

高油油菜品种中油杂 11 的分子辅助选育及广适应性

李云昌, 胡 琼, 梅德圣, 李英德, 徐育松, 谭祖猛

(中国农业科学院油料作物研究所/国家油料作物改良中心/农业部油料作物遗传改良重点实验室, 武汉 430062)

摘要: 【目的】利用现代生物技术提高油菜育种效率, 培育高产油量广适应性新品种, 提升中国油菜品种的技术水平和产业的核心竞争力。【方法】利用陕 2A 细胞质雄性不育为授粉控制系统, 经杂交、测交和回交, 并结合分子标记遗传距离评估预测杂种优势等方法选育甘蓝型油菜杂交种中油杂 11, 并对其产量、含油量和稳定性进行鉴定。【结果】中油杂 11 具有高含油量、高产、稳产、优质、适应性广等特点, 其含油量在中国冬油菜主产区长江上、中和下游 3 个生态区稳定在 43% 以上, 高的年份 (2003~2004 年度) 可达 46% 以上。在湖北省区域试验中, 平均产量为 2 853 kg·ha⁻¹, 比对照中双 6 号增产 11.34%。在全国的长江上、中、下游油菜品种区域试验中平均产量分别为 2 405.7, 2 697.3 和 2 770.2 kg·ha⁻¹, 比各区的对照品种分别增产 11.52%, 12.9% 和 14.92%, 均达极显著水平; 以产油量计算, 分别达到 1 083.3, 1 210.2 和 1 224.8 kg·ha⁻¹, 比对照分别增加 29.42%, 27.65% 和 20.98%。【结论】利用 SSR 结合 SRAP 分子标记估算油菜亲本间的遗传距离, 可以较好地预测杂种优势, 从而增加杂交种配制的目的性, 有效提高杂交油菜育种的效率。

关键词: 甘蓝型油菜; 杂种优势预测; 中油杂 11; 产油量; 适应性

Molecular Assisted Breeding and Adaptability Analysis of Zhongyouza 11 with High Oil Content

LI Yun-chang, HU Qiong, MEI De-sheng, LI Ying-de, XU Yu-song, TAN Zu-meng

(Institute of Oil Crop Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Center for Oil Crops Improvement / Key Laboratory of Agricultural Ministry for Oil Crops Improvement, Wuhan 430062)

Abstract: 【Objective】The increase of breeding efficiency and development of new varieties with high oil yield and wide adaptability ensure the elevation of competitive power of rapeseed varieties and industry. 【Method】Using a three-line system of Shaan 2A cytoplasmic male sterility, a rapeseed hybrid variety Zhongyouza 11 with high grain yield, high oil content, wide adaptability and good quality was developed by the combination of traditional methods and a molecular marker assisted breeding technique. 【Result】The oil content of Zhongyouza 11 is steadily above 43% in the three ecological regions along Yangtze River valley reaches which is the largest winter oilseed production area in China. The highest oil content of Zhongyouza 11 reached 46.68% (in the upper reach of Yangtze River valley in 2003-2004), which is the highest among all lines involved in the national regional oilseed rape variety trials. In the yield trials in Hubei province, the average yield of Zhongyouza 11 reached 2 853 kg·ha⁻¹ (2002-2004), over yielding the control variety Zhongshuang 6 by 11.34%. In the national trials, the yield of Zhongyouza 11 reached 2 405.7 kg·ha⁻¹, 2 697.3 kg·ha⁻¹ and 2 770.2 kg·ha⁻¹ in the upper, middle and lower reach regions, over yielding the respective control varieties by 11.52%, 12.9% and 14.92%, respectively, in 2003-2005. Both the high oil content and high grain yield contributed to the high oil yield of Zhongyouza 11. The oil yield of Zhongyouza 11 in the national trials reached 1 083.3 kg·ha⁻¹, 1 210.2 kg·ha⁻¹, 1 224.8 kg·ha⁻¹, over yielding the respective controls by 29.42%, 27.65% and 20.98%, respectively, in the upper, middle and lower reaches of Yangtze River valley. The highest oil yield reached 1369.65 kg·ha⁻¹ (in the middle reach of Yangtze River valley, 2003-2004), increased by 46.21% compared to the control. The experimental sites distributed widely along the Yangtze River valley covering most of Chinese winter rapeseed production area. Among 89 experimental location/years, the yield of Zhongyouza 11

收稿日期: 2007-06-07; 接受日期: 2007-07-10

基金项目: 国家“863”项目 (2006AA100106); 国家科技支撑计划项目 (2006BAD07A04); 农业部“948”项目 (2003-Q04); 湖北省重大科技攻关项目 (2006AA206A01)

作者简介: 李云昌 (1955-), 男, 湖北崇阳人, 研究员, 研究方向为油菜遗传育种。Tel: 027-86812729; E-mail: lychang@public.wh.hb.cn。通讯作者胡 琼 (1966-), 女, 安徽霍邱人, 研究员, 研究方向为油菜生物技术育种。Tel: 027-86711556; E-mail: huqingy@public.wh.hb.cn

surpassed the controls at 77 of them in the trials, indicating wide adaptability of this variety. Zhongyouza 11 has become the only one that passed the national regional trials of all three regions along the Yangtze River valley in the same year by 2005. It is also the first oilseed rape variety that contains oil exceeding 46% that passed the national regional trials. 【Conclusion】 This study shows that heterosis prediction by the estimation of genetic distance between parental lines using SSR and SRAP markers is an efficient way for the reduction of tedious field trials and the acceleration of breeding procedure.

Key words: *Brassica napus*; Heterosis prediction; Zhongyouza 11; Oil yield; Adaptability

0 引言

【研究意义】提高油菜品种的含油量和适应性是发展中国油菜生产,满足中国植物油需求的重要保证。中国作为世界油菜生产大国,近年来生产面积一直处于世界首位,高居 600 万公顷左右。但受生产效益的制约和消费水平提高的影响,中国油菜生产规模还远远不能满足食用及能源用油的需求。以 2005 年为例,为满足国内市场需求,中国进口植物油脂 1 000 多万吨,进口量几乎等同于国内产量。要扩大油菜生产规模,必须通过提高油菜生产效益来调动农户种植油菜的积极性,而提高含油量则是提高油菜生产效益的主要途径。与提高产量相比,提高含油量对提高产油量的贡献更大。据推算,含油量每提高 1 个百分点,按照目前油菜平均生产水平,对产油量的贡献相当于提高籽粒产量 2.5 个百分点。因此,在高产优质的基础上,培育高含油量油菜品种,提高高油品种的生态适应性,对提高油菜生产效益、扩大油菜种植面积具有积极的推动作用。【前人研究进展】由于油脂合成步骤很多,油菜含油量遗传十分复杂,而提高含油量需要一个长期的过程^[1]。提高含油量的常规育种方法主要有单株定向选择、诱变或通过间接性状如黄籽、大粒的选择等^[2,3]。利用生物技术提高某一种脂肪酸含量或阻断种子蛋白质合成而促进油脂合成对提高含油量也有一定的效果^[4,5]。近年来,由于对油菜生产效益要求的提高,油菜高含油量育种已越来越受到重视,育种材料中高含油量材料不断增多,加拿大最近报道了含油量 54.8% 的黑籽油菜品种^[6],中国也报道了含油量为 54.72% 的油菜品种^[7]。但生产上应用的大多数油菜品种含油量仍然较低,平均水平在 40% 左右。近年来中国采用多种育种途径培育出了含油量超过 40% 的冬油菜品种,如黑籽的中油杂 2 号 (42.45%)、中双 9 号 (42.0%)、黄籽的渝黄 1 号 (42.77%)、渝黄 2 号 (43.19%)、油研 9 号 (43.7%)、油研 10 号 (44.45%) 等^[8,9]。【本研究切入点】但上述这些油菜品种的含油量均未超过 45%。将辐射诱变、系统选择、

大粒和杂种优势利用等多种手段相结合,选育出了含油量在气候适宜年份达到 45% 的优质杂交油菜品种中油杂 8 号^[10]。这些成果虽然说明了近年来中国油菜高含油量育种取得了卓有成效的进展,但是油菜品种的含油量水平仍然有较大的提升空间。【拟解决的关键问题】本研究利用陕 2A 细胞质雄性不育系统及优质高含油量等亲本材料,采用复合杂交、单株成对测交、高含油量定向选择,结合分子标记估算亲本遗传距离预测杂种优势等手段,选配出高含油量优质高产杂交油菜新品种中油杂 11,并对其在长江流域冬油菜区的产量和含油量的稳定性进行了鉴定,为推广应用高产油量优良油菜品种,综合提升中国优质油菜生产效益提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料来源

陕 2A 不育系、陕 2B 保持系、陕 2C 恢复系由陕西省杂交油菜中心提供,中双 2 号为中国农业科学院油料作物研究所育成的双低油菜品种,Start 为引自波兰的欧洲冬油菜品种,227 和 R₁ 分别为中国农业科学院油料作物研究所选育的双低甘蓝型油菜品种系和恢复品系。

1.2 选育经过

1991 年用陕 2B 分别与中双 2 号、Start 组配单交组合,获得单交杂种 F₁。1992 年用两个单交杂种 (陕 2B×中双 2 号) F₁ 与 (陕 2B×Start) F₁ 进行复合杂交,1993 年从大量的复合杂交 F₁ 群体中选取优良单株自交繁殖,并与陕 2A 成对测交。1994 年对测交后代观察,筛选保持性能好的父本单株,随后连续多次回交并自交进行系统选育,获得一个保持性能好、群体一致、农艺和经济性状优良的保持品系 (6098B) 及其连续回交后代群体,即不育系 (6098A)。恢复系 R₆ 的选育同样采用复合杂交和系选育成。首先用陕 2C 与 227 杂交得 F₁,再组配 (陕 2C×227) F₁×R₁ 复合杂交,从 F₂ 开始,选取优良单株,并在自交留种的同时,与陕 2A 测交鉴定,以定向选留恢复基因,

直至育成性状稳定的恢复系 R₆。在保持系和恢复系的选育过程中，每个世代都对单株进行品质性状的鉴定，选留低芥酸、低硫苷和高含油量单株。在保持系和恢复系性状稳定后，通过分子标记对所有育成品系进行遗传距离评估和杂种优势预测，发现 6098A 与 R₆ 组配的杂交种杂种优势明显，随即配制杂种进行组合产量鉴定试验。2002 年参加湖北省油菜区试，2003 年参加全国油菜区试。并分别于 2004 和 2005 年通过湖北省及全国三大区（长江上、中、下游）油菜品种区试，获得湖北省和全国品种审定，定名为“中油杂 11”。

1.3 分子标记估算遗传距离

育种骨干亲本材料的 SSR 和 SRAP 分析及遗传距离估算同谭祖猛等^[1]的方法，其主要步骤包括 DNA 提取，利用 SSR 和 SRAP 引物进行 PCR 扩增，DNA 片段 PAGE 凝胶电泳分离，差异片段统计及数据处理。

1.4 田间试验及性状鉴定

省级和国家级区试按统一试验方案执行，采用随机区组排列，3 次重复，小区净面积为 20 m²。成熟期田间调查病毒病和菌核病发病情况，收获期各小区取 10 株单株考查经济性状，整区收获测产，多重比较法（LSD 法）比较产量差异。选育过程中育种材料的种子脂肪酸组成、硫苷及油分含量利用近红外光谱仪（NIRsystem 5000, Foss）测试^[8]，区试种子中芥酸、油分含量、硫苷由农业部油料及制品质量监督检验测试中心分别利用国家标准 GB/T 17377—1998（气相色谱法）、NY/T 4—1985（残余法）及国际标准 ISO 9167-1：1992（E）进行检测。

2 结果与分析

2.1 亲本遗传距离分析和杂种优势预测

分别利用 45 对 SSR 引物和 25 对 SRAP 引物对 13 个陕 2A 不育系统的保持系、10 个恢复系、1 个骨干育种材料中油 821 和 2 份引自加拿大的材料进行分子标记遗传距离分析，共获得 SSR 多态性标记 125 条，SRAP 多态性标记 172 条。利用这些标记进行聚类分析，可以将 26 份材料分为 5 组，其中 R₁ 和所有保持系归为第一组，保持系内又可以分为 3 个亚组，分别包含 5 个、8 个和 1 个材料，其中 6098B 自成一组，与其它保持系差异稍大。恢复系间差异较大，除 R₁ 与保持系归为 1 组外，HR₃ 和 5320 也在含 7 个恢复系的第二组之外，与中油 821 归为第三组。两个来自加拿大的材料则各为 1 组（图 1）。表明除了 R₁ 以外的任何恢复系与保持系所保持的不育系配制杂交组合都

有可能获得较高的杂种优势。遗传距离计算结果发现 R₆ 和 R₂ 与 3 个保持系的遗传距离都较远（表 1），是

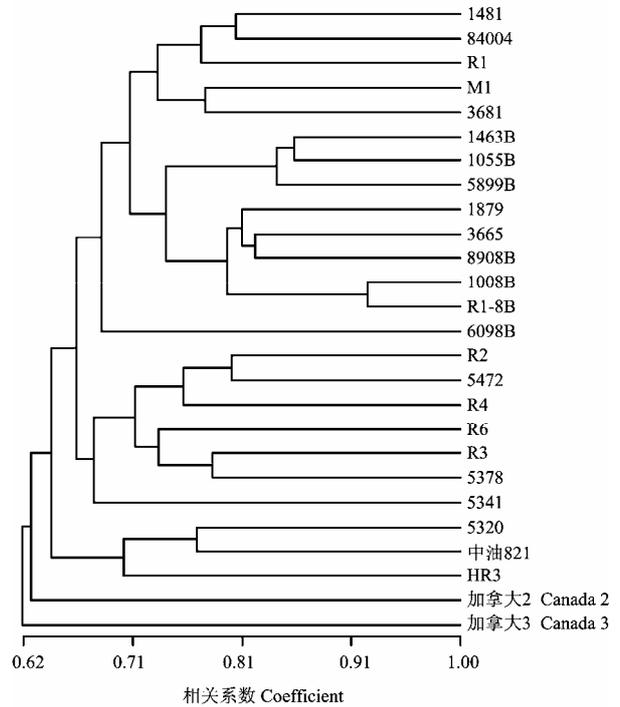


图 1 基于 SSR 和 SRAP 标记建立的 26 个育种材料遗传聚类图

Fig. 1 Dendrogram of 26 breeding lines based on SSR and SRAP markers

表 1 杂交种的产量优势及亲本间的遗传距离

Table 1 Yield heterosis of hybrids and genetic distance of parental lines

组合 Combination	产量 Yield (kg·ha ⁻¹)	中亲优势 MPH (%)	超亲优势 HPH (%)	遗传距离 GDs
1055A×R1	2376.216	54.1	24.4	0.3364
1055A×R2	2480.436	30.8	29.8	0.4490
1055A×R3	2556.864	23.3	14.3	0.3867
1055A×R6	2855.628	46.0	42.7	0.4275
6098A×R1	1778.688	36.2	23.7	0.5803
6098A×R2	2633.292	58.6	39.9	0.5326
6098A×R3	2376.216	29.3	6.2	0.3513
6098A×R6	2716.668	58.0	35.8	0.4581
8908A×R1	2091.348	45.8	23.4	0.4546
8908A×R2	2445.696	36.7	29.9	0.5704
8908A×R3	2126.088	8.1	-5.0	0.3111
8908A×R6	2688.876	45.5	34.4	0.4692

MPH: Mid-parent heterosis; HPH: High parent heterosis

潜力很大的恢复系。为了验证通过分子标记估算遗传距离预测杂种优势的可靠性,利用3个保持系保持的不育系和4个恢复系配制了12个杂交种,并进行产量鉴定。结果表明遗传距离较远、聚类分析不在一组的亲本间杂种优势较强,其中以R₆的配合力最好,与3个不育系的杂交种产量均高于其它恢复系,单产分别达到2 688.88, 2 716.67和2 885.86 kg·ha⁻¹,超亲优势分别达到34.4%, 35.8%和42.7%。同时也进一步验证了利用分子标记预测出的遗传距离与杂种优势具有显著的相关性。如聚类分在同一组或者遗传距离在0.4以下的,其超亲优势均在25%以下。其次,遗传距离虽然较大但聚类被分在一组的亲本间组配的杂交组合其产量杂种优势也较弱,如R₁与6098A和8908A的杂交种。

2.2 中油杂 11 在不同生态区的产量表现

2.2.1 在湖北省的产量水平及产量构成因素

在通过遗传距离预测出6098A与R₆组配的杂交组合杂种优势较强的基础上,2001年配制杂交种并在武汉进行品系产量鉴定试验。在该试验中,中油杂11(原编号为“希望98”)比对照中油821增产19.48%,增产达极显著水平。2002~2004年度参加湖北省油菜品种区域试验,分别在襄樊、宜城、沙洋、武穴、恩施、宜昌、荆州、随州、孝感、武汉和黄冈等11个参试点进行产量比较试验。结果显示,2002~2003年度在9个有效试验点中,中油杂11的平均单产为2 635.5 kg·ha⁻¹,比对照增产11.81%,增产达极显著水平,居所有参试品系第二位。2003~2004年度在11个试验点平均单产3 069 kg·ha⁻¹,比对照增产10.93%,增产同样达极显著水平。两年平均单产2 853 kg·ha⁻¹,与对照相比增产11.34%。从产量构成因素看,中油杂11单株有效角果数略低于对照品种中双6号,千粒重与对照相近,每角粒数明显高于对照,单株产量显著高于对照(表2)。可见中油杂11的增产要素主要是由于每角粒数的增加,导致全株籽粒产量的显著提高。

2.2.2 中油杂 11 在长江流域的籽粒产量表现

中油杂11于2003~2004、2004~2005两个年度参加全国冬油菜品种区域试验,分别在长江流域的上、中和下游3个大区进行产量鉴定,试验点覆盖了中国冬油菜主产区的整个长江流域12个省市。其中上游区包括云南、贵州、四川、重庆、陕西5省市的12个试验点,中游区包括湖南、湖北、江西3省10个试验点,下游区包括安徽、江苏、上海、浙江4省市9个试验点。中油杂11在2003~2004年度全国区试中,长江上游11个有效试验点和长江中游10个试验点全部增产,

表 2 中油杂 11 在湖北省区试中产量构成因素情况

Table 2 Yield components of Zhongyouza 11 in Hubei regional trial

品种 Variety	年份 Year	性状 Trait			
		单株角果数 NSP	每角粒数 NSS	千粒重 TSW(g)	单株产量 YP(g)
中油杂 11	2002-2003	308.8	18.5	3.72	19.8
Zhongyouza 11	2003-2004	310.3	21.0	3.72	22.2
中双 6 号	2002-2003	316.6	14.7	3.73	16.5
Zhongshuang 6	2003-2004	344.7	18.2	3.73	20.7

NSP: Number of siliques per plant; NSS: Number of seeds per siliques; TSW: Thousand seeds weight; YP: Yield per plant

长江下游8个试验点中7个试验点增产,总计29个试验点有28个试验点比对照增产。在2004~2005年度,长江上游12个点和长江中游10个试验点分别有3个试验点减产,长江下游8个试验点全部增产,总计30个试验点有24个试验点比对照增产。在长江上游、中游、下游区两个年度的平均产量分别为2 405.7, 2 697.3和2 770.2 kg·ha⁻¹,比各自的对照品种分别增产11.52%, 12.9%和14.92%(表3),产量居所有参试品种的第一位,是全国油菜区域试验中首个表现出产量高且具有极强稳定性的油菜新品种。

在第一年品种区域试验产量表现突出的基础上,中油杂11第二年在继续参加区域试验的同时,还参加了在长江上、中、下游区的生产试验,试验设计为小区面积为66 m²,随机区组排列,3次重复。产量考查结果表明,中油杂11在长江上游区平均单产2 127 kg·ha⁻¹,比对照油研7号增产7.79%,在长江中游区平均比对照品种(中油杂2号或中油821)增产6.23%,在长江下游区比对照皖油14增产10.89%,增产均达到极显著水平,充分表明中油杂11的高产稳产性。这一点在随后的推广应用不断得到证实,2007年该品种在湖北省武穴市的丰产栽培试验中,产量达到了3 900 kg·ha⁻¹以上。

2.2.3 中油杂 11 在长江流域的稳产性

在全国长江流域三大生态区的生产试验和区域试验中,两个试验年度总共获得了89个试验点次的产量数据。对这些数据的分析结果发现,中油杂11在这89个试验点次中有77个点次增产,平均增产幅度为16.56%,最大增产幅度为67.76%。在长江上游区的35个试验点中,增产点有29个,增产幅度为0.12%~67.76%。在长江中游区的27个试验点中,增产点为22个,增产幅度为0.70%~52.04%。而在长江下游区的25个试验点中,增产点占24个,仅1个试验点减产,增产幅度为

表 3 中油杂 11 在长江流域的产量和产油量表现

Table 3 Yield and oil content performance of Zhongyouza 11 in national regional variety trials

Region 生态区	Year 年份	中油杂 11 Zhongyouza 11			比对照增加幅度 Yield increase over control ²⁾		
		产量 Yield (kg·ha ⁻¹)	含油量 Oil content (%)	产油量 ¹⁾ Oil yield (kg·ha ⁻¹)	产量 Yield (%)	含油量 Oil content (%)	产油量 Oil yield (%)
Upper reaches 上游区	2003~2004	2517.5	46.68	1175.2	20.35	22.78	47.76
	2004~2005	2293.9	43.21	991.2	3.22	9.28	12.80
	平均 Average	2405.7	44.95	1083.3	11.52	15.90	29.42
Middle reaches 中游区	2003~2004	2964.0	46.21	1369.7	25.71	16.31	46.21
	2004~2005	2430.5	43.55	1058.5	0.43	9.86	10.33
	平均 Average	2697.3	44.88	1210.2	12.90	13.09	27.65
Lower reaches 下游区	2003~2004	2840.4	44.84	1273.7	11.97	6.61	19.37
	2004~2005	2699.9	43.55	1175.8	18.11	3.86	22.67
	平均 Average	2770.2	44.20	1224.8	14.92	5.24	20.98

对照品种上游区为油研 7 号, 中游区 2003~2004 年度为中油 821, 2004~2005 年度为中油杂 2 号, 下游区为皖油 14。下面表中同。¹⁾ 产油量 kg·ha⁻¹=产量 kg·ha⁻¹×含油量。²⁾ 增加幅度=(中油杂 11 的值-对照值)/对照值×100%

The control variety in the upper reach trial is Youyan 7, the controls in the Middle reach trial are Zhongyou 821 and Zhongyouza 2 in the year 2003-04 and 2004-05 respectively, and the control variety in the lower reach trial is Wanyou 14. The same in following tables. ¹⁾ Oil yield (kg·ha⁻¹)=Yield (kg·ha⁻¹)×Oil content. ²⁾ Increase over control=(Value of Zhongyouza 11-Value of control)/Value of control×100%

1.73%~41.03%。可见, 减产主要发生在长江上游区, 减产最为严重的是贵州省的遵义。但增产最高的也同样发生在上游区, 为重庆市的万州。总体来看, 虽然有一些减产的点次, 但减产幅度大多在 20%以下, 占减产点的 80%以上。而大多数增产点(53 个)的增产幅度都在 10%以上, 其中增产幅度在 20%以上的有 27 个, 占增产点的 35%以上。因此, 中油杂 11 在长江中下游区的稳产性要强与长江上游区。

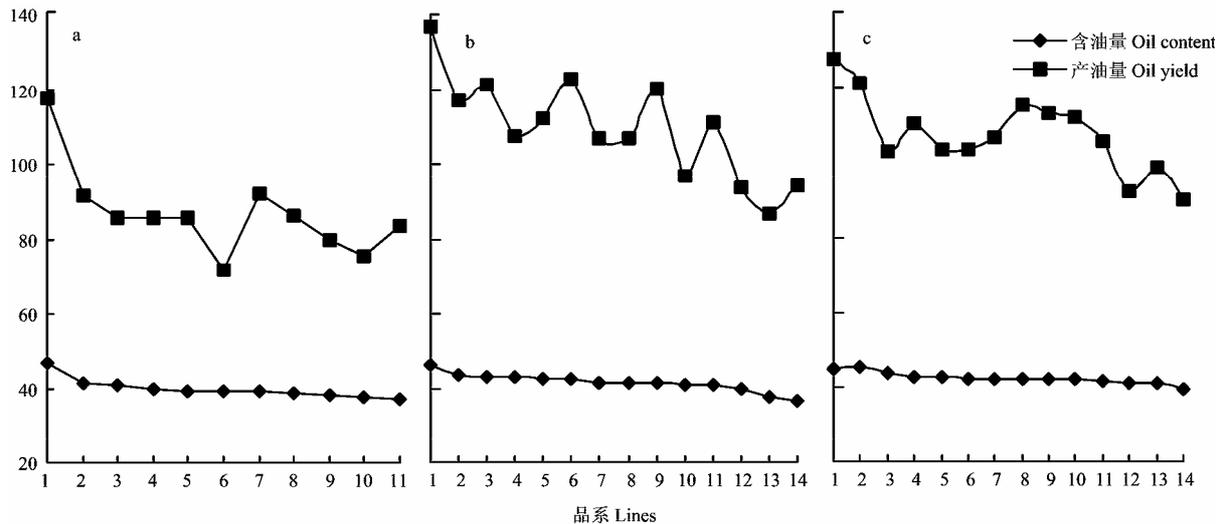
2.2.4 中油杂 11 的超高含油量及产油量 除了较高的籽粒产量之外, 中油杂 11 的高含油量特性突出。从全国油菜区域试验中抽取各试验点的混合种籽进行含油量检测, 结果显示, 两个年度中油杂 11 在长江上、中、下游区的含油量一直稳定在 43%以上, 尤其是在 2003~2004 年度, 收获于长江上游和中游区的种籽含油量分别达到了 46.68%和 46.21% (表 3)。与对照品种相比较, 中油杂 11 的绝对含油量分别增加了 8.66 和 6.48 个百分点, 相对含油量则分别增加了 22.78%和 16.31%, 成为全国区试中首个含油量达到 46%以上的品种。尽管 2005 年春季气候条件没有 2004 年有利于油菜种籽油分的积累, 中油杂 11 在各个生态区的含油量仍然保持在 43%以上。加上高的籽粒产量, 中油杂 11 在全国区试长江上、中、下游组的产油量分别为 1 083.3、1 210.2 和 1 224.8 kg·ha⁻¹, 比对照分别增加 29.42%, 27.65%和 20.98% (表 3)。其中最高产油量达到 1 369.7 kg·ha⁻¹ (2003~2004 年长江中游组), 比

对照品种增加 46.21%, 绝对产油量比对照品种增加了 432.9 kg·ha⁻¹。

与其它参试品种相比, 尽管在 3 个生态区的试验中参试品系各不相同, 但除了在下游区试验中的油 0310 外, 中油杂 11 的含油量都是最高的 (图 2)。也就是说中油杂 11 比其它 37 个参试品种的含油量都要高, 且在上游、中游的区试中分别比含油量次高的 2001V51 和 96185 两个品系高出 2.53 和 5.17 个百分点。在 3 个生态区的区试中比含油量最低的参试品系分别高出 9.67、9.51 和 5.71 个百分点。同时, 中油杂 11 的产油量也是在 3 个生态区所有的参试品系中最高的。尽管下游区区试中的油 0310 含油量略高于中油杂 11 (高 0.52%), 但由于其籽粒产量低于中油杂 11, 所以平均每公顷产油量仍然较中油杂 11 低 62.1 kg。特别是在长江上游区, 中油杂 11 的产油量明显高于其它品系, 所有品系的产油量均比中油杂 11 低 250 kg·ha⁻¹以上, 比产油量为次高的 01 杂 796 还高 257.85 kg·ha⁻¹, 比产油量最低的品系高 457.5 kg·ha⁻¹, 由此可见其显著的增产效果。

3 讨论

杂种优势的遗传机理比较复杂, 从 20 世纪初期开始, 经过近百年的研究, 学者们提出了杂种优势遗传控制的显性假说、超显性假说和上位性假说等^[12]。无论哪一种遗传机制, 都说明不同来源的基因 (包括等



a: 长江上游区 1. 中油杂 11; 2. 2001V51; 3. 油 0308; 4. 黔杂 ZW99004; 5. 富油 1 号; 6. 湘杂油 6 号; 7. 01 杂 796; 8. 杂 0203; 9. 油研 7 号; 10. 中双 9 号; 11. H4270; b: 长江中游区 1. 中油杂 11; 2. 96185; 3. 丰油 701; 4. 96-5; 5. 两优 589; 6. 21931; 7. 杂 2013; 8. 秦优 8 号; 9. H0203; 10. 9558; 11. 沪油杂 1 号; 12. 中油 821; 13. 优 88; 14. 1087; c: 长江下游区 1. 中油杂 11; 2. 油 0310; 3. K142; 4. 2001; 5. 黔杂 ZW99004; 6. 湘杂油 6 号; 7. 皖油 14; 8. 沪油杂 1 号; 9. H243; 10. 皖核杂 5 号; 11. 优 88; 12. SQ1; 13. 中双 9 号; 14. 杂 98033
a: Upper reaches of Yangtze river valley 1. Zhongyouza11; 2. 2001V51; 3. You 0308; 4. Jinza ZW99004; 5. Fuyou 1; 6. Xiangzayou 6; 7. 01za796; 8. Za 0203; 9. Youyan 7; 10. Zhongshuang 9; 11. H4270; b: Middle reaches of Yangtze river valley 1. Zhongyouza 11; 2. 96185; 3. Fengyou 701; 4. 96-5; 5. Liangyou 589; 6. 21931; 7. Za 2013; 8. Qinyou 8; 9. H0203; 10. 9558; 11. Fuyouza 1; 12. Zhongyou 821; 13. You 88; 14. 1087; c: Lower reaches of Yangtze river valley 1. Zhongyouza 11; 2. You 0310; 3. K142; 4. 2001; 5. Jinza ZW99004; 6. Xiangzayou 6; 7. Wanyou 14; 8. Huyouza 1; 9. H243; 10. Wanheza 5; 11. You 88; 12. SQ1; 13. Zhongshuang 9; 14. Za 98033

图 2 中油杂 11 在长江上、中、下游区产油量与其它品系的比较

Fig. 2 Comparison of Zhongyouza 11 with other lines involved in national trials along Yangtze river valley

位基因和非等位基因)间差异与杂种优势的表现有一定关系。这也是杂种优势育种中选择有一定遗传差异亲本配制杂交种的理论基础。以往的育种实践中除了考虑亲本性状的互补之外,配制杂交组合时往往有意采用地理远缘的亲本,也是因为地理远缘的材料间基因差异比来自于同一地区的品种间大^[13]。本研究利用 SSR 和 SRAP 分子标记估算油菜品系间的遗传距离,可以根据分子标记的差异将 26 份材料分为不同杂种优势群,据此估算出的遗传距离与籽粒产量超亲优势之间的相关系数为 0.6115,达极显著水平。在育种实践中通过这种方法预测杂种优势,可以缩小田间配合力测定的规模,节约大量的人力物力,是一种有效的分子标记辅助育种手段。

一般来说,在一定范围内,杂种优势随着亲本间遗传距离的增大而增加,但超过这一范围,杂种优势又会降低^[14]。本研究由于亲本间的遗传距离不大,最高才达到 0.5803,那种遗传距离很大但杂种优势降低的趋势不明显。但是,从本研究结果看,仅仅根据遗传距离预测杂种优势会出现一定的偏差。如 R_1 与 6098B 之间遗传距离最大,但超亲优势并不是很高,

主要是因为 R_1 与 6098B 在聚类时被分为一组,说明尽管它们之间利用本试验的分子标记差异估算的遗传距离较大,但它们分别又与本组内其它材料间差异较小,所以被聚类为同一组。这与前人的研究认为类群间亲本配制杂交种的杂种优势要强于类群内的亲本配制的杂交种结论是一致的^[15,16]。因而在利用遗传距离预测杂种优势时,还必须综合考虑亲本的聚类情况。

在作物中利用分子标记估算遗传距离来预测杂种优势的研究较多,但预测结果都不是很理想,所估算出的遗传距离与杂种优势的相关系数比较低,包括 RFLP^[17,18]、RAPD^[19]、AFLP^[20]、SSR^[21]等标记系统,这可能与采用的分子标记系统与产量杂种优势基因位点的相关性不高有关。特别是利用与基因表达无关的基因组序列作为标记系统,如 RAPD、AFLP、SSR 等,所揭示的遗传差异跟功能基因无关,不能反映与杂种优势相关的基因间的遗传差异,因而与杂种优势性状表现的相关程度也较低。本实验中将 SSR 标记与可反映基因表达外显子差异的 SRAP 标记结合使用,获得了较好的预测效果。如果能够利用与产量性状特别是杂种优势相关的基因的功能分子标记或连锁标记进行

预测, 有望获得更为可靠的效果。

油菜品种的地域性较强, 一般品种只适合在长江流域的 3 个生态区的某一个区种植, 很少有品种能够同时适应 3 个生态区的气候条件。中油杂 11 连续两年在 3 个生态区均表现出极好的稳产特性, 在 89 个试验点次有 77 个增产, 增产点次占总点次的 86.5%。含油量性状同样是连续两年在 3 个生态区稳定在 43% 以上, 说明中油杂 11 不仅产量和含油量性状突出, 还具有广泛的生态适应性, 这与其选配自复合杂交组合的后代有关。无论是保持系 6098B, 还是恢复系 R₆, 均是从复合杂交后代中选育出来的, 两个亲本品系共涉及到 6 个亲本材料的遗传背景。其中陕 2B 和陕 2C 属北方甘蓝型油菜品种, 中双 2 号和 R₁ 具有南方甘蓝型油菜品种的遗传背景, Start 为欧洲甘蓝型油菜品种, 227 则具有加拿大油菜品种的血缘, 可见亲本的遗传变异来源非常大。多个遗传差异大的亲本的功能基因位点经过竞争和选择后在一个杂交种中协调互动, 可能是中油杂 11 具有如此广泛的生态适应性的遗传基础。

中油杂 11 的含油量在气候适宜年份在长江流域大部分地区达到 46% 以上, 最高理论产油量达到 1 369.7 kg·ha⁻¹, 比中国农业科学院油料作物研究所以前育成的高产油量品种中油杂 8 号又提高了一个新台阶^[10], 其产油量水平比各地对照品种平均提高 26.02%。中油杂 11 种籽中芥酸含量为 0.35%, 硫苷含量为 20 μmol·g⁻¹ 饼左右, 达到国际领先的优质油菜品质标准, 是一个产油量高、适应性广的优质油菜新品种。因而, 中油杂 11 的选育成功, 将对中国高含油量油菜育种、提高油菜生产效益、促进油菜生产全面优质化起到积极的推动作用。

4 结论

利用分子标记鉴定亲本间的遗传差异, 进行聚类并估算亲本间的遗传距离, 在此基础上预测组合的杂种优势, 可以去除一批预期杂种优势小的组合, 大大缩小田间配合力测定的规模, 提高育种效率。中油杂 11 即是在前期复合杂交选育出一批优良亲本系的基础上, 利用该方法筛选出的强优势杂交油菜新组合。中油杂 11 在长江流域油菜主产区普遍表现高产稳产, 成为第一个同年通过长江流域三大生态区油菜品种区域试验并被审定的双低油菜品种。由于中油杂 11 兼具高产和高油特性, 其理论产油量在所有产量比较试验中均位居前列。在整个长江流域的产油量比对照平均高出 26% 以上, 是一个适应性广的高油高产优质油菜

新品种。利用常规育种手段结合分子标记预测杂种优势培育高油广适性油菜品种, 中油杂 11 在中国是一个成功的首例。高产油广适性中油杂 11 的育成和推广, 必将推动中国开展高含油量油菜育种, 提升油菜生产效益, 为保障中国的食用油和能源安全做出重大贡献。

致谢: 李晓琴、余友桥参加部分试验工作, 湖北省及全国区试点及组织单位进行区试工作, 特致谢意!

References

- [1] 张 堃, 李云昌, 梅德圣, 胡 琼. 油菜油脂研究进展. 植物学通报, 2007, 24(04): 581-589.
Zhang Y, Li Y C, Mei D S, Hu Q. Advances of lipid research in rapeseed. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(04): 581-589. (in Chinese)
- [2] 贺源辉, 杨瑞芳, 罗时清. 多抗性高产油菜新品系 821 的选育及其性状结构的研究. 中国油料, 1987, (2): 11-15.
He Y H, Yang R F, Luo S Q. Breeding of new rapeseed cultivar 821 with multi-resistance and high yield and it's traits structure. *Oil Crops in China*, 1987, (2): 11-15. (in Chinese)
- [3] 李云昌, 胡 琼, 梅德圣, 李英德, 徐育松. 选育高含油量双低油菜品种的理论与实践. 中国油料作物学报, 2006, 28(1): 92-96.
Li Y C, Hu Q, Mei D S, Li Yi D, Xu Y S. Theory and practice for the development of canola varieties with high oil content. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1): 92-96.
- [4] 陈锦清, 郎春秀, 胡张华, 刘智宏, 黄锐之. 反义 PEP 基因调控油菜籽粒蛋白质/油脂含量比率的研究. 农业生物技术学报, 1999, 7(4): 316-320.
Chen J Q, Lang C X, Hu Z G, Liu Z H, Huang R Z. Antisense PEP gene regulates to ratio of protein and lipid content in *Brassica napus* seeds. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 1999, 7(4): 316-320. (in Chinese)
- [5] Jako C, Kumar A, Wei Y D, Zou J T, Barton D L, Giblin M E, Covello P S, Taylor D C. Seed-specific over-expression of an *Arabidopsis* cDNA encoding a diacylglycerol acyltransferase enhances seed oil content and seed weight. *Plant Physiology*, 2001, 126: 861-874.
- [6] McVetty P B E, Scarth R, Fernando W G D, Li G, Sun Z, Taylor D, Tu J, Zelmer C D. *Brassica* seed quality breeding at the University of Manitoba, sustainable development in *cruciferous* oilseed crops production. Proceedings of 12th International Rapeseed Congress, 2007, 1: 2-4.
- [7] Wang H Z, Li Y C, Hu Q, Zou C S, Liu G H. Current status of

- double-low rapeseed variety development in OCRI-CAAS. *Brassicas*, 2006, 8: 29-36.
- [8] 李云昌, 李英德, 徐育松, 黄永菊, 胡 琼. 高产双低杂交油菜新品种中油杂 2 号的选育. *中国油料作物学报*, 2002, 24(2): 73-75.
Li Y C, Li Y D, Xu Y S, Huang Y J, Hu Q. Breeding of Zhongyouza No.2, a new high yield rapeseed hybrid with double-low. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2002, 24(2): 73-75. (in Chinese)
- [9] 王汉中, 刘贵华, 郑元本, 王新发, 杨 庆. 抗菌核病双低油菜新品种中双 9 号的选育及其重要防御酶活性变化规律的研究. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 23-28.
Wang H Z, Liu G H, Zheng Y B, Wang X F, Yang Q. Breeding of the *Brassica napus* cultivar Zhongshuang 9 with high resistance to *Sclerotinia sclerotiorum* and dynamics of its important defense enzyme activity. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 23-28. (in Chinese)
- [10] 李云昌, 胡 琼, 梅德圣, 李英德, 徐育松. 高产油量优质油菜中油杂 8 号的选育和优良特性. *中国农业科学*, 2005, 38(11): 2198-2204.
Li Y C, Hu Q, Mei D S, Li Yi D, Xu Y S. Development and superior performance of high oil yielding canola hybrid Zhongyouza 8. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(11): 2198-2204. (in Chinese)
- [11] 谭祖猛, 李云昌, 胡 琼, 梅德圣, 李英德, 徐育松. 通过分子标记估算遗传距离预测甘蓝型油菜的杂种优势. *中国油料作物学报*, 2007, 29(2): 126-133.
Tan Z M, Li Y C, Hu Q, Mei D S, Li Y D, Xu Y S. Heterosis prediction with SSR and SRAP markers in rapeseed. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(2): 126-133. (in Chinese)
- [12] 兰进好, 张宝石, 周鸿飞. 作物杂种优势遗传基础研究进展. *中国农学通报*, 2005, 21(1): 114-120.
Lan J H, Zhang B S, Zhou H F. Progresses in the study on the genetic basis of heterosis in crops. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(1): 114-120. (in Chinese)
- [13] 李云昌. 杂种优势的预测与固定. 见: 傅廷栋. 杂交油菜的育种与利用. 武汉: 湖北科学出版社, 1995: 30-35.
Li Y C. Prediction and stabilization of heterosis. In: Fu T D. *Breeding and Utilization of Rapeseed Hybrids*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1994: 30-35. (in Chinese)
- [14] 张爱民, 黄金龙, 王明理. T 型杂种小麦数量性状遗传距离与杂种优势关系的研究. *北京农业大学学报*, 1985, 11(4): 135-142.
Zhang A M, Huang J L, Wang M L. The relationship between genetic distance of quantitative traits and heterosis in hybrid wheat with *T. timopheevi* cytoplasm. *Journal of China Agricultural University*, 1985, 11(4): 135-142. (in Chinese)
- [15] 陈卫江, 李 莓, 于德日. 杂交油菜亲本遗传距离分析与杂种优势. *作物研究*, 1997, (3): 21-24.
Chen W J, Li M, Yu D R. The analysis of genetic distance of hybrid parents and heterosis in rapeseed. *Crop Research*, 1997, (3): 21-24. (in Chinese)
- [16] Riaz A, Li G, Quresh Z, Swati M S, Quiros C F. Genetic diversity of oilseed *Brassica napus* inbred lines based on sequence-related amplified polymorphism and its relation to hybrid performance. *Plant Breeding*, 2001, 120: 411-415.
- [17] Melchinger A E, Lee M, Lamkey K R. Genetic diversity for restriction fragment length polymorphisms: relation to estimated genetic effect in maize inbreds. *Theoretical and Applied Genetics*, 1990, 80: 488-496.
- [18] Diers B W, McVetty P B E, Osborn T C. Relationship between heterosis and genetic distance based on restriction fragment length polymorphism markers in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Science*, 1996, 36: 79-83.
- [19] Liu Z Q, Pei Y, Pu Z J. Relationship between hybrid performance and genetic diversity based on RAPD markers in wheat *Triticum aestivum* L. *Plant Breeding*, 1999, 118: 119-123.
- [20] 吴敏生, 戴景瑞. AFLP 标记与玉米杂种产量、产量杂种优势的预测. *植物学报*, 2000, 42: 600-604.
Wu M S, Dai J R. Use of AFLP marker to predict the hybrid yield and yield heterosis in maize. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42: 600-604. (in Chinese)
- [21] 沈金雄, 傅廷栋, 杨光圣. 甘蓝型油菜 SSR、ISSR 标记的遗传多样性及其与杂种表现的关系. *中国农业科学*, 2004, 37: 477-483.
Shen J X, Fu T D, Yang G S. Relationship between hybrid performance and genetic diversity based on SSR and ISSR in *Brassica napus* L. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 477-483. (in Chinese)

(责任编辑 于 竞)