

谷子高异交结实雄性不育系的创制及应用

王玉文, 李会霞, 田 岗, 史琴香

(山西省农业科学院谷子研究所, 山西长治 046011)

摘要: 【目的】选育高异交结实率的谷子高度雄性不育系、抗除草剂恢复系, 配制优势杂交组合, “二系”配套, 实现谷子的杂优化生产。【方法】对现有的不育系、恢复系进行杂交改良, 系谱法选育符合目标的不育系和恢复系。【结果】选育出 4 个农艺性状好、异交结实率高的谷子高度雄性不育系高 117、高 146、高 229、高 236, 选育出 K103 等具有较高配合力的抗除草剂恢复系, 研究创建了完整的谷子“二系”杂交种选育技术体系, 育成第一个适宜中国谷子中晚熟生态区种植的抗除草剂谷子杂交种长杂谷 2 号。【结论】高异交结实率谷子不育系的育成, 解决了谷子杂交制种和不育系繁种难题, 实现了谷子的杂优化生产。

关键词: 高度雄性不育系; 异交结实率; 抗除草剂; 配合力

Study on Innovation and Application of Highly-Male-Sterile Line with High Outcrossing Rate in Millet

WANG Yu-wen, LI Hui-xia, TIAN Gang, SHI Qin-xiang

(Millet Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Changzhi 046011, Shanxi)

Abstract: 【Objective】 Elite cross combinations were bred using highly-male-sterile line with high outcrossing rate and herbicide-resistant restorer line. By this, two-line system hybrid millet could be used in millet production. 【Method】 Improved existing male sterile lines and restorer lines which suited breeding aim were bred by pedigree method. 【Result】 Four highly-male-sterile-lines with high outcrossing rate and fine agronomic traits named Gao117, Gao146, Gao229, and Gao236 were selected. Herbicide-resistant restorer lines with high combining ability like K103, etc. were bred. A set of technical system of breeding two-line system hybrid was found. The first millet hybrid named Changzagu No.2 with herbicide-resistance was bred which suits to late maturing area in China. 【Conclusion】 The puzzle about high-yielding reproduction of male sterile lines and high-yielding seed reproduction of hybrid were solved by having highly-male-sterile lines with high- outcrossing rate.

Key words: highly-male-sterile line; outcrossing rate; herbicide-resistant; combining ability

0 引言

【研究意义】谷子起源于中国, 是北方的优势农作物。小米营养丰富, 且各种营养成分平衡, 是具有营养保健作用的粮食作物^[1]; 谷子抗旱耐瘠, 是干旱地区可持续农业发展重要的战略储备作物; 谷草又是禾本科作物中最优质的饲草。提高谷子产量, 对发展农业生产、推动农村经济发展、保障粮食安全、节约水资源、保护生态环境有重要作用。目前中国中晚熟谷子生态区仍使用常规品种, 与其它作物相比, 生产

落后, 产量水平和种植效益低而不稳, 严重困扰着谷子生产的发展, 这是造成谷子种植面积减少的主要原因。要大幅度提高谷子产量, 利用杂种优势是重要途径之一。谷子花小、花多, 人工杂交不易, 利用杂种优势不育系是关键。因此, 选育谷子高异交结实雄性不育系对于谷子杂种优势利用研究具有很大的现实意义。【前人研究进展】中国在杂交水稻育种、栽培、推广等方面一直处于世界领先地位。水稻细胞质雄性不育材料的发现和“三系”配套为三系杂交水稻的问世与大面积推广奠定了基础; 光温敏核不育基因和广

收稿日期: 2008-12-18; 接受日期: 2009-11-30

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD02B02)、山西省自然科学基金项目(961030)、山西省科技攻关项目(981007)、山西省农社科攻关项目(041005-1)

作者简介: 王玉文, 副研究员。Tel: 0355-2092856; E-mail: gzswyw@yahoo.com.cn

亲和基因的发掘与成功利用,使两系杂交水稻迅速得到推广应用;近年来超级杂交水稻研究取得了举世瞩目的成就^[1]。而在谷子杂种优势的研究利用上步伐较慢。中国谷子杂种优势利用研究始于1969年,至今已近40年的时间。到目前为止,仍未选出核质互作不育“三系”。在70年代,河北省张家口坝下农业科学研究所曾选育出蒜系28A、黄系4等谷子高度雄性不育系^[2-3],但因间苗困难(苗期需通过指示性状识别真假杂种),未在生产上大面积推广;之后选出了显性核不育系^[4-5]和谷子光(温)敏型雄性不育系^[6-7],并选出了张杂谷1号—6号等谷子杂交种。2007年报道,张杂谷5号最高单产810 kg,创中国谷子最高纪录^[8-10]。但上述杂交种均属早熟类型,不适宜在中国谷子中晚熟生态区种植。国外也有关于谷子不育系的研究报道^[11],但尚无使用谷子不育系选育杂交种的报道。【本研究切入点】本研究旨在选育出中晚熟高异交结实率的谷子高度雄性不育系、抗除草剂恢复系,配制适宜在中国谷子中晚熟生态区种植的优势杂交组合,“二系”配套,实现谷子在中国中晚熟区的杂优化生产,以大幅度提高谷子产量。【拟解决的关键问题】利用高异交结实材料对谷子雄性不育系柱头进行遗传改良,选育出配合力高、异交结实率高的谷子雄性不育系应用于育种和生产;选育出抗除草剂强优恢恢复系,通过测配选育适宜中国谷子中晚熟区的抗除草剂谷子杂交种;进行不育系繁种和杂交制种试验,提高不育系繁种和杂交制种产量,使杂交谷子生产达到商品化生产的要求;研究创建完整的谷子高不育“二系”杂交种选育技术体系,育成的抗除草剂谷子杂交种可在谷子栽培中实现少间苗、少锄草,使谷子生产由传统栽培向现代栽培技术迈进。

1 材料与方法

1.1 选育经过

1.1.1 谷子高度雄性不育系选育 1985年山西省农业科学院谷子研究所在长农10号品种的大田中发现一株天然不育株,有少量结实,入选后与其遗传背景相近的长农24号测交、回交、再自交,每年以穗行种植,成熟后调查其结实率及育性分离情况,到1992年为止,(长10A×长农24)BC₂部分株行不育率达93.8%,1993年其自交穗行中有4个穗行不育率达100%,1994年穗行种植其自交后代,继续选育,使其不育性进一步稳定,1996年将其自交后代加代,共种植自交后代36个穗行,其穗行之间农艺性状稳定,

群体整齐一致,不育率均达100%,不育度约为95%,至此,长10A已成为一个稳定的高度雄性不育系,靠5%左右的自交结实繁殖种子。

长10A在后来的杂种优势利用研究中发现,用其作为母本时异交结实率很低,制种产量不过关。为了提高其异交结实率,利用在山西省农业科学院经济作物研究所发现的一个柱头外露表现良好的材料“81-16”可育株与长10A杂交,对其柱头性状进行遗传改良。对F₂代中出现的不育株套袋自交,F₃代穗行种植,花期全部套袋自交,并观察其柱头大小,选择柱头发达、外露面积大的不育株挂牌标记,成熟后调查不育株率,收获后考察其不育度。

1.1.2 抗除草剂恢复系选育 1998年从中国农业科学院作物品种资源研究所引进抗除草剂“拿捕净”种质材料DSB553,据王天宇等^[12]研究,DSB553种质是用谷子栽培品种资源材料C478和不育材料THA—1与抗除草剂近缘野生青狗尾草UM131杂交,借助生化标记鉴定杂种,继后用C478与之回交两代,获得抗除草剂谷子-狗尾草种质D601SR和D602SR系列,用D601SR与豫谷1号、冀谷1号、C445、豫谷2号等谷子推广优良品种杂交再连续回交5代以上,育成抗除草剂谷子新种质DSB553。经遗传分析,DSB553抗除草剂“拿捕净”特性受一对细胞核显性抗性基因控制,抗感材料正反交杂种一代均表现抗除草剂,二代符合3:1的抗感分离,回交一代符合1:1的抗感分离。1998年在长治DSB553与晋谷21号、晋谷16号、晋谷32号等53份普通谷子品种在同一地块种植,每个品种种植一个小区(6.67 m²),苗期(三叶一芯)喷施12.5%的“拿捕净”,喷施剂量为0.3 mL·m⁻²,7 d后调查死苗情况,并对DSB553的物候期、植株性状进行调查。

1999年开始用DSB553与晋谷21号、晋谷16号、晋谷32号等优良品种杂交,系谱法选育,每代都喷除草剂“拿捕净”进行抗性鉴定。成熟期田间对其后代进行丰产性选择,收获后室内考察其品质性状(主要观察米色),2003年对其F₅代入选的1473份后代材料苗期喷施除草剂,选择稳定抗除草剂、农艺性状基本稳定的材料,进行高不育组合测配,对抗性不稳定的继续选育。

1.1.3 优势组合选育 2004年以高异交结实的高度雄性不育系高117、高146、高253为母本,以选育获得的10个抗除草剂恢复材料为父本,分别为K103、K161、K95、K163、K164、K88、K34、K37、K67、

K172, 按 3×10 NC II 交配设计组配成 30 个组合。2005 年种植 30 个杂交组合的 F_1 代及 10 个父本, 对高度雄性不育系进行配合力测定, 小区面积 5.33 m^2 , 两次重复, 试验完全随机区组设计, 每隔 10 个组合设一生产对照-晋谷 34 号, 成熟后每个小区取 10 株, 调查每个组合的株高、穗长、穗粗、穗粒重、千粒重, 并测定小区产量。

应用固定模型对杂交种 F_1 代各性状进行配合力分析^[13-14], 母本(不育系)一般配合力效应 $g_i = \bar{y}_i - \bar{y}$, 父本一般配合力效应 $g_j = \bar{y}_j - \bar{y}$, 母本一般配合力估计标准误 $\hat{\sigma}_{g(m)} = \sqrt{Ms_e / rf}$, 父本一般配合力估计标准误 $\hat{\sigma}_{g(f)} = \sqrt{Ms_e / rm}$, 母本一般配合力差数标准误 $\hat{\sigma}_{(g_i - g_j)_m} = \sqrt{2Ms_e / rf}$, 父本一般配合力差数标准误 $\hat{\sigma}_{(g_i - g_j)_f} = \sqrt{2Ms_e / rm}$, 特殊配合力效应 $s_{ij} = \bar{y}_{ij} - \bar{y}_i(m) - \bar{y}_j(f) + \bar{y}$, 特殊配合力效应估计标准误 $\hat{\sigma}_s = \sqrt{Ms_e / r}$, 特殊配合力效应差数标准误 $\hat{\sigma}_{(s_{ij} - s_{kl})} = \sqrt{2Ms_e / r}$ 。

杂种优势以亲子比值的相对数表示^[15], 谷子产量的杂种优势理论上是对双亲而言, 由于母本为不育系, 结实率仅为 5%—10%, 母本产量无法估计, 所以各性状杂种优势理论值均与父本性状比较, 即超亲优势, 计算公式为: $H = (F - P) / P$ 。式中 H 为超亲优势, 以%表示; F 为杂种表型值, P 为父本值。实际生产上产量的杂种优势是对标准品种(对照种)而言的超标百分率, 即超标优势, 计算方法: 产量超标优势 = (杂种产量 - 对照产量) / 对照产量。

1.2 高度雄性不育系的繁种试验

采用花期人工辅助授粉的方法, 提高不育系的结实率。具体做法是: 不育系抽穗后, 部分穗套袋自交, 在花期每天 8:00—9:00 拍袋 1 次, 并对自由穗用竹秆轻敲, 利用其有限的花粉提高授粉结实率。

1.3 优势组合的制种试验

为了形成“二系”杂交种配套技术体系, 笔者进行了多年的杂交制种试验:

2004 年冬在海南三亚制种高不育组合 7 个, 父母

本按 2:2 种植, 花期人工辅助授粉, 由于海南谷子产量较低, 其制种产量不能代表北方的产量结果, 故未计产。2005 年春在室内对其真杂交率进行了苗期鉴定。

2005 年在山西省农业科学院谷子所对 4 个高不育组合进行首次小面积制种试验, 父母本按 2:2 种植, 人工隔离, 各组合的制种面积均为 120 m^2 , 花期人工辅助授粉, 成熟后各组合均按结实情况的高、中、低分别收获, 分别计产, 并对其真杂交率进行苗期喷施“拿捕净”鉴定。

2008 年继续制种两个组合, 母本为高 117、高 146, 父本为 K103。父母本按 2:4 种植, 各组合的制种面积均为 133 m^2 , 错期播种调整花期, 人工隔离, 花期辅助授粉, 成熟后按组合混收混脱, 分别计产。

2 结果

2.1 高异交结实率的谷子高度雄性不育系的选育

为了改良长 10A 的异交结实性能, 2000 年笔者用柱头外露表现良好的材料“81-16”可育株与长 10A 杂交, 系谱法选择后代, 花期逐一观察柱头性状。2003 年从 F_6 代中选育出 4 个性状稳定的高异交结实率的谷子高度雄性不育系, 其不育株率均达 100%, 不育度 90%—95% 左右, 柱头发达、外露好、利于制种, 异交结实率 40%—50%, 均属中晚熟类型。

①高 117: 长治春播(5 月 22 日)7 月 30 日抽穗。株高 105.4 cm, 穗长 25.2 cm, 穗粗 3.36 cm, 穗码排列松紧适中, 丰产性好, 抗白发病、黑穗病, 但有少数红叶病株。

②高 146: 株高 89.8 cm, 穗长 18.2 cm, 穗粗 3.24 cm, 抗病性好, 配合力高。长治春播(5 月 22 日)8 月 3 日抽穗。

③高 229: 株高 118.2 cm, 穗长 20.8 cm, 穗粗 3.62 cm, 穗码粒数多, 丰产性好, 抗病、抗倒, 长治春播(5 月 22 日)8 月 3 日抽穗。

④高 236: 株高 103.0 cm, 穗长 24.8 cm, 穗粗 2.36 cm。长治春播(5 月 22 日)8 月 1 日抽穗。

2.2 抗除草剂恢复系选育

2.2.1 抗除草剂“拿捕净”新种质的引进及表现 引进的 DSB553 为选育抗除草剂恢复系提供了种质基础。1998 年在长治与 53 份普通谷子品种在同一地块种植, 苗期(三叶一芯)喷施 12.5% 的“拿捕净”, 7 d 后调查其死苗情况, 结果 DSB553 未出现死苗情况, 其它 53 份谷子品种全部死去, 死苗率达 100%, 并对 DSB553 的物候期、植株性状进行调查, 结果是: 播

种期为 5 月 16 日, 5 月 25 日出苗, 7 月 28 日抽穗, 9 月 28 日成熟, 属中晚熟类型; 植株较矮, 为 91.3 cm, 穗长为 20.1 cm, 穗粗为 2.92 cm, 穗较紧凑, 短刚毛, 属华北春播生态类型, 不宜直接用于恢复系。

2.2.2 抗除草剂恢复系的选育 抗除草剂种质 DSB533 与山西省推广品种晋谷 21、晋谷 32、晋谷 16 等品种杂交后, 2003 年从 1 473 份 F₅ 代材料中鉴定出

稳定的抗除草剂材料 266 份, 其中农艺性状表现较好的 14 份。2003 年冬天在海南三亚对选出的异交结实率高的高不育系和表现较好的抗除草剂恢复材料进行扩繁, 同时进行人工授粉测配, 根据 2004 年杂种一代的表现, 选出了配合力较高的 K103、K95、K161、K163、K172 等抗除草剂恢复系。上述恢复系农艺性状好, 抗逆性强, 配合力高(表 1)。

表 1 部分抗除草剂恢复系的性状表现

Table 1 The performance of part Herbicide-resistant restorer lines (2004)

编号 No.	恢复系 Restorer	穗重(g) Spike weight	粒重(g) Seed weight	株高(cm) Plant height	穗长(cm) Spike length	穗粗(cm) Spike thick	米色级别 Millet color level
25	K172	30.4	23.3	103.6	21.6	2.82	B
54	K103	38.6	31.2	128.0	27.0	4.70	B
66	K161	29.4	24.9	132.5	24.3	3.45	B
84	K95	28.0	18.6	125.3	24.1	2.79	B

2.3 优势组合选育

2004 年以高 117、高 146、高 253 为母本, 以 10 个抗除草剂恢复材料为父本, 按 3×10NC II 交配设计组配成 30 个组合。表 2 为 10 个父本与 3 个母本 F₁ 代的方差分析结果, 可看出各性状基因型间的差异极显著, 表明存在真实的遗传差异, 进而做配合力方差分析, 3 个不育系间(母本间)除穗长、穗粗一般配合力(GCA)不显著外, 其余性状特别是与产量有关的性状(穗粒重、千粒重)一般配合力都达极显著水平, 从小区产量来看也说明了这一问题。10 个父本间各性状的一般配合力都达极显著水平, 各组合的特殊配合力(SCA)在各个性状上都达极显著水平, 说明母本一般配合力效应间、父本一般配合力效应间和

特殊配合力效应间都存在着极显著的遗传差异。

2.3.1 一般配合力效应分析 一个亲本在杂种优势和杂交育种中的利用价值, 首先和一般配合力效应有关, 如果性状的反应量是越大越好, 则一般配合力大的亲本才有较大的利用价值。亲本一般配合力效应及其差异显著性见表 3, 通过计算一般配合力估计标准误, 认为不育系在株高、穗粒重、千粒重、产量方面, 父本在各个性状间, 其一般配合力效应是真实存在的。母本在小区产量上一般配合力最高的为高 117(0.38), 其穗粒重一般配合力也较高(0.13), 高 146 的小区产量一般配合力也较高, 在穗粒重和千粒重上一般配合力均高; 在小区产量上, 3 个母本一般配合力差异均显著, 但在穗长、穗粗上都无差异, 在穗粒重上高

表 2 谷子部分性状的配合力方差分析

Table 2 ANOVA for combining ability of millet

变异来源 Source of variation	DF	株高(cm) Plant height		穗长(cm) Spike length		穗粗(cm) Spike thick		穗粒重(g) Seed weight		千粒重(g) Thousand kernel weight		产量(kg) Yield	
		MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
		重复 Replication	1	1.70		0.09		0.04		0.47		0.003	
F ₁ 基因型 F ₁ genotype	29	233.29	198.42**	1721.56	1277.46**	0.43	9.24**	39.69	23.71**	0.030	17.85**	1.26	62.26**
雌亲一般配合力 GCA	2	56.78	50.46**	1.13	0.84	0.07	1.53	21.05	12.57**	0.020	11.62**	3.60	177.64**
雄亲一般配合力 GCA	9	626.25	556.52**	44.56	33.07**	1.08	23.40**	73.42	43.86**	0.080	47.73**	1.87	92.58**
特殊配合力 SCA	18	40.30	35.82**	2751.22	2041.50**	0.14	3.02**	24.89	14.87**	0.006	3.61**	0.69	34.28**
环境误差 Environment error	29	1.13		1.35		0.05		1.67		0.002		0.02	
总计 Total	59	110.33		846.86		0.23		20.34		0.016		0.63	

** 表示达 0.01 显著水平, MS 为均方, F 为方差, DF 为自由度

** indicate significance at P=1% levels respectively. MS:Mean squares, F:Variance, DF:Degree of freedom

表 3 谷子部分性状的一般配合力效应及差异显著性

Table 3 GCA effects of millet properties and their significance of difference

亲本 Parent	株高(cm) Plant height	穗长(cm) Spike length	穗粗(cm) Spike thick	穗粒重(g) Seed weight	千粒重(g) Thousand kernel weight	产量(kg) Yield
高 117A	-1.86c	-0.02a	0.03a	0.13a	-0.01b	0.38a
高 146A	0.45b	-0.23a	-0.07a	0.96a	0.04a	0.09b
高 253A	1.42a	0.25a	0.04a	-1.08b	-0.02b	-0.46c
$\hat{\sigma}$ g(m)	0.24	0.26	0.05	0.29	0.01	0.03
$\hat{\sigma}$ (gi-gj)	0.34	0.37	0.07	0.41	0.01	0.04
LSD _{0.05}	0.69	0.75	0.14	0.84	0.03	0.09
K103	9.79c	-1.59d	0.75a	4.91b	0.07b	0.59b
K161	-10.78g	1.43b	-0.12cd	-1.93ef	0.19a	-0.63f
K95	-13.03h	1.73b	-0.12cd	-3.81g	0.01c	-0.30e
K163	12.68b	-1.91d	-0.24d	-2.58fg	0.16a	-0.03d
K164	3.54d	-2.03d	0.17b	7.18a	-0.09ef	0.82a
K88	4.74d	1.56b	-0.28d	-1.34def	-0.03cd	-0.53f
K34	-10.04g	-1.68d	-0.57e	-2.43efg	-0.13fg	0.29c
K37	-6.91f	-3.41e	-0.32de	-0.08cd	-0.04de	-0.70f
K67	14.04a	5.89a	0.08bc	-0.98de	-0.16g	-0.18de
K172	-4.04e	0.01c	0.65a	1.04c	0.01cd	0.66ab
$\hat{\sigma}$ g(f)	0.43	0.47	0.09	0.53	0.02	0.06
$\hat{\sigma}$ (gi-gj)	0.61	0.67	0.13	0.75	0.03	0.08
LSD _{0.05}	1.26	1.37	0.26	1.53	0.05	0.17

同列数字后相同字母表示数字间差异不显著。下同

Values followed by same letter in a column mean not significant at $P=0.05$ (LSD-test). The same as below

117、高 146 与高 253 一般配合力差异显著。父本 K103 和 K163、K172 在小区产量上一一般配合力均高，分别为 0.59、0.82、0.66，同时这 3 个父本在穗粒重、穗粗上一一般配合力也均高，但在穗长和株高上一一般配合力都不很高。

2.3.2 特殊配合力效应分析 表 4 为各组合小区产量总和和二向表，表 5 为各性状特殊配合力效应及其差异显著性，不同组合在各性状间特殊配合力效应均有显著差异。组合高 146×K103 小区平均产量为 2.93 kg，

比小区总平均产量 (2.18 kg) 高 0.75 kg，该组合在小区产量上特殊配合力最高，在千粒重、穗粒重上特殊配合力也较高，其高产原因一方面来自于双亲产量性状的累加 (高 146 和 K103 的一般配合力效应均高)，另一方面来自于双亲特殊配合力效应，所以该组合为最佳组合。组合高 117×K163 小区平均产量为 2.88 kg，比小区总平均产量高 0.7 kg，该组合特殊配合力为小的正值，其高产原因主要来自于双亲产量性状的累加 (高 117 和 K163 在小区产量上一一般配合力效应均高)。

表 4 谷子 3×10NC II 设计的小区产量总和二向表

Table 4 Two directions table of total yield in 3×10NC II design of millet

	K103	K161	K95	K163	K164	K88	K34	K37	K67	K172	T _f	\bar{y}_f
高 117A	4.80	4.55	4.35	4.10	5.75	4.60	5.55	4.65	3.80	5.05	47.20	2.36
高 146A	5.85	3.85	4.15	4.70	5.05	3.10	4.85	3.25	4.70	4.70	44.30	2.22
高 253A	4.15	2.65	3.65	4.15	4.70	3.75	3.50	3.05	4.00	5.25	38.35	1.95
T _m	14.80	11.15	12.15	12.95	15.50	11.45	13.90	10.95	12.50	15.00	130.35	$\bar{y}=2.18$
\bar{y}_m	2.47	1.86	2.025	2.16	2.60	1.91	2.32	1.83	2.09	2.50		

T_f 同一母本数值总和， \bar{y}_f 同一母本平均值；T_m 同一父本数值总和， \bar{y}_m 同一父本平均值

T_f is the sum of the same female, \bar{y}_f is the average of the same female; T_m is the sum of the same male, \bar{y}_m is the average of the same male

表 5 谷子部分性状的特殊配合力效应及差异显著性

Table 5 SCA effects of millet's properties and their significance of difference

杂交组合	株高(cm)	穗长(cm)	穗粗(cm)	穗粒重(g)	千粒重(g)	产量(kg)
Cross	Plant height	Spike length	Spike thick	Seed weight	Thousand kernel weight	Yield
高 117×K103	6.61ab	-0.90efghi	0.10abcde	2.01bcdef	-0.020cdefgh	-0.51nopq
高 117×K161	0.68fghij	-0.37cdefghi	-0.22cde	-0.26fghijk	-0.005bcdefgh	0.46bcde
高 117×K95	0.08ghijk	0.69bcdefg	-0.26de	1.62cdefgh	0.027abcdefg	-0.08ijkl
高 117×K163	6.98a	0.37bcdefghi	-0.17cde	0.89defgh	0.031abcdef	-0.59nopqr
高 117×K164	-4.94qr	-0.52defghi	0.22abc	0.04efghijk	-0.070h	0.21efgh
高 117×K88	-1.04jklm	-1.65ghij	0.12abcde	0.31defghi	0.014abcdefgh	0.41cdef
高 117×K34	-0.20hijk	1.24bcde	-0.21cde	-2.51kl	0.014abcdefgh	0.54bcd
高 117×K37	-2.54lmno	1.92bc	-0.20cde	-6.61m	-0.020cdefgh	0.63abc
高 117×K67	-1.89klmno	0.12bcdefghi	0.41a	1.89cdefg	-0.053fgh	-0.74qr
高 117×K172	-3.75opqr	-0.90efghi	0.23abc	2.62bcde	0.081ab	-0.33lmno
高 146×K103	-5.50r	1.17bcde	-0.13bcde	3.88bc	0.066abc	0.83a
高 146×K161	-0.73ijkl	-0.26cdefghi	-0.07bcde	0.16efghij	-0.054fgh	0.15fghi
高 146×K95	1.27fghi	-1.26fghi	0.06abcde	-1.86ijkl	-0.012cdefgh	0.02ghijk
高 146×K163	-3.13mnopq	1.48bcd	0.15abcde	0.91defgh	-0.019cdefgh	0.30defg
高 146×K164	2.10efg	0.50bcdefghi	-0.13bcde	2.91bcd	0.031abcdef	-0.20klm
高 146×K88	5.80abc	0.96bcdef	0.12abcde	-0.77higkl	0.014abcdefgh	-0.80r
高 146×K34	-3.41nopqr	-1.71hij	0.01abcde	-2.14ijkl	0.014abcdefgh	0.13fghij
高 146×K37	-2.55lmno	-3.87jk	0.41a	-0.04fghijk	0.031abcdef	-0.49nopq
高 146×K67	4.50bcd	4.33a	-0.10bcde	-2.39jkl	-0.052efgh	0.45bcde
高 146×K172	1.64efgh	-1.34fghi	-0.30e	-0.66ghijkl	-0.019cdefgh	-0.39mnop
高 253×K103	-1.12jklm	-0.26cdefghi	0.03abcde	-5.88m	-0.047efgh	-0.32lmn
高 253×K161	0.05ghijk	0.62bcdefgh	0.30ab	0.10efghijk	0.059abcd	-0.61opqr
高 253×K95	-1.35jklmn	0.57bcdefgh	0.20abcd	0.23efghij	-0.015cdefgh	0.06ghijk
高 253×K163	-3.85opqr	-1.85ij	0.02abcde	-1.80ijkl	-0.012cdefgh	0.29defg
高 253×K164	2.83def	0.02bcdefghi	-0.09bcde	-2.95l	0.039abcde	-0.01hijk
高 253×K88	-4.77pqr	0.69bcdefg	-0.24de	0.47defghi	-0.028defgh	0.39cdef
高 253×K34	3.62cde	0.47bcdefghi	0.20abcd	4.65ab	-0.028defgh	-0.67pqr
高 253×K37	5.08abc	1.95bc	-0.20cde	6.65a	-0.012cdefgh	-0.14jklm
高 253×K67	-2.62lmnop	-4.45k	-0.30e	0.50defghi	0.105a	0.29defg
高 253×K172	2.12efg	2.24ab	0.08abcde	-1.97ijkl	-0.062gh	0.71ab
$\hat{\sigma}^2$	0.75	0.82	0.1581	0.91	0.03	0.10
$\hat{\sigma}^2$ (sij-sk1)	1.06	1.16	0.22	1.29	0.04	0.14
LSD _{0.05}	2.17	2.38	0.46	2.64	0.09	0.29

2006—2007 年长杂谷 2 号 (高 146×K103) 参加了山西省中晚熟区谷子杂交种区域试验。在两年的区试结果中, 表现最好的为长杂谷 2 号 (表 6), 2006 年平均折每公顷产量 3 757.5 kg, 平均比对照晋谷 34 号增产 17.7%, 居参试杂交种第一位, 6 个试点均表

现增产, 增产点为 100%; 2007 年平均折每公顷产量 5 499.0 kg, 平均比对照晋谷 34 号增产 15.6%, 居参试杂交种第一位, 6 个点中有 5 个点表现增产, 增产点为 83.3%; 两年省区试平均折每公顷产量 4 628.25 kg, 平均比对照晋谷 34 号增产 16.5%。2008 年 4 月

表 6 2006-2007 年长杂谷 2 号区试结果

Table 6 Regional experiment result of Changzagu 2 during 2006-2007

试点 Testing field	产量 Yield per hectare (kg·hm ⁻²)		比对照增产 Increasing yield to control (%)		位次 Rank	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
襄垣 Xiangyuan	3315.0	5685.0	22.8	19.4	1	1
壶关 Huguan	3649.5	6232.5	18.5	18.4	1	1
榆次 Yuci	4725.0	4804.5	15.4	23.4	2	1
泽州 Zezhou	4221.0	5445.0	28.5	20.4	1	1
柳林 Liulin	3840.0		16.4		1	
榆社 Yushe	3000.0		11.1		1	
方山 Fangshan		5859.0		-2.0		3
昔阳 Xiyang		4966.5		20.4		2
平均 Average	3757.5	5499.0	17.7	15.6	1	1
2 年平均 Average of two years	4628.25		16.5		1	

10 日经山西省农作物品种审定委员会审定通过。

2.4 高度雄性不育系的繁种试验

采用花期人工辅助授粉的方法, 提高不育系的结实率。2005 年种植高度雄性不育系高 146A 200 m², 其中一半穗行 (100 m²) 进行人工辅助授粉, 抽穗后开花前套袋 60 穗, 在花期每天早上 8: 00—9: 00 拍袋 1 次, 并对剩余自由穗用竹秆轻敲, 另一半穗行 (100 m²) 抽穗后开花前也套袋 60 穗, 未进行人工辅助授粉, 成熟后调查其结实率和繁种产量。试验结果见表 7, 未经人工辅助授粉的小区产量为 4.49 kg, 经人工

辅助授粉的小区结实率有较大提高, 产量为 8.22 kg, 折每公顷可繁殖不育系 822.0 kg, 比未经人工授粉繁殖产量 (488.95 kg·hm⁻²) 提高了 83%。

2.5 优势组合的制种试验

2004 年冬在海南三亚人工隔离小面积制种 7 个组合。分别是: 高 117×K88、高 117×K163、高 146×K103、高 229×K172、高 117×K161、高 117×K164 和高 236×K95。2005 年春在室内对上述 7 个制种组合进行苗期喷施除草剂鉴定其真杂交率 (表 8), 高 146×K103 因花期相遇不好, 异交结实率低, 仅为

表 7 2005 年人工辅助授粉试验结果

Table 7 The result of supplementary pollination in 2005

高 146 Gao146	辅助授粉(平均) Supplemental pollination	未辅助授粉(平均) Non-supplemental pollination
套袋穗结实率% Selt-setting rate in bag	25.6	8.8
自由穗结实率% Selt-setting rate freely	17.4	9.5
折合每公顷产量 Seed reproduction per hectare (kg·hm ⁻²)	822.00	488.95

表 8 三亚制种的 7 个组合真杂交率苗期鉴定

Table 8 Outcrossing rate of the seven combinations reproduced in Sanya

组合 Cross	I			II			平均真杂交率(%) Average
	活苗(个) Living	总苗(个) Total	真杂交率(%) Outcrossing rate	活苗(个) Living	总苗(个) Total	真杂交率(%) Outcrossing rate	
	高 117×K164	17	37	45.9	18	36	
高 117×K88	3	20	15.0	14	26	53.8	34.4
高 117×K163	14	32	43.8	8	34	19	30.4
高 236×K95	12	37	32.4	8	26	30.8	31.6
高 146×K103	8	50	16.0	5	48	10.4	13.2
高 229×K172	19	31	61.3	11	29	37.9	49.6
高 117×K161	16	32	50.0	10	30	33.3	41.7

13.2%，结果造成 2005 年杂交种产量比较试验时，田间留苗不足正常密度的 50%，造成减产(减产 0.31%)，其余 6 个组合的异交结实率均大于 30%，最高的达 49.6%。在对杂交种正常播量(15 kg·hm⁻²)播种的情况下，苗期喷施除草剂杀死假杂种后均不会造成缺苗。

2005 年在谷子所制种 4 个组合，父母本比例为 2:2，其产量结果和异交结实率见表 9。高 146×K103

由于花期相遇不太好，制种产量较低。

2008 年在谷子所继续进行杂交种制种试验，制种两个组合(表 10)，母本为高 117、高 146，父本为 K103，父母本比例按 2:4 种植，父本 K103 穗子粗大，花粉量大，花期相遇好，制种产量较高，分别为 1 670.25 kg·hm⁻²、1 968.75 kg·hm⁻²，繁种系数达 150 倍，达到了商品化的要求。

表 9 2005 年制种产量结果和真杂交率(杂交结实率)

Table 9 Hybrid seed reproduction and outcrossing rate in 2005

组合 Cross	折每公顷制种产量 Hybrid seed reproduction per hectare (kg)	高 High		中 Middle		低 Low (kg)		平均 Average (%)
		真杂交率	产量	真杂交率	产量	真杂交率	产量	
		Outcrossing rate (%)	Reproduction (kg)	Outcrossing rate (%)	Reproduction (kg)	Outcrossing rate (%)	Reproduction (kg)	
高 117×K164	633.75	83.3	2.50	59.2	2.25	19.1	2.00	56.24
高 117×K163	754.50	82.2	1.15	51.1	3.90	43.2	3.00	52.70
高 117×K161	633.00	62.5	2.70	11.1	3.00	6.8	1.05	30.99
高 146×K103	396.00	75.6	0.65	42.1	2.85	4.9	0.70	41.08

表 10 2008 年制种产量

Table 10 Hybrid seed reproduction in 2008

组合 Cross	按真杂交率分类 Outcrossing rate (kg)			制种产量 Hybrid seed reproduction (kg)	折每公顷制种产量 Hybrid seed reproduction per hectare (kg)
	高 high	中 middle	低 low		
	高 117×K103	14.05	5.43		
高 146×K103	13.35	8.30	1.45	23.10	1968.75

3 讨论

3.1 谷子柱头外露率与高异交结实不育系的关系

谷子花器细小，花粉量很少，谷子不育系要接受外源花粉，必须增加柱头接受花粉的有效面积来补偿花粉量小的缺陷以满足受精的需要。杂交水稻研究中大量调查表明，异交结实率中柱头外露因素所起的作用要占 80%^[16-19]。从水稻提高异交结实率的经验证明，提高母本柱头外露因素比单靠增加父本花粉量更加行之有效，具有更大的结实潜力^[20-23]；崔贵梅等曾研究证明，谷子的柱头外露程度与异交结实率显著正相关^[24]，在谷子不育系选育过程中，综合评价柱头生长势，能提前预测不育系的异交结实程度，有利于在谷子不育系选育和测配过程中减少盲目性。本研究中，长 10A 的柱头外露率不高，用其作为母本测配时，异交率仅有 5%，而针对这一性状进行改良选育的高 117、高 146、高 229、高 236 高度雄性不育系的柱头外露率较好，异交结实率提高到 40%—50%。

3.2 谷子高异交结实不育系在应用中需要进一步解决的问题

在恢复系选育方面应当利用现有的一批较好的恢复系，以恢×恢、恢×优良品种的方法，继续选育更好的恢复系。随着市场经济的发展，人们对小米的品质要求越来越高。谷子杂交种与常规谷子品种相比米质较差，仍然在很大程度上制约着杂交谷子的发展。因此今后要从不育系和恢复系的选育着手，注意对品质的要求，使选出的杂交种适应市场的要求，既要高产又要优质，提高农民收入。目前应对已选出的优势组合及恢复系进行适口性分析，选择优质组合，尽快大面积用于生产。另外，田大成等研究水稻不育系柱头外露率性状时，指出除由品种差异等内在因素决定外，还易受外部环境的影响^[25]。我们除要选育柱头外露好的不育系外，还要借鉴水稻提高柱头外露的经验^[26-27]，将遗传选育和栽培措施相结合，进一步提高杂交制种产量。

4 结论

谷子雄性不育系异交结实率低, 制种产量低是限制谷子杂交种商品化生产的主要原因, 本项研究选育出了高异交结实率的谷子高度雄性不育系, 研究创建了完整的谷子高不育“二系”杂交种选育技术体系, 育成中国第一个谷子中晚熟生态区种植的抗除草剂谷子杂交种长杂谷 2 号, 该杂交谷子每公顷制种产量可达 1 968.75 kg, 繁种系数达到 150 倍, 达到了商品化生产要求; 不育系每公顷繁种产量可达 822 kg, 繁种系数达 73.07 倍; 育成的抗除草剂谷子杂交种可在谷子栽培中实现少间苗、少锄草, 使谷子生产由传统栽培向现代栽培技术迈进。

致谢: 中国农业科学院作物品种资源研究所王天宇老师为本研究提供了抗除草剂材料, 山西省农业科学院谷子研究所张喜文和生物中心崔贵梅给予了诸多指导和帮助, 特此感谢!

References

- [1] 青先国, 黄大金, 艾治勇. 中国杂交水稻产业经济发展战略. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 617-623.
Qing X G, Huang D J, Ai Z Y. Developmental strategies for hybrid rice industrial economy in China. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2008, 36(6): 617-623. (in Chinese)
- [2] 李荫梅. 谷子育种学. 北京: 中国农业出版社, 1997: 5-36, 112-119.
Li Y M. *Millet Breeding*. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 5-36, 112-119. (in Chinese)
- [3] 崔文生, 马烘锡, 张德勇. 谷子雄性不育“蒜系 28”的选育与利用. 中国农业科学, 1979 (1): 43-46.
Cui W S, Ma H X, Zhang D Y. The selection and utilization of “Suan His 28”—A male sterility strain of millet. *Scientia Agricultura Sinica*, 1979 (1): 43-46. (in Chinese)
- [4] 胡洪凯, 马尚耀, 石艳华. “Ch 型”谷子显性核不育的遗传及其应用研究. 作物学报, 1986, 12(2): 73-78.
Hu H K, Ma S Y, Shi Y H. The discovery of a dominant mail-sterile gene in millet (*Setaria italica*). *Acta Agronomica Sinica*, 1986, 12(2): 73-78. (in Chinese)
- [5] 崔文生, 孔玉珍, 杜 贵, 赵治海. 谷子光敏型显性核不育材料“光-1”选育研究初报. 华北农学报, 1991,6(增刊): 47-51.
Cui W S, Kong Y Z, Du G, Zhao Z H. A preliminary observation on breeding of photoperiod-sensitive and dominant GMA material of foxtail millet “Guang A1”. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1991, 6(Suppl.): 47-51. (in Chinese)
- [6] 崔文生, 孔玉珍, 赵治海, 杜 贵, 苏裕源. 谷子光敏型隐性核不育材料“292”选育初报. 华北农学报, 1991,6(增刊): 177-178.
Cui W S, Kong Y Z, Zhao Z H, Du G, Su Y Y. A preliminary observation on breeding of photoperiod-sensitive and recessive GMA material of foxtail millet “292”. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1991, 6(Suppl.): 177-178. (in Chinese)
- [7] 赵治海, 崔文生, 杜 贵, 杨少青. 谷子光(温)敏型不育系 821 选育及其不育性与光温关系的研究. 中国农业科学, 1996, 29(5): 23-31.
Zhao Z H, Cui W S, Du G, Yang S Q. The selection of millet photo(thermo) sensitive sterile line 821 and a study on the relation of sterility to illumination and temperature. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(5): 23-31. (in Chinese)
- [8] 赵治海. 张杂谷 1 号. 河北农业科技, 2003 (5): 16.
Zhao Z H. A new millet breed—ZHANG ZA GU YI HAO. *Hebei Agricultural Sciences & Technology*, 2003 (5): 16. (in Chinese)
- [9] 闫凤岐, 张雅丽, 姚 瑞. 杂交谷子亩产创世界之最. 河北农业科技, 2008 (1): 56.
Yan F Q, Zhang Y L, Yao R. The highest yield of hybrid millet in the world. *Hebei Agricultural Sciences & Technology*, 2008 (1): 56. (in Chinese)
- [10] 邱凤仓. 光温敏两系杂交谷子的推广及应用. 河北农业科技, 2008 (18): 8-9.
Qiu F C. Application and extension of photo(thermo) sensitive two-line hybrid millet. *Hebei Agricultural Sciences & Technology*, 2008 (18): 8-9. (in Chinese)
- [11] Ananthakalaiselvi A, Krishnasamy V, Vijaya J. Stigma receptivity and pollen viability studies in hybrid pearl millet km. *The Madras Agricultural Journal*, 1999, 86(10/12): 603-605.
- [12] 王天宇, 石云素, 辛志勇, H. Darmency 抗除草剂谷子新种质的创制、鉴定与利用. 中国农业科技导报, 2000, 2(5): 62-66.
Wang T Y, Shi Y S, Xin Z Y, Darmency H. A creation, evaluation and utilization of the new crop germplasm: herbicide resistance foxtail millet (*Setaria italica*). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2000, 2(5): 62-66.
- [13] 孔繁玲. 植物数量遗传学. 北京: 中国农业大学出版社. 2006: 271-292.
Kong F L. *Quantitative Genetics in Plants*. Beijing: Chinese Agricultural University Press, 2006: 271-292. (in Chinese)
- [14] Yu S B, Li J X, Xu C G. Importance of epistasis as the genetic basis of heterosis in an elite rice hybrid. *Proceeding of Agricultural Sciences*, 1997, 94: 9226-9231.
- [15] Schtrtz K F, 卢庆善. 中美高粱杂交优势与配合力的研究. 辽宁农

- 业科学, 1994(4): 3-7.
- Schtrtz K F, Lu Q S. Study on the hybrid and combining ability of Chinese and U. S. sorghum. *Liaoning Agricultural Sciences*, 1994(4): 3-7. (in Chinese)
- [16] 杨保汉. 不育系柱头外露率及其结实率研究. 杂交水稻, 1997, 12(1): 13-15.
- Yang B H. Studies on stigma exertion rate and outcrossing rate of CMS lines in rice. *Hybrid Rice* 1997, 12(1): 13-15. (in Chinese)
- [17] 王彦荣, 华泽田, 张忠旭, 李全英, 李如海, 苏玉安, 姚继攀, 王之旭. 高柱头外露率粳稻不育系的选育与应用. 杂交水稻, 2008, 23(3): 4-8.
- Wang Y R, Hua Z T, Zhang Z X, Li Q Y, Li R H, Su Y A, Yao J P, Wang Z X. Breeding and application of japonica male sterile lines with high stigma exertion rate in rice. *Hybrid Rice*, 2008, 23(3): 4-8. (in Chinese)
- [18] 李维科, 于平福. 高产优质杂交灿稻新组合“特优 649”产业化技术研究 II. 高产制种技术研究. 广西农业科学, 2007, 38(5): 515-518.
- Li W K, Yu P F. Techniques for industrialization production of new indica hybrid rice combination Teyou 649 with high-yielding and fine grain quality II. Techniques for high-yielding seed production. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2007, 38(5): 515-518. (in Chinese)
- [19] 韦善富, 宋智萍, 石瑜敏, 王威豪. 优质杂交稻新组合早优 11 高产制种技术. 广西农业科学, 2007, 38(4): 395-397.
- Wei S F, Song Z P, Shi Y M, Wang W H. High-yielding seed production technique of new good quality hybrid rice Zaoyou 11. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2007, 38(4): 395-397. (in Chinese)
- [20] 吴爽, 李成荃, 王守海, 杨仁崔, 张书标. 几种优良品种花器性状的遗传及相关分析. 安徽农业科学, 2003, 31(2): 171-172.
- Wu S, Li C Q, Wang S H, Yang R C, Zhang S B. Heritable and correlation analysis of several restore lines' floral character. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(2): 171-172. (in Chinese)
- [21] 田大成, 张素英, 秦春林. 提高柱头外露率是杂交稻制种稳产高产的关键措施. 四川农业科技, 1990(2): 16-18.
- Tian D C, Zhang S Y, Qin C L. Increasing stigma exertion rate is the key measure of high and stable yield in hybrid rice seed production. *Sichuan Agricultural Sciences & Technology*, 1990(2): 16-18. (in Chinese)
- [22] 金祥, 黄宗烘, 杨占烈, 向关伦, 甘雨, 潘建惠. 水稻温敏不育系 G156S 的开花习性及其异交特性. 贵州农业科学, 2008(5): 10-11.
- Jin X, Huang Z H, Yang Z L, Xiang G L, Gan Y, Pan J H. Study on flowering habits and cross characteristics of G156S, a thermo-sensitive genic male sterile line in rice. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2008(5): 10-11. (in Chinese)
- [23] 浦选昌, 吴元华, 刘茂桃, 杨昌元, 李琳琪. 水稻籼型温敏核不育系 K16S 的选育. 贵州农业科学, 2006(3): 7-8.
- Pu X C, Wu Y H, Liu M T, Yang C Y, Li L Q. Breeding of K16S, an indica rice temperature-sensitive genic male sterile line. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006(3): 7-8. (in Chinese)
- [24] 崔贵梅, 牛天堂, 张福耀, 袁爱萍, 孙毅. 谷子 (*Setaria italica* Beauv.) 高异交结实雄性不育系“81-16”的柱头性状观察. 作物学报, 2007, 33(1): 149-153.
- Cui G M, Niu T T, Zhang F Y, Yuan A P, Sun Y. The stigma observation on foxtail millet (*Setaria italica* Beauv.) male-sterile line “81-16” with high outcross seed setting. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(1): 149-153. (in Chinese)
- [25] 田大成, 张素英, 秦春林. 杂交稻制种喷施“九二〇”增产机理及其衡量指标的探讨. 杂交水稻, 1990 (6): 20-23.
- Tian D C, Zhang S Y, Qin S L. Discussion on yield-increasing mechanism and the parameters reflecting spraying “920” in hybrid rice seed production. *Hybrid Rice*, 1990(6):20-23. (in Chinese)
- [26] 吕凯, 魏凤娟, 吴永辉, 石扬娟. 施肥和激素对水稻不育系柱头外露率和结实率的影响. 安徽农业科学, 2003, 31(4): 641-642.
- Lü K, Wei F J, Wu Y H, Shi Y J. Influence of fertilisation and hormone application out-chapter rate and seed-setting rate. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(4): 641-642. (in Chinese)
- [27] 沈森和. 提高杂交水稻制种异交结实率探讨. 种子, 1995, 75(1): 38-39.
- Shen S H. Studies on increase outcrossing rate in hybrid rice seed production. *Seed*, 1995, 75(1): 38-39. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)