

新疆冬麦区 AL 型三系杂交小麦亲本配合力、杂种优势和聚类分析

孔德真, 聂迎彬, 崔凤娟, 李 伟, 桑 伟, 徐红军, 刘鹏鹏, 田笑明
(新疆农垦科学院作物研究所/谷物品质与遗传改良兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘 要: 为了解新疆 AL 型三系杂交小麦亲本间配合力及其杂种优势关系, 利用稳定不育系 8 份, 恢复力强的恢复系 9 份, 按照 NC II 不完全双列杂交(8×9)设计配制 72 个 F₁ 杂交组合, 对亲本及杂交组合的 7 个农艺性状进行配合力效应和杂种优势分析, 再根据亲本性状的配合力划分杂种优势类群。结果表明, 三系小麦杂交组合中普遍存在产量和产量性状杂种优势, 针对强优势组合的亲本选择, 双亲之一一般配合力(GCA)或双亲 GCA 之和为正值且相对较大; 相关性分析表明, 中亲优势与父本和母本 GCA 值之和呈极显著正相关, 父本和母本的 GCA 相关性大于特殊配合力(SCA)相关性。针对 6 个性状的 GCA 效应值和性状表型值分别进行聚类分析表明, 配合力距离远的亲本组配可能出现强优势杂交组合的几率较大, 性状表型值距离较远的两个亲本同一性状之间的优势互补也可以在后代中表现出较强的杂种优势。将 17 个亲本划分为 4 个和 5 个类群, 为后续 AL 型杂交小麦强优势杂交组合的配制提供了依据。

关键词: 三系杂交小麦; 不育系; 恢复系; 配合力; 杂种优势

DOI: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2024.03.129

中图分类号: S 512.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-4705(2024)03-0129-08

Combining Ability, Heterosis and Clustering Analysis of Hybrid Wheat Parents in Xinjiang Winter Wheat Region

KONG Dezhen, NIE Yingbin, CUI Fengjuan, LI Wei, SANG Wei,
XU Hongjun, LIU Pengpeng, TIAN Xiaoming
(Institute of Crop Research, Xinjiang Academy of Agri-Reclamation Sciences/
Key Lab of Xinjiang Production and Construction Corps for Cereal Quality Research and
Genetic Improvement, Shihezi Xijiang 832000, China)

Abstract: To study the relationship between heterosis and combining ability among parents of AL type hybrid wheat in Xinjiang region, 72 (8×9) F₁ hybrid combinations were prepared according to incomplete diallel cross of NC II using 8 AL type stable sterile lines and 9 restorer lines with strong resilience, and the heterosis and combining ability effects of 7 agronomic characters of parents and hybrid combinations were analyzed. Heterosis groups were divided according to parental traits and general combining ability. The results showed that three-line wheat hybrid heterosis had universal in yield and yield traits, and was particularly important that one parent GCA or the sum of both parents GCA was positive and relatively large for parental selection of strong dominant combinations. Correlation analysis showed that parental dominance was positively correlated with the sum of paternal and maternal GCA values, and the GCA correlation between paternal and maternal was greater than the SCA correlation. According to the GCA effect value and phenotype value of 6 traits, the cluster analysis showed that the combination of parents with far combining ability could have a higher probability of

收稿日期: 2023-11-21
基金项目: 兵团重点领域科技攻关(2023CB007-10)。
作者简介: 孔德真(1987—), 男(汉族), 甘肃临夏人; 硕士, 副研究员, 研究方向: 小麦杂种优势利用(E-mail: kongdezhen1746@163.com)。
通讯作者: 田笑明(1953—), 男(汉族), 新疆乌鲁木齐人; 本科, 研究员, 研究方向: 小麦杂种优势利用(E-mail: txming729@163.com)。

strong dominance cross combination, and the complementarity of advantages between two parents with the same trait whose trait phenotype value was far away could also show strong heterosis in the offspring. The 17 parents were divided into 4 and 5 groups, which provided the basis for the preparation of strong and dominant combinations of AL type hybrid wheat.

Key words: three-line hybrid wheat; sterile line; restorer line; combining ability; heterosis

小麦是我国重要的粮食作物之一。为了解决小麦需求增大与耕地面积减小之间的矛盾,在生产中应加大对杂交小麦的应用力度^[1]。杂交小麦是小麦杂种优势利用的具体形式,利用杂种优势能大幅度提高小麦的单产水平和改良品质^[2]。生产上能否大面积推广种植小麦杂交种,主要取决于其杂种优势的表现^[3]。杂交小麦在生产上还没有大面积利用主要问题是强优势杂交组合少和制种产量低。目前,杂交小麦强优势组合选配方法主要是通过大量配制杂交组合和多年产量鉴定,这种育种方法不仅费时费力,而且效率较低,发掘的强优势组合少^[4]。

杂交小麦亲本作为强优势杂交组合配制的基础,研究亲本材料的配合力和遗传距离是提高选择强优势杂交组合的有效途径之一。强优势组合的选配主要是通过亲本配合力分析对杂交种进行亲本选择和组合评价^[5]。一般认为,评价杂交亲本的优劣既要依据亲本自身产量、抗逆性、品质、株型等性状表现,还要参考其配合力的高低^[6],首先提高亲本的一般配合力(GCA),然后再选择具有高特殊配合力(SCA)的 F₁ 组合较易获得较高的杂种优势^[7]。杂种优势是亲本 GCA 与组合 SCA 共同作用的结果,具备高亲本 GCA、能够衍生高 SCA 的杂优组合是杂种优势群创建的目标^[8]。

AL 型三系杂交小麦强优势杂交组合的选配,需要不断对新转育不育系和新创制恢复系进行杂交组合配制,并对不育系和恢复系进行配合力分析,从而筛选到优异的核心种质亲本。本研究选择 8 个稳定 AL 型不育系和 9 个恢复系作为亲本,采用不完全双列杂交设计配制 72 个杂交组合,对 F₁ 代的小区产量等农艺性状进行配合力分析,并根据不育系和恢复系的一般配合力和产量性状划分杂种优势群,以期对新疆三系杂交冬小麦强优势杂交组合的配制提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为新疆农垦科学院作物研究所小麦育种创新团队回交转育 8 代以上的 AL 型稳定不育系 8 份(周麦 22A、周麦 26A、周麦 32A、周麦 18A、济麦 20A、

山农 22A、石麦 15A、2008(153)A),分别用 A1~A8 表示,杂交选育的稳定恢复系 9 份(99AR144-1、99AR142-1、2014AR5、2015AR76、2016ARH14、2017ARH11、2012AR29-1、2017ARH20、2015AR24),分别用 R1~R9 表示,及不育系和恢复系组配的 72 个 F₁ 代杂交组合。

1.2 试验设计与性状调查

2021 年 5 月按照 NC II 不完全双列杂交(8×9)配制 72 个 F₁ 杂交组合,2021 年 9 月将杂交组合及亲本(不育系亲本用同型保持系代替)种植在新疆农垦科学院作物研究所试验田中。田间试验为随机区组设计,每份材料种植 6 行区,每行种 50 粒,行长 1.5 m,行距 0.25 m,小区面积 2.25 m²,2 次重复。田间管理与大田生产保持一致。在小麦苗期和灌浆期对小区基本苗数、收获穗数、株高进行测定,收获脱粒后测量小区产量。根据小区产量、基本苗数、收获穗数换算出田间出苗率、基本苗成穗数、单穗产量和单株产量。

田间出苗率/%=(基本苗数/播种粒数)×100%;

基本苗成穗数=收获穗数/基本苗数。

1.3 数据统计与分析

亲本配合力分析采用 NC II 不完全双列杂交统计分析方法进行,对每个杂交组合及亲本的田间出苗率数据先作反正弦转换,其余各性状各值、GCA 值进行标准化转化后计算卡方距离,采用离差平方和进行系统聚类分析。所有数据分析均在 Excel 2019 和 SPSS 22 软件中进行。

平均中亲优势/%=[(平均 F₁ 值-双亲平均值)/双亲平均值]×100%;

平均母本优势/%=[(平均 F₁ 值-平均母本值)/平均母本值]×100%;

平均父本优势/%=[(平均 F₁ 值-平均父本值)/平均父本值]×100%。

2 结果与分析

2.1 杂种优势表现

平均中亲优势是两个亲本相互作用的结果,由表 1 可看出,7 个性状具有平均中亲优势的组合占组合总数的比例依次为:株高>基本苗成穗数>收获穗数>单株产量>小区产量>田间出苗率>单穗产量;进一

步分解,母本不育系平均优势的组 合占比表现为:株高>基本苗成穗数、单株产量>小区产量>收获穗数>田间出苗率>单穗产量;父本恢 复系平均优势的组 合占比表现为:单株产量、基本苗成穗数>收获穗数>株高>基本苗成穗数>小区产量>单穗产量>田 间出苗率,说明三系小麦杂交组 合中普遍存在产量和 产量性状杂种优势,杂交组 合的单株产量、收获穗数、 基本苗成穗数的优势组 合占比较多,其中单株产量和 基本苗成穗数杂种优势的 平均值均大于 20%,72 个组 合中有 60%以上的组 合小区产量平均优势(4.44%~ 8.56%)超过两个亲本。株高在平均母本优势中均表 现出最高的正向优势(31.7%),在平均父本优势和平均 中亲优势中正向组 合也最多,说明杂交小麦株高的 杂种优势是普遍存在的。杂交组 合田间出苗率和单穗 产量的平均父本优势和平均中亲优势均为负值,说明 杂交组 合的田间出苗率受父本影响较大。

2.2 配合力效应

2.2.1 配合力方差分析

对 17 个亲本配置的 72 个杂交组 合的 7 个性状配 合力进行方差分析,区组间除了收获穗数、单株产量和 株高存在非处理因素上的显著差异,其余性状均不存

在显著差异;各性状在组 合间均存在极显著差异,说明 各性状的差异主要是遗传差异造成的(表 2)。配合力 方差分析表明,7 个性状在父本和母本的 GCA 均达极 显著水平,父母本互作 SCA 除了株高和小区产量差异 不显著,其余性状均达极显著水平。

2.2.2 亲本主要性状 GCA 效应

小区产量是最重要的目标性状,其余性状是次级 性状,目标性状和次级性状的 GCA 多为正效应的是 好亲本。由表 3 可以看出,父本恢复系小区产量 GCA 效应值列前 4 位的是 R9、R3、R2 和 R4,母本不育系小 区产量 GCA 列前 3 位的是 A8、A7 和 A6,它们的次级 性状的 GCA 也有较高的正效应。72 个组 合中小区产 量位列前 4 位的分别是 A8×R2、A8×R1、A7×R9 和 A8×R4。由此可以看出,亲本多个性状 GCA 有较高 的正效应,它们之间配制杂交组 合,容易产生籽粒产量 的杂种优势。

小麦株高是杂种优势显著的性状。育种中要求亲 本株高 GCA 效应为负值,配制杂交组 合可获得植株 较低的后代。由表 3 可看出,父本恢复系 R6、R9、R3 株高 GCA 为负值,其中 R9 和 R3 是前述的好亲本。 母本不育系 A3、A4、A2、A1 的株高 GCA 为负效应,

表 1 72 个 F₁ 杂交组 合 7 个性状的杂种优势表现
Table 1 Heterosis in seven traits of 72 F₁ hybrid wheat crosses

性状	平均母本优势			平均父本优势			平均中亲优势		
	平均值/ %	变异系数/ %	优势组 合 占比/%	平均值/ %	变异系数/ %	优势组 合 占比/%	平均值/ %	变异系数/ %	优势组 合 占比/%
出苗率	1.45	985.5	55.76	-4.52	216.8	29.4	-1.00	1 063.0	51.9
收获穗数	13.34	214.4	63.40	10.28	219.8	76.9	14.96	121.4	76.9
成穗数	22.56	140.5	71.10	20.22	121.7	77.1	21.22	93.0	84.6
单穗产量	5.28	702.7	51.90	-4.12	497.6	35.4	-1.71	1462.6	40.4
株高	31.70	667.8	100.00	7.76	157.2	67.1	18.10	178.5	96.1
单株产量	20.01	183.4	71.20	23.10	155.4	77.1	21.39	159.3	73.0
小区产量	8.56	311.9	69.20	4.44	540.5	60.4	8.25	300.4	69.2

表 2 7 个性状的基因型和配合力方差分析
Table 2 Analysis of variance for genotype and combining ability for seve traits

变异来源	自由度	出苗率	收获穗数	成穗数	单穗产量	株高	单株产量	小区产量
区组	1	0.469	27.3*	4.7	0.153*	3.500*	6.3	2.60
组 合	71	117.300**	121.2**	1 797.7**	19.600**	2 241.700**	5 499.9**	4 916.90**
母本	7	2.160**	2 190.0**	1 146.1**	383.600**	1 082.000**	2 820.0**	15.65**
父本	8	4.030**	9 104.0**	821.3**	171.800**	2 180.000**	1 439.0**	2.68**
母本×父本	56	265.100**	8 244.1**	232.2**	29.900**	1.029	428.7**	0.38

注:“*”表示 $p<0.05$ 差异显著;“**”表示 $p<0.01$ 差异极显著。

表 3 亲本性状 GCA 效应值
Table 3 GCA effects of parents traits

亲本	收获穗数	单株产量	单穗产量	出苗率	成穗数	株高	小区产量
R1	33.3	−0.120	0.040	−0.80	0.003	4.01	0.058
R2	204.1	0.040	0.000	−2.40	0.170	2.57	0.080
R3	−10.5	0.960	0.260	−1.50	−0.160	−1.10	0.106
R4	121.0	0.860	0.420	1.60	−0.760	0.30	0.040
R5	35.2	−0.930	−0.230	0.10	−0.060	−0.80	−0.169
R6	111.1	−0.460	−0.080	0.36	0.060	−3.90	−0.004
R7	203.1	−0.002	−0.050	5.30	0.350	−0.40	0.055
R8	−126.4	−1.320	−0.310	1.30	−0.040	1.50	−0.270
R9	46.3	0.970	−0.090	2.40	0.460	−2.20	0.105
A1	−97.2	−0.980	0.100	3.10	−0.410	−1.80	−0.019
A2	9.8	0.450	−0.110	−0.20	0.190	−3.50	0.007
A3	−145.2	−0.950	−0.410	−15.90	0.190	−9.80	−0.529
A4	−129.9	0.450	0.060	2.30	−0.750	−3.50	−0.304
A5	46.6	0.240	0.060	3.40	−0.078	8.00	0.094
A6	73.1	0.250	−0.004	1.20	0.210	0.90	0.139
A7	23.6	0.730	0.110	−2.37	0.290	1.60	0.167
A8	164.5	1.740	0.180	3.50	0.340	8.16	0.450

但是这些不育系的小区产量 GCA 效应值多为负值，最终小区产量优势不佳，应该继续选育目标性状 GCA 为较高正效应而株高性状 GCA 为负效应的不育系。

2.2.3 杂种优势分析

为了进一步了解杂交组合 F₁ 代各性状的杂种优势表现，分析不同亲本对 F₁ 杂交组合杂种优势的影响(表 4)，2 个双亲配制 F₁ 杂交组合的株高在平均父本优势和平均中亲优势中均表现正值，说明株高在杂交后代中表现出较强的杂种优势。R1、R2 和 R4、R9 等 4 个父本小区产量的平均中亲优势和平均父本优势较高，A1、A2、A5、A7 等 4 个母本的小区产量平均中亲优势和平均母本优势方面表现出强的杂种优势。杂交种收获穗数优势对后期产量影响是较大的，R2、R3、R5 和 R7 等 4 个父本收获穗数表现出强的杂种优势，母本中 A1、A4、A6 和 A8 表现出较强的杂种优势。因此，在杂交小麦组合配制过程中，需要分析父本和母本的优势特点进行优势互补，有利于获得杂种优势更强的杂交组合。

2.3 杂种优势和配合力之间的关系

为进一步了解杂种优势与配合力的关系，根据小区产量的杂种优势高低，分别取前 10 位强优势组合和

后 10 位弱优势组合进行分析，结果(表 5)表明，产生强优势组合的 3 种类型：1) 双亲具有较高的 GCA 和 SCA 效应(如 A8/R2，A8/R9，A8/R1)；2) 亲本之一的 GCA 和 SCA 较高，则小区产量也较高(如 A8/R4，A8/R6)；3) 亲本的小区产量 GCA 较高，SCA 不高，则杂交组合的产量也较高(如 A8/R3)，这个组合的双亲小区产量 GCA 分别为 0.45 和 0.106，SCA 效应为 −0.05，杂交组合小区产量为 2.23 kg 排位第 8。纵观后 10 位的弱优势组合亲本之一 GCA 或 GCA 之和及 SCA 绝大多数组合为负值。

对 72 个 F₁ 杂交组合小区产量的杂种优势值与双亲 GCA 值和组合 SCA 值的相关性分析表明，中亲优势、母本优势、父本优势与父本 GCA 值、母本 GCA 值和父本与母本 GCA 值之和呈显著正相关，中亲优势与父本与母本 GCA 值之和呈极显著正相关，父本和母本的 GCA 相关性大于 SCA 相关性(表 6)，说明杂交组合双亲的 GCA 值对杂交组合杂种优势的影响较大，在配制组合时亲本性状 GCA 值的参考价值大于 SCA 值。由此可见，对于强优势组合的亲本选择，双亲之一 GCA 或双亲 GCA 之和为正值且相对较大特别重要。

表 4 亲本配制杂交组合 F₁ 代各农艺性状的杂种优势分析
Table 4 Heterosis analysis of agronomic characters in F₁ hybrid crosses

父本	出苗率		收获穗数		单株产量		株高		小区产量	
	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势
R1	-2.58	-7.42	-2.62	1.53	25.86	36.52	18.59	10.03	16.59	18.33
R2	-4.0	-6.29	17.25	16.93	14.33	11.49	20.84	8.14	21.60	25.75
R3	-5.37	-9.25	6.84	16.82	35.28	38.37	20.85	8.14	9.71	4.81
R4	-2.58	-7.42	-2.62	1.53	39.48	50.49	23.57	15.76	12.01	11.34
R5	0.12	-0.97	16.91	20.82	-3.38	-7.34	21.76	15.76	-6.37	-11.79
R7	1.93	0.12	30.27	44.86	-2.95	-4.21	13.61	0.32	0.87	-1.61
R8	4.91	3.10	3.41	-0.06	-19.48	-15.45	14.71	0.20	-20.86	-24.66
R9	6.16	4.18	3.40	-14.52	-19.49	-15.45	17.79	7.55	12.76	24.79

母本	出苗率		收获穗数		单株产量		株高		小区产量	
	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势	平均中亲优势	平均父本优势
A1	12.5	25.22	9.95	21.41	26.09	49.05	24.02	42.98	33.39	43.01
A2	-5.84	-8.57	20.76	-6.11	63.31	16.31	22.49	45.66	11.45	34.09
A3	-23.44	-23.39	-0.99	-1.04	1.93	-3.52	10.41	32.50	-32.11	-33.95
A4	3.25	6.67	20.86	68.24	-10.18	-8.37	22.81	48.55	-9.16	-2.81
A5	0.67	-0.86	19.72	0.89	20.07	17.42	16.07	21.69	14.05	8.68
A6	-0.33	1.84	21.25	19.19	13.73	6.23	13.25	26.87	6.84	2.85
A7	-6.79	-6.44	-0.18	-15.29	40.89	28.60	17.50	15.10	12.21	15.25
A8	3.34	7.05	22.62	14.49	21.26	-6.59	21.33	24.59	13.56	-0.75

表 5 10 个强、弱优势组合的小区产量及其配合力
Table 5 Combining ability and grain yield per plot for 10 crosses with higher heterosis and 10 crosses with lower heterosis

组合	强优势组合					组合	弱优势组合				
	小区产量/kg	SCA	GCAF	GCAM	GCAF+GCAM		小区产量/kg	SCA	GCAF	GCAM	GCAF+GCAM
A8/R2	2.42	0.170	0.450	0.080	0.530	A4/R4	1.24	-0.207	-0.304	0.040	-0.264
A8/R1	2.36	0.136	0.450	0.058	0.508	A3/R7	1.23	-0.008	-0.530	0.055	-0.474
A7/R9	2.32	0.337	0.167	0.105	0.272	A3/R4	1.19	-0.040	-0.530	0.040	-0.489
A8/R4	2.32	0.113	0.450	0.040	0.490	A6/R8	1.15	-0.436	-0.004	-0.270	-0.274
A8/R9	2.30	0.025	0.450	0.105	0.555	A4/R5	1.15	-0.093	-0.310	-0.169	-0.473
A8/R8	2.29	0.375	0.450	-0.270	0.180	A3/R2	1.12	-0.150	-0.530	0.080	-0.449
A8/R6	2.28	0.123	0.450	-0.004	0.446	A4/R8	1.08	-0.058	-0.310	-0.270	-0.574
A8/R3	2.23	-0.050	0.450	0.106	0.556	A3/R1	1.05	-0.193	-0.530	0.058	-0.471
A6/R6	2.12	0.260	0.139	-0.004	0.135	A3/R3	1.04	-0.257	-0.530	0.556	0.027
A6/R7	2.11	0.200	0.139	0.055	0.194	A3/R6	0.87	-0.308	-0.530	-0.004	-0.533

注:SCA 为组合的特殊配合力效应;GCAF 为母本的一般配合力效应;GCAM 为父本的一般配合力效应;GCAF+GCAM 为双亲一般配合力之和。下同。

表 6 杂种优势与 GCA 与 SCA 的相关性
Table 6 Correlation of heterosis with GCA and SCA

杂交优势	SCA	GCAM	GCAF	GCAM+GCAF
中亲优势	0.024 *	0.798 *	0.356 *	0.820 **
母本优势	0.361 *	0.761 *	0.537 *	0.641 *
父本优势	0.130 *	0.270 *	0.440 *	0.234 *

注:“*”表示显著相关;“**”表示极显著相关。

2.4 杂种优势群划分

2.4.1 根据亲本 GCA 划分杂种优势群

根据 17 个亲本 6 个农艺性状的 GCA 效应值,进行系统聚类分析,结果(图 1)表明,在距离阈值 10 处可将 17 份亲本聚类为四类:第一类包括 A1、R3、R8;

第二类包括 A2、A7、R1、R5、R6、A6、R7、A5、R2;第三类包括 A8、R9;第四类包括 A4、R4、A3。对照看表 5 中排位前 10 的强优势组合 A8/R2、A8/R1、A8/R4、A8/R6 中,父本 R2、R1、R4、R6 的遗传距离与母本 A8 的相差较远,A7/R9 间的遗传距离也相差较远;A4、

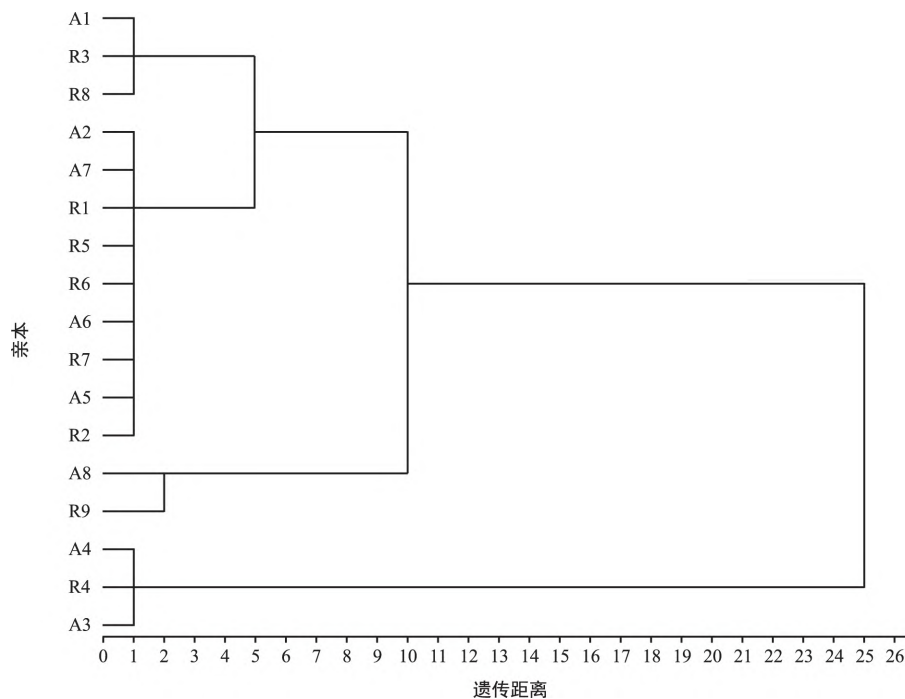


图 1 根据亲本 6 个性状的 GCA 对 17 份小麦亲本的聚类分析
Fig.1 Cluster analysis of the 17 wheat parents based on the GCA of 6 traits

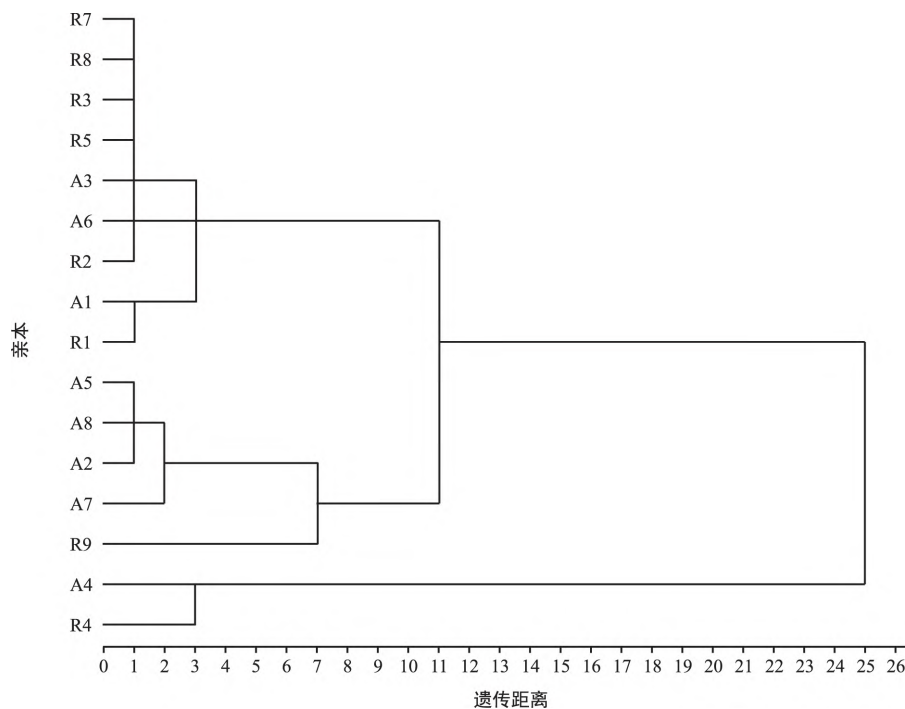


图 2 根据亲本 6 个性状值对 17 份小麦亲本的聚类分析
Fig.2 Cluster analysis of the 17 wheat parents based on the performance of 6 traits

R4、A3 遗传距离最近, A3/R4、A4/R4 进行组配后, 没有出现强优势组合。强优势杂交组合 A6/R6、A6/R7、A8/R9 的两个亲本虽然分别在同一类群中, 但是仍然表现出较强的优势。10 个强优势组合中有 7 个亲本都是来自不同类群, 其中有 2 个组合来自第二类群, 有 1 个组合来自第三类群。因此, 配合力遗传距离远的亲本可能出现强优势杂交组合的几率较大。也不排除两个遗传距离近的亲本杂交产生强优势组合, 具体原因尚待研究。

2.4.2 根据亲本性状表现划分优势群

根据 17 个亲本的小区产量、收获穗数、出苗率等 6 个性状平均表现值进行系统聚类分析, 结果(图 2)表明, 在距离阈值 7 处可将 17 个亲本划分为五类: 第一类包括 R7、R8、R3、R5、A6、R2; 第二类包括 A1、R1; 第三类包括 A5、A8、A2、A7; 第四类包括 R9; 第五类包括 A4、R4。对照表 5 的 10 个强优势组合中有 9 个都是来自不同类群, 仅有 1 个组合来自于第 1 类群。在表 5 的 10 个强优势组合中, 亲本来自不同类群(遗传距离较远)的组合, 亲本中至少有一个亲本的单个性状表现出中亲杂种优势(表 4), 如 A8/R2 的双亲在出苗率中亲杂种优势上有较大差异(3.34%和-4.0%), A8/R9 的双亲单株产量方面中杂种优势有显著差异(21.26%和-19.49%)等, 从聚类性状上可以看出, 性状表型距离较远的两个亲本同一性状之间的优势互补也可以在后代中表现出较强的杂种优势。

3 讨论

杂交小麦具有普遍的杂种优势, 但是杂种优势在 15% 以上的组合较少, 和玉米、水稻一样可以通过不断改良不育系和恢复系, 最后产生杂种优势强的后代^[9]。王小亮等^[10]研究发现, 杂交小麦大部分性状的平均中亲优势均表现为正向优势。在本研究中, 所有组合的 7 个性状母本优势均为正值, 父本优势和中亲优势中正向组合也表现最多, 说明所有杂交组合在多个性状中较亲本表现出杂种优势, 仅田间出苗率和单穗产量的父本优势和中亲优势平均值均为负值, 说明杂种组合田间出苗率和单穗产量较亲本的平均杂种优势不强。如以周麦 32A 为母本配制的所有杂交组合田间出苗率平均值为 67.39%, 远低于亲本及所有杂交组合 F₁ 代出苗率的平均水平。因此, 在杂交组合亲本选配过程中, 应选择杂交组合田间出苗率高的亲本作为骨干亲本, 进行强有优势组合的配制, 使 F₁ 代单株分蘖成穗能力表现出强的杂种优势, 在杂交小麦播种中适当降低播量, 减少种子成本。

配合力分析被认为是鉴定杂种优势群的有效技

术, 通过不同亲本间双列杂交组配, 了解亲本配合力优势以及后代杂种优势, 对亲本不同性状间的配合力效应值进行聚类分析, 划分亲本之间的亲缘关系, 对于组配强优势杂交组合具有更重要的意义。陈向东等^[11]研究发现, 强优势组合的双亲 SNP 遗传距离相对较远, 遗传距离与 GCA、SCA 与中亲优势在排名前 10% 的组合中分别有 35.71% 和 61.90% 组合一致, 这与本研究中用亲本各性状的 GCA 进行聚类分析得到的结果相一致。说明 GCA 值与遗传距离有相关性, GCA 值越大出现强优势杂交组合的概率越大, 这与王汉霞等^[6]研究结果相一致; 通过杂种优势与 GCA 和 SCA 相关性分析得到, GCA 和 SCA 与强优势杂交组合之间成显著正相关, 但是 GCA 的相关系数均大于 SCA, 说明在进行强优势杂交组合亲本选择时, 参考 GCA 的可信度大于 SCA, 这与 GCA 的上下代之间的遗传力大于 SCA 有关。

亲本间遗传差异与杂种优势密切相关, 根据亲本血缘关系, 可以划分为不同的杂种优势群^[12]。通过 GCA 值进行亲本遗传距离分析和杂种优势群划分, 陈晓文等^[13]利用普通小麦 8 个性状的 GCA 将 15 份亲本划分为五类。在本研究中, 将 17 份亲本的 6 个农艺性状的 GCA 值通过聚类分析, 分为 4 个类群, 10 个强优势组合中有 7 个亲本都是来自不同类群, 其中有 2 个组合来自第二类群, 说明强优势杂交组合来自于遗传距离较远的类群。由于亲本不同性状的 GCA 分析受多个因素影响, 最终影响亲本间遗传距离的准确性。目前, 分子标记分类法和全基因组预测法进行小麦杂种优势群的构建以及优势组合选配^[14]已经成为杂种优势群划分的主流技术, 对于提高杂交小麦优势组合出现的概率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 茹振钢, 冯素伟, 李淦, 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3388-3393.
- [2] 史秀秀, 毕晓静, 马守才, 等. 黄淮麦区杂交小麦亲本的杂种优势和配合力分析[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1111-1118.
- [3] 陈晓杰, 杨保安, 范家霖, 等. 小麦杂种优势利用研究进展[J]. 种子, 2022, 41(1): 66-73.
- [4] 刘杰, 黄学辉. 作物杂种优势研究现状与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(10): 1396-1404.
- [5] 杨爱国, 张世煌, 李明顺, 等. CIMMYT 和我国玉米种质群体的配合力及杂种优势分析[J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1329-1337.

- [6]王汉霞,马巧云,单福华,等.北部冬麦区杂交小麦亲本配合力及杂种优势分析[J].麦类作物学报,2021,41(9):1055-1062.
- [7]Adhikari A,Ibrahim A,Rudd J C,et al.Estimation of heterosis and combining abilities of U. S. winter wheat germplasm for hybrid development in Texas[J].Crop Science,2020,60(2):788-803.
- [8]Yu K,Wang H,Liu X,et al.Large-scale analysis of combining ability and heterosis for development of hybrid maize breeding strategies using diverse germplasm resources[J].Frontiers in Plant Science,2020,11:660.
- [9]赵昌平.中国杂交小麦研究现状与趋势[J].中国农业科技导报,2010,12(2):5-8.
- [10]王小亮,袁汉民,陈东升,等.宁夏春小麦新种质资源配合力和杂种优势研究[J].西北农业学报,2006,15(5):42-46.
- [11]陈向东,吴晓军,方方,等.基于 SNP 遗传距离和配合力的杂种优势预测[J].科学通报,2022,67(26):3221-3232.
- [12]湛蔚,袁梦琦,邢永忠.水稻杂种优势遗传与分子基础[J].科学通报,2016,61(35):3842-3849.
- [13]陈晓文,马守才,王志军,等.15 个化杂杂交小麦亲本配合力和杂种优势群的初步研究[J].麦类作物学报,2011,31(4):630-636.
- [14]朱献文,徐云碧,李健,等.小麦杂种优势群的创制[J].科学通报,2022,67(26):3152-3164.

(上接第 128 页)

- [3]夏广新,管孝君,张芝玉,等.盒子草的形态和组织结构研究[J].广西植物,1994,14(3):237-240.
- [4]高信芬,陈书坤,顾志建,等.绞股蓝属的染色体研究[J].云南植物研究,1995,17(3):312-316.
- [5]谢文娟.罗汉果及同科 15 属植物分子细胞遗传学研究[D].南宁:广西大学,2018.
- [6]Fu A,Wang Q,Mu J,et al.Combined genomic, transcriptomic, and metabolomic analyses provide insights into chayote (*Sechium edule*) evolution and fruit development[J].Horticulture Research,2021,8(1):35.
- [7]Liu L,Wang Q,Zhang Z,et al.MATO: An updated tool for capturing and analyzing cytotaxonomic and morphological data[J].The Innovation Life,2023,1(1):100010-1-100010-7.
- [8]李懋学,陈瑞阳.关于植物核型分析的标准化问题[J].武汉植物学研究,1985(4):297-302.
- [9]Stebbins G L.Chromosomal evolution in higher plants[M].London:Edward Aronold,1971.
- [10]Arano H.Cytological studied in subfamily Carduoideae (Compositae) of Japan IX.The karyotype analysis adn phylogenetic considerations on *Pertya* and *Ainsliaea*(2)[J].Botanic Magazine (Tokyo),1963,76(895):32-39.
- [11]Levan A,Fredga K,Sandberg A A.Nomenclature for centromeric position on chromosomes[J].Hereditas,1964,52(2):201-220.
- [12]Doležel J,Bartoš J A N.Plant DNA flow cytometry and estimation of nuclear genome size[J].Annals of botany,2005,95(1):99-110.
- [13]Doležel J,Greilhuber J,Suda J.Estimation of nuclear DNA content in plants using flow cytometry[J].Nature protocols,2007,2(9):2233-2244.
- [14]弓娜,田新民,周香艳,等.流式细胞术在植物学研究中的应用——检测植物核 DNA 含量和倍性水平[J].中国农学通报,2011,27(9):21-27.
- [15]宋亚男.黄梁木染色体制片体系的建立[D].广州:华南农业大学,2018.
- [16]曹世睿,张婷,王其刚,等.八个蔷薇属种质资源的核型分析[J].北方园艺,2021(13):85-90.
- [17]张露月,韩永华,李宗芸.草莓属的细胞遗传学研究进展[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2020,38(4):65-69.
- [18]李蕾嘉,万诚,席培宇,等.三种表型八步茶形态性状及染色体分析[J].种子,2023,42(1):141-146.
- [19]冯娜,李景环.野大麦的分子核型分析[J].种子,2021,40(8):15-19,24.
- [20]杨婷,王亚,张素勤,等.佛手瓜染色体核型分析[J].湖北农业科学,2019,58(23):215-217,226.
- [21]钱春桃,罗向东,陈劲枫,等.利用卷须制片确认佛手瓜染色体数目[J].南京农业大学学报,2002,25(2):113-114.
- [22]段一凡,李岚,杨欣欣,等.桂花及其近缘种倍性和基因组大小分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(5):47-52.
- [23]李皎,周鹏,张强,等.基于流式细胞术的北美冬青基因组大小测定[J].中国野生植物资源,2023,42(1):29-34.