳亚种间杂种优势利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择三明市农业科学研究院利用多个不同来源的粳型或爪哇型广亲和品种进行聚合杂交(复交),并通过多世代选择育成的5份水稻粳型亲籼种质资源材料:明恢413、明恢509、明恢512、明恢1616、明恢1707。以籼型两系不育系广占63S和SE21S以及粳型两系不育系N5088S作为亲籼性的鉴定材料;以籼型三系不育系金23A(野败型)、广抗13A(野败型)、II-32A(印水型)、中九A(印水型)、K17A(K型)作为恢复谱的鉴定材料。以上材料由三明市农业科学研究院提供。另外,以粳稻恢复系C418作为生物学特性研究的对照材料;以生产上大面积推广应用的杂交粳稻品种9优418作为杂种优势鉴定的对照品种。C418和9优418由徐州市农业科学院提供。

1.2 研究方法

1.2.1 试验材料种植及主要农艺性状测定 2019年冬在海南三亚用明恢413、明恢509、明恢512、明恢1616、明恢1707、C418(CK)与不育系广占

63S、SE21S、N5088S、金 23A、广抗 13A、II-32A、中九 A、K17A 等配制杂种一代。2020 年晚季在福建沙县种植亲本、杂种一代以及对照品种 9 优 418, 试验材料于 6 月 23 日播种, 7 月 20 日移栽。采用随机区组设计, 3 次重复, 每小区种植 32 株, 株行距 20 cm × 23 cm, 单本插, 大田常规管理。记载播始历期, 成熟时各小区去除边行, 随机选取中间 6 株, 考查其株高、穗长、每穗总粒数、结实率、单株有效穗数、千粒重、单株谷重、剑叶长、剑叶宽、一次枝梗长、二次枝梗长、一次枝梗数、二次枝梗数等性状。利用 Excel、DPS 软件进行数据分析。

1.2.2 粳籼属性判定 采用程侃声的亚洲稻粳籼亚种的鉴别方法^[10], 对明恢 413、明恢 509、明恢 512、明恢 1616、明恢 1707、C418(CK) 的稃毛、叶毛、酚反应、1~2 穗节长、谷粒长宽比、抽穗时稃色等 6 个性状进行测定, 分别按照 0、1、2、3、4 共 5 级进行评分, 即为程氏指数。程氏指数总分 0~8 分为籼型; 9~13 分为偏籼型; 14~17 分为偏粳型; 18~24 分为粳型。以此判定试验材料的粳籼属性。

1.2.3 亲粳性鉴定 田间种植明恢 413、明恢 509、明恢 512、明恢 1616、明恢 1707、C418(CK) 与籼型两系不育系广占 63S 和 SE21S 以及粳型两系不育系 N5088S 所配制的杂种一代。成熟后考查杂种一代的结实率, 进行亲粳性鉴定。

1.2.4 恢复谱测定 田间种植明恢 413、明恢 509、明恢 512、明恢 1616、明恢 1707 与不同类型籼型三系不育系金 23A(野败型)、广抗 13A(野败型)、II-32A(印水型)、中九 A(印水型)、K17A(K 型) 所配制的杂种一代。成熟后考查杂种一代的结实率, 进行恢复谱鉴定。

1.2.5 光合特性测定 在始穗期和成熟期用 LI-6400 型便携式光合仪于晴天 9:00-11:00 在田间分别测定明恢 413、明恢 509、明恢 512、明恢 1616、明恢 1707、C418(CK) 剑叶的光合速率, 重复 3 次, 取其平均值。测定时光强设定为 1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 气温为 30~33 $^{\circ}\text{C}$, CO_2 浓度为 330 $\mu\text{L}/\text{L}$ ^[11]。

1.2.6 育种利用 在生物学特性研究的基础上, 选择其中 2 份粳型亲粳种质与籼型两系不育系华 1037S 配制粳籼亚种间杂交稻组合, 参加福建省晚稻迟熟组区试, 区试的对照品种采用籼型杂交稻宜优 673(CK)。华 1037S 由华中农业大学提供, 宜优 673 由福建省农业科学院提供。

2 结果与分析

2.1 粳型亲粳种质的生物学特性

2.1.1 主要农艺性状 由表 1 可知, 5 份粳型亲粳种质与粳稻恢复系 C418(CK) 的主要农艺性状比较, 除剑叶长、剑叶宽由于数据缺失无法比较外, 其他性状之间均存在差异。播始历期较 C418(CK) 长, 这可能是由于 C418 作为北方粳稻, 北种南引在福建沙县种植生育期缩短。穗长较 C418(CK) 短, 一次枝梗长除明恢 1707 长于 C418(CK) 外, 其他 4 个均较 C418(CK) 短, 主要是由于 C418(CK) 属于弯曲穗型, 而 5 份粳型亲粳种质均为直立穗型, 直立穗型与弯曲穗型相比, 其一次枝梗长和穗长较短。单株有效穗数较 C418(CK) 多, 再加上直立穗型, 表明 5 份粳型亲粳种质生产应用上适合密植, 可大幅增加每公顷有效穗数, 具有较大增产潜力。株高、结实率性状在数据分析上虽然存在差异, 但株高均在 110 cm 左右, 结实率均在 75% 以上, 已经达到生产上应用要求。除明恢 509 外, 其他 4 份粳型亲粳种质的一次枝梗数、二次枝梗数、二次枝梗长均高于 C418(CK), 由于枝梗数的多少和枝梗的长短共同决定着穗着粒的稀疏, 直接影响每穗总粒数的多少。因此, 此结果直接影响每穗总粒数也高于 C418(CK), 尤其是明恢 1616 和明恢 512 的每穗总粒数分别是 438.7 粒和 368.3 粒, 远高于 C418(CK) 的每穗总粒数 256.7 粒。另外, 粳稻恢复系 C418(CK) 的千粒重性状更大。从总体表现看, 5 份粳型亲粳种质表现播始历期偏长、株高适中、穗短、着粒密, 单株有效穗数多, 结实率均在 75% 以上, 千粒重中等。

2.1.2 粳籼属性 粳型亲粳种质明恢 509、明恢 413、明恢 1616、明恢 1707、明恢 512 的程式指数总分分别为 19、14、14、15、15, 粳稻恢复系 C418(CK) 的程式指数总分为 18(表 2)。程式指数判定表明, 明恢 509 和 C418(CK) 的粳籼属性为粳; 明恢 413、明恢 1616、明恢 1707、明恢 512 的粳籼属性为偏粳。这表明如果利用籼型三系不育系和籼型两系不育系与之配组, 由于分属不同的亚种, 亲缘关系较远, 势必产生较大的杂种优势。

2.1.3 亲粳性 本研究之所以选用两系不育系作为测验种, 主要是考虑用两系不育系可省去杂交过程中的人工去雄, 且可有效避开恢保关系的问题, 大大提升了测验效率和准确度。由表 3 可知, 5 份粳型亲粳种质与籼型两系不育系广占 63S、SE21S 测交

表 1 5 份粳型亲粳种质的主要农艺性状

Table 1 The main agronomic characters of five indica-compatible japonica germplasms

性状 Traits	明恢 509 Minghui 509	明恢 413 Minghui 413	明恢 1616 Minghui 1616	明恢 1707 Minghui 1707	明恢 512 Minghui 512	C418 (CK)
播始历期 (d) DSH	84.3 ± 0.6b	80.7 ± 0.6c	80.7 ± 0.6c	81.3 ± 0.6c	93.7 ± 0.6a	74.3 ± 0.6d
株高 (cm) PH	118.8 ± 0.4a	110.3 ± 1.5b	109.6 ± 3.6b	96.3 ± 1.7c	101.7 ± 0.5c	111.2 ± 6.1b
穗长 (cm) PL	22.6 ± 1.6d	28.9 ± 0.6b	25.5 ± 1.5c	24.8 ± 0.9c	27.4 ± 1.6b	31.5 ± 3.0a
单株有效穗数 EPNPP	10.0 ± 1.7a	7.3 ± 2.1ab	8.7 ± 0.6ab	8.7 ± 2.5ab	9.3 ± 1.5ab	6.7 ± 2.1b
每穗总粒数 TGNPP	174.3 ± 29.5d	222.0 ± 49.8cd	438.7 ± 27.1a	204.7 ± 2.5cd	368.3 ± 25.7b	256.7 ± 42.7c
结实率 (%) SSR	79.4 ± 6.8bc	89.0 ± 3.8ab	80.0 ± 9.6bc	89.4 ± 2.6ab	76.9 ± 3.1c	94.9 ± 1.0a
千粒重 (g) TGW	19.2 ± 0.8d	25.2 ± 1.1b	16.5 ± 0.0e	22.8 ± 0.1c	22.5 ± 0.1c	27.4 ± 0.1a
单株谷重 (g) GWPP	16.6 ± 1.1d	23.9 ± 1.5c	22.5 ± 0.6c	16.4 ± 3.2d	31.4 ± 1.2b	35.9 ± 3.3a
剑叶长 (cm) FLL	31.8 ± 3.7b	41.8 ± 3.5a	41.2 ± 2.7a	43.4 ± 4.9a	40.5 ± 2.3a	-
剑叶宽 (cm) FLW	2.1 ± 0.0b	2.2 ± 0.1b	2.4 ± 0.1a	2.2 ± 0.1b	2.2 ± 0.1b	-
一次枝梗数 PBRN	13.0 ± 1.2d	14.2 ± 0.4cd	16.4 ± 0.8ab	15.5 ± 0.4bc	17.2 ± 0.7a	13.0 ± 0.0d
一次枝梗长 (cm) PBRL	71.4 ± 3.8b	108.1 ± 5.2a	105.1 ± 9.6a	119.5 ± 2.4a	105.1 ± 4.9a	113.2 ± 13.3a
二次枝梗数 SBRN	32.2 ± 5.9c	45.1 ± 4.7b	70.2 ± 3.8a	65.2 ± 1.9a	61.9 ± 2.7a	35.7 ± 6.4c
二次枝梗长 (cm) SBRL	33.6 ± 4.7c	66.0 ± 9.6ab	78.8 ± 12.8a	81.7 ± 9.9a	80.6 ± 3.9a	52.7 ± 12.4b

数据用平均数 ± 标准差表示; 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著; - : 数据缺失; 下同

Values were shown as mean ± SD, different letters indicated that there are significantly different at the 0.05 level, - : Data is missing, the following is the same. DSH: Duration from seeding to heading, PH: Plant height, PL: Panicle length, EPNPP: Effective panicle number per plant, TGNPP: Total grain number per panicle, SSR: Seed setting rate, TGW: 1000-grain weight, GWPP: Grain weight per plant, FLL: Flag leaf length, FLW: Flag leaf width, PBRN: Primary branch rachis number, PBRL: Primary branch rachis length, SBRN: Secondary branch rachis number, SBRL: Secondary branch rachis length, the same as below

表 2 5 份粳型亲粳种质的籼粳属性

Table 2 Indica-japonica attribute of five indica-compatible japonica germplasms

性状 Traits	明恢 509 Minghui509	明恢 413 Minghui413	明恢 1616 Minghui1616	明恢 1707 Minghui1707	明恢 512 Minghui512	C418 (CK)
稃毛 Glume pubescence	3	2	3	4	2	4
叶毛 Leaf pubescence	3	2	3	3	3	2
酚反应 Phenol reaction	4	3	2	2	4	4
1~2 穗节长 Length of 1 st and 2 nd rachis	2	1	2	2	2	3
谷粒长宽比 Grain length to width ratio	3	3	3	2	2	2
抽穗时稃色 Glume color at heading stage	4	3	1	2	2	3
程氏指数总分 Cheng's index total score	19	14	14	15	15	18
籼粳属性 Indica-japonica attribute	粳	偏粳	偏粳	偏粳	偏粳	粳

表 3 5 份粳型亲粳种质与粳型、粳型两系不育系测交 F_1 的结实率Table 3 Seed setting rate of F_1 between five indica-compatible japonica germplasms and two-line sterile line of indica and japonica (%)

名称 Name	广占 63S Guangzhan 63S	SE21S	N5088S
明恢 509 Minghui 509	86.40 ± 2.87	85.51 ± 1.09	42.03 ± 4.25
明恢 413 Minghui 413	89.80 ± 3.22	79.17 ± 1.20	65.14 ± 1.69
明恢 1616 Minghui 1616	87.20 ± 2.18	86.20 ± 2.81	37.90 ± 1.48
明恢 1707 Minghui 1707	87.52 ± 1.93	83.45 ± 2.88	35.24 ± 4.14
明恢 512 Minghui 512	81.77 ± 2.69	86.99 ± 1.84	55.91 ± 1.59
C418 (CK)	48.72 ± 3.36	48.80 ± 3.21	92.45 ± 1.46

F_1 的结实率均在 75% 以上,最高的可达 89.80%,这表明供试的 5 份粳型亲粳种质的亲粳性或亲粳的能力均达到较高的水平,已符合生产应用的要求。5 份粳型亲粳种质与粳型两系不育系 N5088S 测交 F_1 的结实率均低于 70%,最低的只有 35.24%,这表明供试的 5 份粳型亲粳种质不亲粳或对粳的亲和能力很弱。以上结果表明,本课题组前期所确定的亲粳但不亲粳的新种质材料创制策略,目前已取得了实质性进展,且育成了符合目标的新的粳型亲粳种质。另外,对照品种粳稻恢复性 C418 的测交结果刚好与之相反,与粳型两系不育系广占 63S、SE21S 测交 F_1 的结实率均低于 70%,分别为 48.72%、48.80%;与粳型两系不育系 N5088S 测交 F_1 的结实率却高达 92.45%,这表明粳稻恢复性 C418 只是一个普通的粳稻品种,仅对种内亲缘关系较近的粳稻品种具有亲和性,而对亚种间亲缘关系较远的粳稻品种不具有亲和性。以上结果已相互验证。

2.1.4 恢复谱 在以上对 5 份粳型亲粳种质亲粳性鉴定的基础上,进一步选用不同类型的粳型三系

不育系对其进行恢复谱的测定。由表 4 可知,5 份粳型亲粳种质与野败型粳型三系不育系金 23A、广抗 13A 测交 F_1 的结实率均高于 80%,最低达 81.88%,最高达 92.21%;与印水型粳型三系不育系 II-32A、中九 A 测交 F_1 的结实率均高于 80%,最低达 86.72%,最高达 96.11%;与 K 型粳型三系不育系 K17A 测交 F_1 的结实率均高于 80%,最低达 83.21%,最高达 96.79%。以上结果表明,5 份粳型亲粳种质在具备优良亲粳性的基础上,还具有较强的恢复能力且恢复谱较广,预示在今后杂种优势利用中它们具有较广阔的不育系选配范围和较大增产潜力,应用前景较好。

2.1.5 光合特性 由图 1 可知,所有供试材料的剑叶在始穗期的光合速率都高于成熟期,这与剑叶自身的功能衰退有关。剑叶始穗期的光合速率以明恢 509 表现最高,明恢 1707 和明恢 512 表现与 C418 (CK) 相当,明恢 413 和明恢 1616 表现较低。明恢 509 (粳型) 在始穗期的光合速率明显高于明恢 413 (偏粳型)、明恢 1616 (偏粳型)、明恢 1707 (偏粳型)、明恢 512 (偏粳型)。表明随着粳稻成分的增

表 4 5 份粳型亲粳种质与不同类型粳型三系不育系测交 F_1 的结实率Table 4 Seed setting rate of F_1 between five indica-compatible japonica germplasms and three-line sterile lines of different indica types (%)

名称 Name	金 23A Jin 23A	广抗 13A Guangkang 13A	II-32A	中九 A Zhongjiu A	K17A
明恢 509 Minghui 509	86.04 ± 3.70	91.82 ± 2.18	89.11 ± 3.18	88.13 ± 1.45	96.79 ± 1.16
明恢 413 Minghui 413	86.86 ± 2.71	88.24 ± 1.18	96.11 ± 1.35	93.02 ± 1.34	92.67 ± 2.62
明恢 1616 Minghui 1616	89.95 ± 1.46	91.10 ± 3.79	95.36 ± 2.88	92.79 ± 1.34	91.52 ± 2.18
明恢 1707 Minghui 1707	92.21 ± 2.44	85.90 ± 3.86	89.47 ± 3.15	86.72 ± 3.52	90.80 ± 3.19
明恢 512 Minghui 512	83.17 ± 2.25	81.88 ± 2.04	95.87 ± 3.22	87.05 ± 2.84	83.21 ± 3.04

加,始穗期的光合速率表现一定程度的增强,预示干物质积累增多,增产潜力加大。

另外,5份粳型亲粳种质在成熟期的光合速率均高于C418(CK)(图1),与始穗期相比其降幅也较为缓和。这表明5份粳型亲粳种质的剑叶在生育后

期依然能够保持较高的光合速率,为高产打下基础。光合速率下降缓和一些,更有利于种子后期灌浆充实饱满。明恢512始穗期和成熟期的光合速率与其他材料相比均保持在较高水平,今后在提高光合性能、促进干物质积累方面可作为核心种质加以利用。

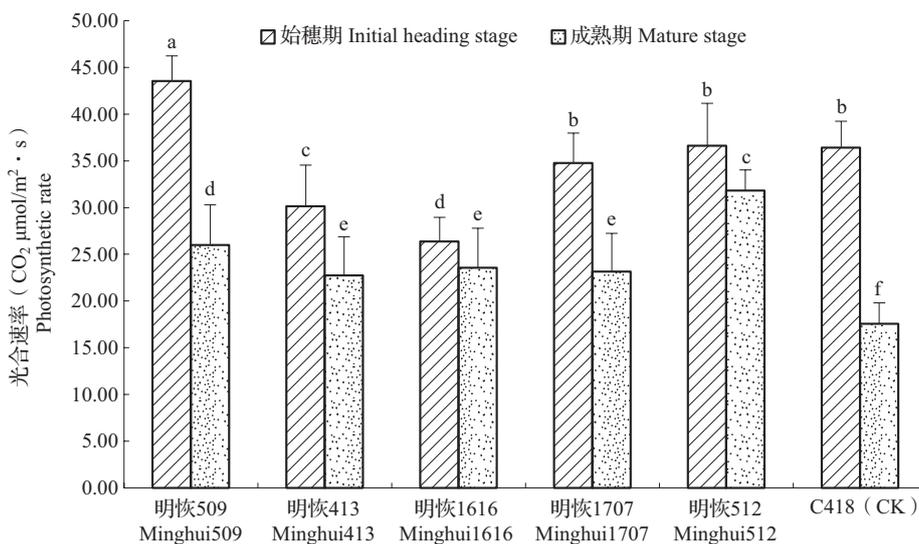


图1 5份粳型亲粳种质始穗期和成熟期剑叶的光合速率比较分析

Fig.1 Comparative analysis of photosynthetic rate of flag leaf of five indica-compatible japonica germplasm at initial heading stage and mature stage

2.2 粳型亲粳种质的杂种优势表现

由表5可知,平均竞争优势除播始历期、株高和千粒重性状表现为负值外,其余性状均表现为正值。播始历期和株高性状表现负向杂种优势,说明利用粳型亲粳种质与籼型不育系所配制的籼粳亚种间杂交稻组合与对照品种相比生育期缩短,株高降低,这在一定程度上解决了籼粳亚种间杂交所存在的生育期太长和株高过高等问题^[12],达到了生产应用的要求。但千粒重性状所表现出的负向杂种优势也会给所配制的籼粳亚种间杂交稻组合带来千粒重小的不利影响。穗长、单株有效穗数、每穗总粒数、结实率、一次枝梗数和二次枝梗数等性状与对照品种9优418(CK)相比均表现正向杂种优势,表明所配制的籼粳亚种间杂交稻组合与对照杂交粳稻组合相比具有更加显著的杂种优势。尤其是穗长、一次枝梗数、二次枝梗数和每穗总粒数所表现的正向平均竞争优势较高,均超过10%,分别为11.9%、14.3%、25.3%和23.5%,此类性状也正是品种穗大、粒多的基础,在提高品种产量方面起到更加积极的作用。这也在一定程度上说明了所配制的籼粳亚种间杂交稻组合表现穗子更大、着粒更密、粒数更多、产量更高的

原因。

2.3 粳型亲粳种质的育种利用

在对粳型亲粳种质进行生物学特性和杂种优势研究的基础上,本课题组利用明恢1616和明恢1707与籼型两系不育系华1037S配制了籼粳亚种间杂交稻新组合华两优3716和华两优3707,并参加了福建省晚稻迟熟组区试,区试表现见表6。福建省属于典型的南方籼稻种植区,其区试的对照品种是籼型杂交稻宜优673(CK)。由表6可知,华两优3716和华两优3707全生育期与对照相当,株高明显低于对照,每穗总粒数明显高于对照,结实率均在70%以上且与对照相当,千粒重明显小于对照,以上区试表现与粳型亲粳种质的杂种优势表现分析结果相吻合。籼粳亚种间杂交稻新组合华两优3716和华两优3707的综合产量表现比对照宜优673(CK)增产分别达4.1%和6.0%,已完成区试试验程序,相继通过福建省农作物品种审定。可见,利用自主选育的粳型亲粳种质配制籼粳亚种间杂交稻新品种,研究思路、方法可行,且组合表现穗大、粒多、配合力好、产量优势明显等特点,具有较好的生产应用前景。

表 5 5 份粳型亲粳种质与籼型两系、三系不育系测交 F_1 的农艺性状和杂种优势表现Table 5 Agronomic characters and heterosis of F_1 between five indica-compatible japonica germplasms and two-line, three-line sterile lines of indica types

编号 Serial number	杂交组合 Cross combination	播始历期 (d) DSH	株高 (cm) PH	穗长 (cm) PL	单株有 效穗数 EPNPP	每穗 总粒数 TGNPP	结实率 (%) SSR	千粒重 (g) TGW	一次 枝梗数 PBRN	二次 枝梗数 SBRN	单株 谷重(g) GWPP
1	广占 63S × 明恢 1707	77	100.8	27.0	8.7	260.7	92.5	22.9	14.6	55.2	47.8
2	广占 63S × 明恢 512	78	108.1	23.9	11.7	254.7	87.4	25.5	15.2	58.6	66.1
3	广占 63S × 明恢 1616	72	111.7	27.9	9.3	229.3	91.2	22.1	15.0	58.7	43.1
4	广占 63S × 明恢 509	74	121.8	25.0	6.3	188.7	90.4	25.3	13.0	36.3	27.3
5	广占 63S × 明恢 413	68	112.0	23.9	8.3	232.3	96.5	28.5	11.4	40.4	53.2
6	广抗 13A × 明恢 1707	85	106.3	26.8	11.7	274.7	77.2	26.1	14.3	45.1	64.7
7	广抗 13A × 明恢 512	87	114.9	25.3	11.7	252.0	68.5	26.3	16.3	40.8	53.0
8	广抗 13A × 明恢 1616	84	122.4	25.2	10.7	285.3	87.8	22.6	15.3	59.1	60.5
9	广抗 13A × 明恢 509	83	128.3	22.2	9.0	211.7	90.5	27.4	14.3	42.0	47.3
10	广抗 13A × 明恢 413	76	117.6	26.6	9.7	189.7	76.2	28.1	13.4	65.2	39.3
11	中九 A × 明恢 1707	83	114.0	26.7	8.3	267.3	82.1	21.4	16.4	59.2	39.1
12	中九 A × 明恢 512	84	105.9	26.1	7.0	254.0	70.4	22.8	17.9	64.9	28.6
13	中九 A × 明恢 1616	81	130.9	29.2	6.3	302.3	91.1	21.2	16.1	58.7	36.9
14	中九 A × 明恢 509	79	137.7	27.1	6.7	187.3	86.5	23.9	15.7	47.1	25.9
15	中九 A × 明恢 413	69	114.1	29.8	6.7	220.0	93.0	24.9	15.6	44.6	33.9
16	金 23A × 明恢 1707	81	105.8	28.7	8.3	225.3	90.5	24.4	16.2	50.2	41.4
17	金 23A × 明恢 512	79	108.5	29.3	12.7	253.7	73.2	25.5	17.3	56.3	59.9
18	金 23A × 明恢 1616	76	118.3	29.9	10.3	243.3	89.9	25.2	17.2	58.4	57.0
19	金 23A × 明恢 509	78	134.3	25.8	9.7	256.3	82.7	25.5	16.2	42.9	52.3
20	金 23A × 明恢 413	70	104.6	27.3	10.3	153.0	76.9	26.6	14.3	33.8	32.3
21	SE21S × 明恢 1707	80	106.1	26.4	13.3	174.3	80.4	25.4	16.2	57.4	47.6
22	SE21S × 明恢 512	82	110.3	28.0	7.3	218.3	89.7	25.6	15.8	56.2	36.7
23	SE21S × 明恢 1616	77	130.3	28.7	7.0	288.0	75.5	21.7	15.8	57.9	33.1
24	SE21S × 明恢 509	81	135.1	24.4	8.0	195.7	83.8	24.7	14.1	44.1	32.4
25	SE21S × 明恢 413	80	134.0	26.5	7.3	216.3	65.8	23.4	15.0	51.1	24.4
26	II-32A × 明恢 1707	84	101.1	24.2	10.7	214.7	85.5	22.5	15.3	48.6	44.1
27	II-32A × 明恢 512	85	103.3	24.4	7.3	179.7	89.2	24.7	16.0	46.7	29.0
28	II-32A × 明恢 1616	80	122.1	26.7	7.3	266.7	95.4	23.2	17.8	56.9	43.2
29	II-32A × 明恢 509	86	141.5	25.8	11.0	246.7	62.6	21.8	17.4	49.6	37.1
30	II-32A × 明恢 413	73	119.2	26.4	6.7	178.3	96.1	26.0	17.1	89.1	29.7
31	9 优 418 (CK)	105	123.3	23.7	8.6	186.8	83.2	26.6	13.6	41.9	35.3
32	平均竞争优势 (%)	-24.7	-4.8	11.9	5.0	23.5	0.9	-7.9	14.3	25.3	19.5

表6 利用粳型亲种种质配制的籼粳亚种间杂交稻组合的区试表现

Table 6 Performance in regional test of intersubspecific hybrid rice combinations using the indica-compatible japonica germplasm

参试年份 Tested year	杂交组合 Cross combination	全生育期(d) WGP	株高 (cm) PH	每hm ² 有效穗数 EPNPH	每穗总粒数 TGNPP	结实率 (%) SSR	千粒重 (g) TGW	产量 (kg/hm ²) Y	比CK± (%) CWC
2018-2019	华两优 3716 (华 1037S × 明恢 1616)	126.5	117.5	2.2 × 10 ⁶	193.2	79.4	23.7	8327.1	4.1
	宜优 673 (CK)	126.7	126.0	2.5 × 10 ⁶	144.7	76.0	31.8	7995.9	0.0
2019-2020	华两优 3707 (华 1037S × 明恢 1707)	124.7	104.3	2.5 × 10 ⁶	178.0	73.8	27.1	7943.4	6.0
	宜优 673 (CK)	126.6	119.8	2.4 × 10 ⁶	138.0	78.6	31.2	7492.4	0.0

WGP: Whole growth period, EPNPH: Effective panicle number per hectare, Y: Yield, CWC: Compared with control

3 讨论

3.1 粳型亲种种质的选育

水稻长期育种实践表明,新品种在产量上要有较大的突破,取决于育种材料的发现与创新,无论是矮化育种还是“三系法”杂交水稻的成功发明,都是先从育种材料上取得突破。因此,育种材料的发现和创新是水稻育种取得突破性进展的关键。栽培稻分为籼稻(*Oryza sativa* L. subsp. *indica* S. Kato)和粳稻(*O. sativa* L. subsp. *japonica* S. Kato) 2个亚种^[13-14],亚种间的深刻分化与显著差异,使它们在产量、品质和抗逆性等方面各具特色,其亚种间杂交F₁无论是在营养生长还是在产量性状上均具有强大的杂种优势^[15-17]。然而,由于水稻籼粳亚种间存在着生殖隔离,其杂交的子一代普遍存在不育性,一般结实率很低,这成为籼粳杂种优势利用的主要障碍。广亲和品种的发现使这一问题得以缓解,但未能完全解决。主要是广亲和品种与普通籼、粳型品种的亲和力不是很强,且在广亲和品种与籼、粳的杂交后代中,广亲和材料出现的频率低,无法提供大量的广亲和材料供育种者选择配组。同时,亲和力好的材料往往是籼粳中间类型,典型的籼粳广亲和材料很少出现。从籼粳杂种优势在生产上的实际应用来说,并不一定要求对籼、粳都亲和的广亲和系,而只要求对籼稻亲和的粳型亲种系或对粳稻亲和的籼型亲种系,其杂种结实率能够达到生产应用的要求,即可满足实际生产需求。本课题组利用多个来源不同的粳型或爪哇型广亲和品种聚合杂交,以提高后代粳型或偏粳型材料的亲种能力,依据这一策略育成了一批粳型亲种种质,其与籼稻亲和力优

良^[18-19]。本研究中,5份粳型亲种种质与籼型两系不育系广占63S、SE21S测交F₁的结实率均在75%以上,最高可达89.80%。这表明本研究所育成的粳型亲种种质对籼稻的亲种能力已达到了较高水平,符合生产应用的要求,可在今后籼粳杂种优势利用中继续进行配组利用。

3.2 “籼不粳恢”籼粳亚种间杂交配组方式的选择与应用

目前,实现籼粳亚种间杂种优势利用的途径主要有两条,分别是“粳不籼恢”和“籼不粳恢”。“粳不籼恢”利用途径是以粳型不育系作母本与籼型恢复系进行配组,“籼不粳恢”利用途径是以籼型不育系作母本与粳型恢复系进行配组。“粳不籼恢”配组方式已取得了很大进展,选育的籼粳杂交稻组合已在生产上推广应用^[20-21],但是“粳不籼恢”这一籼粳亚种间杂种优势利用途径的最大技术障碍在于制种产量偏低。目前生产上应用的粳稻不育系一般柱头不外露或外露率较低,而且花时较迟,而偏籼型广亲和恢复系往往花时较早,两者的花时差约1h左右,所以目前生产上利用的“粳不籼恢”亚种间杂交稻组合制种产量还较低,造成杂交稻种子生产量偏小,种子成本较高,影响了在生产上的大面积推广应用^[22]。本课题组长期以来,一直坚持开展粳型亲种种质的创制与利用研究,率先采用“籼不粳恢”配组方式以实现籼粳亚种间杂种优势的有效利用。即利用生产上应用的籼型不育系(包括三系、两系不育系)作母本与自主选育的粳型亲种种质进行杂交,配制籼粳亚种间杂交稻组合。“籼不粳恢”配组方式充分考虑了籼粳亚种间杂交稻制种过程中的花时差异,可有效克服“粳不籼恢”在生产应用中制种

产量低的问题,且能利用现阶段生产上应用的大部分粳型不育系(包括三系、两系不育系),可用于选择配组的不育系范围更广、更灵活。目前,已育成一批粳籼杂交稻组合在福建省内外试验示范,表现出较好的应用前景。本研究中,明恢 413、明恢 509、明恢 512、明恢 1616、明恢 1707 等 5 份粳型亲粳种质的农艺性状好,亲粳能力强,能够恢复野败型、印水型、K 型等粳型三系不育系,恢复谱广,恢复能力强,其测交 F₁ 的结实率均在 80% 以上。已利用其中的明恢 1616 和明恢 1707 与粳型两系不育系华 1037S 配组,育成了粳籼亚种间杂交稻新组合华两优 3716 和华两优 3707,区试表现较好,较对照增产显著,已完成区域试验程序,相继通过福建省农作物品种审定。

参考文献

- [1] 袁隆平. 杂交水稻的育种战略设想. 杂交水稻, 1987(1): 1-3
Yuan L P. Breeding strategy of hybrid rice. Hybrid Rice, 1987(1): 1-3
- [2] 吕学莲, 白海波, 惠建, 田小燕, 杨宸刚, 马斯霜, 蔡正云, 李树华. 粳籼稻杂交衍生 RIL 系的苗期抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 556-563
Lv X L, Bai H B, Hui J, Tian X Y, Yang C G, Ma S S, Cai Z Y, Li S H. Comprehensive evaluation of seedling drought resistance of RILs population derived from *Indica* rice and *Japonica* Rice. Journal of Plant Genetic Resource, 2019, 20(3): 556-563
- [3] 卢永根, 张桂权. 特异亲和基因及其在杂交水稻育种上利用的设想. 福建稻麦科技, 1992, 10(1): 1-3
Lu Y G, Zhang G Q. Specific affinity genes and the idea of utilization in hybrid rice breeding. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 1992, 10(1): 1-3
- [4] 张桂权, 卢永根. 栽培稻杂种不育性的遗传基础. 华南农业大学学报, 1987, 8(3): 52-62
Zhang G Q, Lu Y G. Genetic basis on the hybrid sterility in cultivated rice. Journal of South China Agricultural University, 1987, 8(3): 52-62
- [5] 张桂权, 卢永根. 栽培稻杂种不育性的遗传研究: I. 等位基因 F₁ 不育系杂种不育性的双列分析. 中国水稻科学, 1989, 3(3): 97-101
Zhang G Q, Lu Y G. Genetic studies on the hybrid sterility in cultivated rice: I diallel analysis of the hybrid sterility among isogenic F₁ sterile lines. Chinese Journal of Rice Science, 1989, 3(3): 97-101
- [6] 张桂权, 卢永根. 栽培稻杂种不育性的遗传研究: II. F₁ 花粉不育性的基因模式. 遗传学报, 1993, 20(3): 222-228
Zhang G Q, Lu Y G. Genetic studies on the hybrid sterility in cultivated rice: II a genic model for F₁ pollen sterility. Journal of Genetics and Genomics, 1993, 20(3): 222-228
- [7] 张桂权, 卢永根, 刘桂富, 杨进昌, 张华. 栽培稻杂种不育性的遗传研究: III. 不同类型品种 F₁ 花粉不育性的等位基因分化. 遗传学报, 1993, 20(6): 541-551
Zhang G Q, Lu Y G, Liu G F, Yang J C, Zhang H. Genetic studies on the hybrid sterility in cultivated rice: III. Allele differentiation of F₁ pollen sterility in different types of varieties. Journal of Genetics and Genomics, 1993, 20(6): 541-551
- [8] 张桂权, 卢永根, 张华, 杨进昌, 刘桂富. 栽培稻 (*Oryza sativa*) 杂种不育性的遗传研究: IV. F₁ 花粉不育性的基因型. 遗传学报, 1994, 21(1): 34-41
Zhang G Q, Lu Y G, Zhang H, Yang J C, Liu G F. Genetic studies on the hybrid sterility in cultivated rice: IV genotypes for F₁ pollen sterility. Journal of Genetics and Genomics, 1994, 21(1): 34-41
- [9] 张桂权, 卢永根. 粳型亲粳系的选育及其在杂交水稻超高产育种上的利用. 杂交水稻, 1999, 14(6): 3-5
Zhang G Q, Lu Y G. Breeding of the indica-compatible japonica lines and their use in the breeding of super-high-yield hybrid rice. Hybrid Rice, 1999, 14(6): 3-5
- [10] 程侃声. 亚洲稻粳籼亚种的鉴别. 昆明: 云南科技出版社, 1993: 615
Cheng K S. Identification of indica japonica subspecies of Asian rice. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing Press, 1993: 615
- [11] 卓伟, 许旭明, 张受刚, 韦新宇, 马彬林. 水稻不同粳籼分化类型的光合特性比较与遗传分析. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2010, 39(3): 225-230
Zhuo W, Xu X M, Zhang S G, Wei X Y, Ma B L. Photosynthetic characteristics and genetic analysis of different types of rice of indica-japonica's differentiation. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2010, 39(3): 225-230
- [12] 许旭明, 张受刚, 卓伟, 马彬林, 杨腾帮, 梁康迳. 水稻粳籼杂交衍生系创新效果评价与利用. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(2): 113-118
Xu X M, Zhang S G, Zhuo W, Ma B L, Yang T B, Liang K J. Evaluation and utilization of the off springs derived from indica-japonica cross. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2009, 38(2): 113-118
- [13] 刘丹, 王嘉宇, 马殿荣, 孙健, 柴永山, 孙玉友, 魏才强, 解忠, 李洪亮, 张巍巍, 程杜娟, 孙国宏, 陈温福. 东北地区杂草稻与栽培稻的遗传多样性及粳籼分化. 植物遗传资源学报, 2017, 18(2): 217-224
Liu D, Wang J Y, Ma D R, Sun J, Chai Y S, Sun Y Y, Wei C Q, Xie Z, Li H L, Zhang W W, Cheng D J, Sun G H, Chen W F. Genetic diversity and indica-japonica differentiation between weedy rice and cultivars in northeast of China. Journal of Plant Genetic Resource, 2017, 18(2): 217-224
- [14] 付深造, 辛霞, 张志娥, 陈晓玲, 辛萍萍, 卢新雄. 利用热稳定蛋白特异条带鉴别粳籼稻的方法研究. 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 19-24
Fu S Z, Xin X, Zhang Z E, Chen X L, Xin P P, Lu X X. Study on a method for identifying indica-japonica rice by using specific heat-stable protein bands. Journal of Plant Genetic Resource, 2011, 12(1): 19-24
- [15] 朱立宏, 周毓珍, 陶世昌. 粳籼稻杂交育种研究. 作物学报, 1964, 3(1): 69-84
Zhu L H, Zhou Y Z, Tao S C. Studies on cross-breeding of japonica with indica rice. Acta Agronomica Sinica, 1964, 3(1): 69-84
- [16] 袁隆平. 杂交水稻育种的战略 // 袁隆平. 两系法杂交水稻研

- 究论文集. 北京: 农业出版社, 1992: 1-5
 Yuan L P. Breeding strategy of hybrid rice//Yuan L P. Collected papers of two line hybrid rice research. Beijing: Agricultural Press, 1992: 1-5
- [17] 万建民. 水稻籼粳交杂种优势利用研究. 杂交水稻, 2010, 25 (S1): 3-6
 Wan J M. Utilization of strong heterosis between indica and japonica varieties in rice. Hybrid Rice, 2010, 25 (S1): 3-6
- [18] 张受刚, 许旭明. 粳型亲籼恢复系的选育与利用. 福建稻麦科技, 2006, 24 (1): 3-5
 Zhang S G, Xu X M. Breeding and utilization of indica-compatible japonica restorers. Fujian Science and Technology of Rice and Wheat, 2006, 24 (1): 3-5
- [19] 许旭明, 梁康迳, 张受刚, 尚伟, 张瑛英, 韦新宇, 柯蓓. 利用 ILP 标记分析水稻籼粳杂交亲本和衍生系的籼粳分化. 中国农业科学, 2009, 42 (10): 3388-3396
 Xu X M, Liang K J, Zhang S G, Shang W, Zhang Y Y, Wei X Y, Ke B. Analysis of indica-japonica differentiation in rice parents and derived lines using ILP markers. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42 (10): 3388-3396
- [20] 许德海, 王晓燕, 马荣荣, 禹盛苗, 朱练峰, 欧阳由男, 金千瑜. 重穗型籼粳杂交稻甬优 6 号超高产生理特性. 中国农业科学, 2010, 43 (23): 4796-4804
 Xu D H, Wang X Y, Ma R R, Yu S M, Zhu L F, Ouyang Y N, Jin Q Y. Analysis on physiological properties of the heavy panicle type of indica-japonica inter-subspecific hybrid rice Yongyou 6. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (23): 4796-4804
- [21] 吴明国, 林建荣, 宋昕蔚, 阮关海, 李春寿. 籼粳亚种间超高产杂交水稻新组合春优 58 的选育. 杂交水稻, 2007, 22 (5): 17-19
 Wu M G, Lin J R, Song X W, Ruan G H, Li C S. Breeding of indica-japonica hybrid rice combination Chunyou58 with super high yield. Hybrid Rice, 2007, 22 (5): 17-19
- [22] 林建荣, 宋昕蔚, 吴明国. 4 份籼粳中间型广亲和恢复系的生物学特性及其杂种优势利用. 中国水稻科学, 2012, 26 (6): 656-662
 Lin J R, Song X W, Wu M G. Biological characteristics and heterosis utilization of four indica-japonica intermediate type restorer lines with wide compatibility. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26 (6): 656-662