

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01744

## 模拟干旱胁迫下不同甘蓝型油菜品种发芽能力的配合力与遗传效应分析

杨春杰 程 勇 邹崇顺 张学昆\* 郑普英 李桂英 杨 畅

(中国农业科学院油料作物研究所, 湖北武汉 430062)

**摘 要:** 选择 7 个干旱胁迫下发芽能力不同的甘蓝型油菜品种进行完全双列杂交, 将亲本及  $F_1$  代种子在 10% PEG 模拟干旱胁迫条件下发芽, 测定相对单株鲜重、相对茎长、相对成苗率、相对发芽率、相对发芽势和相对活力指数, 用 Griffing I 方法对发芽性状进行一般配合力(GCA)和特殊配合力(SCA)遗传分析。结果表明, 一般配合力方差在 42 个组合间各性状达到了极显著水平, 特殊配合力方差在 42 个组合间除了相对活力指数外的各性状也达到了极显著水平。其中, 中双 9 号上述 6 性状的一般配合力效应值最高分别为 0.0656、0.0708、0.1185、0.1048、0.1096 和 0.0861; 中双 6 号一般配合力效应虽然不高, 但其组合中双 6 号×西农长角和中双 6 号×中双 10 号的特殊配合力效应较高, 是耐旱性较强的组合。

**关键词:** 甘蓝型油菜; 种子; 模拟干旱胁迫; 耐旱性; 配合力分析; 双列杂交; 发芽

## Combining Ability and Genetic Effects of Germination Ability in Different *Brassica napus* L. Cultivar under Simulated Drought Stress

YANG Chun-Jie, CHENG Yong, ZOU Chong-Shun, ZHANG Xue-Kun\*, ZHENG Pu-Ying, LI Gui-Ying, and YANG Chang

(Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, Hubei, China)

**Abstract:** The rapeseed breeding for tolerance to drought is one of the most important ways to reduce yield loss from drought stress in autumn. Therefore, an experiment was conducted to estimate combining ability and heritability of drought tolerance during seed germination using complete diallel crossing design of seven cultivars. The germinating seeds of parents and  $F_1$  were treated with simulated drought stress in 10% PEG and grew for 7 d, then relative length of stem, relative fresh weight per plant, relative survival percentage, relative germination rate, relative germination energy, and relative vigor index were measured, general combining ability and special combining ability of germination traits were analyzed by Griffing I. The results showed that general combining ability was significantly different in six drought traits. And meanwhile special combining ability in five traits was significantly different except relative vigor index. Among 42 combinations, Zhongshuang 9 had the highest general combining ability effect values of six traits above which were 0.0708, 0.0656, 0.1185, 0.1048, 0.1096, and 0.0861, respectively. Although the general combining ability of Zhongshuang 6 was not very high, but the special combining ability of its combinations Zhongshuang 6 × Xinongchangjiao and Zhongshuang 6 × Zhongshuang 10 was higher. The combinations can be used in rapeseed breeding for drought tolerance.

**Keywords:** *Brassica napus* L.; Seed; Simulated drought stress; Drought tolerance; Combining ability; Diallel crossing; Germination

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA100106, 2006AA10Z1C2); 国家科技支撑计划项目(2006BAD07A04); 中国农业科学院油料作物研究所所长基金项目

作者简介: 杨春杰(1980–), 女, 辽宁铁岭人, 硕士研究生。E-mail: Ycj0729@163.com

\*通讯作者(Corresponding author): 张学昆(1968–), 研究员, 博士生导师, 从事油菜遗传育种研究。Tel: 027-86813983; E-mail: seedcq@263.net

Received(收稿日期): 2008-01-31; Accepted(接受日期): 2008-05-11.

我国油菜常年种植面积 730 万公顷, 总产量 1 190 万吨, 均占世界的 1/3, 居世界首位<sup>[1]</sup>。长江流域是我国油菜主产区, 虽然降雨充沛, 但全年降水并不均匀, 季节性干旱频繁发生。影响长江流域油菜生产的季节性干旱主要是秋旱和春旱, 其中秋旱对油菜生产影响最大<sup>[2-4]</sup>。据湖南省汉寿县 22 年的气象资料统计, 该县秋冬干旱共发生 10 次, 造成该县油菜播种面积显著减少, 播种期显著推迟, 油菜产量大幅下降。秋旱发生时一般正值油菜播种期, 长达 10~15 d 以上的干热天气导致气温高, 土壤水分蒸发量大, 轮作稻田耕作困难, 油菜出苗慢、出苗不整齐、基本苗少。严重干旱还导致播种期推迟, 播种面积下降, 区域总产减少 25%~32%。在干旱胁迫下, 还会加重油菜缺硼的发生程度和范围, 导致油菜花而不实<sup>[5]</sup>。

已有研究表明, 作物耐旱性状是由多基因控制的数量性状<sup>[6-10]</sup>。配合力的高低是杂交育种和杂种优势利用中亲本选择的主要依据之一, 广泛地应用于

玉米、水稻、油菜等多种作物。油菜上有关产量性状和品质性状方面的配合力和遗传分析已有很多报道<sup>[11-12]</sup>, 但是关于耐旱性状的配合力及遗传分析鲜见报道。本文以种子发芽期耐旱能力不同的 7 个甘蓝型油菜品种为亲本进行完全双列杂交设计。将亲本及 F<sub>1</sub> 代种子在 10% PEG 模拟干旱胁迫条件下发芽, 测定发芽性状并对其进行配合力分析, 进而研究油菜发芽期耐旱性的遗传机制, 为选育耐旱性强的油菜优良品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

用 10% PEG 模拟干旱胁迫对现有油菜资源进行耐旱鉴定, 根据相对活力指数及相关性状选择高活力指数的 2 个材料, 中等活力指数的 3 个材料, 低活力指数的 2 个材料进行双列杂交试验设计<sup>[15]</sup>。试验材料及来源见表 1, 其中西农长角、渝黄 1 号选系、油研 10 号选系为市场购买后进行多代单株选择得到的自交系。

表 1 材料来源及性状  
Table 1 Origin and traits of materials

编号 Code	名称 Name	来源 Origin	相对茎长 Relative stem length	相对单株重 Relative fresh weight per plant	相对成苗率 Relative survival percentage	相对活力指数 Relative vigor index
1	4204	中国农业科学院油料作物研究所 OCRI	0.478	0.661	0.790	0.378
2	渝黄 1 号选系(F <sub>7</sub> ) Yuhuang 1 (F <sub>7</sub> )	西南大学 SWU	0.782	0.982	0.975	0.762
3	西农长角 Xinongchangjiao	西南大学 SWU	0.547	0.685	0.980	0.536
4	油研 10 号选系(F <sub>8</sub> ) Youyan 10 (F <sub>8</sub> )	贵州省油料作物研究所 GZOCRI	0.549	0.619	0.470	0.258
5	中双 10 号 Zhongshuang 10	中国农业科学院油料作物研究所 OCRI	0.652	0.677	0.850	0.554
6	中双 6 号 Zhongshuang 6	中国农业科学院油料作物研究所 OCRI	0.906	0.868	0.970	0.879
7	中双 9 号 Zhongshuang 9	中国农业科学院油料作物研究所 OCRI	0.691	0.742	0.990	0.684

SWU: Southwest University, Chongqing, China; OCRI: Oil Crops Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Science, Wuhan, China; GZOCRI: Oil Crops Research Institute of Guizhou, Guizhou, China.

1.2 试验方法

2006 年 9 月 27 日于中国农业科学院油料作物研究所试验农场(湖北省武汉市武昌区)直播 7 个亲本, 按常规方法进行田间管理。2007 年 3 月采用 7×7 完全双列杂交配制杂交组合, 2007 年 5 月 4 日于黄熟期收获杂种 F<sub>1</sub> 及自交后代, 于室内自然风干脱粒, 晾晒后保存于 4℃ 冰箱中待测。按照杨春杰等的方法<sup>[13]</sup>, 选取亲本和 F<sub>1</sub> 代种子 100 粒, 在铺有 8 层吸水纸和一层滤纸的培养皿中, 以加 10% PEG 15 mL

模拟干旱, 对照加蒸馏水; 播后第 5 天测发芽势, 播后第 7 天测发芽率、茎长、单株鲜重、萎蔫数, 分别计算相对茎长、相对发芽势、相对发芽率、相对单株鲜重、相对成苗率和相对活力指数。用唐启义等<sup>[14]</sup>的 DPS 数据处理系统中的 Griffing 完全双列杂交第一种方法进行配合力方差分析及一般配合力和特殊配合力效应值的估算, 并计算有关遗传参数的。试验重复 3 次, 用反正弦转化以百分率为单位的性状值。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜发芽性状的方差分析

随机区组设计的方差分析结果表明, 6 个发芽性状在 42 个组合间均达到极显著差异, 说明各组合基因型效应之间存在着真实差异, 可进一步对其进行配合力方差分析(表 2)。

表 2 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜 6 个发芽性状的随机区组设计方差分析

Table 2 Analysis of variance on 6 germination traits of *B. napus* L. under simulated drought stress

发芽性状 Germination trait	组合均方 Mean squares of combination	机误均方 Mean squares of error	F 值 F-value
相对茎长 Relative stem length	0.0877	0.0105	8.3442**
相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	0.0770	0.0103	7.4745**
相对成苗率 Relative survival percentage	0.2318	0.0282	8.2098**
相对发芽率 Relative germination rate	0.2551	0.0183	13.9312**
相对发芽势 Relative germination energy	0.2595	0.0136	19.0608**
相对活力指数 Relative vigor index	0.0873	0.0171	5.1048**

\*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。\*: significant at 0.01 probability level.

表 3 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜发芽性状配合力的方差分析

Table 3 Variance analysis of combining ability of germination traits in *B. napus* L. under simulated drought stress

发芽性状 Germination trait	机误 Error	反交效应 Reciprocal cross effect		一般配合力 GCA			特殊配合力 SCA	
		均方 MS	F 值 F-value	均方 MS	F 值 F-value		均方 MS	F 值 F-value
相对茎长 Relative stem length	0.0035	0.0371**	10.5801**	0.0464	13.2329**		0.0165	4.7115**
相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	0.0034	0.0307**	8.9443**	0.0456	13.2836**		0.0149	4.3450**
相对成苗率 Relative survival percentage	0.0094	0.1227**	13.0367**	0.0926	9.8458**		0.0274	2.9154**
相对发芽率 Relative germination rate	0.0061	0.1083**	17.7411**	0.1057	17.3270**		0.0559	9.1511**
相对发芽势 Relative germination energy	0.0045	0.1109**	24.4406**	0.1072	23.6242**		0.0562	12.3771**
相对活力指数 Relative vigor index	0.0057	0.0469**	8.2295**	0.0411	7.2034**		0.0079	1.3804

\*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。\*: significant at 0.01 probability level.

### 2.2 模拟干旱胁迫下发芽性状的配合力效应分析

6 个性状一般配合力差异很大, 同一性状不同亲本的一般配合力效应值不同, 说明同一性状不同亲本的遗传作用有显著差别(表 4)。同一亲本不同性状的一般配合力效应值也不同, 说明各性状的加性

### 2.2 模拟干旱胁迫下发芽性状的配合力方差分析

甘蓝型油菜 6 个发芽性状一般配合力(GCA)均达到了极显著水平, 除相对活力指数外各性状特殊配合力(SCA)也达到了极显著水平(表 3)。说明相对茎长、相对单株鲜重、相对成苗率、相对发芽率和相对发芽势由加性效应和非加性效应共同控制, 而相对活力指数主要受加性效应控制。

效应间存在本质上的差异, 这种差异为鉴定和选用综合性状一般配合力高的亲本提供了可能。其中中双 9 号的相对茎长、相对单株鲜重、相对成苗率、相对发芽势、相对发芽率和相对活力指数的一般配合力效应值均最高。因此, 在 PEG 模拟干旱胁迫的

表 4 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜 6 个发芽性状的一般配合力效应

Table 4 GCA effects for 6 germination traits of *B. napus* L. under simulated drought stress

性状 Germination trait	材料编号 Code of material							LSD <sub>0.05</sub>	LSD <sub>0.01</sub>
	1	2	3	4	5	6	7		
相对茎长 Relative stem length	0.0304(3)	0.0174(4)	-0.0440(5)	0.0559(2)	-0.0711(7)	-0.0594(6)	0.0708(1)	0.1405	0.1860
相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	0.0629(2)	0.0090(4)	-0.0557(5)	0.0353(3)	-0.0613(7)	-0.0558(6)	0.0656(1)	0.1390	0.1841
相对成苗率 Relative survival percentage	0.0900(2)	-0.0562(5)	-0.0901(7)	0.0343(3)	-0.0630(6)	-0.0335(4)	0.1185(1)	0.2301	0.3047
相对发芽率 Relative germination rate	0.0770(2)	0.0017(4)	-0.0824(6)	0.0574(3)	-0.0255(5)	-0.1329(7)	0.1048(1)	0.1853	0.2454
相对发芽势 Relative germination energy	0.0728(2)	0.0019(4)	-0.0852(6)	0.0567(3)	-0.0229(5)	-0.1328(7)	0.1096(1)	0.1598	0.2116
相对活力指数 Relative vigor index	0.0330(3)	-0.0225(5)	-0.0540(6)	0.0380(2)	-0.0625(7)	-0.0181(4)	0.0861(1)	0.1791	0.2372

同行数据后括号内数字表明位次。

Numbers in brackets in the same row indicate the place in GCA effects.

条件下, 认为该品种在提高杂种  $F_1$  种子发芽期耐旱能力方面是一个比较理想的亲本。

在配制杂交组合时, 虽然应选用一般配合力较好的材料作亲本, 但同时还应考虑亲本的特殊配合力效应。42 个杂交组合的分析结果表明, 同一性状不同组合间及同一杂交组合不同性状间的特殊配合力效应值均有较大差异(表 5)。6 个发芽性状的反交效应均达到极显著水平, 说明反交组合间存在着极显著差异(表 6)。杂交组合中双 6 号×西农长角和中双 6 号×中双 10 号的相对活力指数、相对发芽势、

表 5 模拟干旱胁迫下 7 个品种发芽性状的特殊配合力分析  
Table 5 Effective value of SCA on germination traits of *B. napus* L. under simulated drought stress

组合 Combination	相对茎长 Relative stem length	相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	相对成苗率 Relative survival percentage	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽势 Relative germination energy	相对活力指数 Relative vigor index
1×2	0.0132	0.0188	-0.0682	-0.0041	-0.0072	-0.0195
1×3	0.0251	0.0316	-0.0227	0.0816	0.0883	-0.0222
1×4	-0.0303	-0.0430	-0.1036	-0.0615	-0.0552	-0.0487
1×5	0.0260	-0.0084	0.0544	0.0298	0.0176	0.0350
1×6	0.0520	0.0761	0.1764	0.1410	0.1394	0.0800
1×7	-0.0594	-0.0603	-0.0449	-0.1073	-0.1116	-0.0418
2×1	0.0448	0.0456	0.1961	-0.0034	0.0000	0.1330
2×3	0.1092	0.1157	-0.0009	0.1552	0.1525	0.0147
2×4	0.0428	0.0338	-0.0491	0.0157	0.0108	0.0092
2×5	0.0594	0.0498	0.0501	0.1144	0.1040	0.0436
2×6	-0.1705	-0.1720	-0.1554	-0.3038	-0.2937	-0.0929
2×7	-0.0408	-0.0235	-0.0075	-0.0486	-0.0301	-0.0308
3×1	0.0145	0.0108	0.2447	-0.0017	-0.0051	0.1342
3×2	0.0286	-0.0054	-0.2807	0.0000	0.0017	-0.1305
3×4	-0.0472	-0.0220	0.0569	-0.0682	-0.0739	0.0281
3×5	-0.1451	-0.1504	-0.2266	-0.3076	-0.3104	-0.1157
3×6	-0.1190	-0.1107	-0.1025	-0.1599	-0.1562	-0.0588
3×7	-0.0206	-0.0070	0.1048	0.0629	0.0617	0.0018
4×1	-0.0164	0.0025	-0.1546	-0.0017	0.0068	-0.0844
4×2	-0.0652	-0.0535	-0.2958	0.0102	0.0119	-0.2130
4×3	-0.1868	-0.1767	-0.2441	-0.1644	-0.1665	-0.2095

组合 Combination	相对茎长 Relative stem length	相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	相对成苗率 Relative survival percentage	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽势 Relative germination energy	相对活力指数 Relative vigor index
4×5	0.0009	0.0441	0.1275	0.0917	0.1076	0.0283
4×6	0.0531	0.0419	0.1454	0.1536	0.1470	0.0520
4×7	0.0173	0.0080	-0.0384	-0.0877	-0.0938	0.0234
5×1	0.0667	0.0358	0.1293	-0.0168	-0.0035	0.1003
5×2	-0.1089	-0.0926	-0.2803	0.0127	0.0088	-0.2040
5×3	-0.2416	-0.2166	-0.3217	-0.5100	-0.5108	-0.1643
5×4	0.1458	0.0481	0.0587	-0.0524	-0.0740	0.1416
5×6	-0.0938	-0.0826	-0.1457	-0.2688	-0.2753	-0.0611
5×7	-0.0315	-0.0330	0.0027	0.2284	0.2365	-0.0486
6×1	0.0642	0.0200	0.0024	-0.0071	-0.0018	0.0581
6×2	-0.2891	-0.2652	-0.4563	-0.4904	-0.5046	-0.2630
6×3	0.2793	0.2618	0.4752	0.5503	0.5551	0.2656
6×4	-0.0007	-0.0092	0.0013	-0.0102	-0.0067	-0.0006
6×5	0.2774	0.2843	0.4592	0.4983	0.4983	0.2548
6×7	0.0726	0.0817	0.0596	0.0975	0.0923	0.0621
7×1	0.0234	0.0201	0.0850	0.0000	0.0000	0.0635
7×2	0.0223	-0.0071	-0.1890	-0.0134	-0.0106	-0.0689
7×3	0.0296	0.0330	0.0730	-0.0029	0.0082	0.0603
7×4	0.0419	0.0405	0.1106	0.0000	0.0017	0.0926
7×5	-0.0470	-0.0292	-0.1334	0.2332	0.2424	-0.0909
7×6	-0.0494	-0.0545	-0.1207	-0.0084	-0.0051	-0.0871

第 1 列编号相对应的品种参见表 1。  
Codes for materials same as in Table 1.

表 6 模拟干旱胁迫下发芽能力指标的遗传参数估计  
Table 6 Estimates of genetic parameters of 6 germination traits of *B. napus* L. under simulated drought stress

项目 Item	相对平均茎长 Relative stem length	相对单株鲜重 Relative fresh weight per plant	相对成苗率 Relative survival percentage	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽势 Relative germination potential	相对活力指数 Relative vigor index
一般配合力方差 Variances of GCA	0.0002	0.0002	0.0006	0.0004	0.0003	0.0003
特殊配合力方差 Variances of SCA	0.0026	0.0025	0.0069	0.0045	0.0033	0.0042
反交效应方差 Variances of the effect of reciprocal cross	0.0018	0.0017	0.0047	0.0031	0.0023	0.0029
广义遗传力 Broad heritability (%)	52.71	51.57	41.04	66.06	73.04	25.92
狭义遗传力 Narrow heritability (%)	19.38	20.80	19.58	13.52	14.78	20.57

相对发芽率、相对成苗率、相对单株鲜重和相对平均茎长等发芽性状的特殊配合力效应表现为较高的正值,综合反交效应值较大,表现较好,且均达到了极显著水平,因此,这两个组合是发芽期耐旱能力较强的组合(表 5)。

## 2.4 模拟干旱胁迫下发芽性状的遗传效应和遗传参数

在干旱胁迫下发芽相关性状的一般配合力方差达到极显著水平,除相对活力指数外其他性状的特殊配合力方差达到极显著水平,说明除相对活力指数主要受加性效应控制外,其他性状由加性效应和非加性效应共同控制。相对发芽率和相对发芽势的狭义遗传力相对较低(分别为 13.52 和 14.78),而广义遗传力相对较高,表明这两个性状受环境影响大,在后期世代进行选择才能收到较好的效果。相对茎长、相对单株鲜重、相对活力指数和相对成苗率的狭义遗传力较高,而广义遗传力较低,在早期世代对这些性状进行选择会收到较好的效果。所以,配制杂交组合时,除要考虑加性基因的累加效应外,还应重视非加性效应的作用。

## 3 讨论

在育种实践中,一般配合力主要用于亲本的选择,特殊配合力主要用于组合的选育。实际应用中,组合的特殊配合力效应一般转换为亲本的特殊配合力方差<sup>[16]</sup>。张向群<sup>[17]</sup>研究认为,杂交育种中亲本选配的合适指标是配合力类型,即一般配合力与特殊配合力方差的结合类型,最佳类型是一般配合力高,特殊配合力方差大。

由双亲产生的一般配合力方差包含全部加性效应遗传方差及小部分上位性加性效应遗传方差,而双亲互作产生的特殊配合力方差则还包括全部显性方差引起的非加性遗传方差和绝大部分上位性作用的非加性遗传方差。一般配合力是亲本品种基因加

性效应对杂种产生的平均效应;特殊配合力则是亲本品种在特定组合内由基因的显性方差、上位性作用等对某一性状产生的不符合品种平均表现的一种能力,可使杂种性状表现偏高或偏低的现象<sup>[15]</sup>。

本研究结果表明,各发芽性状的一般配合力在遗传型间的差异均达到了极显著水平,除了相对活力指数外其他 5 个性状的特殊配合力在遗传型间的差异也达到极显著水平。相对平均茎长、相对单株鲜重、相对成苗率、相对发芽率、相对发芽势和相对活力指数等性状的特殊配合力方差大于一般配合力方差,这些性状受基因的加性效应和非加性效应共同控制。所以配制杂交组合时,除要考虑加性基因的累加效应外,还应重视基因的非加性效应,才能收到较好的效果。

## 4 结论

7 个品种间的一般配合力均存在极显著差异,特殊配合力除相对活力指数外的其他性状均存在极显著差异。相对活力指数主要受基因的加性效应控制;而相对茎长、相对单株鲜重、相对成苗率、相对发芽率、相对发芽势等性状由基因的加性效应和非加性效应共同控制。中双 9 号的相对平均茎长、相对平均单株鲜重、相对成苗率、相对发芽率、相对发芽势和相对活力指数等性状的一般配合力都表现出较高的正向效应值,是选配耐旱性强组合的理想亲本;中双 6 号×西农长角和中双 6 号×中双 10 号的相对活力指数、相对发芽势、相对发芽率、相对成苗率、相对单株鲜重和相对平均茎长等性状的特殊配合力效应表现为较高的正值,是耐旱性较强的组合。

## References

- [1] Fu T D, Yang G S, Tu J X, Ma C Z. The present and future of rapeseed production in China. In: Proceedings of International Symposium on Rapeseed Science. New York: Science Press, 2001. pp 3-5

- [2] Xing J(邢君), Fei J-J(费俊杰), Yang J-Q(杨建群), Liu L(刘磊). The main meteorological disasters and its defense technologies and strategies on rapeseed in Anhui province. *Anhui Agric Sci Bull* (安徽农学通报), 2004, 10(4): 28, 46 (in Chinese)
- [3] Fan G-F(樊高峰), Miao C-M(苗长明), Mao Y-D(毛裕定). Application of drought indexes to dryness assessment in Zhejiang province. *Meteorol Month* (气象), 2006, 32(2): 70–74 (in Chinese with English abstract)
- [4] Dai Q-M(戴清明), Lü A-Q(吕爱钦), He W-J(何维君), Xie N-B(谢年保), Chen X(陈欣), Zhang Z-Y(张志远), Kuang C-L(匡朝凌), Qu K(瞿科). The arising regulation and the decreasing and avoiding strategies of the main meteorological disasters on rapeseed in Dongting lake region. *Crop Res* (作物研究), 2006, (1): 60–65 (in Chinese)
- [5] Fang Y-H(方益华), Yang Y-A(杨玉爱). Effect of water stress and boron nutrition on rapeseed. *Chin J Oil Crop Sci* (中国油料作物学报), 1999, 21(3): 52–56 (in Chinese with English abstract)
- [6] Ekanayake I J, O Toole J C, Garrity D P, Masajo T M. Inheritance of root characters and their relations to drought resistance in rice. *Crop Sci*, 1985, 25: 927–933
- [7] Moncada P, Martinez C P, Borrero J, Chatel M, Gauch H Jr, Guimaraes E, Tohme J, McCouch S R. Quantitative trait loci for yield and yield components in an *Oryza sativa* × *Oryza rufipogon* BC<sub>2</sub>F<sub>2</sub> population evaluated in an upland environment. *Theor Appl Genet*, 2001, 102: 41–52
- [8] Pantalone V R, Burton J W, Carter T E. Soybean fibrous root heritability and genotypic correlations with agronomic and seed quality traits. *Crop Sci*, 1996, 36: 1120–1125
- [9] Pantalone V R, Rebetzke G J, Burton J W, Carter T E J. Phenotypic evaluation of root traits in soybean and applicability to plant breeding. *Crop Sci*, 1996, 36: 456–459
- [10] Wang J-Z(王金召), Han Y-L(韩燕丽), Jia Y-J(贾耀军), Qiao X(乔旭), Zhang M-Y(张明友), Liu R-Z(刘软枝). Research advances on drought resistance of genetic breeding in maize (Summary). *J Henan Agric Sci* (河南农业科学), 2006, (9): 12–14 (in Chinese)
- [11] Zou X-F(邹晓芬), Zou X-Y(邹小云), Song L-Q(宋来强), Zhang J-M(张建模), Xiong R-X(熊任香), Yu R-X(余瑞新). Analysis on combining ability and heritability of yield and characters of *Brassica napus* L. *Acta Agric Jiangxi* (江西农业学报), 2007, 19(2): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- [12] Liu X-X(刘绚霞), Dong Z-S(董振生), Liu C-S(刘创社), Dong J-G(董军刚). Analysis of combining ability and quality of new sterile lines and restorers in *Brassica napus* L. *Acta Agric Boreal-Occident Sin* (西北农业学报), 2002, 11(2): 86–89 (in Chinese with English abstract)
- [13] Yang C-J(杨春杰), Zhang X-K(张学昆), Zou C-S(邹崇顺), Cheng Y(程勇), Zheng P-Y(郑普英), Li G-Y(李桂英). Effects of drought simulated by PEG-6000 on germination and seedling growth of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Chin J Oil Crop Sci* (中国油料作物学报), 2007, 29(4): 425–430 (in Chinese with English abstract)
- [14] Tang Q-Y(唐启义), Feng G-M(冯明光). DPS Data Processing System for Practical Statistics (实用统计分析及其 DPS 数据处理系统). Beijing: Science Press, 2002. pp 272–279 (in Chinese)
- [15] Liu W(刘炜), Li Z-C(李自超), Shi Y-L(史延丽), Ma H-W(马洪文), Wang J(王坚), Zhang H-L(张洪亮). Heterotic ecotypes grouping of japonica rice by combining ability. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(1): 66–72 (in Chinese with English abstract)
- [16] Gao Z-R(高之仁). Quantitative Genetics (数量遗传学). Chengdu: Sichuan University Press, 1986. pp 314–452 (in Chinese)
- [17] Zhang X-Q(张向群). The performance of two combining abilities in F<sub>1</sub> of corn inbred lines. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1987, 13(2): 135–142 (in Chinese with English abstract)