

# 超级杂交稻两优培九的广适性分析

吕川根 李霞 宗寿余 邹江石

(江苏省农业科学院 粮食作物研究所, 南京 210014)

## Analysis of the Eurytopicity of Super Hybrid Rice Liangyoupeijiu

LÜ Chuangen, LI Xia, ZONG Shouyu, ZOU Jiangshi

(Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The implication of eurytopicity of hybrid rice remains unclear, and the screening indicators and identification methods have not been reported in detail. A two-line super hybrid rice Liangyoupeijiu has been extensively grown in southern China for many years. Here, we reviewed the eurytopicity of Liangyoupeijiu and proposed methods of selection for rice better adaptability. Based on the characteristics of Liangyoupeijiu, the intrinsic mechanism and scientific implication of eurytopicity were summarized in two aspects. One is the wide adaptability to ecological factors including weak sensitivity to photoperiod, resistance to pathogens, as well as the plant height, leaf angle, and grain quality produced in the areas that can meet the requirements of agricultural ecology and economy. The other is the wide adaptability to environmental factors including tolerance to light intensity, air temperature, and moisture, nutrients, salinity, pH in soils, as well as resilience to planting date, planting density, and fertilizer management. Novel hybrid rice should be selected accordingly.

**Key words:** super hybrid rice; Liangyoupeijiu; eurytopicity; agronomic trait; breeding

**摘 要:** 水稻广适性的内涵目前尚不明确, 其筛选指标和鉴定方法也未见详细报道。两系法超级杂交稻两优培九已在南方稻区广范围、大面积种植近二十年, 是 2002 年以来种植面积遥居首位的杂交稻。在总结和分析与其广适性密切相关农艺特性的研究和生产实践的基础上, 提出杂交水稻广适性的内涵应包括两个方面: 一是生态适应性广, 即适宜生长的地域特别是纬度范围较大, 这需要品种感光性不强, 并且对不同生态稻区主要病害有一定的抗性或耐性, 另外还要求在不同生态稻区生长的株高、叶角等植株形态和稻米品质等重要性状(变幅)能符合当地农业生态和农业经济的要求; 二是环境适应性好, 即对各生态区的环境因子(光照强度、温度和土壤水分、主要养分、盐度、pH)及其变化都能较好适应, 对强弱光、高低温、水分胁迫、酸碱盐土等主要逆境有一定的耐受力, 因播期、密度和肥料管理带来环境差异而造成的影响也不大。

**关键词:** 超级杂交稻; 两优培九; 广适性; 农艺性状; 育种

中图分类号: S511.0351

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)03-0191-15

中国水稻种植区域(18°N–52°N)分布广泛, 生态条件各异, 许多高产品种由于广适性不够或遭遇不利的生长条件等原因而在推广上受到限制甚至遭受损失, 所以, 广适性是水稻育种的重要目标之一。但迄今为止, 对于水稻广适性的研究并不多, 其内涵尚不明确, 缺乏系统性论述, 对广适性的筛选指标和鉴定方法也未见详细报道。两系法超级杂交稻两优培九已在南方稻区广范围、大面积种植近二十年, 是 2002 年以来种植面积遥居首位的杂交

稻<sup>[1]</sup>, 其广适性特性值得深入总结与分析。本文在综述与其广适性密切相关农艺特性的研究和生产实践的基础上, 提出杂交水稻广适性的内涵, 并初步提出其筛选方法, 以期对杂交稻广适性育种的性状选择提供参考。

### 1 两优培九种植的广适性

两优培九(65002, LYPJ)是江苏省农业科学院与

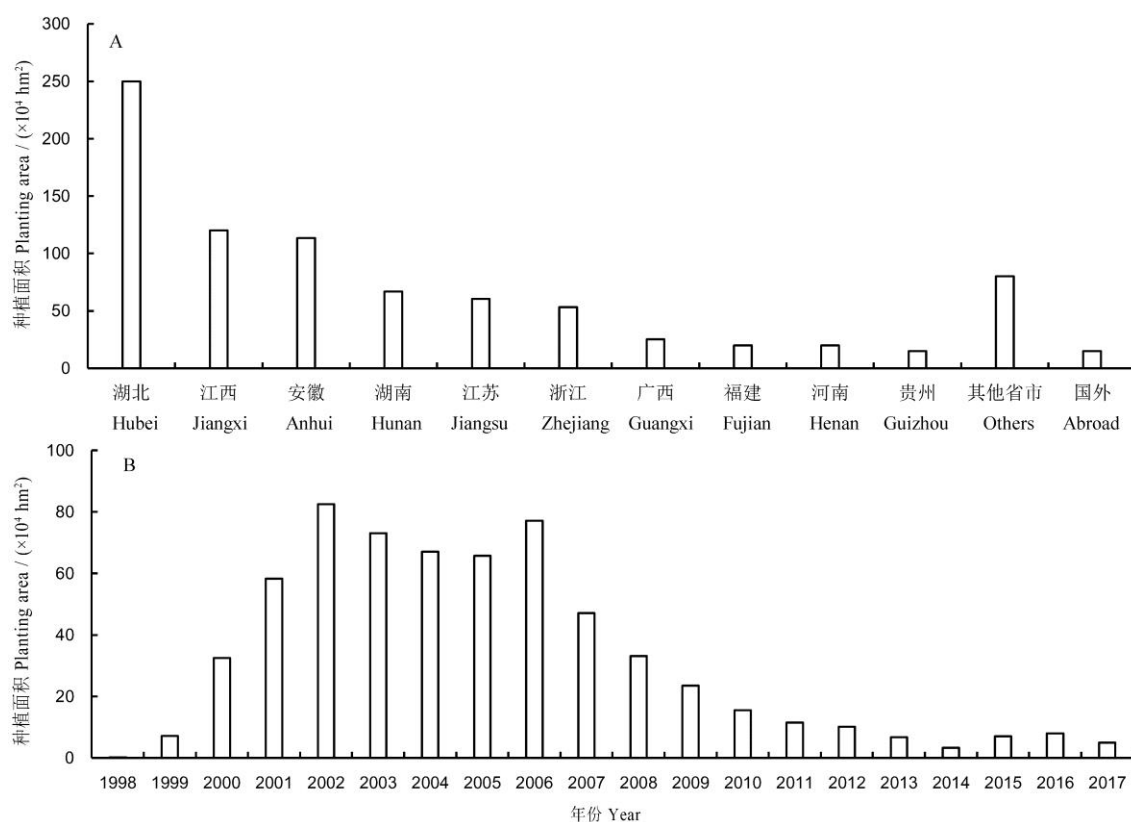
收稿日期: 2018-11-30; 修改稿收到日期: 2019-02-14。

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA211151, 2002AA207001); 国家农业科技成果转化资金资助项目(02EFN213200233)。

国家杂交水稻工程技术研究中心合作,在协作攻关中形成的一个重大品种,是中国超级稻计划完成第一步目标的标志性品种,也是继杂交稻霸主汕优 63 之后应用面积最大的杂交稻。汕优 63 在 1976–2001 年是种植面积最大、覆盖范围最广的杂交稻,具有广泛的适应性;两优培九则在 2002–2017 年累计种植面积位居第一,单个品种年种植面积连续多年位居第一<sup>[1]</sup>。

大量种植试验和大面积生产实践表明,两优培九与汕优 63 具有相似的广适性,可在 34°N 以南地区种植,其中,32°N 以南[或纬度+海拔/100<32]为适宜种植区,32°N–34°N[或纬度+海拔/100<34]为次(较)适宜种植区<sup>[2]</sup>。东自浙江宁波东海沿岸(或江苏盐城黄海沿岸),西至云南丽江和成都平原,南从海南三亚,北达陕西汉中(或江苏徐州),纵跨 18°N–35°N,在南方 3 大稻作区(中国南方和北方各有 3 个稻作区)共 9 个亚区中的 8 个亚区(I:华南双季稻稻作区,共 3 个亚区;II:华中双单季稻稻作区,共 3 个亚区;III:西南高原单双季稻稻作区,青藏高寒河谷单季稻亚区除外的其他 2 个亚区)和江北单季稻稻作区(IV)的黄淮平原丘陵中晚熟亚区(IV2)

均有多年且较大面积的种植,覆盖 34°N 以南除台湾、西藏之外的 17 个省(市、自治区)稻区。在华南双季稻稻作区主要作双季早稻和晚稻;在华中单双季稻稻作区主要作单季中稻,部分作晚稻;在西南高原单双季稻稻作区和江北单季稻稻作区的 IV2 亚区作单季中稻(表 1)。多个稻区的大面积种植表明,两优培九比之前当家杂交稻汕优 63 增产 0.75~1.5 t/hm<sup>2</sup>。1999 年和 2000 年,在湖南省和江苏省共有 38 个 6.7 hm<sup>2</sup> 丰产方(百亩方)和 3 个 67 hm<sup>2</sup> 丰产方(千亩方)的平均单产均超过 10.5 t/hm<sup>2</sup>,率先实现中国超级稻计划第一期目标。从 1998 年开始示范,至 2017 年仍有一定面积的种植,其中有 5 年种植面积超过 67 万 hm<sup>2</sup>(一千万亩),2002 年达到 82.5 万 hm<sup>2</sup>,替代连续 16 年年种植面积居于首位的汕优 63,连续多年成为年种植面积最大的杂交稻。至 2017 年止,累计种植面积已超过 800 万 hm<sup>2</sup>,成为继汕优 63 之后种植面积遥居首位的杂交稻,其中,在湖北、江西、安徽、湖南、江苏、浙江种植面积均较大,还先后被成功引种到菲律宾、巴基斯坦、越南等国,2015–2017 年在巴基斯坦和越南有较大面积种植(图 1)<sup>[1]</sup>。



其他省市指海南省等 7 个省市的总和。2015–2017 年数据为国内面积加上出口种子量折算。

Others represent the total planting area of seven provinces such as Hainan. The data of 2015–2017 include the area calculated from the seeds exportation.

图 1 两优培九在各省(A)和历年(B)种植面积

Fig. 1. Planting area of Liangyoupeijiu in various provinces (A) and years (B).

表 1 两优培九在 8 个水稻亚区的种植方式和部分代表性地区的生育期  
Table 1. Growth duration of Liangyoupei9 in eight rice subregions.

稻作区 Rice planting area	亚区 Subregion	代表性地区 Representative area	种植方式 Planting type	全生育期（与汕优 63 或其他当家杂交稻比） Growth duration (Compared with Shanyou 63 or other major hybrid rice)/d		
				中稻 Mid-rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
华南双季稻稻作区( I )	闽粤桂台平原丘陵亚区( I 1)	广东广州, 广西南宁	双季稻		130(+3) 132~134	115(+3) 116~121
	琼雷台地平原亚区( I 3)	海南海口	双季稻		130	117~122
华中双单季稻稻作区( II )	长江中下游亚区( II 1)	苏中苏南地区, 安徽淮河流域, 河南信阳地区, 湖北江汉平原	单季中稻	140~156(+3~5)		
	川陕盆地亚区( II 2)	四川江油、达州, 陕西安康地区	单季中稻	143~155(+3~5) 157~163(+5~7)		
	江南丘陵亚区( II 3)	浙江温州、台州, 福建武夷、尤溪, 江西赣州、萍乡, 湖南长沙、吉首, 广东蕉岭、梅州	单季中稻 或双季晚稻	140~145(+3~5)		130~135(+3~5)
				140~145(+3)		130(+3)
				144~146(+6) 140~153(+4~9) 145		133~135(+6) 113~122
西南高原单双季稻稻作区( III )	黔东湘西山地亚区( III 1)	贵州遵义	单季中稻	180		
	滇川高原岭谷亚区( III 2)	云南永胜	单季中稻	162(+1~3)		
华北单季稻稻作区( IV )	黄淮平原丘陵中晚熟亚区( IV 2)	江苏宿迁、徐州	单季中稻	153~162(+5)		

2 两优培九广适性主要相关性状的解析

两优培九得以广范围大面积多年份种植，一是其具有感光感温特性的广泛适应性，使抽穗和开花结实处于良好的生态条件；二是光合姿态和穗粒结构合理，使其生长和高产的广适性好，加之米质优良，得到市场认可；三是对主要生物逆境和非生物逆境(环境)的适应性较好，未因抗逆性问题而发生重大损失。这些表现在与广适性紧密相关的农艺特性方面，生育期、株高叶角等主要株型特征、生长特性及生物量、稻谷产量、稻米品质、对主要生物逆境和环境及其变化等均具有广泛的生态适应性和环境适应性。

2.1 生育期的适应性特征

水稻的广泛适应性首先表现为适宜种植的地域广大，特别是适宜纬度范围较大，即要求在不同生态区生育期适宜，才能保证安全抽穗和开花，并使灌浆结实处于有利的环境条件。

水稻生育期与光温反应密切相关。一般来说，感光性强的水稻品种适应的纬度范围较窄，在不同生态稻区尤其是纬度差异较大的区域间生育期变幅大，甚至不能正常抽穗。而感光性中等和较弱的水稻品种生育期变幅较小，在不同生态区才有较广泛的生育期适应性。

邹江石等<sup>[3]</sup>在南方稻区 8 个代表性试验点连续 2 年进行生态适应性试验，结果表明，两优培九抽穗的高温促进率为 3~5 级(短日下为 5 级，长日下为 3 级)，短日促进率为 4~5 级，属中等感光、强

感温型，其生育期稳定性在长江中下游亚区较高，华南双季稻稻作区稍低。生育期主要受温度影响，适播期内每提早 1 d 播种，抽穗期提早 0.2~0.3 d，变幅不大。例如，在江南丘陵亚区( II 3)温州，6 月中下旬相差 15 d 播种，播始历期仅相差 2 d。

邹江石等<sup>[2]</sup>对 1999~2000 年南方稻区 11 个省 19 个区域试验点和 5 个生产试验点的结果进行分析，两优培九作单季中稻，全生育期需总积温 3650~3800℃·d，需 12℃ 以上有效积温 1850℃·d，其中出苗至抽穗 1400℃·d。

以各地的种植试验和生产实践来看，在 35° N 以南各稻作亚区，两优培九适宜的种植区域范围较广，也适合各个生态区的不同种植制度，具有广泛的生育期适应性(表 1)。

2.2 光合姿态主要性状的适应性特征

种植区域广的水稻要求最大程度适应不同生态区的光照强度和台风等灾害性天气，需要品种在不同生态稻区的株高、叶角等光合姿态具有一定适应特征，其中最重要的性状就是株高适宜且变化不大以利于抗倒伏，顶 3 叶叶角较小且较稳定以利于采光。可见，株高和叶角的生态适应性和稳定性是水稻生态广适性需要关注的最重要形态学指标。

2.2.1 株高特性及其在不同生态区的变幅

两优培九株高不仅与其遗传特性有关，而且受一定气象因素的影响(占株高 10%~18%)；在南京 6 月初之前播种株高正常(114~122 cm)，6 月中旬以后播种株高则会降低；温度正常时株高日增 1 cm 以上，温度偏高或偏低时仅日增 0.6 cm<sup>[4]</sup>。根据对南方稻区区域试验和生产试验统计，两优培九作单季

中稻,株高 112 cm。吕川根等<sup>[5]</sup>比较了在华南双季稻稻作区、长江中下游亚区、川陕盆地亚区和滇川岭谷亚区的株高特征,平均值为(115.6±6.9) cm,变异系数为 6%;以长江中下游亚区为最高(121.9 cm),滇川岭谷亚区为最低(114.5 cm)。

多个试验和种植实践表明,超高产杂交稻适宜株高为 110~125 cm。两优培九株高在此适宜范围内,而且在不同生态稻区间变幅不大,是其具有较好抗倒伏性和广泛生态适应性的一个重要株型特征。

### 2.2.2 叶角分布及其在不同生态区的变幅

两优培九顶 3 叶上举并内卷,对光能利用较为有利。吕川根等<sup>[5]</sup>2006 年和 2007 年在南方稻区的广东广州(稻区及亚区号: I 1)、广西南宁(I 1)、海南海口(I 3)、江苏扬州(II 1)、湖北武汉(II 1)、四川江油(II 2)、福建尤溪(II 3)、云南涛源(III 2)共 8 个生态试验点观测了齐穗期叶角特征,结果表明,顶部 3 叶的平均叶角为 13.6°±3.7°,以倒 3 叶为最大,剑叶与倒 2 叶相近;剑叶、倒 2 叶叶角的区域间极差均很小。

多个模拟研究表明,水稻理想株型的上 3 叶叶角配置以 5°(剑叶)、10°(倒 2 叶)和 15°(倒 3 叶)左右为宜。两优培九的叶角配置基本达到这种要求,而且不同生态稻区间变化不大,这是其群体光能利用具有广泛生态适应性的株型特征。

## 2.3 生物量和稻谷产量的适应性特征

广适性水稻需较大的生物量,并最终反映在稻谷产量上,才可为人类服务。其生物学基础就是要有较强的光合生产和较高的物质积累,并有通畅的物质运转和合理的分配。

### 2.3.1 生物量

两优培九群体干物质积累能力强,尤其是抽穗期至成熟期的干物质增量明显高于亲本和汕优 63,以致最终生物量较高。宗寿余等<sup>[6]</sup>报道,两优培九生物量比汕优 63 高 12.1%。吕川根等<sup>[7]</sup>在 4 种植植密度、2 种氮肥水平下种植比较,成熟期生物量比汕优 63 高 9.7%~12.2%。Ibrahim 等<sup>[8]</sup>在长沙、孟加拉国加济普尔(Gazipur, 24°0' N, 90°25' E, 8.4 m)和哈比坚尼(Habiganj, 25°27' N, 91°24' E, 5.5 m)2 个热带环境以及孟加拉国 2 个旱季进行田间试验,两优培九生物量均较高。

#### 2.3.1.1 光合优势的稳定性特征

与 9311 和汕优 63 相比,两优培九在正常生长和衰老过程中,光能吸收、传递和转化效率及碳同化等方面均具有比较优势,表现为  $P_n$  较高,对强弱光的适应性或耐受能力及抗衰老能力更强;具有多

种抵御偏低或过高温度的策略,对不良温度的适应性或耐受能力更强;土壤水分亏缺造成的生长伤害较轻;低氮或高氮条件下均具有光合能力的比较优势;光合作用对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高、土壤 pH、盐胁迫等环境条件的适应能力更强<sup>[9]</sup>。

#### 2.3.1.2 生长优势的稳定性特征

两优培九比汕优 63 的生物量高 9.7%~12.2%,源于全生长期作物生长率(CGR)高 6.5%~6.6%,叶面积持续时间(LAD)高 25.8%~35.6%<sup>[6-7]</sup>。Katsura 等<sup>[10]</sup>研究发现,两优培九稻谷产量与成熟期生物量密切相关,叶面积指数(LAI)也是生物量高积累的一个重要因素,而不同环境间的辐射利用效率(RUE)差异并不大。Wu 等<sup>[11]</sup>也认为,超级杂交稻产量高是由于干物质产量高,积累能力强,LAD 比 LAI 更能解释光合生产的优势。Katsura 等<sup>[12]</sup>2004 年在京都获得了当地自然条件下稻谷产量纪录,也发现由于 LAD 高导致生物量高积累,而不是 RUE 的作用。Zhang 等<sup>[13]</sup>也认为,两优培九等超级杂交稻产量高是由于库和源均高,部分原因是较长生长期(LAD 的构成因子)和辐射高积累产生的更大生物量,RUE 并不能解释产量优势。

吕川根等<sup>[14]</sup>用 8 个生态试验点生长数据建立与 7 项气象参数对应的 CGR 模型,并依据 23 年的气候资料计算 7 个水稻生态区(共 109 个地区或季节)两优培九常年的 CGR,平均值变化为 13.83~23.44 g/dm<sup>2</sup>,长江中下游流域单季中稻较高,黄淮流域、四川盆地和云贵高原单季稻高达 18~22 g/dm<sup>2</sup>,但华南地区早、晚稻较低。综合考虑生长优势和生长季节的要求,认为其最优势生长区域和最佳种植区域在长江中下游流域和黄淮流域偏南地区。

#### 2.3.1.3 光合产物的运转和分配

水稻产量的形成不但表现为物质生产和积累,还表现在是否有通畅的运转和合理的分配,这也是广适性需要关注的一个特性。

陈炳松等<sup>[15]</sup>用 <sup>14</sup>C 示踪分析表明,两优培九叶片光合产物的输出能力较强,光合产物向穗部的分配比率比亲本高,运转速率和分配比率也均比汕优 63 高。庄宝华等<sup>[16]</sup>的试验结果显示,两优培九群体物质积累能力明显强,比汕优 63 高 30.3%,单位库容可利用的同化物即源库比也不低,但干物质向经济器官的分配率较低,结实率、库充实率和收获指数较低。郭士伟等<sup>[17]</sup>认为,两优培九抽穗前根系活力比汕优 63 强,抽穗后伤流强度下降幅度较大,且一直维持在较低水平。陈晓飞<sup>[18]</sup>也发现,生育后期两优培九根系生理活性比 9311 和汕优 63 都低,

物质合成和转化能力早一周下降。王志琴等<sup>[19]</sup>研究发现, 结实前中期根系伤流液和叶片中玉米素、玉米素核苷含量两优培九与父本无差异, 但均显著高于汕优 63, 灌浆后期却均明显低于两者, 早衰与根、叶中细胞分裂素含量较低有关; 灌浆中后期叶面喷施玉米素可明显提高叶片中玉米素和玉米素核苷的总含量, 从而延缓衰老并提高结实率和粒重。

可见, 两优培九物质运转稳定性尚不够, 这与其后期生长状况关系很大。采用合适的措施使后期叶片和根生长良好和不早衰, 是提高其物质运转的有效方法。

### 2.3.2 稻谷产量及其稳定性

南方稻区区域试验两优培九产量为 7.1~11.7 t/hm<sup>2</sup>, 平均 8.7 t/hm<sup>2</sup>, 生产试验平均 8.5 t/hm<sup>2</sup>, 产量稳定性类型为稳定, 表明其在南方稻区产量较高且较为稳定, 生态广适性较好。原因是由于其不但穗粒结构合理、协调, 而且单位面积穗数、每穗颖花数、结实率、千粒重在生态区之间变幅较小。邹江石等<sup>[20]</sup>2006 年和 2007 年在南方三大稻作区 8 个生态试验点的结果表明, 作单季中稻, 每 1 m<sup>2</sup> 穗数为 215.9~256.6; 每穗颖花数 208.9~218.9, 变幅很小; 结实率为 79.8%~81.5%, 千粒重稳定在 26.7 g。作双季早稻、晚稻以及作再生稻的前季, 不同生态区间穗粒结构差异也不大。

#### 2.3.2.1 不同生态区的稻谷产量

华北单季稻稻作区黄淮平原中晚熟亚区: 两优培九在江苏稳产性高于早熟中粳类型, 在苏北地区无不宜种植区[其中, 苏北灌溉总渠(33.5° N)以北属于华北单季稻稻作区(IV)的黄淮平原丘陵中晚熟亚区(IV2)]<sup>[21]</sup>。在江苏省区试和生产试验中单产 9.6 t/hm<sup>2</sup>, 比汕优 63 增产 7.8%~9.2%, 差异达极显著水平。在较北部的宿迁市[34° N 附近, 属 IV2 亚区], 2001 引种 6.7 hm<sup>2</sup>, 平均产量 10.3 t/hm<sup>2</sup>, 比汕优 63 增产 22.2%; 2002 年种植 333 hm<sup>2</sup>, 2003 年扩大至 2000 hm<sup>2</sup>, 2004 年又扩大至 4000 hm<sup>2</sup>, 比 II 优 084 增产约 18%。

华中双单季稻稻作区: 在安徽省区试中产量 8.0~8.3 t/hm<sup>2</sup>, 比汕优 63 增产 1.6%~2.2%; 在湖北省农业科学院品比和联合多点试验中, 比汕优 63 增产 6.3%~11.3%, 湖北省种植面积累计达到 2.5×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>, 最大年份在 4×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup> 左右。在陕西省区试中比汕优 63 增产 3%~10.6%, 在偏北的陕西安康、河南信阳等地区, 是较好协调高产与优质的首选杂交稻。在浙江省温州市区试中产量 7.9~8.1 t/hm<sup>2</sup>, 比汕优 63 高 3.1%~9.4%。台州市温岭等 6

个县 9 组杂交晚稻试验, 两优培九在 6 组试验中产量均列第一, 比同组第二位增产 3.8%~16.8%, 无论作连晚还是单晚、在山区还是沿海种植, 均表现耐肥抗倒、耐渍耐涝、抗逆性较强、适应性广而高产。在江西萍乡作单季中稻比汕优 63 增产 10%, 在江西赣州作连作晚稻比 II 优 46 增产 15.5%。Huang 等<sup>[22]</sup>、Jiang 等<sup>[23]</sup>在湖南长沙等 6 个点种植, 两优培九产量比常规稻高 8%~19%。衡阳市 2003 年 6.9 hm<sup>2</sup> 平均产量 12.2 t/hm<sup>2</sup>, 达超级稻第二期目标; 吉首市阿娜村 1350 m<sup>2</sup> 强化栽培田折合单产 13.3 t/hm<sup>2</sup>, 创湘西州水稻高产纪录。在临湘山区冷浸田、青夹泥田和沙泥田适应性均强, 比汕优 63 增产 14.4%~16.5%。在广东梅州平原和山区不同类型土壤、不同肥力田块种植, 长势长相良好, 而且高抗白叶枯和稻瘟病。

华南双季稻稻作区: 两优培九在海南最适合作早稻, 也可作连作晚稻。在海南省 3 年试验中表现丰产性好、适应性广, 早稻区试比广优 4 号增产 2.3%, 晚稻品比试验比博优 64 增产 5.4%。在广西南宁明等地作双季稻, 早稻和晚稻分别增产 9% 和 16.5%。在南宁等地则生育期偏长, 晚季易受不良天气影响而出现早衰, 而在早季则表现为穗多粒多、结实率高。

两优培九在中国地域之外也进行了试验和试种。2002~2004 年在日本京都市(35°1' N, 135°7' E, 20 m)进行田间试验, 2002~2003 年稻谷单产为 9.7~9.9 t/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>, 2004 年达到 11.8 t/hm<sup>2</sup>, 创造了京都水稻产量纪录<sup>[12]</sup>。在孟加拉国加济普尔和哈比坚尼进行 2 年试验, 稻谷产量分别为 6.1~7.5 t/hm<sup>2</sup> 和 7.2~10.3 t/hm<sup>2</sup>, 也能很好适应当地热带环境并取得较高产量<sup>[8]</sup>。

综上所述, 两优培九在南方各生态稻区和其他合适的种植区普遍能获得较高的稻谷产量, 具有较好的生态稻区的产量广适性。

#### 2.3.2.2 多种种植方式下的稻谷产量

除以上所述的移栽稻之外, 两优培九在多种种植方式下也均能获得较高的稻谷产量, 具有较好的不同种植方式下的产量适应性。

再生稻: 再生稻投资省、效益好, 适宜在 25° N~30° N 种植, 热量条件为种植水稻单季有余、双季不足的地区; 或水资源、人工、成本等限制双季稻生产的地区。两优培九米质好, 头季稻产量高, 再生力又强, 在福建、江西、广西等地作再生稻, 增产幅度高, 综合性状较为理想<sup>[24]</sup>, 解决了一些生产难题<sup>[25]</sup>, 具有较大的生产效益(表 2)。再生稻有

表2 两优培九在部分地区作再生稻的产量

Table 2. Yield of Liangyoupei jiu as ratooning rice in some areas.

代表性地区 Representative area	头季 Main season /(t·hm <sup>-2</sup> )	再生季 Ratoon season /(t·hm <sup>-2</sup> )	二季合计 Total /(t·hm <sup>-2</sup> )	比对照增产 Compared to control/%
福建尤溪县 Youxi, Fujian	11.3~11.7	6.2~6.8	17.5~18.5	30.6~40.2
福建沙县、大田县 Shaxian and Datian, Fujian	10.8~11.2	6.1~6.2	16.9~17.4	32.8~33.1
江西修水县 Xiushui, Jiangxi	8.7	5.0	13.7	7.0
广西钦州市 Qinzhou, Guangxi	8.5	6.3	14.8	33.7

效穗均来自于地上部节间腋芽,两优培九倒2节间穗产量占67%左右,其次为倒3节间,这两个节位再生率高、每穗粒数多,可占再生产量的约94%。

免耕直播、抛秧和机栽秧:通过其他轻简栽培,两优培九也能高产稳产。冯跃华等、程兆伟等在前3年定位基础上,在长沙进行两优培九4种耕作方式试验,结果表明,免耕稻与翻耕稻产量差异并不显著<sup>[26]</sup>,免耕稻的根系活力和根长均高于翻耕稻,免耕直播能提高根系活力<sup>[27]</sup>。采用稀直播强化栽培,一般产量9.5 t/hm<sup>2</sup>,高产田可超过10.5 t/hm<sup>2</sup>。刘立中等<sup>[28]</sup>、蔡晓华等<sup>[29]</sup>试验表明,两优培九全生育期直播比移栽缩短6 d,有效穗多26.7%,虽然每穗颖花数和千粒重有所降低,但实产达9.6 t/hm<sup>2</sup>,比移栽高10.6%。但Badshah等<sup>[30]</sup>发现,两优培九直播稻比移栽稻平均茎蘖干质量低14%,库容量也较小,虽然成穗数较多,产量仍稍低。

两优培九也适用抛秧的方式种植。安徽天长县进行0.7 hm<sup>2</sup>免耕抛秧试验,比手栽秧增产3%~5%,而且减少人工1~2个。温州乐清县作单季稻抛秧23 hm<sup>2</sup>,单产9.4 t/hm<sup>2</sup>,比协优46高2.7 t/hm<sup>2</sup>。

两优培九也适用机插秧方式种植。周仁先<sup>[31]</sup>在安徽庐江进行试验,同期育秧,机栽比人工移栽返青期推迟3 d,始穗期迟2 d,但机栽可保证大田的基本苗,有效穗较多,产量相近。

## 2.4 稻米品质的稳定性特征

众多相关试验和生产实践表明,在各个生态区和多种种植环境条件下两优培九均能获得较好的稻米品质,稻米品质稳定性较好。

### 2.4.1 不同生态区的主要稻米品质指标

2年7个代表性生态点组成的30个种植试验表明,两优培九稻米各项品质指标均可在国标三级以上,其中,胶稠度、直链淀粉含量等4项指标2年均达到国标一级;整精米率和透明度等4项指标均在国标二级以上。7个生态点间的变异系数2年均小于0.05的有精米率、直链淀粉含量等5项指标,而透明度等4项指标大于0.1。蛋白质含量等7项

指标2年间均无显著差异,直链淀粉含量等5项指标有显著差异。作晚稻米质好于作早稻,整精米率高8.2个百分点,碱消值高一个等级,透明度极显著高,米质高一个等级<sup>[32]</sup>。垩白率在扬州、武汉等长江中下游亚区变异稍大,在广州、海口等华南双季稻稻作区变异次之,在云南涛源表现低而稳定;各生态点的垩白率均随播期的推迟而变小<sup>[33]</sup>。最佳食味的RVA谱出现在华中双单季稻稻作区,适宜播期的比迟播的好<sup>[34]</sup>。沈新平等<sup>[35]</sup>在江苏4个不同生态类型稻作区的5个纬度点(31.3°N~34.7°N)进行试验,结果表明垩白具有明显的纬向递变特征,以偏北为优;垩白率(度)随播期推迟而降低。

多年试验和种植实践表明,两优培九在南方稻区大范围内种植,米质一般均在国标三级以上。直链淀粉含量为20.2%~22.0%,胶稠度为72~84 mm,既保持了籼米的爽口性,又具有粳米的一定软性,米饭软而不黏,冷而不硬,气味清香,口感较好。因此,它既能满足习惯籼米人们的口味,也深受喜食粳米人们的欢迎,大众化适口性较好。适口性等被江苏省品种审定会专家现场评比为11个品种之首,超过了多个粳稻和糯稻<sup>[1]</sup>。两优培九2000年被评为安徽省优质米,同年被湖北省首届优质稻米评审会评为国标二级优质稻米,被评为陕西省二级优质稻米和海南省特二级大米。在浙江、四川等地也作为优质米而优价收购。

### 2.4.2 温度和氮肥对主要品质指标的影响

与其他水稻品种一样,两优培九稻米品质也易受灌浆结实期气象条件的影响。申建斌等<sup>[36]</sup>发现,日平均和日最高温度主要影响两优培九整精米率,其次是垩白粒率和精米率。宗寿余等<sup>[33]</sup>分析认为,日平均温度对垩白率影响最大,其次是日最低温度和日最高温度;齐穗后6~30 d的日平均温度影响最显著,利于形成较低垩白率的温度为22℃~25℃。肖辉海等<sup>[37]</sup>在两优培九灌浆期进行高温和适温处理,高温下籽粒直链淀粉积累快,成熟后籽粒和直链淀粉的质量分数均低,而蛋白质质量分数则较高;

灌浆中后期相对低的日均温有助于改善稻米品质。

张洪程等<sup>[38]</sup>研究表明，适量施氮利于提高营养品质、加工品质、蒸煮品质，而高氮则对整精米率、垩白度等外观品质不利，但 4 个氮肥水平下两优培九稻米品质均优于汕优 63。万靓军等<sup>[39]</sup>的试验结果表明，在施氮量 225 kg/hm<sup>2</sup> 水平下，前中期施用比例按 3：7、4：6、5：5、6：4、7：3，两优培九加工品质和营养品质均逐渐下降，外观品质先降后升，而淀粉黏性逐渐提高，施氮比例以 5：5 和 6：4 能较好协调产量与品质的关系。陈双龙<sup>[40]</sup>发现，随着施氮量增加，加工品质和营养品质得以改善，而外观品质和食味品质则变劣；后期喷施叶面肥(氮磷钾或氨基酸+多种微量元素)可提高整精米率，降低垩白率和垩白度，使加工品质和外观品质得以改善，蛋白质含量也有所提高。Wang 等<sup>[41]</sup>研究表明，整精米率受施氮量显著影响，但两优培九 2 年 13 个氮处理的整精米产量比汕优 63 高 24%~34%，还具有更高胶稠度和更低蛋白质含量，米饭适口性更好。过量施氮等引起倒伏也影响某些稻米品质指标。郎有忠等<sup>[42]</sup>模拟两优培九结实期不同时间倒伏，糙米率、长宽比、糊化温度和胶稠度均不受影响，其他品质指标则变劣。

2.5 生物逆境的适应性特征

水稻的生物逆境主要是稻瘟病、白叶枯病、纹枯病等病害和螟虫类、稻飞虱等虫害。由于水稻品种一般都不抗纹枯病和螟虫类、稻飞虱等虫害，均是采用农药防治，所以这些逆境的抗性对品种的广适性影响不大。两优培九对白叶枯病主要生理小种 PX097、JS49-6、KS-6-6、浙 173 的抗性指数为 3~5 级，表现抗至中感(国家南方区试；江苏、湖北等省区试)，而白叶枯病生理小种相对稳定，在不同生态稻区间差异也不大，两优培九对白叶枯病具有较好的普遍抗性或耐性，即具有较好的广适性。

而水稻最主要病害稻瘟病生理小种很复杂，在

不同生态区之间有差异，而且同一生态区不同年度间生理小种的变异和种群间的消长也较快，是影响水稻品种广泛生态适应性的最主要生物逆境，只有稻瘟病抗性较广谱、水平抗性中等以上的水稻品种，才能多年在多个生态区广泛种植。

综观已有研究结果和种植表现(表 3)，在大多数水稻生态区和主要种植区，两优培九对稻瘟病主要生理小种的抗性和对叶瘟、穗颈瘟的综合抗性均优于汕优 63 或相当，这是其能够广范围、大面积、多年份种植的重要抗生物逆境基础。

2.6 对环境及其变化的适应性特征

水稻生长环境中的非生物因子主要包括光强、温度和土壤水分、养分、盐度、pH 等。众多相关试验和生产实践表明，两优培九对主要环境因子有较好的适应性，对逆境具有较强的耐性，因播期、密度和肥料管理造成温度、光照和养分等环境差异的影响也不大。

2.6.1 对强弱光的适应性特征

对强光和弱光的适应性或耐受能力主要体现在叶片光合能力上。两优培九在强光和弱光下的光能吸收、传递和转化效率及碳同化等均具有优势，对 UV-B 辐射增强的适应性或耐受能力更强。另外，两优培九 C<sub>4</sub> 光合途径酶活性较高，在弱光下仍有较高的碳同化效率<sup>[9]</sup>。

2.6.2 开花受精和灌浆结实稳定性和对高低温的适应性特征

一般而言，水稻开花受精安全日均温较低的品种广适性较好。研究表明，两优培九开花受精适宜日均温为 25.4℃，安全日均温为 23℃，均明显低于其他亚种间杂种，而与常规稻相近。受精率变异系数为 43.6，虽高于常规稻(30.2~32.3)，但低于亚种间杂种(52.2)，说明其受精率及其稳定性介于常规稻与亚种间杂交稻之间<sup>[51]</sup>。吕川根等<sup>[52]</sup>分析南方稻区 19 个区域试验点和 5 个生产试验点的资料 and 进行相

表 3 两优培九稻瘟病抗性  
Table 3. Rice blast resistance of Liangyoupei jiu.

试验地或菌种 Test province or strain	试验者 Tester or method	抗性表现 Resistance	抗性与对照杂交稻比 Compared with control
RB1-RB22	奉光平等 <sup>[43]</sup>	抗菌频率 54.6%	略高(优)于汕优 63
南方稻区	南方稻区区试	叶瘟 3.4~4 级，穗瘟 7~9 级	抗叶瘟优于汕优 63，抗穗瘟相仿
江苏	江苏省区试	对 3 个小种均为抗	优于汕优 63(感至抗)
安徽	安徽省区域	轻感(4 级)	优于汕优 63
湖北	湖北省区试；张舒等 <sup>[44]</sup> ；沈斌 <sup>[45]</sup>	叶瘟中感至中抗，穗颈瘟中感至高感	抗叶瘟优于、抗穗颈瘟略优于汕优 63 或相当
湖南	肖友伦等 <sup>[46]</sup>	综合病级 5	远优于金优 207(9 级)
江西	马辉刚等 <sup>[47]</sup> ；习先俨等 <sup>[48]</sup>	毒力频率 6	优于汕优 63(9.7)，优于金优 207(23.9)
福建	杜宜新等 <sup>[49]</sup> ；黄华康等 <sup>[50]</sup>	感至中抗	抗性高一个等级或相当
陕西、海南	陕西省、海南省大田种植	抗	综合抗性明显优于汕优 63



关研究发现,与汕优 63 相比,两优培九结实率低 4.3~7.5 个百分点,但变异系数相近;在南京 5 月份播种,结实率一般为 75%~90%,稳定性尚好,播期迟至 6 月中旬以后,结实率才会明显降低;开花期 5 d 日均温在 13.7℃~28.5℃ 范围内时,温度每增加 1℃,受精率可提高 1.9%~10.7%。

隗溟等<sup>[53]</sup>在盛花期用 36℃ 处理,两优培九结实率明显高于汕优 63,表明其具有较强耐高温能力;但当有库源关系限制时,较多受精粒停止发育,结实率低于汕优 63。

### 2.6.3 穗、粒重的稳定性及对温度和水分胁迫的适应性特征

水稻完成穗增重需要的时间长,碰到不利因素和灾害天气的概率就会增大,广泛适应性就会受到一定限制,这是大穗型品种存在的普遍现象。两优培九灌浆起始质量和终极质量均大于汕优 63,起始增重势和最高增重速率则均明显小,穗重的快速增加期虽长达 19.1~25.5 d,但完成穗增重却需要 44~47 d,而汕优 63 仅需 27 d。研究还表明,两优培九完成穗增重需要的总天数与灌浆期平均温度显著正相关<sup>[54]</sup>。栽培上可通过增加孕穗期茎秆中物质的积累以保证出穗后有充足的光合产物和预防灌浆期叶片早衰等措施加以改善。

温度是两优培九谷粒长、宽的主要影响因子,其有利日均温为 27℃~29℃;谷粒厚度与抽穗后 1~30 d 最高气温( $T_{\max}$ )呈二次曲线关系;谷粒比重与日照时数正相关,而与抽穗后 1~10 d 的  $T_{\max}$  负相关,其有利  $T_{\max}$  为 <30℃。吕川根等<sup>[55]</sup>用 52 年气候资料模拟 7 个生态区(共 95 个地区)两优培九的千粒重,平均值为 25.9~28.0 g,变幅并不大。

薛艳凤等<sup>[56]</sup>在两优培九齐穗 20 d 后用连续 4 d 的低温弱光和水分胁迫处理,并不会引起叶片早衰,短期低温弱光会使谷粒充实率、结实率和千粒重显著减低,但敏感程度低于汕优 63。薛艳凤等<sup>[57]</sup>还发现,受精子房膨大速度和粒重增加速率均比汕优 63 慢,单粒重和充实度也均比汕优 63 低,施用粒肥、剪叶或疏花可改变粒重和充实度。

### 2.6.4 对不同播期、栽插密度和氮肥管理引起环境变化的适应性特征

两优培九适播期内每提早 1 d 播种,抽穗期一般只提早 0.2~0.3 d,所以,不同播期对其生长环境变化的影响并不大。

两优培九在一定种植密度范围内均能获得高产,产量差异不大。郑克武等<sup>[58]</sup>研究表明,栽插密度 22.5 万~31.5 万穴/hm<sup>2</sup>,结实率和千粒重变化均

较小,穗数与每穗颖花数之间具有良好互补性。采用强化栽培法,双本或单本栽插均能获得高产,而且适当增大株行距,同时采用双本栽插,既能保证植株的生理活性,也能形成足量有效穗。可见,在一定范围内(株距 20 cm、行距 23.3~13.3 cm 或株距 16.7 cm、行距 26.7~20 cm),两优培九具有较强的群体自我调节能力,对栽培密度的适应范围较宽。

吴爽等<sup>[59]</sup>在 3 种栽插密度下试验,氮素水平对两优培九产量有显著影响,其中施氮 262.5 kg 产量最高,但与施氮 337.5 kg 的产量差异并不显著。据为民等<sup>[60]</sup>研究发现,施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> 配合播种量 18.8 kg 的产量最高(12.1 t/hm<sup>2</sup>)。郑克武等<sup>[58]</sup>的试验表明,施氮 225 kg/hm<sup>2</sup> 可协调穗数、每穗颖花数、结实率、千粒重之间关系而获得高产。Zhang 等<sup>[13]</sup>的两年两地田间试验和 Huang 等<sup>[61]</sup>的试验均表明,在中等至较高土壤肥力下,不需要施用更多氮肥提高两优培九产量。而且,高氮下产量比汕优 63 高 13%,如果不使用固定时间调剂用氮量(FTNM)和实时氮管理(RTNM)等技术,易导致过度施用氮肥<sup>[62]</sup>。

综上所述,两优培九在高氮条件下产量水平较高,但在中等至较高土壤肥力条件下产量也高,对氮肥多寡的适应性较好。

### 2.6.5 对土壤盐分和 pH 值的适应性特征

盐胁迫下两优培九发芽性能和幼苗耐盐性均稍弱于汕优 10 号(1990 年代大面积种植的杂交稻)<sup>[63]</sup>,潘晓毗等<sup>[64]</sup>将其定为 7 级弱耐盐。17 mmol/L NaCl 浸种两优培九,利于幼苗增强对高盐胁迫的适应能力<sup>[65]</sup>。雷华等<sup>[66]</sup>盐胁迫幼苗 4 d 后发现,幼苗产生游离脯氨酸和可溶性糖等有机渗透调节物维持地上部的渗透平衡;在根部通过避 Na<sup>+</sup>以减轻对地上部的伤害,在茎和叶中则通过保持细胞中较高的 K<sup>+</sup>水平以减轻伤害。吕金海等<sup>[67]</sup>从脯氨酸含量、电导率和叶绿素含量 3 项指标认定两优培九比 II 优 838 具有更强耐盐性。综合已有实验结果,两优培九具有一定的(弱)耐盐能力,在低于一定盐度水平的土壤上生长,具有较好的适应性。

刘少华等<sup>[68]</sup>用砂培模拟 5 个 pH 值的根际环境, pH 值在 4~8 范围内,两优培九均能正常生长,其中 pH 值为 6 左右最适于幼苗生长发育。

### 2.7 两优培九的广适应特点和不足之处

两优培九感光性中等,株高、叶角配置合理且在不同生态区之间变化不大,对多个生态稻区的稻瘟病生理小种均有一定抗性 or 耐性,对环境的光照强度、温度和土壤水分、氮素营养、盐分、pH 值的适应范围较宽,对环境变化和逆境耐受性较好,



也适合多种种植方式, 因此, 在多种生态条件和多变的环境条件下, 均能形成较高产量和优质稻米。

虽然两优培九得以广范围、大面积、多年份种植, 但与广适性很好的汕优 63 相比仍有一些不及之处。如, 在南方区试中表现并不增产, 在许多低肥和中肥条件下也不增产, 遇及高温时仍有产量损失, 在寒露风较早地区仍有一定风险。随着水稻育种的进步, 近十多年来又出现了不少广适性优良的杂交水稻。与近十几年来的育种进步和杂交稻生产要求相比, 两优培九尚存在以下主要不足之处:

生长前期在长期淹灌、根生长不良的情况下, 抽穗期和灌浆前中期如果遇及 23℃ 以下气温, 会出现青枯死株现象。在预防措施上, 要多露田透气以促进根系深扎; 齐穗后以灌“跑马水”为主, 保持土壤湿润和根系活力; 遇及低温则可灌深水保湿护根。

两优培九物质运转稳定性尚不够, 需采用必要措施使后期叶片和根生长良好和不早衰, 才能提高物质运转效率及其稳定性。物质运转不稳导致结实率和籽粒充实也不及汕优 63, 增加出穗前灌浆物质储备和维持灌浆期剑叶功能、保持叶粒比为 1.6~1.7 cm<sup>2</sup>/粒最为重要<sup>[69]</sup>。

在大多数生态区和主要种植区, 两优培九对稻瘟病生理小种的抗性和对叶瘟、穗颈瘟的综合抗性虽然优于或相当于汕优 63, 但抗性水平并不高, 在很多重病区仍不适宜种植。

### 3 水稻广适性概念和内涵及其育种选择的思考和讨论

#### 3.1 水稻广适性概念及其主要内涵

目前对于水稻广适性的内涵尚不明确。国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)通过对小麦等的研究首次赋予作物广适性的概念和内涵, 即一种基因型在多种环境中都能获得高产的能力, 主要环境因素包括降水(旱、涝)、温度(暖冬、春寒、干热风)和空气湿度(影响发病程度)及病虫害(暴发或正常)等。罗军等<sup>[70]</sup>在研究云南粳稻适应性中提出, 广适性水稻要求感光性弱、感温性不强、短日高温生育期相对较长, 即在 16 h 光照条件下生育期延长不多, 感温性适中而较耐低温; 在元江县(23°34' N)红光农场(海拔 700 m)和因远(海拔 1500 m)的自然条件下抽穗期相差少于 30 d; 光温反应是 113、213 或者 222、223 型(3 级分类法, 数级顺序为感光性、感温性、短日高温生育期)。陈立云等<sup>[71]</sup>提出, 群体早发性、性状全优且高度协调、根系发达且高活力性、后期的

强功能性是杂交水稻广适性的重要指标。在其他作物方面, CIMMYT 提出, 广适性与小麦对光照时数的不敏感性相关。孙道杰等<sup>[72]</sup>也认为, 广适性和稳产性应理解为作物生长发育与光周期的协调一致性, 即不管温度如何波动、水分供应是否充足、土壤营养状况如何, 到一定时间(光照时数及其变化趋势)作物总能开花结实; 对于小麦广适稳产性来说, 就是与生育同步的仅仅是光周期。

笔者认为, 植物生长的广适性较为狭义, 一般是指适宜生长的地域宽广, 对主要生物和非生物逆境耐受力较强, 在各种环境条件下均能正常生长, 并取得一定的生物量或经济产量。而对于大宗作物水稻来说, 已有七千年种植史, 是人类主要粮食作物, 人们对新品种的要求更高, 品种的广适性应该比狭义的植物学广适性要求更高, 不但要能正常生长, 而且产量要比已有品种高, 对品质等也有要求。所以, 广适性水稻是广义概念, 即不但要在不同(多个)生态稻区均能较好生长, 而且在特定生态区的各种各样环境条件下均能取得与当地主栽水稻品种相当或更高(好)的稻谷产量和稻米品质。其内涵应该包括两个方面: 第一个方面是生态适应性广, 即适宜生长的地域广大, 特别是适宜纬度范围较大, 这需要品种感光性不强, 并且对不同生态稻区主要病害有一定的抗性或耐性(即要求水平抗性较好), 另外还要求在不同生态稻区生长的株高、叶角等植株形态和稻米品质等重要性状(变幅)能符合当地农业生态和农业经济的要求; 第二个方面是环境适应性好, 即在某个生态区, 对生长环境的各因子(光照强度、温度和土壤水分、主要养分、盐分、pH 值, 包括年间的变化)的适应范围较宽, 对主要逆境(强弱光、高低温、水分胁迫、酸碱盐土等)有一定的耐受力, 因播期、密度和肥料管理造成环境差异的影响也不大。以上两个方面的广适性使得水稻能表现出稳定的品种特性, 在多种生态和多样环境条件下都能良好生长, 充分发挥优良品种的特性, 使光合作用能力较强、产物积累较多, 产物运转通畅、分配合理, 并能开花受精良好、灌浆结实充分, 最后达到产量高、品质优之目的(图 2)。

#### 3.2 水稻广适性品种的育种选择

广适性是水稻育种的重要目标之一, 但其育种选择和鉴定方法尚不完善。李兴茂等<sup>[73]</sup>发现, 广适性中麦 175 具有株型直立、叶片小、早熟、半矮秆等特点, 认为将这些性状聚合并在多个环境下进行稳定性比较, 注意对于干旱和高温等逆境的反应, 将有助于广适性品种的培育。陈立云等<sup>[71]</sup>认为, 增加

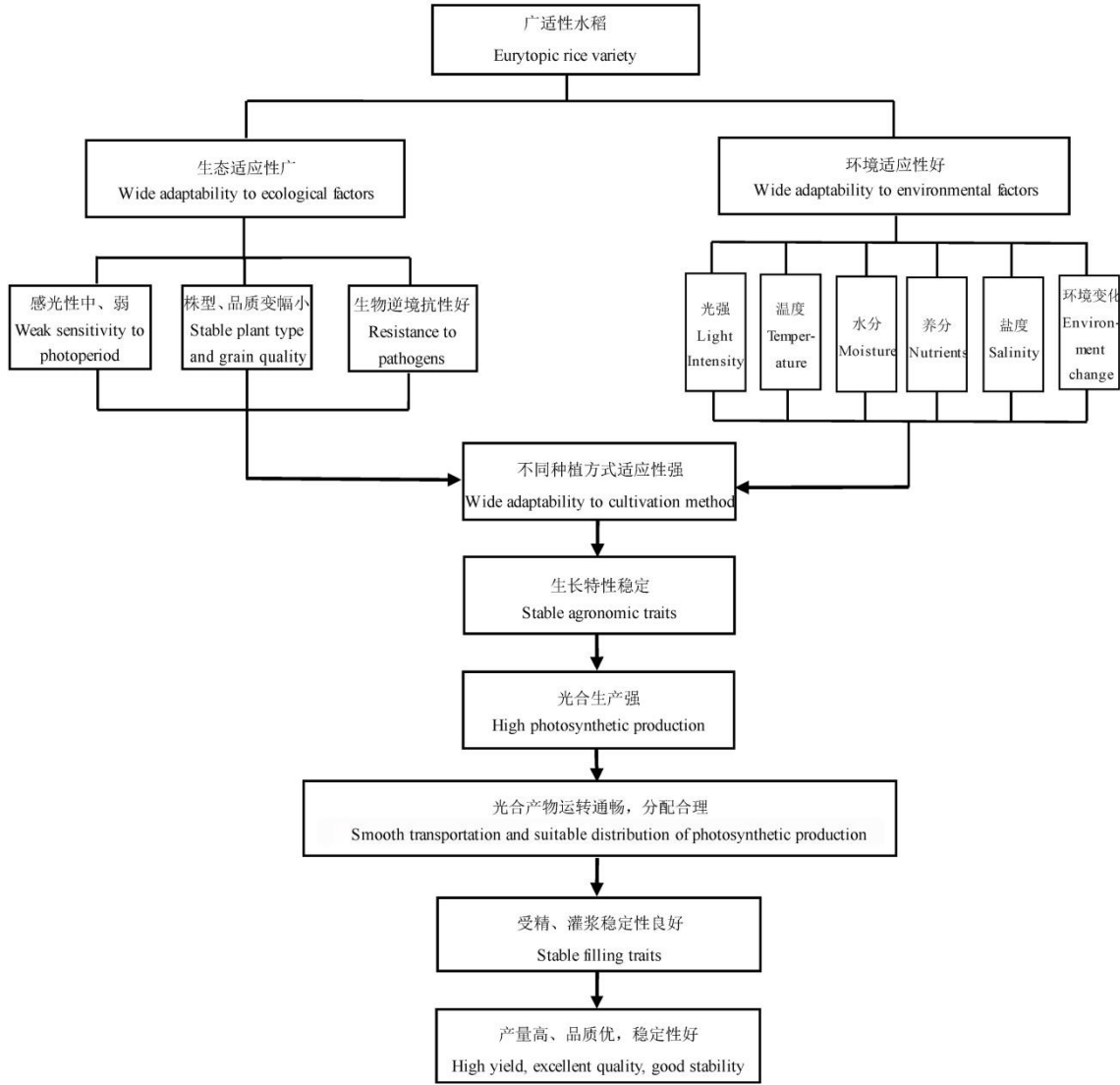


图 2 水稻广适性性状  
Fig. 2. Traits for rice eurytopy.

选择压力是选育广适性杂交稻的重要手段,对于高低温耐性、稻瘟病抗性等重要性状,要创造易于鉴定和选择的条件,可将低世代材料种植在抽穗期遇及高、低温的环境下以增大选择压力,提高中选材料对逆境的抵抗力;将低代材料间隔世代种植在稻瘟病重发区,至材料基本稳定后再分别种植于病圃和育种基地供抗性鉴定和农艺性状选择。

一个水稻品种欲大面积应用,需要评判其是否具有广泛的生态适应性和良好的环境适应性。在生态适应性方面,光温反应类型和抗病性等性状已有成熟的、广为认可的鉴定方法。在环境适应性方面,笔者认为,应主要鉴定光强(强光和弱光)适应范围、开花受精对极端高低温的敏感性、对肥料和水分丰缺的耐受性等。笔者曾提出耐强弱光能力、开花受精对高低温的敏感性、对肥料多寡的适应性、对水分丰缺的忍耐性、抗早衰能力等鉴定方法,并提出

从中筛选出若干指标组成一个指标体系,作为鉴定一定量复鉴组合或中高世代品系良好适应性(环境适应性)的生理指标体系,用于田间活体检测或简单的人工处理和实验室筛选<sup>[74]</sup>。

笔者课题组对此想法进行了初步尝试。孙志伟等<sup>[75]</sup>在人工光氧化、遮荫处理和大田自然光照条件下发现,可将抽穗期剑叶的 SPAD 值作为杂交稻对高、低光强适应性的大田无损筛选指标;李霞等<sup>[76]</sup>通过聚类分析将水稻耐旱表现型分为耐旱型、干旱敏感型和中等耐旱型 3 类,并通过研究发现,抽穗期烤田条件下叶片的  $F_v/F_m$  值可作为水稻水分胁迫的大田无损筛选指标;李霞等<sup>[77]</sup>在南京连续 3 年对共约 200 个杂交稻进行广适性筛选,利用单点(实验地)单年(季节)的条件,模拟光、温、水、肥试验,初步建立了通过一个季节、在主要生育期采用 5 种环境条件处理、多指标平行筛选的“环境适应性综

合鉴定方法”, 并初步提出水稻广适性指数= $x_1 \times$ 高光适应指数 $+x_2 \times$ 低光适应指数 $+x_3 \times$ 水分匮乏耐性指数 $+x_4 \times$ 高肥耐性指数 $+x_5 \times$ 抗旱衰指数 $\times$ 结实率( $x_i$ 为当地该逆境发生频率)。

### 3.3 水稻广适性相关基因的发掘和育种利用尚需加强

经过几十年努力, 中国在水稻生产上取得了历史性成就, 但是, 粮食尤其是稻谷产量仍需要持续提高, 特别是针对最近和未来的国际贸易争端, 中国更应提高水稻产量以确保粮食安全。中国科学家在挖掘水稻理想株型等高产和优质性状相关基因方面已取得重要进展, 处于国际领先地位<sup>[78-80]</sup>, 相比较而言, 广适性相关基因研究则尚需加强。近年来, 中国科学家用代表性杂交稻对产量杂种优势相关位点进行系统的定位和解析, 在两优培九及其亲本中发现了多个与高产相关的基因<sup>[81]</sup>, 也发现了高低温、干旱等多逆境相关基因<sup>[82-83]</sup>。此方面研究方兴未艾。利用具有广适性的超级杂交稻两优培九及其亲本作为研究材料, 深入挖掘、研究其广适性相关基因并进行育种利用, 将为进一步理解水稻广适性的内涵提供分子理论依据, 也可为广适性水稻品种的育种和改良提供基因资源。

### 参考文献:

- [1] 吕川根, 邹江石. 两系法杂交稻两优培九育种的理论与实践. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1635-1645.  
Lü C G, Zou J S. Theory and practice on breeding of two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Sci Agric Sin*, 2016, 49(9): 1635-1645. (in Chinese with English abstract)
- [2] 邹江石, 吕川根, 姚克敏, 胡凝. 两系杂交稻两优培九生物学特性及主要配套技术. 中国农业科技导报, 2008, 10(2): 43-50.  
Zou J S, Lü C G, Yao K M, Hu N. Biological characters and major matching techniques for two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *J Agric Sci Technol*, 2008, 10(2): 43-50. (in Chinese with English abstract)
- [3] 邹江石, 吕川根, 胡凝, 李义珍, 姚克敏. 两系杂交稻两优培九的生态适应性研究及其种植区域规划. 中国农业科学, 2008, 41(11): 3563-3572.  
Zou J S, Lü C G, Hu N, Li Y Z, Yao K M. Studies on ecological adaptability and suitable planting area of a two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Sci Agric Sin*, 2008, 41(11): 3563-3572. (in Chinese with English abstract)
- [4] 姚克敏, 邹江石, 买苗, 吕川根, 顾显跃. 两系法杂交水稻株高变化规律及其与气象条件的关系. 杂交水稻, 1999, 14(增刊): 49-51.  
Yao K M, Zou J S, Mai M, Lü C G, Gu X Y. Variation of plant height and its relation to climatic factors in two-line hybrid rice. *Hybrid Rice*, 1999, 14(Suppl): 49-51. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吕川根, 胡凝, 姚克敏, 夏士健, 漆庆明. 超高产杂交稻两优培九齐穗期株型的区域差异及对冠层结构的影响. 中国水稻科学, 2009, 23(5): 529-536.  
Lü C G, Hu N, Yao K M, Xia S J, Qi Q M. Plant type and its effects on canopy structure at heading stage in various ecological areas for a two-line hybrid rice combination, Liangyoupeijiu. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(5): 529-536. (in Chinese with English abstract)
- [6] 宗寿余, 吕川根, 赵凌, 王才林, 戴其根, 邹江石. 两系法亚种间杂交稻两优培九的高产生理基础初探. 南京农专学报, 2000, 16(3): 8-12.  
Zong S Y, Lü C G, Zhao L, Wang C L, Dai Q G, Zou J S. Physiological basis of high yield of an intersubspecific hybrid rice. *J Nanjing Agric Technol Coll*, 2000, 16(3): 8-12. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕川根, 宗寿余, 郑克武, 赵凌, 王才林, 邹江石. 超级杂交稻两优培九的群体生长分析. 江苏农业学报, 2003, 19(4): 198-204.  
Lü C G, Zong S Y, Zheng K W, Zhao L, Wang C L, Zou J S. Growth analysis for super hybrid rice Liangyoupeijiu. *Jiangsu J Agric Sci*, 2003, 19(4): 198-204. (in Chinese with English abstract)
- [8] Ibrahim M D, Peng S B, Tang Q Y, Huang M, Jiang P, Zou Y B. Comparisons of yield and growth behaviors of hybrid rice under different nitrogen management methods in tropical and subtropical environments. *J Integr Agric*, 2013, 12(4): 621-629.
- [9] 吕川根, 李霞, 陈国祥. 超级杂交稻两优培九高产的光合特性及其生理基础. 中国农业科学, 2017, 50(21): 4055-4070.  
Lü C G, Li X, Chen G X. Photosynthetic characteristics and its physiological basis of super high-yielding hybrid rice Liangyoupeijiu. *Sci Agric Sin*, 2017, 50(21): 4055-4070. (in Chinese with English abstract)
- [10] Katsura K, Maeda S, Lubis I, Horie T, Cao W X, Shiraiwa T. The high yield of irrigated rice in Yunnan, China 'A cross-location analysis'. *Field Crops Res*, 2008, 107: 1-11.
- [11] Wu W G, Zhang H C, Qian Y F, Cheng Y, Wu G C, Zai C Q, Dai Q G. Analysis on dry matter production characteristics of super hybrid rice. *Rice Sci*, 2008, 15(2): 110-118.
- [12] Katsura K, Maeda S, Horie T, Shiraiwa T. Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu, a hybrid rice recently bred in China. *Field Crops Res*, 2007, 103: 170-177.
- [13] Zhang Y, Tang Q Y, Zou Y B, Li D Q, Qin J Q, Yang S H, Chen L J, Xia B, Peng S B. Yield potential and radiation use efficiency of super hybrid rice grown under subtropical conditions. *Field Crops Res*, 2009, 114: 91-98.
- [14] 吕川根, 胡凝, 姚克敏, 邹江石. 两系杂交稻品种两优培九作物生长率的气候模型及分析. 中国农业科技导报, 2010, 12(4): 62-67.  
Lü C G, Hu N, Yao K M, Zou J S. Ecotype model analysis on crop growth rate of two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *J Agric Sci Technol*, 2010, 12(4): 62-67. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈炳松, 张云华, 李霞, 焦德茂. 超级杂交稻两优培九

- 生育后期的光合特性和同化产物的分配. 作物学报, 2002, 28(6): 777-782.
- Chen B S, Zhang Y H, Li X, Jiao D M. Photosynthetic characteristic and assimilate distribution in super hybrid rice Liangyoupeijiu at late growth stage. *Acta Agron Sin*, 2002, 28(6): 777-782. (in Chinese with English abstract)
- [16] 庄宝华, 张书标, 章清杞, 杨仁崔. 两系亚种间杂交稻两优培九产量形成的生理特性. 福建农林大学学报, 2003, 32(2): 137-141.
- Zhuang B H, Zhang S B, Zhang Q Q, Yang R C. Physiological characteristics of yield formation in Liangyoupeijiu, a two-line intersubspecific hybrid rice. *J Fujian Agric For Univ*, 2003, 32(2): 137-141. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭士伟, 夏士健, 朱虹霞, 张云华, 施卫明. 水稻根系活力测定方法及超级稻两优培九生育后期根系活力研究. 土壤, 2012, 44(2): 308-311.
- Guo S W, Xia S J, Zhu H X, Zhang Y H, Shi W M. Factors influencing collecting amount of rice roots bleeding and investigation on roots vigor after heading. *Soils*, 2012, 44(2): 308-311. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈晓飞. 水稻两优培九生育后期氮代谢和籽粒灌浆的生理机理研究. 福州: 福建农林大学, 2007.
- Chen X F. Study on the physiological mechanism of nitrogen metabolism and the grain filling of Liangyoupeijiu at the late development stage. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王志琴, 仇明, 桑大志, 杨建昌, 朱庆森. 两优培九结实期植株体内细胞分裂素与叶片衰老的关系. 扬州大学学报, 2003, 24(4): 54-57.
- Wang Z Q, Qiu M, Sang D Z, Yang J C, Zhu Q S. Cytokinin contents in plants and their relations with leaf senescence of Liangyoupeijiu during grain filling. *J Yangzhou Univ*, 2003, 24(4): 54-57. (in Chinese with English abstract)
- [20] 邹江石, 李义珍, 吕川根. 两系杂交稻两优培九产量构成及其生态关联. 杂交水稻, 2008, 23(6): 65-72.
- Zou J S, Li Y Z, Lü C G. Grain yield components and their relation to ecological conditions of two-line hybrid rice Liangyoupeijiu. *Hybrid Rice*, 2008, 23(6): 65-72.
- [21] 许轲, 杨海生, 张洪程, 龚金龙, 沈新平, 陶小军, 戴其根, 霍中洋, 魏海燕, 高辉. 江淮下游地区水稻品种生产力纬向差异及其合理利用. 作物学报, 2014, 40(5): 871-890.
- Xu K, Yang H S, Zhang H C, Gong J L, Shen X P, Tao X J, Dai Q G, Huo Z Y, Wei H Y, Gao H. Latitudinal difference of rice varieties productivity in the lower Yangtze and Huai Valleys and its rational utilization. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(5): 871-890. (in Chinese with English abstract)
- [22] Huang M, Zou Y B, Jiang P, Xia B, Ibrahim M D, Ao H J. Relationship between grain yield and yield components in super hybrid rice. *Agric Sci China*, 2011, 10(10): 1537-1544.
- [23] Jiang P, Xie X B, Huang M, Zhou X F, Zhang R C, Chen J N, Wu D, Xia B, Xiong H, Xu F X, Zou Y B. Potential yield increase of hybrid rice at five locations in southern China. *Rice*, 2016, 9: 11.
- [24] 赖波平, 谢国强, 李光明. 两优培九再生利用初探. 江西农业科技, 2002(1): 8-10.
- Lai B P, Xie G Q, Li G M. Preliminary study on the utilization for regeneration of Liangyoupeijiu. *Jiangxi Agric Sci Technol*, 2002(1): 8-10. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘逊忠, 何万福, 陈同聪, 黎国安, 陈军. 两优培九及其再生稻旱区高产栽培技术. 农业科技通讯, 2010(7): 133-134.
- Liu S Z, He W F, Chen T C, Li G A, Chen J. Introduction of Liangyoupeijiu and its high-yield cultivation techniques in arid land. *Agric Sci Technol Newsl*, 2010(7): 133-134. (in Chinese with English abstract)
- [26] 冯跃华, 邹应斌, Uresh R J B. 免耕移栽对两系杂交水稻两优培九若干群体特征的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(1): 65-70.
- Feng Y H, Zou Y B, Uresh R J B. Effects of no-tillage cultivation on some population characteristics of two-line hybrid rice Liangyoupeijiu. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(1): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- [27] 程兆伟, 邹应斌, 刘武, 莫亚丽, 蒋鹏, 詹可. 免耕栽培对超级杂交稻两优培九根系特性的影响. 作物研究, 2008, 22(4): 239-242.
- Cheng Z W, Zou Y B, Liu W, Mo Y L, Jiang P, Zhan K. Effects of no-tillage cultivation on the root system of super hybrid rice Liangyoupeijiu. *Crop Res*, 2008, 22(4): 239-242. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘立中, 陈再高, 刘建华. 两优培九直播栽培的表现及配套栽培技术. 安徽农业科学, 2003, 31(2): 250-251.
- Liu L Z, Chen Z G, Liu J H. Performance and supporting cultivation techniques of direct-seeding cultivation of Liangyoupeijiu. *J Anhui Agric Sci*, 2003, 31(2): 250-251. (in Chinese with English abstract)
- [29] 蔡晓华, 陈再高. 超级稻两优培九直播栽培表现及主要栽培技术. 安徽农学通报, 2006, 12(8): 98-99.
- Cai X H, Chen Z G. Direct seeding performance and main cultivation techniques of super rice Liangyoupeijiu. *Anhui Agric Sci Bull*, 2006, 12(8): 98-99. (in Chinese with English abstract)
- [30] Badshah M A, Tu N, Zou Y B, Ibrahim M, Wang K. Yield and tillering response of super hybrid rice Liangyoupeijiu to tillage and establishment methods. *Crop J*, 2014, 2: 79-86.
- [31] 周仁先. 两优培九机栽和人工栽插比较. 安徽农学通报, 2005, 11(1): 21.
- Zhou R X. Comparison of mechanical and artificial planting of Liangyoupeijiu. *Anhui Agric Sci Bull*, 2005, 11(1): 21. (in Chinese with English abstract)
- [32] 吕川根, 邹江石, 宗寿余, 张启军, 姚克敏. 两系杂交稻两优培九稻米品质性状的变异分析. 江苏农业学报, 2008, 24(6): 738-744.
- Lü C G, Zou J S, Zong S Y, Zhang Q J, Yao K M. Analysis of grain quality of a two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, 24(6): 738-744. (in Chinese with English abstract)
- [33] 宗寿余, 吕川根, 姚克敏. 两优培九稻米垩白率变异及

- 其与气象因子的关系. 江苏农业学报, 2008, 24(5): 569-572.
- Zong S Y, Lü C G, Yao K. Chalky grain rate variation and its relationship with meteorological factors for a two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, 24(5): 569-572. (in Chinese with English abstract)
- [34] 漆庆明, 张启军, 姚克敏, 夏士健, 吕川根. 两系超级稻两优培九稻米 RVA 谱的特点. 江苏农业科学, 2008(6): 25-28.
- Qi Q M, Zhang Q J, Yao K M, Xia S J, Lü C G. Characteristics of RVA spectrum of two-line super rice Liangyoupeijiu. *Jiangsu Agric Sci*, 2008(6): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- [35] 沈新平, 顾丽, 沈小燕, 龚丽萍, 张洪程. 两优培九稻米淀粉黏滞性(RVA 谱)的纬度地域和播期变化特征. 中国水稻科学, 2007, 21(1): 59-64
- Shen X P, Gu L, Shen X Y, Gong L P, Zhang H C. Variation of starch viscosity characteristics (RVA profile) of hybrid rice Liangyoupeijiu as affected by latitude and seeding time. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21(1): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- [36] 申建斌, 邹冬生, 陆魁东, 宋忠华, 刘云开. 播种期对超级杂交稻产量和米质影响的研究. 种子, 2005, 24(8): 77-79.
- Shen J B, Zou D S, Lu K D, Song Z H, Liu K Y. Study on the influence of sowing date on the yield and quality of super hybrid rice. *Seed*, 2005, 24(8): 77-79. (in Chinese)
- [37] 肖辉海, 郝小花, 王文龙, 王云, 李丽. 灌浆结实期高温对杂交稻两优培九籽粒形成生理的影响. 西北农业学报, 2012, 21(3): 71-76.
- Xiao H H, Hao X H, Wang W L, Wang Y, Li L. Effect of high temperature at grain filling stage on grain formation physiology of hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Acta Agric Bor-occid Sin*, 2012, 21(3): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800-806.
- Zhang H C, Wang X Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupeijiu. *Sci Agric Sin*, 2003, 36(7): 800-806. (in Chinese with English abstract)
- [39] 万靓军, 张洪程, 霍中洋, 孙政国, 林忠成, 钱银飞. 不同氮肥施用比例对两优培九产量及品质的影响. 扬州大学学报, 2005, 26(1): 69-72.
- Wan L J, Zhang H C, Huo Z Y, Sun Z G, Lin Z C, Qian Y F. The effect of different proportion of nitrogen application on yield and quality of rice Liangyoupeijiu. *J Yangzhou Univ*, 2005, 26(1): 69-72. (in Chinese with English abstract)
- [40] 陈双龙. 施氮量和喷施叶面肥对两优培九稻米品质的影响. 中国稻米, 2005(5): 39-40.
- Chen S L. Effects of nitrogen application rate and foliar fertilizer on the quality of Liangyoupeijiu rice. *Chinese Rice*, 2005(5): 39-40. (in Chinese with English abstract)
- [41] Wang Q, Huang J L, He F, Cui K H, Zeng J M, Nie L X, Peng S B. Head rice yield of super hybrid rice Liangyoupeijiu grown under different nitrogen rates. *Field Crops Res*, 2012, 134: 71-79.
- [42] 郎有忠, 杨晓东, 王美娥, 朱庆森. 结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及稻米品质的影响. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 407-412.
- Lang Y Z, Yang X D, Wang M E, Zhu Q S. Effects of lodging at different filling stages on rice grain yield and quality. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(4): 407-412. (in Chinese with English abstract)
- [43] 奉光平, 刘二明, 黄红梅, 吕建林, 燕玮婷, 白珍安, 毛莹, 张卓. 121 个水稻品种的抗瘟性鉴定. 杂交水稻, 2010, 25(3): 79-81.
- Feng G P, Liu E M, Huang H M, Lü J L, Yan W T, Bai Z A, Mao Y, Zhang Z. Identification of resistance of 121 rice varieties against *Magnaporthe grisea*. *Hybrid Rice*, 2010, 25(3): 79-81. (in Chinese with English abstract)
- [44] 张舒, 陈其志, 吕亮, 杨小林, 喻大昭. 自然诱发条件下湖北省水稻主栽品种对稻瘟病、纹枯病的抗性鉴定. 华中农业大学学报, 2006, 25(3): 236-240.
- Zhang S, Chen Q Z, Lü L, Yang X L, Yu D Z. Assessment of the variety resistance to *Pyricularia Grisea* and *Rhizoctonia Solani* induced under the natural condition in Hubei Province. *J Huazhong Agric Univ*, 2006, 25(3): 236-240. (in Chinese with English abstract)
- [45] 沈斌. 湖北稻瘟病菌生理小种和水稻抗瘟性的鉴定及生化机制研究. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- Shen B. Studies on Hubei *Magnaporthe Grisea* species identification and evaluation of rice blast resistance. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [46] 肖友伦, 郭新华, 易卫平, 朱艳, 徐志德, 李小娟, 肖放华. 湖南水稻主栽品种稻瘟病抗性的评价与利用. 湖南农业科学, 2010, (23): 106-108, 112.
- Xiao Y L, Guo X H, Yi W P, Zhu Y, Xu Z D, Li X J, Xiao F H. Evaluation and utilization of rice-blast resistance of rice leading varieties in Hunan. *Hunan Agric Sci*, 2010, (23): 106-108, 112. (in Chinese with English abstract)
- [47] 马辉刚, 曹九龙, 胡水秀, 黄瑞荣, 涂雪琴. 水稻品种对稻瘟病的抗性分析和利用评价. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 213-216.
- Ma H G, Cao J L, Hu S X, Huang R R, Tu X Q. Identification and evaluation of resistance of rice to *Magnaporthe grisea*. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2006, 28(2): 213-216. (in Chinese with English abstract)
- [48] 习先俨, 易金祥, 李文安, 石出高. 两优培九在萍乡的试种表现及高产栽培技术. 江西农业科技, 2001, (2): 15-16.
- Xi X Y, Yi J X, Li W A, Shi C G. The performance and high-yield cultivation techniques of Liangyoupeijiu in Pingxiang. *Jiangxi Agric Sci Technol*, 2001, (2): 15-16. (in Chinese with English abstract)
- [49] 杜宜新, 阮宏椿, 王茂明, 关瑞峰, 杨秀娟, 甘林, 陈福如. 福建省水稻主栽品种对稻瘟病的抗性评价. 中国农学通报, 2010, 26(7): 217-221.
- Du Y X, Ruan H C, Wang M M, Guan R F, Yang X J, Gan L, Chen F R. Resistance evaluation of leading rice varieties to rice blast disease in Fujian Province. *Chin*

- Agric Sci Bull* 2010, 26(7): 217-221. (in Chinese with English abstract)
- [50] 黄华康, 陈双龙. 优质两系杂交稻组合两优培九抗稻瘟病特性试验研究. 江西农业大学学报, 2004, 26(4): 503-506.  
Huang H K, Chen S L. Studies on resistance to rice blast of new good quality line of Liangyoupeijiu. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2004, 26(4): 503-506. (in Chinese with English abstract)
- [51] 吕川根, 王才林, 宗寿余, 赵凌, 邹江石. 温度对水稻亚种间杂种育性及结实率的影响. 作物学报, 2002, 28(4): 499-504.  
Lü C G, Wang C L, Zong S Y, Zhao L, Zou J S. Effects of temperature on fertility and seed set in intersubspecific hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2002, 28(4): 499-504. (in Chinese with English abstract)
- [52] 吕川根, 邹江石, 胡凝, 姚克敏. 亚种间杂交稻颖花受精率与温度的相关性及其模型分析. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1026-1032.  
Lü C G, Zou J S, Hu N, Yao K M. Correlation of intersubspecific hybrid rice spikelet fertilization rate with temperature and related statistic model. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(6): 1026-1032. (in Chinese with English abstract)
- [53] 隗溟, 王光明, 陈国惠, 朱自均, 杨朝进. 盛花期高温对两系杂交稻两优培九结实率的影响研究. 杂交水稻, 2002, 17(1): 51-53.  
Wei M, Wang G M, Chen G H, Zhu Z J, Yang Z J. Effect of high temperature at full flowering stage on seed setting percentage of two-line hybrid rice Liangyoupeijiu. *Hybrid Rice*, 2002, 17(1): 51-53. (in Chinese with English abstract)
- [54] 吕川根, 胡凝, 相国根, 姚克敏, 邹江石. 四个两系杂交水稻穗增重特性分析. 江苏农业学报, 2008, 24(4): 381-386.  
Lü C G, Hu N, Xiang G G, Yao K M, Zou J S. Analysis of panicle weight growing of four two-line hybrids of rice. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, 24(4): 381-386. (in Chinese with English abstract)
- [55] 吕川根, 宗寿余, 胡凝, 邹江石, 姚克敏, 唐卫亚. 两系杂交稻两优培九粒重因子的环境模型解析及生态特征分析. 作物学报, 2008, 34(12): 2202-2209.  
Lü C G, Zong S Y, Hu N, Zou J S, Yao K M, Tang W Y. Modeling with climatic factors and analysis on ecological characters for grain weight dissected factors of two-line hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(12): 2202-2209. (in Chinese with English abstract)
- [56] 薛艳凤, 郎有忠, 朱庆森, 杨建昌, 吕川根. 低温弱光与土壤水分亏缺对两优培九结实期叶绿素含量及谷粒的影响. 江苏农业学报, 2008, 24(6): 766-770.  
Xue Y F, Lang Y Z, Zhu Q S, Yang J C, Lü C G. Effects of low temperature and weak light and soil water deficits on chlorophyll content and grain of Liangyoupeijiu during grain-filling period. *Jiangsu J Agric Sci*, 2008, 24(6): 766-770. (in Chinese with English abstract)
- [57] 薛艳凤, 陆江锋, 吕川根, 金军, 邹江石, 朱庆森. 两系亚种间杂交稻两优培九籽粒灌浆动态研究. 江苏农业研究, 2001, 22(2): 13-19.  
Xue Y F, Lu J F, Lü C G, Jin J, Zou J S, Zhu Q S. Studies on the development of grain filling of two line hybrid rice Liangyoupeijiu. *Jiangsu Agric Res*, 2001, 22(2): 13-19. (in Chinese with English abstract)
- [58] 郑克武, 邹江石, 吕川根. 氮肥和栽插密度对杂交稻两优培九产量及氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2006, 32(6): 885-893.  
Zheng K W, Zou J S, Lü C G. Effects of transplanting density and nitrogen fertilizer on yield formation and N absorption in a two-line intersubspecific hybrid rice, Liangyoupeijiu. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(6): 885-893. (in Chinese with English abstract)
- [59] 吴爽, 王守海, 罗彦长, 王德正, 李成荃. 两系杂交中粳 65002 的栽培技术研究. 安徽农业科学, 1999, 27(1): 8-10.  
Wu S, Wang S H, Luo Y C, Wang D Z, Li C Q. Studies on cultural practice for two-line medium indica hybrid rice combination, 65002. *J Anhui Agric Sci*, 1999, 27(1): 8-10. (in Chinese with English abstract)
- [60] 据为民, 江兴明, 刘劲松, 何爱清, 董胜桃, 姚何生, 金四九. 两优培九直播密度与施氮量试验. 安徽农业科学, 2002, 30(1): 22-23.  
Ju W M, Jiang X M, Liu J S, He A Q, Dong S T, Yao H S, Jin S J. The experiment in the relation between the planting density of hybrid rice, Liangyoupeijiu and the amount of N-fertilizer application. *J Anhui Agric Sci*, 2002, 30(1): 22-23. (in Chinese with English abstract)
- [61] Huang M, Jiang P, Shan S L, Gao W, Ma G H, Zou Y B, Uphoff N, Yuan L P. Higher yields of hybrid rice do not depend on nitrogen fertilization under moderate to high soil fertility conditions. *Rice*, 2017, 10: 43.
- [62] Huang J L, He F N, Cui K H, Buresh R J, Xu B, Gong W H, Peng S B. Determination of optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. *Field Crops Res*, 2008, 105: 70-80.
- [63] 阮松林, 薛庆中. 盐胁迫条件下杂交水稻种子发芽特性和幼苗耐盐生理基础. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 281-284.  
Ruan S L, Xue Q Z. Germination characteristics of seeds under salt stress and physiological basis of salt-tolerance of seedlings in hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2002, 16(3): 281-284. (in Chinese with English abstract)
- [64] 潘晓毗, 谢留杰, 陈剑, 黄善军, 徐建龙. 盐胁迫下杂交水稻种子发芽特性及耐盐性评价. 中国农学通报, 2014, 30(21): 75-79.  
Pan X B, Xie L J, Chen J, Huang S J, Xu J L. Germination characteristics of hybrid rice seeds under salt stress and their evaluation of salt-tolerance. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(21): 75-79. (in Chinese with English abstract)
- [65] 刘少华, 王仁雷, 刘青, 徐国华. NaCl 预处理对高盐胁迫下两系杂交稻幼苗生长的影响. 河南农业大学学报, 2013, 47(2): 128-131, 137.  
Liu S H, Wang R L, Liu Q, Xu G H. Effect of pretreatment with NaCl on the seedling growth of super-hybrid rice under high salt stress. *J Henan Agric Univ*, 2013, 47(2): 128-131, 137. (in Chinese with English abstract)

- [66] 雷华, 陈国祥, 褚必海, 周斌伟. NaCl 胁迫对两优培九幼苗离子含量的影响. 作物杂志, 2007(3): 63-66.  
Lei H, Chen G X, Chu B H, Zhou B W. Effect of NaCl stress on ion content of Liangyoupeijiu seedlings. *Crops*, 2007(3): 63-66. (in Chinese with English abstract)
- [67] 吕金海, 张志程, 莫小华. 两优培九和 II 优 838 抗盐性比较分析. 现代农业科技, 2007(8): 66-67.  
Lü J H, Zhang Z C, Mo X H. Comparative analysis of salt tolerance of Liangyoupeijiu and Ilyou 838. *Modern Agric Sci Technol*, 2007(8): 66-67. (in Chinese with English abstract)
- [68] 刘少华, 谢鹏飞, 徐国华, 王仁雷. 根际 pH 值对高产杂交稻幼苗根系生长特性的影响. 江苏农业科学, 2013, 41(1): 70-72.  
Liu S H, Xie P F, Xu G H, Wang R L. Effects of rhizosphere pH on root growth characteristics of high-yielding hybrid rice seedlings. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(1): 70-72. (in Chinese with English abstract)
- [69] 吕川根, 宗寿余, 赵凌, 王才林, 邹江石. 两系法亚种间杂交稻两优培九结实率与源、库的关系. 江苏农业学报, 2000, 16(4): 193-196.  
Lü C G, Zong S Y, Zhao L, Wang C L, Zou J S. Relationship between seed setting rate and source-sink of a two-line intersubspecific hybrid Liangyoupeijiu. *J Agric Sci*, 2000, 16(4): 193-196. (in Chinese with English abstract)
- [70] 罗军, 杨忠义, 卢义宣, 刘光荣, 黄迪威. 广适性水稻品系的鉴定与研究. 云南农业科技, 1989(2): 3-7.  
Luo J, Yang Z Y, Lu Y X, Liu G R, Huang D W. Identification and research of wide adaptable rice lines. *Yunnan Agric Sci Technol*, 1989(2): 3-7. (in Chinese with English abstract)
- [71] 陈立云, 唐文帮, 肖应辉, 刘国华, 邓化冰. 广适性超高产杂交水稻选育的新成就与体会//第 1 届中国杂交水稻大会论文集. 长沙: 2010: 54-58.  
Chen L Y, Tang W B, Xiao Y H, Liu G H, Deng H B. Accomplishments and experiences in breeding widely adaptable super high-yielding hybrid rice//Proceedings the 1st China Hybrid Rice Conference. Changsha: 2010: 54-58. (in Chinese with English abstract)
- [72] 孙道杰, 王辉, 闵东红, 李学军, 冯毅. 广适性小麦品种的重要性状指标. 中国农学通报, 2002, 18(6): 83-85.  
Sun D J, Wang H, Min D H, Li X J, Feng Y. The important characteristic index to widely adaptation of wheat cultivars. *Chin Agric Sci Bull*, 2002, 18(6): 83-85. (in Chinese with English abstract)
- [73] 李兴茂, 倪胜利. 不同水分条件下广适性小麦品种中麦 175 的农艺和生理特性解析. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4374-4380.  
Li X M, Ni S L. Agronomic and physiological characterization of the wide adaptable wheat cultivar Zhongmai 175 under two different irrigation conditions. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(21): 4374-4380. (in Chinese with English abstract)
- [74] 吕川根, 姚克敏, 李霞, 胡凝, 邹江石. 两系法亚种间杂交稻育种的若干思考. 中国农业科技导报, 2007, 9(2): 38-43.  
Lü C G, Yao K M, Li X, Hu N, Zou J S. Thought on two-line intersubspecific hybrid rice breeding. *Rev China Agric Sci Technol*, 2007, 9(2): 38-43. (in Chinese with English abstract)
- [75] 孙志伟, 李霞, 吕川根. 大田条件下杂交稻光强广适应性的无损筛选. 江苏农业科学, 2009(5): 77-80.  
Sun Z W, Li X, Lü C G. Non-destructive screening of hybrid rice for light intensity and adaptability under field conditions. *Jiangsu Agric Sci*, 2009(5): 77-80. (in Chinese with English abstract)
- [76] 李霞, 孙志伟, 吕川根, 任承刚, 曹昆, 王超. 田间杂交水稻单年单点 5 种不同逆境的批量筛选及聚类分析. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 528-534.  
Li X, Sun Z W, Lü C G, Ren C G, Cao K, Wang C. Mass screening and cluster analysis for tolerance to stress of hybrid rice variety under field conditions. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18(3): 528-534. (in Chinese with English abstract)
- [77] 李霞, 孙志伟, 黄蓉美, 阎丽娜, 吕川根. 杂交水稻组合在不同生育时期对水分胁迫的响应及聚类分析. 江苏农业学报, 2010, 26(2): 225-231.  
Li X, Sun Z W, Huang R M, Yan L N, Lü C G. Response to water deficit at different growth stages of hybrid rice crosses and their cluster analysis. *Jiangsu J Agric Sci*, 2010, 26(2): 225-231. (in Chinese with English abstract)
- [78] Qian Q, Guo L B, Smith S M, Li J Y. Breeding high-yield superior quality hybrid super rice by rational design. *Natl Sci Rev*, 2016, 3: 283-294.
- [79] Wang B, Smith S M, Li J Y. Genetic regulation of shoot architecture. *Ann Rev Plant Biol*, 2018, 69: 25.1-25.32.
- [80] 刘贵富, 陈明江, 李明, 吕慧颖, 葛毅强, 魏珣, 杨维才. 水稻育种行业创新进展. 植物遗传资源学报, 2018, 19(3): 416-429. (in Chinese with English abstract)  
Liu G F, Chen M J, Li M, Lü H Y, Ge Y J, Wei X, Yang W C. Advance and innovation of rice breeding. *J Plant Gen Res*, 2018, 19(3): 416-429.
- [81] Huang X, Yang S, Gong J, Zhao Q, Feng Q, Zhan Q, Zhao Y, Li W, Cheng B, Xia J, Chen N, Huang T, Zhang L, Fan D, Chen J, Zhou C, Lu Y, Weng Q, Han B. Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice. *Nature*, 2016, 537: 629-633.
- [82] 王曼玲, Rocha P, 李落叶, 徐孟亮, 夏新界. 水稻多逆境诱导基因 *OsMsr4* 的克隆与表达分析. 生物技术通报, 2009(7): 68-75.  
Wang M L, Rocha P, Li L Y, Xu M L, Xia X J. Cloning and analysis of *OsMsr4* gene concerning multiple-stress in rice. *Biotechnol Bull*, 2009(7): 68-75. (in Chinese with English abstract)
- [83] 卢学丹, 宋书锋, 李落叶, 王曼玲, 夏新界. 水稻多逆境响应新基因 *OsMsr9* 的表达与克隆. 农业现代化研究, 2010, 31(2): 228-232.  
Lu X D, Song S F, Li L Y, Wang M L, Xia X J. Expression and cloning of a novel stress-responsive gene *OsMsr 9* in rice. *Res Agric Modern*, 2010, 31(2): 228-232. (in Chinese with English abstract)