

王洪飞, 仇秀丽, 王乃元, 等. 新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状的相关性分析 [J]. 福建农业学报, 2012, 27 (4): 319-323.
WANG H-F, QIU X-L, WANG N-Y, et al. Correlations Among Yield-related Traits of CMS-FA Hybrid Rice [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27 (4): 319-323.

新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状的相关性分析

王洪飞^{1,2}, 仇秀丽^{1,2}, 王乃元¹, 李毓¹, 梁康进¹

(1. 福建农林大学作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室, 福建 福州 350002;

2. 福建省农业科学院水稻研究所, 福建 福州 350018)

摘要: 以新质源 (CMS-FA) 杂交稻遗传系统的 5 个不育系和 5 个恢复系进行不完全双列杂交, 采用加性—显性遗传模型和 MINQUE (1) 法, 对新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状进行多种相关分析。结果表明, 新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状间的相关性为: 株高与结实率, 剑叶长与生育期、结实率, 生育期与每穗实粒数, 结实率与千粒重, 千粒重与单株产量等性状之间的遗传相关以基因的加性正相关为主; 单株穗数与株高、剑叶长、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率, 千粒重与每穗总粒数等性状之间的遗传相关以基因的加性负相关为主。株高与穗长、剑叶长、每穗总粒数、千粒重, 穗长与每穗总粒数、每穗实粒数、单株产量等性状之间具有显著或极显著的显性相关。利用加性相关为主的性状进行间接选择可取得较好的育种效果。

关键词: 杂交稻; 新质源 (CMS-FA); 加性相关; 显性相关; 产量相关性状

中图分类号: S 511.03

文献标识码: A

Correlations Among Yield-related Traits of CMS-FA Hybrid Rice

WANG Hong-fei^{1,2}, QIU Xiu-li^{1,2}, WANG Nai-yuan¹, LI Yu¹, LIANG Kang-jing¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crops, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Rice Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350018, China)

Abstract: Using 5 CMS-FA sterile lines as female parents and 5 corresponding restorers as male parents, 25 crosses were bred with the incomplete diallel cross design for the experiment. Their parents and F₁ generations were planted to generate data on the yield-related traits. By the additive-dominant model and MINQUE (1) method, the genetic correlations among 10 yield-related traits of CMS-FA hybrid rice were analyzed. The results showed significant correlations among the traits. The genetic correlations between the plant height (PH) and seed-set percent (SSP), between the flag-leaf length (FLL) and growth duration (GD) or SSP, between GD and filled grain number per panicle (FGNPP), between SSP and 1000-grain-weight (TGW), and between TGW and yield per plant (YPP) were basically positive and additive. Those between the panicle number per plant (PNPP) and PH, between FLL, total grain number per plant (TGNPP), FGNPP, SSP, and between TGW and TGNPP were mainly negative and additive. There were also significant or very significant positive dominance correlations between traits of PH and panicle length (PL), between FLL, TGNPP, TGW, PL and TGNPP, FGNPP, YPP. Consequently, in breeding, it would be advisable to choose the traits that showed high additive correlations.

Key words: hybrid rice; new cytoplasmic resource (CMS-FA); additive correlation; dominance correlation; yield-related trait

收稿日期: 2012-03-05 初稿; 2012-04-08 修改稿

作者简介: 王洪飞 (1978—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 水稻遗传育种 (E-mail: whf6502108@126.com)

通讯作者: 王乃元 (1952—), 男, 研究员, 研究方向: 水稻遗传育种和杂种优势利用 (E-mail: wangny@sina.com)

梁康进 (1954—), 男, 研究员, 研究方向: 水稻杂种优势利用与遗传生态学 (E-mail: liangkj_2005@126.com)

基金项目: 国家“863”计划项目 (2007AA10Z181); 福建省科技计划项目 (F2007AA10Z181); 福建省农业科技重点项目 (2006N0006); 福建省科技重大专项 (2008NZ0001); 福建省自然科学基金项目 (2006J0060); 福建省发改委农业五新项目 (闽发改农业〔2010〕452号); 福建省农业科学院青年科技人才创新基金项目 (2009QC-10)

杂交稻的选育成功并在生产上推广应用,为保障我国乃至世界粮食安全做出了突出的贡献。现阶段,深入开展水稻雄性不育的探索研究,发掘和利用新质源杂交稻将是我国杂交稻育种取得突破性进展和增加杂交稻胞质遗传多样性以适应我国水稻生产迫切需要的重要途径之一。为实现杂交稻育种新的突破,进一步提升杂交稻综合水平和育种潜力,王乃元等从普通野生稻中发掘获得 1 种核质互作雄性不育的新材料,与野败型 (CMS-WA) 和红莲型 (CMS-HL) 的恢保关系不同,其细胞质育性基因和细胞核育性基因均与 CMS-WA 和 CMS-HL 型相互不等位,是一种新型的雄性不育细胞质源,称为福建野生稻新型雄性不育细胞质源,简称新质源 CMS-FA^[1],在此基础上,创建了水稻新质源 (CMS-FA) 三系遗传系统^[1-5]。

水稻产量相关性状的遗传表现受基因连锁或基因互作的影响,它们之间往往有着不同程度的相关性。在水稻这些性状的改良过程中,若对某一项性状进行间接选择通常会引起该性状及与之相关性状的变化^[6-8]。为进一步阐明水稻性状间的相互关系,取得更好的育种效果,有必要对水稻性状间的相关性进行研究。以往对水稻产量相关性状之间关系的研究^[9-13],主要是采用以传统的方差和协方差分析方法为基础的表型相关进行分析,或是将表型相关进一步区分为遗传相关和环境相关两部分,但难以揭示性状间更为复杂的相互关系。近年来,朱军发展了基于混合线性模型的一系列遗传模型及其统计分析方法^[14-16],其中的加性-显性遗传模型 (AD 模型) 可以直接估算成对性状间的各项遗传效应的相关系数,能够分析性状间更为复杂的相互关系,并能分析有不规则缺失的试验数据或是特殊的缺区试验^[17]。本研究旨在利用加性-显性遗传模型 (AD 模型) 和统计分析方法研究新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状之间的关系,明确加性相关和显性相关在性状间的作用,为新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状的间接选择和遗传改良提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料共 35 个,即新质源 (CMS-FA) 不育系 5 个:金农 1A、金农 2A、金农 3A、金农 4A 和金农 5A,新质源 (CMS-FA) 恢复系 5 个:金恢 1 号、金恢 2 号、金恢 3 号、金恢 4 号和金恢 5 号,杂交组合 (F_1) 25 个:由 5 个新质源 (CMS-

FA) 不育系和 5 个新质源 (CMS-FA) 恢复系按 5 \times 5 的不完全双列杂交方式手工杂交配制。试验材料均由福建农林大学新质源 (CMS-FA) 杂交稻育种技术研究课题组提供。

1.2 试验方法

2007 年晚季在福建农林大学教学科研基地 (沙县) 试验田种植亲本 (不育系由同型保持系替代) 和 F_1 ,试验地前茬为水稻,冬季和春季空闲,肥力中等偏上,地力均匀,施肥和管理参照当地中上水平实施。随机区组设计,3 次重复。6 月 3 日播种,6 月 27 日插秧,各小区均种植 36 株,每区 3 行,每行 12 株,株、行距均为 20 cm,单本栽插。试验区四周设置保护行,围 60 cm 高的薄膜墙防鼠害。水稻成熟后,每个小区取中间 10 株样本,考查亲本和 F_1 的株高、穗长、剑叶长、单株有效穗数、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重以及单株产量,并计算生育期。所有数据在 2007 年 9~12 月正常气候条件下采集考查。

1.3 统计分析方法

数据分析参照数量性状的加性-显性遗传模型 (AD 模型) 和统计分析方法^[14-16] 进行,用 MINQUE (1) 法和 Jackknife 数值抽样方法估算出新质源 (CMS-FA) 杂交稻成对性状间各遗传效应的协方差及其标准误,再根据协方差分量 [表型协方差 $C_P(X, Y)$ 、遗传协方差 $C_G(X, Y)$ 、加性协方差 $C_A(X, Y)$ 、显性协方差 $C_D(X, Y)$],估算性状间的表现型相关 (r_P)、基因型相关 (r_G)、加性相关 (r_A) 和显性相关 (r_D) 系数,对各遗传参数采用 t 测验 (自由度=2) 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 亲本和 F_1 产量相关性状的平均表型值分析

表 1 列出了新质源 (CMS-FA) 杂交稻亲本和 F_1 产量相关性状的平均表型值和变异系数。比较亲本和 F_1 产量相关性状的平均表型值可以看出, F_1 的平均株高、穗长、剑叶长、每穗总粒数、每穗实粒数、千粒重以及单株产量高于亲本,而单株穗数、结实率和生育期略低于亲本,表明新质源 (CMS-FA) 杂交稻具有普遍的杂种优势。从变异系数来看,除剑叶长外,亲本其他 9 个性状的变异系数均大于 F_1 ,表明在这些性状上亲本的变程度大,这有利于新质源 (CMS-FA) 杂交稻较优组合的筛选。

表1 亲本和F₁产量相关性状的平均值和变异系数Table 1 Mean and variance coefficient of yield-related traits of parents and F₁ generations

性状	亲本		组合	
	平均值	变异系数	平均值	变异系数
株高/cm	113.3	7.17	121.2	5.32
穗长/cm	21.5	5.21	22.8	3.74
剑叶长/cm	28.3	1.67	29.5	6.79
生育期/d	117.7	6.16	115.5	5.99
单株穗数	12.5	20.85	12.4	11.39
穗总粒数	104.4	19.33	115.0	13.31
穗实粒数	85.7	17.93	93.8	14.07
结实率/%	82.6	11.78	82.0	9.76
千粒重/g	26.9	17.28	27.5	9.37
单株产量/g	26.5	15.26	30.7	10.47

2.2 各产量相关性状的相关性分析

在水稻产量相关性状选育改良的过程中,对某些遗传率低的性状,可以通过与该性状具有明显加性相关性而且遗传率高的另一性状进行间接选择^[6-7],以提高产量相关性状的遗传改良效果。新质源(CMS-FA)杂交稻产量相关性状的表现型、基因型、加性和显性相关系数估算值列于表2。

从表2性状间的表现型相关和基因型相关系数可以看出,它们不仅方向基本相同,而且数值大小也非常接近,从表现型相关程度即可推测其相应的基因型相关。在研究的10个性状中,绝大多数成对性状间的表现型相关和基因型相关正值或负值均已达到显著或极显著水平,表明新质源(CMS-FA)杂交稻产量相关性状间存在明显的相关性。进一步分析表明,株高与穗长、剑叶长、生育期、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重、单株产量,穗长与剑叶长、每穗总粒数、每穗实粒数、单株产量,剑叶长与生育期、结实率、千粒重、单株产量,每穗总粒数与每穗实粒数、单株产量,每穗实粒数与结实率、单株产量,结实率与千粒重以及千粒重与单株产量间的表现型相关和基因型相关均为正值且已达到显著或极显著水平,而单株穗数与株高、剑叶长、生育期、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重,每穗总粒数与结实率、千粒重间的表型相关和基因型相关均为负值,基本达到90%或以上的显著性水平,这一结果表明,根据这些性状之间的相关性,对前一性状进行选择会明显影响后一性状的遗传表现。

表2 产量相关性状间的表现型、基因型、加性和显性相关系数

Table 2 Phenotypic genetic additive and dominance correlation coefficients of yield-related traits of CMS-FA hybrid rice

性状	株高	穗长	剑叶长	生育期	单株穗数	穗总粒数	穗实粒数	结实率	千粒重	单株产量
株高	0.175	-0.012	0.707**	-0.761**	0.121	0.315*	0.388**	0.148	-0.429*	
	0.662**	0.686*	0.225+	-0.333	0.519*	0.751*	0.245	0.441*	0.642*	
穗长	0.422**		0.340+	0.234+	-0.151	0.262	0.226	0.057	-0.217*	-0.047
	0.445**		0.593+	-0.240	-0.177	0.811**	0.610**	-0.279	0.556*	0.681*
剑叶长	0.263**	0.417*		0.427*	-0.619*	-0.109	-0.039	0.150**	0.649**	0.661*
	0.275**	0.437*		0.230	0.055	0.389**	0.596**	0.199	0.522*	0.643+
生育期	0.495**	0.064	0.339*		-0.775**	0.283*	0.437**	0.274*	0.401**	0.516
	0.510**	0.068	0.376*		-0.253**	-0.439**	0.208	0.789**	0.165*	-0.024
单株穗数	-0.464**	-0.183+	-0.309*	-0.532**		-0.374*	-0.635*	-0.507+	-0.705*	-1.000
	-0.557**	-0.161	-0.376*	-0.615**		-0.132	-0.321	-0.168	-0.229*	0.243
穗总粒数	0.281**	0.504**	0.118	0.109**	-0.284**		0.846**	-0.237	-0.293**	0.346*
	0.281**	0.488**	0.048	0.120**	-0.286**		0.643**	-0.449	0.205	0.663+
穗实粒数	0.447**	0.386**	0.193+	0.355**	-0.467*	0.779**		0.317	-0.152*	0.619+
	0.485**	0.382*	0.161	0.379**	-0.521*	0.782**		0.382	0.110	0.710*
结实率	0.285*	-0.137*	0.117*	0.370**	-0.276+	-0.319*	0.338*		0.259+	0.538
	0.317*	-0.117+	0.167*	0.394**	-0.362+	-0.315*	0.338*		-0.126	0.080
千粒重	0.175*	-0.010	0.517**	0.367**	-0.499*	-0.188*	-0.098	0.150*		1.000*
	0.175*	-0.010	0.517**	0.367**	-0.499*	-0.188*	-0.098	0.150*		1.000*
单株产量	0.270*	0.358*	0.410*	0.114	-0.021	0.369**	0.503*	0.230	0.322*	
	0.339**	0.479*	0.527*	0.153	-0.274*	0.447**	0.548*	0.186	0.408*	

注:下三角上行和下行数字分别为表现型相关和基因型相关系数,上三角上行和下行数字分别为加性相关和显性相关系数;+、*和**分别表示在0.10、0.05和0.01水平上的显著性。

加性相关和显性相关分析表明, 株高与生育期、每穗实粒数, 剑叶长与千粒重、单株产量, 生育期与结实率、千粒重, 每穗总粒数与每穗实粒数、单株产量, 每穗实粒数与单株产量, 单株穗数与千粒重、生育期间的加性相关和显性相关正值或负值均已达到了 10% 或 5% 或 1% 的显著水平, 因此利用它们的这种性状间的相关性进行间接选择是有效果的, 但由于显著的基因显性相关效应的存在, 会对间接选择的效果产生显著影响。而株高与结实率, 剑叶长与生育期、结实率, 生育期与每穗实粒数, 结实率与千粒重, 千粒重与单株产量, 单株穗数与株高、剑叶长、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率, 千粒重与每穗总粒数间的显性相关不显著, 其加性相关正值或负值, 均达到了 10% 或 5% 或 1% 的显著性水平, 说明这些性状间的遗传相关以基因的加性相关为主。因为在性状选择的过程中, 基因的加性相关部分可以累加, 并且可以稳定遗传^[6-7], 根据这些性状的遗传表现, 在杂种早期世代进行间接选择即可获得较好的效果。

进一步分析发现, 株高与穗长、剑叶长、每穗总粒数、千粒重, 穗长与每穗总粒数、每穗实粒数、单株产量间的加性相关均不显著, 但存在显著或极显著的显性相关, 说明这些性状间的遗传相关以基因的显性相关为主, 表明它们之间在杂种优势的表现上存在显著的相关, 有利于通过杂种优势进行杂种后代性状的选择, 在选配新质源 (CMS-FA) 杂交稻组合时可以考虑加以利用。但对这些性状进行间接选择, 如果想获得较好的效果必须在较高世代进行为宜。虽然剑叶长与每穗总粒数、每穗实粒数间存在极显著的显性相关, 但因其相关值与加性相关值正负相反, 致使表现型相关、基因型相关也不显著, 因此对这 3 个性状进行间接选择效果不好。

从表 2 还可以看出, 虽然穗长与千粒重, 千粒重与每穗实粒数之间的表现型相关和基因型相关不显著, 但这 2 对性状间的加性相关均达到了显著性水平, 只是因为其加性相关和显性相关的系数值符号相反, 才导致表现型相关和基因型相关不显著。在低世代选择穗长较短的单株可以显著提高千粒重, 进而减少每穗实粒数。不过, 由于穗长与千粒重之间存在显著的基因显性相关, 会对选择结果产生较大的影响。此外, 单株产量与株高, 每穗总粒数与生育期间的 4 种类型的相关均达到显著或极显著水平, 但加性相关和显性相关的表现方向相反, 若对这些性状进行间接选择仍然有一定的效果。

综合上述分析, 新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状之间存在着相当复杂的关系, 形成了一个相互作用的网状结构, 共同作用于产量的形成。因此, 优化各个产量因素之间的关系, 对最大限度提高产量有重要意义。

3 讨 论

历经 20 年的尝试和探索, 福建农林大学新质源 (CMS-FA) 杂交稻育种技术研究课题组成功地研究开发了一种新型细胞质源 (CMS-FA) 杂交稻^[1-5], 对增加和丰富我国水稻籼型三系不育系胞质类型的遗传多样性, 提高杂交稻育种潜力具有重要的推动作用。另外, 研究和查明新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状之间的遗传相关性, 明确性状之间更为复杂的相互关系, 对实施几个目标性状的同步改良或间接选择至关重要。本研究选用新质源 (CMS-FA) 杂交稻遗传系统的 5 个不育系和 5 个恢复系为研究材料, 利用最新发展的数量性状加性-显性遗传模型 (AD 模型) 和统计分析方法^[14-16], 直接估算新质源 (CMS-FA) 杂交稻成对性状间的各项遗传效应的相关系数, 明确各产量相关性状之间的相互关系, 为今后新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状选择育种和改良目标的制订提供参考。

杂交稻的产量相关性状之间往往存在着不同程度的相关性^[6-8]。在水稻这些性状的改良过程中, 若对某一项性状进行间接选择通常会引起其他相关性状的变化。因此, 在杂交稻育种和遗传改良过程中对某些性状的选择必须注意到产量相关性状彼此之间的相关性。以往对水稻产量相关性状之间关系的研究^[9-13], 主要是采用传统的方差和协方差分析方法为基础的表型相关进行分析, 现已与水稻育种实际不相适宜。近年来, 利用最新发展的加性-显性遗传模型 (AD) 和统计分析方法, 石春海等^[6]研究发现粒形性状间的遗传相关以加性相关为主, 产量性状间的相关性除有效穗性状外, 其他产量性状间均以加性正相关为主, 显著显性正相关也存在多数性状间。代余军等^[8]分析发现性状之间的遗传相关大多归因于基因的显性效应; 林强等^[18-19]分别对籼型三系杂交早稻粒形与产量性状、籼稻茎叶与产量性状进行了加性相关和显性相关分析, 这些结果为杂交稻选择育种和遗传改良提供了一定的理论依据。

本研究利用加性-显性遗传模型 (AD) 将新质源 (CMS-FA) 杂交稻产量相关性状间的遗传相关

分解成加性和显性2种相关分量，初步揭示了新质源（CMS-FA）杂交稻成对性状间复杂的相互关系，对新质源（CMS-FA）杂交稻产量相关性状的间接选择和遗传改良有重要的意义。新质源（CMS-FA）杂交稻系统是1个新发掘的与野败型（CMS-MA）和红莲型（CMS-HL）恢保关系及育性基因均不同的材料系统，仍属于三系杂交稻应用范畴，因此，对于生产上大面积应用的野败型（CMS-MA）和红莲型（CMS-HL）等胞质类型杂交稻产量相关性状的间接选择和遗传改良，本研究结果同样可以供其参考和借鉴。

参考文献：

- [1] 王乃元. 野生稻(*O. rufipogon*)新胞质改良不育系稻米品质的研究[J]. 作物学报, 2006, 32 (2): 253—259.
- [2] 王乃元. 野生稻(*O. rufipogon*)雄性不育恢复系的研究[J]. 作物学报, 2006, 32 (12): 1884—1891.
- [3] 王乃元, 梁康逢, 李毓, 等. 新质源（CMS-FA）杂交稻系统的亲本资源筛选[J]. 作物学报, 2008, 34 (9): 1549—1556.
- [4] 王乃元, 梁康逢, 李毓, 等. 水稻新质源（CMS-FA）雄性不育恢复基因的遗传[J]. 作物学报, 2008, 34 (11): 1929—1937.
- [5] 王洪飞, 王乃元, 李毓, 等. 新质源（CMS-FA）杂交稻产量相关性状的遗传效应与杂种优势分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (2): 230—239.
- [6] 石春海, 申宗坦. 粳稻粒形及产量性状的加性相关与显性相关分析[J]. 作物学报, 1996, 22 (1): 36—42.
- [7] 石春海, 朱军. 粳稻稻米外观品质与其它品质性状的相关性分析[J]. 浙江农业大学学报, 1994, 20 (6): 606—610.
- [8] 代余军, 陈建国, 周勇, 等. 粳稻杂交稻主要农艺性状之间的遗传相关分析[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 1999, 21 (1): 93—95.
- [9] 蒋开锋, 郑家奎, 文宏灿. 杂交早稻主要性状分析及高产育种探索[J]. 四川农业大学学报, 1996, 14 (2): 162—166.
- [10] 张海峰. 优质早籼稻产量性状分析及育种策略探讨[J]. 分子植物育种, 2005, 3 (6): 853—856.
- [11] 邓辉明, 邹小云, 宋宇. 两系杂交水稻产量性状的相关及通径分析[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27 (1): 68—71.
- [12] 谭酬志, 邹小云, 熊春梅, 等. 粳型三系杂交水稻产量性状的相关及通径分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (29): 12629—12631.
- [13] 刘伟明. 粳粳亚种间杂交水稻产量性状与产量的相关、回归及通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25 (1): 70—72.
- [14] 朱军. 遗传模型分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 175—201, 240—254.
- [15] ZHU J. Mixed model approaches for estimating genetic variances and covariances [J]. Journal of Biomathematics, 1992, 7 (1): 1—11.
- [16] 朱军. 作物杂种后代基因型值和杂种优势的预测方法[J]. 生物数学学报, 1993, 8 (1): 32—44.
- [17] 左清凡, 朱军, 刘宜柏, 等. 非等试验设计植株农艺及产量性状的数量遗传分析方法[J]. 中国农业科学, 2000, 33 (2): 30—33.
- [18] 林强, 梁康逢, 郑秀平, 等. 粳型三系杂交早稻粒形及产量性状的加性相关和显性相关分析[J]. 福建农业学报, 2009, 24 (1): 46—50.
- [19] 林强, 梁康逢, 郑秀平, 等. 粳稻茎叶及产量性状的加性相关和显性相关分析[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31 (2): 194—197, 213.

(责任编辑: 柯文辉)