

基于能源利用的高粱配合力和杂种优势分析

韩东倩^{1,2} 韩立朴³ 薛帅^{1,2} 尤明山¹ 谢光辉^{1,2*}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193;

2. 中国农业大学 生物质工程中心,北京 100193;

3. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心,石家庄 050021)

摘要 为选育生物量高的能源高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench),本研究对不同类型的15个高粱品种和4个不育系,采用NC II遗传交配设计,获得60个杂交组合,对地上部生物量等11个性状进行了配合力和杂交优势分析。结果表明:地上部生物量等10个性状的遗传是由加性和非加性基因共同控制,倒伏率主要受加性基因控制。父本NW-21、绿能3号和母本A₃晋梁5A地上部生物量的一般配合力效应值极显著高于对照,是适宜组配高生物产量能源高粱杂交种的父、母本材料。A₃三尺三A×绿能3号和A₃三尺三A×Saccaline是地上部生物量特殊配合力效应值较高的组合。杂交高粱中在天上部生物量上存在超标优势。

关键词 高粱; 生物量; 配合力; 杂种优势; 能源作物

中图分类号 S 514.032

文章编号 1007-4333(2012)01-0026-07

文献标志码 A

Combining ability and heterosis of sorghum for biomass energy

HAN Dong-qian^{1,2}, HAN Li-pu³, XUE Shuai^{1,2}, YOU Ming-shan¹, XIE Guang-hui^{1,2*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Biomass Engineering Center, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract One of the breeding objectives of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is to obtain high biomass yield. Fifteen different types of sorghum R lines and four male sterile lines were used to analyze the combining ability and heterosis of 11 traits with NC II genetic mating design mating scheme. The results indicated that lodging percentage was controlled additive effects; other traits such as aboveground biomass were contributable to both additive and non-additive effects. Those parental lines of NW-21, Lvngeng-3 and maternal parental line of A₃Jinliang-5A with higher general combining ability for the aboveground biomass were identified as potential parental materials for high biomass hybrid breeding program. The two crosses of A₃Sanchisan A × Lvngeng-3 and A₃Sanchisan A × Saccaline revealed significantly higher aboveground biomass than that of A₃Sanchisan A × Rio (check). Hybrids displayed over-standard heterosis in aboveground biomass.

Key words sorghum; biomass; combining ability; heterosis; energy crop

随着能源危机和环境危机日益严峻,生物质能成为最有潜力的可再生清洁能源^[1-2]。甜高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)因其生物产量高、含糖量高、耗水量少和抗逆性强等特点被认为是我国

最具潜力的能源作物之一^[3-4]。但是随着第二代生物乙醇技术的发展,生物产量成为衡量作物能源产量的重要指标。多年来育种家们通过三系杂交培育出优良杂交高粱^[5-6],而且杂交品种的农艺性状和品

收稿日期: 2011-07-25

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD07A04); 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(nyhyzx07-11)

第一作者: 韩东倩, 硕士研究生, E-mail: seia123@163.com

通讯作者: 谢光辉, 教授, 主要从事非粮能源植物研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

质性状均优于自交品种^[7]。了解和掌握高粱主要数量性状的配合力状况,对利用现有高粱种质资源选育杂交品种具有指导意义。有关高粱籽粒产量和含糖量的配合力方面已有很多报道^[8-13],但对各部分生物量的配合力报道很少。本研究通过对 15 个不同类型高粱品种和 4 个不育系的数量性状进行配合力分析,旨在筛选适合作为生物质原料的高粱亲本和优良杂交组合。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2010 年在中国农业大学涿州实验站

(39°28'N,115°51'E)进行。实验站所在地区属于温带大陆性季风气候,平均气温 12℃,年均降水量 550 mm;降水量最大月均为 7 和 8 月。

1.2 供试材料及试验设计

2009 年本试验以 A₃ 三尺三 A, A₃ 晋梁 5A、A₁ Tx623A 和 A₁ 7501A 为母本和 15 个恢复系为父本(表 1),采用 NC II 遗传交配设计组配了 60 个杂交组合。试验材料包括 60 个杂交组合、19 个亲本和 1 个对照品种(醇甜二号)。以 A₃ 三尺三 A 和丽欧为一般配合力分析的对照,以 A₃ 三尺三 A×丽欧为特殊配合力分析的对照,按 α 试验设计,每个处理设 3 次重复,每小区面积为 9 m²,4 行区,行长 3 m。

表 1 试验种质材料来源来源和类型

Table 1 Origins and types of the germplasm used

种质材料	原产国	提供单位	类型
可育父本			
12584	中国	中国农科院作物科学所	甜高粱
05206	中国	山西农科院高粱所	甜高粱
Brown Kaoliang	美国	USDA-ARS, PGRCU*	籽粒高粱
Er pitou	中国	USDA-ARS, PGRCU	甜高粱
MN-2907	美国	中国农科院作物科学所	甜高粱
NW-18	中国	由陕西民间收集	帚高粱
NW-21	中国	由甘肃民间收集	帚高粱
Saccaline	澳大利亚	USDA-ARS, PGRCU	甜高粱
San er sui	中国	USDA-ARS, PGRCU	帚高粱
Sumac	美国	USDA-ARS, PGRCU	甜高粱
X097	中国	山西民间	甜高粱
大牛尾	中国	USDA-ARS, PGRCU	帚高粱
丽欧	中国	中国农科院作物所	甜高粱
绿能 3 号	中国	北京绿能经济植物研究所	甜高粱
马子尾	中国	山东农科院作物所	籽粒高粱
雄性不育母本			
A ₁ 7501A	美国	山西农科院高粱所	不育系
A ₁ Tx623A	美国	中国农科院作物所	不育系
A ₃ 晋梁 5A	中国	山西农科院高粱所	不育系
A ₃ 三尺三 A	中国	山西农科院高粱所	不育系

注: * USDA-ARS, PGRCU 指美国农业部农业研究服务站和 Plant Genetic Resources Conservation Unit。

1.3 田间管理

2010 年 5 月 2 日以穴播方式播种,密度为 53 333

穴/hm²,行距为 0.75 m,株距为 0.25 m。播种前施用 72 kg/hm² N(尿素),60 kg/hm² P₂O₅(磷酸二氢铵),30 kg/hm² K₂O(硫酸钾)。拔节期追施 48 kg/

hm² N (尿素)和 30 kg/hm² K₂O(硫酸钾)。播种后立即喷施除草剂阿特拉津进行地面封盖。3~4叶期定苗,每穴留1株。全生育期不除分蘖。在拔节期施用吡喃丹一次。于4月29日和7月26日以漫灌方式对各试区浇水。在籽粒灌浆期套网袋防鸟食。各材料在其籽粒的成熟时取样收获,不结实的在霜前统一收获。

1.4 调查与取样

参照陆平的《高粱种质源描述规范和数据标准》^[14],调查每个小区的开花期、全生育期、株高、茎粗、主穗长、倒伏率和分枝数。每小区收获时随机选取7株收获地上部分整株,测定株高、茎粗和主穗长后,将叶从茎上剥离,分别测定茎鲜重、叶鲜重和穗鲜重。以四分法分别取茎、叶样带回实验室,105℃杀青30min,70℃烘干至恒重,测定含水量,计算茎、叶干重。果穗放入网袋,放入网室风干后脱粒称重,穗轴和枝梗在70℃烘箱烘干至恒重后计入茎干重。计算全株生物量时,以干重计,对籽粒按含水率为14%扣除水分。籽粒产量以风干重计产。

1.5 数据分析方法

按照NCⅡ原理和方法进行一般配合力和特殊配合力分析,并计算杂交优势。其中数据分析部分采用SAS 9.1和Excel完成。

母本一般配合力间差异显著性检验的差数标准误 $SED_f = \sqrt{2 \times Me / (m \times r)}$,父本一般配合力间差异显著性检验的差数标准误 $SED_m = \sqrt{2 \times Me / (f \times r)}$,组合特殊配合力差异显著性检验的差数标准误 $SED = \sqrt{2 \times Me / r}$ 。

式中:Me为试验误差的均方,m为恢复系数,f为不育系数,r为重复数。

$$\text{超标优势 SH} = [(F - X) / X] \times 100\%$$

式中:SH为超标优势,F为杂交表型值,X为对照的表型值。

2 结果与分析

2.1 各性状的方差分析

本试验80个材料11个性状的方差分析结果见表2。组合间各性状差异均达到极显著水平。母本间和父本间各性状也均达到显著水平。父本和母本互作的方差除倒伏率差异不显著外,其他10个性状均表现出极显著差异。表明这10个性状受加性和非加性效应共同影响,而倒伏率主要受加性基因控制。重复间全生育期、株高、茎干重、叶干重和地上部生物量也存在显著差异,说明5个性状受到环境的影响较大。

表2 各性状组合方差分析及其配合力方差分析

Table 2 Mean squares for variance analysis and combining ability analysis

变异来源	自由度	出苗- 开花期/d	全生 育期/d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗长/ cm	倒伏率/ %	分枝 数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒产量/ (t/hm ²)	地上部生物量/ (t/hm ²)
重复	2	2.7	7.5*	529.8*	1.5	0.8	575.3	0.8	4.3*	0.4*	0.1	15.8*
重复×区组	27	1.9	2.1	124.9	0.6	1.0	450.5	0.3	0.8	0.1	0.0	3.1
基因型	79	366.3**	430.9**	10 981.0**	8.6**	102.5**	1 792.3**	1.9**	45.5**	2.6**	3.0**	54.7**
组合	59	365.1**	382.7**	7 515.8**	5.9**	81.1**	1 631.5**	1.9**	44.2**	2.6**	3.3**	52.0**
母本	3	45.3**	130.0**	3 595.7**	6.3**	167.8**	4 264.8**	4.7**	76.1**	1.3**	26.9**	39.7**
父本	14	1 309.5**	1 278.6**	2 0371.0**	13.9**	245.8**	2 660.1**	3.7**	94.9**	5.1**	2.9**	106.5**
父本×母本	42	16.8**	28.3**	1 845.2**	2.7**	8.9**	992.9	0.8**	21.0**	1.8**	1.2**	29.4**
误差	80	2.1	3.8	109.1	0.5	0.8	779.7	0.3	0.8	0.1	0.1	1.9

注:*表示差异在0.05水平显著,**表示差异在0.01水平显著。下表同。

2.2 各性状的相关分析

本试验80个材料11个性状的相关分析结果见表3。全生育期、株高、茎粗、茎干重和叶干重均

与地上部生物量极显著相关,可以通过株高和茎粗性状指标来筛选品种。籽粒产量与分枝数极显著负相关。

表 3 11 个数量性状间相关分析

Table 3 Correlation analysis for the 11 different quantitative traits

	出苗- 开花期/d	全生育期 /d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗 长/cm	倒伏 率/%	分枝数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒产量/ (t/hm ²)	地上部生物 量/(t/hm ²)
出苗-开花期	1.00	0.97**	0.74**	0.32**	0.39**	-0.24*	-0.41**	0.62**	0.32**	0.07	0.57**
全生育期		1.00	0.69**	0.33**	0.38**	-0.24*	-0.34**	0.67**	0.39**	0.08	0.63**
株高			1.00	0.27*	0.51**	-0.17	-0.46**	0.64**	0.34**	0.08	0.59**
茎粗				1.00	0.31	-0.22*	0.16	0.31**	0.26*	-0.18	0.29**
主穗长					1.00	-0.24*	-0.40**	0.21	-0.04	0.04	0.17
倒伏率						1.00	0.04	-0.21	-0.1	0.11	-0.18
分枝数							1.00	0.02	0.2	-0.54**	0.05
茎干重								1.00	0.85	-0.19	0.99**
叶干重									1.00	-0.09	0.90**
籽粒产量										1.00	-0.17
地上部生物量											1.00

2.3 亲本一般配合力

15 个恢复系和 4 个不育系的 11 个性状一般配合力的效应值见表 4。虽然 NW-21 的分枝数和籽粒产量一般配合力效应值极显著低于丽欧,但全生育期、株高、茎粗、主穗长和地上部生物量的一般配合力效应值高于丽欧,说明 NW-21 可以作为能源高粱杂交育种的理想材料。绿能 3 号的全生育期、株高、籽粒产量和地上部生物量一般配合力均极显著高于丽欧,表明在选育能粮兼用高粱中可利用绿能 3 号。除 NW-21,其他的籽粒高粱和帚高粱的地上部生物量的一般配合力效应值为负值,且极显著

低于丽欧。

不育系 A₃ 晋梁 5A 的全生育期、株高、主穗长、茎干重和地上部生物量的一般配合力效应值比 A₃ 三尺三 A 高,达到极显著水平,表明 A₃ 晋梁 5A 可以作为能源高粱杂交育种的母本材料,从而培养出地上部生物量高的杂交种。而 A₃ 三尺三 A 株高、茎粗、叶干重和地上部生物量的一般配合力效应值为正值。由 A₃ 晋梁 5A 和 A₃ 三尺三 A 做母本的所有组合均不可育,籽粒产量的一般配合力效应值为负值。父本对照品种丽欧和母本对照品种 A₃ 三尺三 A 的地上部生物量一般配合力效应值也为正值,

表 4 各性状的一般配合力(GCA)效应分析

Table 4 Estimates of general combining ability effects of parent lines for different traits

亲本	出苗- 开花期/d	全生育 期/d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗长/ cm	倒伏 率/%	分枝数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒产量/ (t/hm ²)	地上部生物 量/(t/hm ²)
父本											
12584	-1.22*	1.41	-21.34	-0.10	-4.52**	-12.16	0.43	1.10**	0.41*	0.50*	1.59**
5206	-0.84	3.16**	-17.12	0.73**	-1.85**	-5.74	0.48	2.50	0.56	0.92**	3.04
Brown Kaoliang	-8.30**	-10.04**	-31.69*	0.85**	-4.42**	5.76	0.10**	-5.12**	-1.01**	0.64**	-6.49**
Er Pitou	-11.80**	-15.75**	-32.00*	-1.15**	0.24**	-0.74	0.11**	-4.49**	-1.05**	0.00	-5.65**
MN-2907	-12.09**	-13.17**	-49.48**	-3.36**	-10.44**	26.18**	0.67	-2.08**	-0.42**	-0.90**	-2.61**
NW-18	-7.34**	-8.13**	-23.96	-1.11**	3.97**	28.43**	-0.06**	-3.64**	-0.38**	0.25	-3.94**
NW-21	42.28**	36.58**	184.72**	3.20**	12.93**	-21.99	-1.33**	8.64**	0.50	-0.54**	8.63**

续表

亲本	出苗- 开花期/d	全生育 期/d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗长/ cm	倒伏 率/%	分枝数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒产量/ (t/hm ²)	地上部生物 量/(t/hm ²)
Saccaline	-2.26**	-1.84**	-15.09	0.51*	-1.64**	19.68*	0.64	2.98	0.79	-0.57**	4.03
San Er Sui	-10.38**	-11.88**	-38.43**	-0.65	1.27**	-20.74	-0.20**	-4.22**	-0.78**	-0.33**	-5.02**
Sumac	-6.09**	-7.25**	-48.35**	0.12	-4.11**	13.76	0.48	-2.14**	-0.43**	-0.56**	-2.42**
X097	22.45**	29.54**	89.75**	0.24	6.36**	-20.32	-0.97**	3.17*	0.10**	0.37	3.31
大牛尾	-8.05**	-7.34**	1.90**	0.20	6.39**	2.18	-0.65**	-3.77**	-1.29**	0.09	-5.02**
丽欧	-0.01	0.75	-20.80	-0.17	-2.97	-6.99	0.70	2.43	0.72	0.18	3.17
绿能3号	10.53**	11.75**	42.63**	-0.41	-1.56**	7.18	-0.58**	5.46**	2.01**	0.65**	7.97**
马子尾	-6.88**	-7.79**	-20.73	1.08**	0.35**	-14.49	0.17*	-0.81**	0.27**	-0.70**	-0.58**
SED _m	0.59	0.80	4.26	0.29	0.37	11.40	0.22	0.37	0.13	0.13	0.56
母本											
A ₁ 7501A	-1.09	-2.57**	-9.56**	-0.16**	-2.81**	13.54**	-0.31**	-1.99**	-0.21**	0.77*	-2.45**
A ₁ Tx623A	0.42**	1.08**	-12.70**	-0.10**	3.71**	-3.34	-0.33**	-1.25**	-0.30**	1.02**	-1.40**
A ₃ 晋梁5A	1.70**	2.84**	17.86**	-0.49**	0.74**	0.86*	0.36	2.11**	0.15**	-0.90	2.41**
A ₃ 三尺三A	-1.03	-1.35	4.41	0.75	-1.63	-11.06	0.29	1.13	0.36	-0.90	1.44
SED _f	0.31	0.41	2.20	0.15	0.19	5.89	0.12	0.19	0.07	0.07	0.29

注:父本以丽欧为对照,母本以A₃三尺三A为对照,SED为差数标准误。

表现出较高的一般配合力。

2.4 杂交组合特殊配合力

特殊配合力效应反映的是杂交组合中非加性基因效应,这种效应不能稳定地遗传。表5列出了地上部生物量特殊配合力效应值高的15个组合和低的15个组合,总的来看,除倒伏率外,其它性状有很多组合的特殊配合力效应存在显著差异。A₃三尺

三A×绿能3号的茎干重、叶干重和地上部生物量的特殊配合力效应值最高,达到极显著水平。A₃三尺三A×Saccaline的茎干重、叶干重和地上部生物量的特殊配合力效应值仅次于A₃三尺三A×绿能3号。因为试验中A₃不育系组配的所有组合均不育,所以籽粒产量的特殊配合力效应值不能反映籽粒产量的真实情况。

表5 部分组合各性状的特殊配合力(SCA)效应

Table 5 Estimates of specific combining ability effects of selected crosses for different traits

组合	出苗- 开花期/d	全生 育期/d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗长/ cm	倒伏 率/%	分枝数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒 产量/ (t/hm ²)	地上部 生物量/ (t/hm ²)
A ₁ 7501A×5206	-1.35	-5.55*	-18.19**	0.74	-0.43	28.54	-0.26	-3.36**	-0.33*	-0.01	-3.22**
A ₁ 7501A×Brown Kaoliang	2.24	5.16**	29.03	0.02	0.91	-1.29	0.03	3.08**	1.47**	0.57**	3.71**
A ₁ 7501A×ER PITOU	-0.81	-1.64	19.33	0.33	1.08	28.54	-0.39	1.30	0.23*	0.22	2.02
A ₁ 7501A×NW-18	1.15	2.57**	22.72	0.19	0.81	-8.96	0.35	2.35**	1.31**	0.59**	4.02**
A ₁ 7501A×NW-21	1.19	3.03**	-8.53**	0.80	-1.91**	-13.54	0.30	4.27**	0.94*	-0.97**	2.72*
A ₁ 7501A×Saccaline	0.99	-0.05	-39.44**	-0.74**	-1.43**	-3.54	0.39	-2.80**	-0.62**	-1.06**	-3.50**
A ₁ 7501A×X097	-5.87**	-13.43**	14.06	-0.66**	1.20	-15.21	-0.01	-2.09**	-0.67**	0.45*	-2.39*
A ₁ 7501A×丽欧	-0.97	-0.64	-16.58**	-0.81**	-3.96**	3.12	-0.29	-2.75**	-0.23	-0.05	-2.63*
A ₁ 7501A×绿能3号	-2.31	-2.30	-52.80**	0.32	-0.13	7.29	0.11	-6.45**	-1.62**	0.76**	-8.22**
A ₁ 7501A×马子尾	2.24	2.41**	10.42	0.91	-0.25	-20.04	0.00	4.26**	0.61	-0.18	5.15**
A ₁ Tx623A×12584	3.02*	2.04**	9.24	-1.07**	-0.67*	-6.49	-0.45	2.71**	1.01**	0.99**	3.76**

续表

组 合	出苗- 开花期/d	全生 育期/d	株高/ cm	茎粗/ cm	主穗长/ cm	倒伏 率/%	分枝数	茎干重/ (t/hm ²)	叶干重/ (t/hm ²)	籽粒	地上部
										产量/ (t/hm ²)	生物量/ (t/hm ²)
A ₁ Tx623A×NW-21	-9.02**	-0.46	-25.31**	-3.51**	3.97**	3.34	0.36	4.18**	1.46**	-0.11	6.07**
A ₁ Tx623A×Saccaline	2.04	5.29**	8.70	-0.79**	-1.48**	13.34	0.16	-4.76**	-1.24**	-0.08	-5.20**
A ₁ Tx623A×SAN ER SUI	-0.17	0.67	-120.76**	2.78**	-2.19**	2.09	1.84**	-2.26**	-0.73**	-1.59**	-3.19**
A ₁ Tx623A×大牛尾	-1.71	-3.21	11.75	0.51	1.10	15.84	-0.18	1.90**	0.40	-0.19	2.24
A ₁ Tx623A×绿能 3 号	0.92**	-0.29	49.78**	-0.36*	0.49	-5.82	-0.43	-3.47**	-1.22**	0.54**	-5.25**
A ₃ 晋梁 5A×5206	-0.09	2.54**	-0.82*	0.36	1.99	-17.11	-0.12	2.43**	-0.09	-0.92**	2.15*
A ₃ 晋梁 5A×NW-18	-0.09	-0.67	-10.13**	-0.40*	-2.16**	12.06	-0.21	-3.79**	-1.06**	-0.25	-5.13**
A ₃ 晋梁 5A×X097	-1.18	0.66	-26.55**	-1.04**	0.04	-2.52	-0.20	6.07**	1.28**	-0.37	7.12**
A ₃ 晋梁 5A×丽欧	-2.49*	-2.05	6.57	0.72	2.82**	-15.86	-0.25	3.74**	0.24	-0.18	3.76**
A ₃ 晋梁 5A×马子尾	-1.68	-0.01	-10.36**	-1.90**	-4.01**	19.98	-0.12	-2.42**	0.00	0.70**	-2.57*
A ₃ 三尺三 A×12584	-2.46*	-4.02	-9.73**	1.41	0.72	17.89	0.65	-3.12**	-0.88**	-0.50	-4.09**
A ₃ 三尺三 A×5206	0.56	2.73**	17.99	0.23	0.64	-5.19	1.21	2.31**	0.54	-0.92**	2.86*
A ₃ 三尺三 A×Brown Kaoliang	-0.02	1.43**	-17.94**	-0.17*	0.88	-16.69	0.27	-2.88**	-1.62**	-0.64	-4.03**
A ₃ 三尺三 A×NW-21	7.44**	0.81*	5.36	1.77	-1.68**	11.06	-0.30	-7.22**	-1.92**	0.54**	-8.63**
A ₃ 三尺三 A×Saccaline	-1.27	1.73**	11.59	0.64	1.03	-12.28	-0.26	5.83**	1.61**	0.57**	7.18**
A ₃ 三尺三 A×SAN ER SUI	-1.48	-0.73	24.15	-1.53**	-0.63*	9.81	-1.00**	1.93**	0.91*	0.33*	2.85*
A ₃ 三尺三 A×X097	2.88*	7.35**	-1.74*	1.36	-1.30**	9.39	0.25	-3.99**	-1.04**	-0.37	-5.07**
A ₃ 三尺三 A×丽欧	-0.06	-2.36	20.02	0.99	0.82	1.06	0.34	-0.05	0.30	-0.18	0.23
A ₃ 三尺三 A×绿能 3 号	-4.50**	0.14	-13.19**	0.37	-0.94*	-18.11	0.19	10.41**	3.61**	-0.65	13.51**
A ₃ 三尺三 A×马子尾	0.31	-0.98	-22.12**	0.68	-0.18	4.22	-0.17	-2.73**	-0.77**	0.70**	-3.46**
SED	1.18	1.59	8.53	0.58	0.73	22.80	0.45	0.73	0.26	0.26	1.13

注：组合 A₃ 三尺三 A×丽欧为对照，SED 为差数标准误。

2.5 杂交组合各性状的超标优势的表现

本研究的杂交高粱中只有茎干重和地上部生物量 2 项性状平均超标优势为正值(表 6)。茎干重的

杂交优势幅度为 -72%~200.8%，正优势占 46.7%，负优势占 58.3%。地上部生物量的杂交优势幅度为 -67.6%~181.8%，正优势占 40.0%，负

表 6 60 个杂交组合各性状的超标优势

Table 6 Standard heterosis value for different traits in 60 hybrids

性 状	平均优势/%	幅度/%	优势分布次数		正负优势/%	
			F>SH	F<SH	正	负
出苗-开花期	-7.9	-24.4~48.3	11	49	18.3	81.7
全生育期	-9.2	-25.4~19.6	10	50	16.7	83.3
株高	-4.3	-56.1~65.5	13	47	21.7	78.3
茎粗	-0.5	-25.8~31.3	25	35	41.7	58.3
主穗长	-5.6	-48.0~61.8	21	39	35.0	65.0
茎干重	13.3	-72.0~200.8	28	32	46.7	53.3
叶干重	-6.3	-67.1~153.2	21	39	35.0	65.0
籽粒产量	-67.5	-100.0~70.0	6	54	10.0	90.0
地上部生物量	5.8	-67.6~181.0	24	36	40.0	60.0

注：F、SH 分别表示杂交表型值、超标亲值。

优势占 60.0%。而其他 7 项性状中,多数组合基本上是负超标优势,即没有突破对照醇甜 2 号。超标优势最高的是茎干重为 13.3%,最低的是籽粒产量为 -67.5%。而籽粒产量的超标优势幅度为 -100.0%~70%,正优势占 10.0%,负优势占 90.0%。

3 讨论

通过配合力分析得到,除倒伏率父母本的互作效应不显著,其他 10 个性状的父本,母本和父母本的互作效应均达到显著水平。这表明倒伏率受加性基因控制,所以在选育抗倒伏品种时,应重点考虑亲本自身的抗倒伏能力。而其他 10 个性状由加性基因和非加性基因共同控制。这个结果和前人研究结论相同,Kenga^[7]和 Makanda^[12]对高粱籽粒产量、主穗长、开花期和株高等性状配合力分析,认为加性基因和非加性基因共同影响性状表现。全生育期、株高、茎粗、茎干重和叶干重均与地上部生物量极显著相关,可以通过株高和茎粗性状指标来筛选品种。

本研究中 A₃ 三尺三 A 和 A₃ 晋梁 5A 属于高粱 A₃ 细胞质雄性不育系。由它们组配的所有组合均不育。但 A₃ 三尺三 A 和 A₃ 晋梁 5A 的地上部生物量的一般配合力效应值为正值,说明高粱 A₃ 细胞质雄性不育系可以作为高粱能源杂交育种的理想的不育系材料。高粱不育系育种中,育种家考虑父本对不育系的恢复力,而大多数高粱品系对 A₃ 细胞质雄性不育表现保持^[15-16]。所以 A₃ 细胞质雄性不育系多用于不以籽粒产量为育种目标的高粱育种,例如饲草高粱^[16]。作为能源用高粱,地上部生物量是筛选品种的重要指标,可以选择抗逆性强的 A₃ 细胞质雄性不育系。同时,不育杂交品种的光合产物不转移到籽粒中,可提高生物产量^[16]。而且不育杂交品种抗倒伏^[17],还可以减少高粱前期套袋^[17]和收获时去穗的工作成本,有利于能源高粱产业化。

杂交高粱中在天上部生物量和茎干重上存在超标优势。由于本研究中亲本材料有限,所以其他 7 性状平均优势为负值。在今后的研究中,采用更多的亲本材料,有利于选育出更好的能源高粱品种。

参 考 文 献

- [1] Antonopoulou G, Gavala H N, Skiadas I V, et al. Biofuels generation from sweet sorghum: fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(1): 110-119
- [2] Demirbas A. Progress and recent trends in biofuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(1): 1-18
- [3] Tian Y S, Zhao L X, Meng H B, et al. Estimation of un-used land potential for biofuels development in (the) People's Republic of China [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(S1): 77-85
- [4] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y, et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111, (1/2), 55-64
- [5] 高士杰, 刘晓辉, 李继洪, 等. 我国粒用高粱育种现状及对策 [J]. *作物杂志*, 2006(3): 13-15
- [6] 程庆军, 张福耀, 平俊爱, 等. 高粱异胞质雄性不育研究进展与展望 [J]. *杂粮作物*, 2005, 25(1): 14-18
- [7] Kenga R, Alabi S O, Guptac S C. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 251-260
- [8] 张素萍. 高粱新的不育系与恢复系的综合遗传分析 [J]. *杂粮作物*, 2006, 26(1): 9-10
- [9] 张阳, 赵威军, 张福耀, 等. 新选甜高粱不育系和恢复系的配合力分析 [J]. *作物杂志*, 2010(5): 102-105
- [10] 吕鑫, 张福耀, 平俊爱, 等. 高粱主干恢复系主要农艺经济性性状配合力分析 [J]. *杂粮作物*, 2010, 30(4): 265-268
- [11] Makanda I, Tongoona P, Derera J. Combining ability and heterosis of sorghum germplasm for stem sugar traits under off-season conditions in tropical lowland environments [J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(2): 272-279
- [12] Makanda I, Tongoona P, Derera J. Combining ability and cultivar superiority of sorghum germplasm for grain yield across tropical low and mid-altitude environments [J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(1/2): 75-85
- [13] 曹文伯. 甜高粱茎秆糖锤度配合力的测定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2002, 3(4): 23-27
- [14] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [15] 卢庆善, 孙毅. 杂交高粱遗传改良 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2005
- [16] 程庆军, 张福耀, 田承华, 等. 高粱 A₃ 细胞质雄性不育的研究与利用 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 154-161
- [17] 邹剑秋, 王艳秋, 张志鹏, 等. A₃ 型细胞质能源用甜高粱生物产量、茎秆含糖锤度和出汁率研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(2): 8-13