

甘蓝型油菜 - 白芥渐渗系材料农艺性状和种子品质分析

张盼, 赵璇, 耿玉璐, 郑宇茜, 蒋金金, 吴健, 方玉洁, 王幼平

(扬州大学生物科学与技术学院, 扬州 225009)

摘要: 远缘杂交能够有效拓宽物种的遗传背景, 产生丰富的遗传变异。前期研究中利用体细胞融合技术获得了甘蓝型油菜扬油 6 号(Y6)与白芥的属间杂种, 将杂种与 Y6 连续回交和自交得到了一系列稳定遗传的渐渗系株系。本研究以 62 个渐渗系株系为材料, 对这些株系进行 14 个农艺性状的考察, 并通过相关性分析、主成分分析、回归分析和聚类分析等方法, 探究甘蓝型油菜单株产量与农艺性状之间的关系及影响单株产量的主要因素。结果显示, 甘蓝型油菜 - 白芥渐渗系株系的农艺性状存在较大差异; 单株产量与全株角果数、有效分枝数和每角粒数等性状呈极显著正相关, 而与分枝点高度呈极显著负相关。主成分分析的结果表明, 4 个主成分可以概括 14 个农艺性状的大部分信息, 这些主成分主要与角果数目、株高、角果长度和千粒重等性状指标相关。回归分析结果表明, 千粒重、每角粒数、二次有效分枝数、株高和全株角果数对单株产量具有重要影响。综合各项指标, 筛选出一些具有优异农艺性状的材料, 如 L8 等株系角果数目明显增多; L3、L7 等株系分枝数目明显增多; L42、L49 等株系千粒重明显增加; L3、L8 等株系单株产量明显提高。利用近红外光谱仪分析渐渗系材料种子品质性状, 发现硫代葡萄糖苷、芥酸、亚麻酸等品质性状存在较大变异, 可用于选育具有优良品质性状的材料。本研究表明远缘杂交对于甘蓝型油菜种质资源创新、提高油菜产量提供了一条有效途径, 研究结果为利用这些种质资源进行育种实践提供了理论依据。

关键词: 甘蓝型油菜; 白芥; 体细胞杂交; 农艺性状; 单株产量; 种子品质

Agronomic Traits and Qualitative Characters Analysis of *Brassica napus*-*Sinapis alba* Introgression Lines

ZHANG Pan, ZHAO Xuan, GENG Yu-lu, ZHENG Yu-qian, JIANG Jin-jin,

WU Jian, FANG Yu-jie, WANG You-ping

(College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009)

Abstract: Distant hybridization is recognized as an effective strategy enriching the genetic abundance of the cultivated species. Taking use of the intergeneric hybrids of *Brassica napus* (cultivar Yangyou 6, referred Y6) and *Sinapis alba* L. with somatic cell fusion as well as continuous backcrossing with Y6 and self-crossing, a series of genetically-stable introgression lines were obtained. In this study, fourteen agronomic traits of 62 introgression lines were investigated. The correlation analysis, principal component analysis, regression analysis, and cluster analysis were used to explore the relationship between agronomic traits and the main factors affecting the yield per plant. The results revealed significant differences in agronomic traits among the introgression lines.

收稿日期: 2019-11-26 修回日期: 2019-12-02 网络出版日期: 2019-12-26

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20191126004>

第一作者研究方向为油菜株型性状调控, E-mail: 15861327137@163.com

通信作者: 方玉洁, 研究方向为油菜株型性状调控, E-mail: yjfang@yzu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0102000); 国家重点基础研究发展计划(2015CB150201); 国家自然科学基金(31872874); 大学生科创基金(x20180675)

Foundation project: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0102000); National Key Basic Research Program of China (2015CB150201); National Natural Science Foundation of China (31872874); Undergraduate Student Scientific Research Innovation Program (x20180675)

The yield per plant was positively correlated with the silique number per plant, the number of effective branches, and seeds per silique, but negatively correlated with the height of the primary branch. Principal component analysis showed that, four principal components could reflect large proportion of the genetic variations that observed in 14 agronomic traits, which are mainly related to traits such as silique number, plant height, silique length, and 1000-grain weight. Regression analysis showed that 1000-grain weight, seeds per silique, secondary effective branch number, plant height, and silique number per plant had pivotal effects on yield per plant. Some introgression lines with excellent traits were characterized based on the agronomic characteristics. The silique number of L8 significantly increased. The branch number of L3 and L7 significantly increased. The 1000-grain weight of L42 and L49 significantly increased obviously. The yield per plant of L3 and L8 significantly increased. Near infrared spectroscopy was used to analyze the seed quality characters of the introgression lines, and the results revealed that glucosinolates, erucic acid, and linolenic acid showed great variation, which could be used to select the materials with advantageous quality characters. Taken together, this study provided a successful example of distant hybridization which served as an effective approach for the innovation of the *Brassica napus* L. germplasm resources and the improvement of *Brassica napus* L. yield. The results of this study laid a theoretical basis for *Brassica napus* L. breeding with these germplasm resources.

Key words: *Brassica napus* L.; *Sinapis alba* L.; somatic hybrid; agronomic traits; yield per plant; qualitative characters

油菜是全球范围内重要的油料作物,中国是油菜的主产国之一。菜籽油是我国主要食用油之一,甘蓝型油菜(*Brassica napus* L., $2n=38$, AACC)是我国油菜的主要栽培类型,在农业生产上具有重要的地位。近年来中国油菜种植面积逐年减少,目前我国食用油很大一部分依靠进口(http://www.moa.gov.cn/ztzl/nybrl/rlxx/201901/t20190109_6166369.htm),鉴于全球油菜籽减产、我国食用油供需严重不平衡的现状,提高油菜产量、促进油菜产业发展^[1],对于解决我国食用油供给不足的问题、保障我国食用油安全具有重要意义^[2]。

农作物的性状改良依赖于丰富的遗传资源,甘蓝型油菜遗传基础相对比较狭窄,而十字花科其他属的植物中遗传类型丰富、变异广泛,蕴藏着许多有利的遗传变异。远缘杂交能够突破不同植物物种间有性杂交的障碍,实现远源物种之间遗传物质的传递和融合,增加遗传变异,因此,利用远缘杂交手段将十字花科其他属植物中的优异性状引入甘蓝型油菜中,为拓宽甘蓝型油菜遗传背景、拓展其种质资源、改良其农艺性状和品质开辟了一条有效途径^[3-4]。研究者们已借助远缘杂交技术成功获得了多种依靠常规有性杂交难以获得的杂交材料: Takeshita 等^[5]利用胚珠培养获得了甘蓝型油菜和萝卜(*Raphanus sativus* L.)的杂种; Fahleson 等^[6]将甘蓝型油菜黄化苗下胚轴原生质体与芝麻菜(*Eruca sativa* Mill.)叶肉原生质体进行融合,获得

了23株杂种植株; Ripley 等^[7]利用胚胎挽救技术得到了甘蓝型油菜和白芥(*Sinapis alba* L.)的杂种; Fahleson 等^[8]通过原生质体融合技术得到了甘蓝型油菜和芝麻菜的杂种; Zhao 等^[9]成功获得了甘蓝型油菜与诸葛菜(*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz, $2n=24$, OO)的属间杂种。远缘杂交技术已经建立起一条将其他物种优良性状向甘蓝型油菜中转移的桥梁,获得了一些抗病性增强、品质改良的杂种后代材料。研究者们从甘蓝型油菜和野芥(*Sinapis arvensis* L.)以及甘蓝型油菜和黑芥(*Brassica nigra* (L.) W. D. J. Koch)的属间原生质体融合后代中获得了抗黑胫病的材料^[10-11]。戴兴临等^[12]用甘蓝型油菜与蔊菜(*Rorippa indica* (L.) Hiern)进行远缘杂交,得到了对菌核病有较强抗性的杂交后代。Du 等^[13]借助原生质体融合技术得到了甘蓝型油菜与菘蓝(*Isatis indigotica* Fortune, $2n=14$, II)的体细胞杂种并获得了二体附加系,发现二体附加系的叶片提取物具有一定的抗流感病毒活性。甘蓝型油菜与羽衣甘蓝远缘杂交实现了黄籽性状从羽衣甘蓝向甘蓝型油菜的转移^[14]。Qian 等^[15]对甘蓝型油菜和芥菜型油菜进行种间杂交,利用芥菜型油菜黄籽基因资源创制甘蓝型油菜黄籽新种质。研究者们还利用甘蓝型油菜与播娘蒿(*Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl)进行体细胞杂交获得了具有黄籽性状和高油双低性状的油菜^[16]。朱程等^[17]对甘蓝型油菜与诸葛菜进行属间杂交并利用胚胎挽救技

术得到了粉红色花瓣的杂种后代。

白芥 (*Sinapis alba* L., $2n=24$, SS) 是十字花科白芥属植物,与甘蓝型油菜的亲缘关系比较近。白芥具有黄籽、抗裂荚、抗病性强等许多优良性状,可为十字花科其他植物的育种提供有利的遗传资源。研究者们很早就开始关注白芥的各种优异性状,在应对非生物胁迫方面,白芥对于干旱具有较强的耐受能力^[18-19];在应对生物胁迫方面,白芥对于黑胫病、黑腐病以及露尾甲等病虫害的抗性都比较强^[20-21];除此之外,白芥还具有重要的药用价值,在临床上具有镇咳平喘、抗炎镇痛的作用,对于酵母菌等多种真菌具有广谱的抗菌作用^[22-23]。从 20 世纪 80 年代起,研究者们就开始尝试利用各种技术将白芥的优良性状导入到十字花科其他植物中^[24-26],巩振辉等^[27]利用杂种子房培养和杂种胚珠培养的方法创制了白菜和白芥的杂种后代,将白芥的抗病基因导入到白菜中,获得了对黑腐病抗性增强的白菜-白芥杂种免疫株系。Wang 等^[28]利用体细胞融合技术获得了甘蓝型油菜和白芥的体细胞杂种。张云虹等^[29]对甘蓝型油菜和白芥的体细胞杂种与甘蓝型油菜连续回交和自交产生的后代进行了抗裂角性鉴定,筛选出一些抗裂角性增强的材料。尽管前人创建了白芥与十字花科其他植物的一些杂交材料,并对杂种后代的性状进行了一些研究,但是对白芥的优良抗逆性、优异农艺性状以及药用成分向其他植物物种中的转移和应用还非常有限。

本实验室前期利用体细胞融合技术得到甘蓝型油菜扬油 6 号 (Y6) 与白芥的属间杂种,将杂种与轮回亲本甘蓝型油菜 Y6 进行连续回交和自交,得到了一系列渐渗系株系^[28-30],经过多代回交,渐渗系材料的遗传背景已与亲本 Y6 非常相近,且渐渗系材料的表型能够稳定遗传。田间观察发现,与亲本 Y6 相比,渐渗系株系中除了部分株系的种皮颜色呈现不同程度地变黄之外,另外一些株系的株高、一次有效分枝部位、分枝数目以及角果数也发生了变化,有望从中筛选出农艺性状优异、具有增产潜力的材料。因此,本研究对 62 个渐渗系株系进行了田间观察和 14 个农艺性状的考察及种子品质性状分析,对各农艺性状进行了相关性分析和主成分分析,对主要农艺性状与单株产量进行了回归分析,并筛选出一些农艺性状表现突出的株系,为后续的育种工作积累重要资源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

利用体细胞融合技术得到甘蓝型油菜扬油 6 号 (Y6) 与白芥的属间杂种^[28],以甘蓝型油菜 Y6 作为轮回亲本,与上述甘蓝型油菜-白芥杂种后代进行连续回交和自交获得稳定遗传的渐渗系株系 (L1~L22、L24~L39、L41~L64)。

1.2 材料种植

2015 年 10 月在江苏扬州市下河地区农科所、2017 年 10 月在扬州大学实验农牧场进行试验材料种植,选择地势平坦,土壤肥力中等或中等以上的均匀田块进行区域试验。将甘蓝型油菜-白芥体细胞杂种后代渐渗系材料种子直播于田间,3 叶期间苗,5 叶期定苗,每个油菜株系种植 4 行,设置 3 个重复,试验地四周设置保护行,各项栽培管理措施一致。

1.3 农艺性状调查

在油菜成熟后收获前进行田间表型观察,在材料成熟后进行主要农艺性状考察。成熟收获前 3~5 d 排除四周边行,每个株系随机选择 5 株,对植株株高 (PH, plant height)、分枝点高度 (HPB, height of primary branch)、一次有效分枝数 (PEBN, primary effective branch number)、二次有效分枝数 (SEBN, secondary effective branch number)、主轴长度 (LMI, length of main inflorescence)、主轴有效角果数 (SNMF, silique numbers of main florescence)、一次有效角果数 (ESNPB, effective silique number on primary branches)、二次有效角果数 (ESNSB, effective silique number on secondary branches)、全株角果数 (SNPP, silique number per plant)、主轴角果密度 (SD, silique density)、角果长度 (SL, silique length)、每角粒数 (SS, seeds per silique)、千粒重 (GW, 1000-grain weight) 和单株产量 (YPP, yield per plant) 等 14 个农艺性状进行考察和记录。

1.4 品质性状调查

利用近红外多功能品质快速分析仪 (FOSS 公司 NIRS DS2500F) 对渐渗系材料的种子品质性状 (包括:水分、含油量、蛋白质、硫代葡萄糖苷、芥酸、棕榈酸、棕榈一烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸) 进行测定。

1.5 数据分析

对各个农艺性状的原始考种数据以及品质数据进行处理和分析^[31],利用 Microsoft Excel 2016 和

SPSS 25 软件进行相关性分析、主成分分析、回归分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 渐渗系材料农艺性状差异

本实验室前期对甘蓝型油菜扬油 6 号 (Y6) 和白芥进行体细胞融合得到属间杂种, 然后将得到的体细胞杂种与甘蓝型油菜 Y6 进行连续回交, 得到的后代再经过多代自交获得稳定遗传的渐渗系株系 (图 1)。田间观察发现, 一些渐渗系株系的性状与亲本 Y6 相比出现了明显差异, 如 L5 一次有效分枝数增加, L12 主轴角果密度增加, L15 一次有效角果数增加 (图 2)。对渐渗系株系材料的 14 个农艺性状进行考察 (表 1), 在被测的 14 个农艺性状中, 二次有效角果数和二次有效分枝数变异较大, 主要是由于个别材料的二次分枝缺失导致的; 此外, 一次有效角果数、分枝点高度、单株产量和全株角果数也表现出了较大差异, 一次有效角果数最多达 578 个, 分枝点高度极差达到了 82.87 cm, 单株产量极差达到了 59.83 g, 全株角果数极差达到了 596 个。部分材料的一次有效分枝数和二次有效分枝数表现较好, 这些材料中一次有效分枝数最多的达到了 14.25 个, 二次有效分枝数最多的达到了 21.31 个。在调查的 14 个农艺性状中, 株高、角果长度和千粒重的

变化较小。变异系数可以较客观地反映渐渗系材料不同农艺性状变化的程度, 通过选育性状优良的材料, 有望为提高油菜产量提供基础, 具有重要的生产实践价值。

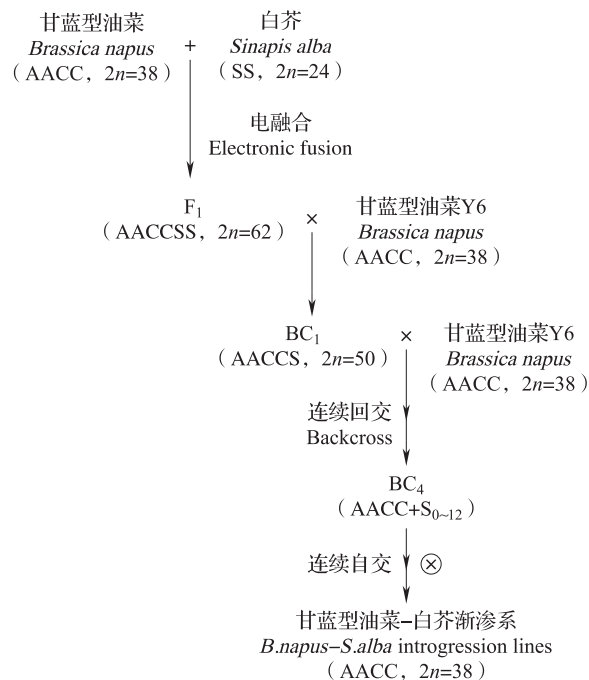


图 1 甘蓝型油菜 - 白芥渐渗系的创建过程
Fig.1 The construction pipeline of *B.napus*-*S.alba* introgression lines

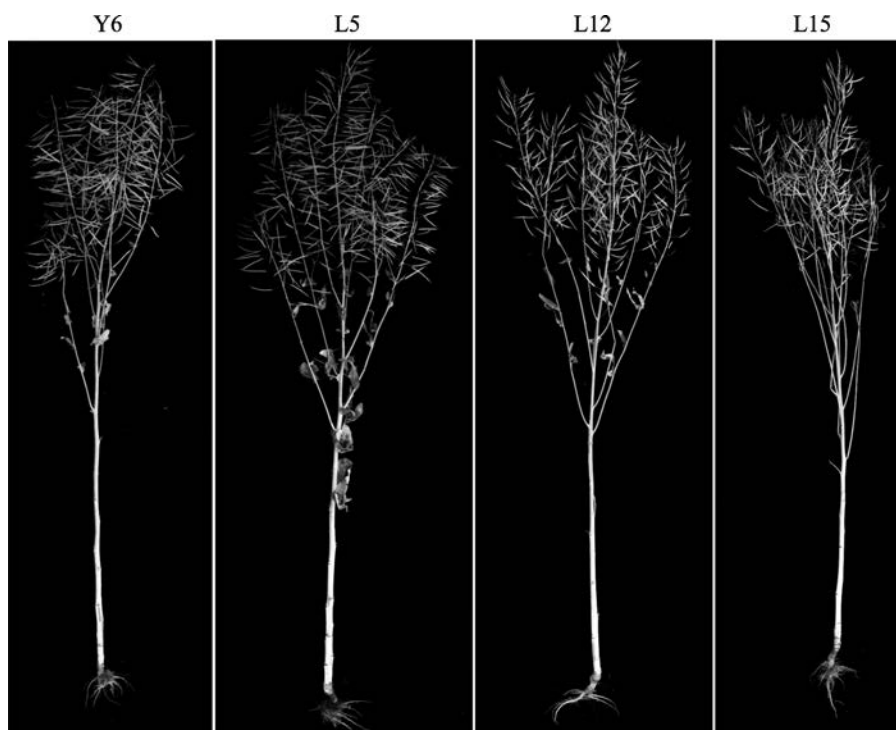


图 2 部分渐渗系株系的成株期表型
Fig.2 Phenotype of some introgression lines at adult plant stage

表 1 渐渗系株系主要农艺性状变异情况

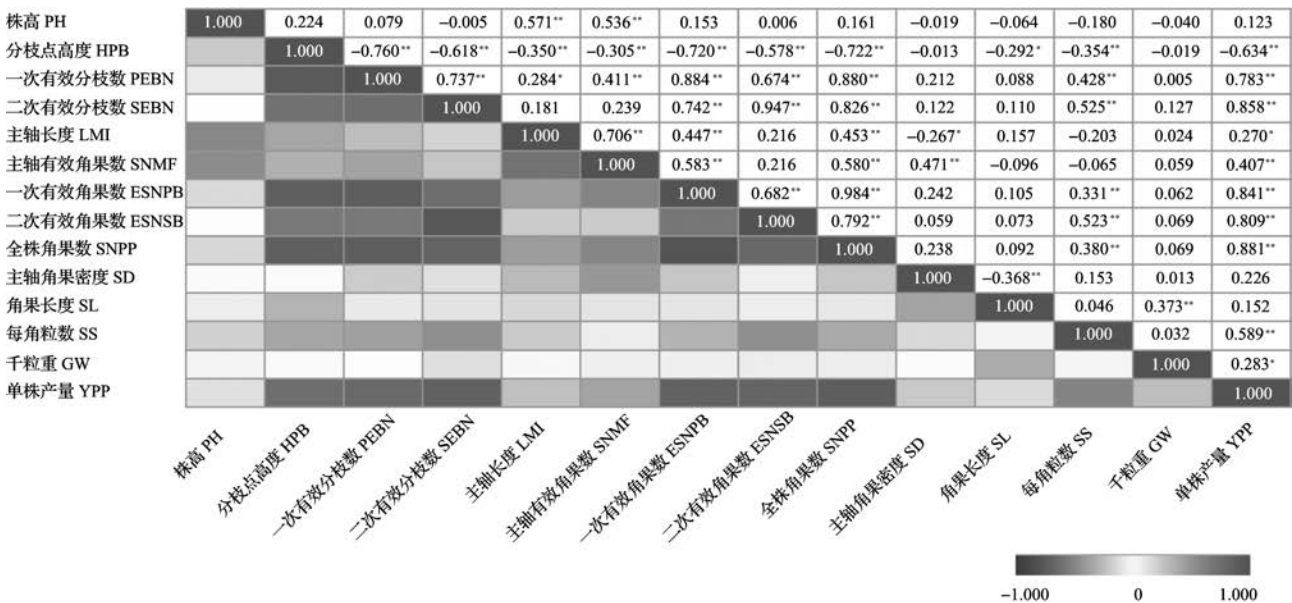
Table 1 Variation of main agronomic traits of introgression lines

性状 Traits	最小值 Min.	最大值 Max.	极差 Range	平均数 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV
株高 (cm) PH	137.68	203.90	66.22	179.37	13.23	7.37
分枝点高度 (cm) HPB	12.31	95.18	82.87	49.75	18.80	37.78
一次有效分枝数 PEBN	4.75	14.25	9.50	9.32	2.27	24.36
二次有效分枝数 SEBN	0	21.31	21.31	5.57	4.93	88.42
主轴长度 (cm) LMI	46.45	94.85	48.40	66.55	9.32	14.00
主轴有效角果数 SNMF	47.25	97.50	50.25	71.55	11.68	16.33
一次有效角果数 ESNPB	78.25	578.00	499.75	286.15	112.35	39.26
二次有效角果数 ESNBS	0	159.00	159.00	34.77	37.14	106.83
全株角果数 SNPP	128.75	724.75	596.00	392.47	146.80	37.40
主轴角果密度 (个/cm) SD	0.80	1.41	0.61	1.09	0.13	11.79
角果长度 (cm) SL	5.87	9.81	3.94	6.91	0.63	9.17
每角粒数 SS	17.88	33.83	15.95	25.54	3.11	12.18
千粒重 (g) GW	3.56	5.11	1.55	4.18	0.37	8.93
单株产量 (g) YPP	6.41	66.24	59.83	27.10	13.60	50.21

2.2 渐渗系材料各农艺性状相关性分析

对渐渗系材料的 14 个农艺性状进行相关性分析,其相关系数计算结果如图 3 所示,渐渗系株系材料的单株产量与全株角果数、一次和二次有效分枝数、一次和二次有效角果数、主轴有效角果数、每角粒数呈极显著正相关,与千粒重和主轴长度呈显著正相关,与分枝点高度呈极显著负相关;全株角果

数与一次和二次有效角果数、一次和二次有效分枝数、主轴有效角果数、主轴长度及每角粒数呈极显著正相关,与分枝点高度呈极显著负相关;千粒重与角果长度呈极显著正相关;株高与主轴长度和主轴有效角果数呈极显著正相关;分枝点高度与大部分农艺性状均呈极显著负相关关系。



* 表示在 0.05 水平上相关性显著; ** 表示在 0.01 水平上相关性显著
 *The correlation was significant at 0.05 level, ** The correlation was significant at 0.01 level

图 3 农艺性状相关性分析
 Fig.3 Correlation analysis of agronomic traits

2.3 主成分分析

通过对 62 个甘蓝型油菜 - 白芥渐渗系株系材料的 14 个重要农艺性状进行因子分析, 提取出 4 个主成分(表 2)。如表 2 所示, 主成分 1 的特征值为 6.411, 贡献率为 45.795%, 主要与全株角果数、单株产量、一次和二次有效角果数以及一次和二次有效分枝数等性状指标相关; 主成分 2 特征值为 2.239, 贡献率为 15.996%, 主要与株高、主轴长度和主轴有效角果数等性状指标相关; 主成分 3 特征值是 1.693, 贡献率为 12.093%, 主要性状指标为角果长度、千粒重和主轴角果密度等; 主成分 4 的特征值为 1.143, 贡献率为 8.168%。前 4 个主成分累计贡献率达到 82.052%, 能够概括 14 个农艺性状的大部分信息, 说明可以以此为依据对材料进行综合评价。

2.4 农艺性状与单株产量的回归分析

为了明确各农艺性状对渐渗系株系材料单株产量的影响, 首先对单株产量与其他农艺性状之间的关系进行了回归分析。以单株产量为因变量 (Y), 其他农艺性状为自变量 ($X_1 \sim X_{13}$) 进行线性回归分析, 经过分析将分枝点高度 (X_2)、一次有效分枝数 (X_3)、主轴长度 (X_5)、主轴有效角果数 (X_6)、

一次有效角果数 (X_7)、二次有效角果数 (X_8)、主轴角果密度 (X_{10})、角果长度 (X_{11}) 性状剔除, 保留株高 (X_1)、二次有效分枝数 (X_4)、全株角果数 (X_9)、每角粒数 (X_{12}) 和千粒重 (X_{13}) 性状进行分析, 得到如下回归方程: $Y = -74.887 + 0.091X_1 + 0.624X_4 + 0.052X_9 + 1.157X_{12} + 7.667X_{13}$ ($R^2 = 0.917$, $F = 126.680$, $P = 0$)。回归模型方差分析结果显示, F 统计量为 126.680, 对应 P 值为 0, 表明该回归模型在整体上回归关系极显著。对回归标准化预测值和因变量绘制散点图, 并进行标准化残差的直方图和 P-P 图正态检验, 说明回归方程的拟合效果较好, 且随机变量残差符合正态分布(图 4)。对上述回归方程中涉及各农艺性状因子与单株产量进行途径分析的结果表明, 上述因子对单株产量的直接效应从大到小依次为一次有效角果数 > 主轴有效角果数 > 每角粒数 > 千粒重 > 二次有效角果数 > 株高 > 主轴角果密度 > 分枝点高度 > 主轴长度 > 一次有效分枝数 > 二次有效角果数 > 角果长度, 其中一次有效角果数、每角粒数、千粒重和株高对单株产量的效应值为正, 且呈极显著相关, 说明提高一次有效角果数、每角粒数、千粒重和株高能够有效增加单株产量。

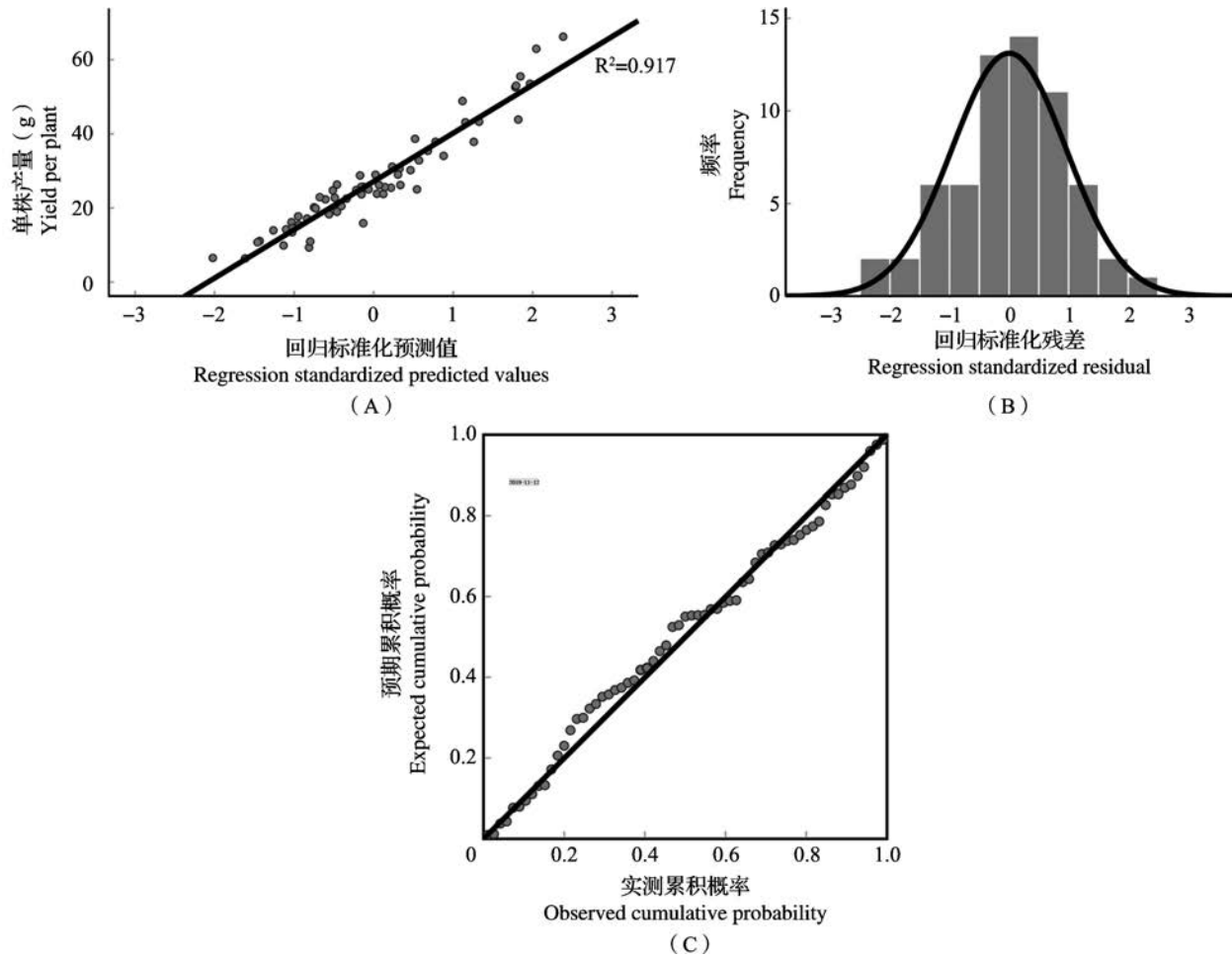
表 2 农艺性状的特征向量及贡献率

Table 2 Eigenvectors and accumulative contribution rates of the agronomic traits

性状 Traits	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
株高 PH	0.021	0.352	0.012	0.020
分枝点高度 HPB	-0.121	0.072	-0.119	0.173
一次有效分枝数 PEBN	0.140	-0.022	-0.039	-0.096
二次有效分枝数 SEBN	0.137	-0.116	0.002	-0.039
主轴长度 LMI	0.066	0.334	0.222	-0.153
主轴有效角果数 SNMF	0.084	0.325	-0.125	0.186
一次有效角果数 ESNPB	0.147	0.053	-0.023	-0.022
二次有效角果数 ESNSB	0.131	-0.109	0.008	-0.109
全株角果数 SNPP	0.152	0.039	-0.026	-0.029
主轴角果密度 SD	0.034	0.021	-0.465	0.409
角果长度 SL	0.023	-0.064	0.476	0.187
每角粒数 SS	0.077	-0.247	-0.095	0.011
千粒重 GW	0.020	-0.042	0.240	0.733
单株产量 YPP	0.145	-0.055	0.002	0.151
特征值 Eigen value	6.411	2.239	1.693	1.143
贡献率 (%) Contribution rate	45.795	15.996	12.093	8.168
累计贡献率 (%) Cumulative contribution rate	45.795	61.791	73.884	82.052

表中特征值表示各主成分的方差, 贡献率代表各主成分的方差占原始变量总方差的比率

The eigenvalues in the table represent the variance of each principal component, and the contribution rate represents the ratio of the variance of each principal component to the total variance of the original variable



A: 回归标准化预测值与因变量的散点图; B: 回归标准化残差的直方图; C: 回归标准化残差的正态 P-P 图

A: Scatter plot of the regression standardized predicted values against dependent variable,

B: The regression standardized residual histogram, C: Normal P-P plot of regression standardized residual

图 4 农艺性状与单株产量的回归分析

Fig.4 The regression analysis between the agronomic traits and yield per plant

2.5 主要农艺性状的聚类分析

以 14 个农艺性状作为指标,对 62 份渐渗系材料进行聚类分析(图 5),渐渗系材料在相对距离 3.0 处可以划分为 5 个类群,第 I 类群包括 L11、L16、L37、L48 和 L63,共 5 个株系,该类群材料分枝点较高,一次和二次有效分枝数较少,角果数较少,单株产量及生物产量也最低;第 II 类群包括 L20、L53、L42 等 16 个株系,该类群材料株高较高,分枝点较矮,分枝数较多,角果数较多,单株产量及生物产量较高,综合农艺性状良好;第 III 类群包括 L60、L22、L51 等 28 个株系,该类群材料一次有效分枝数较多,而二次有效分枝数较少,一次有效角果数较多,单株产量及生物产量中等;第 IV 类群包括 L9、L12、L8 等 6 个株系,该类群材料株高中等,分枝点较低,一次和二次有效分枝数相差不大,一次有效角果数

较多,二次有效角果数较少,单株产量及生物产量较高。第 V 类群包括 L6、L32、L5 等 8 个株系,该类群二次有效分枝数和二次有效角果数较少,单株产量及生物产量较高。

2.6 优异农艺性状渐渗系材料的筛选

根据田间农艺性状考察的结果,筛选出一些部分性状与对照 Y6 相比表现优异的株系(表 3)。与 Y6 相比,L3、L6、L9、L14、L34、L39 株系材料的分枝部位明显降低;L8、L9、L12、L15、L39 株系材料的角果数目明显增多;L3、L7、L12、L39 株系材料的分枝数目明显增多;L42、L49、L63 株系材料的千粒重明显增加;L3、L8、L12、L14、L39 株系材料的单株产量明显提高。在后续田间育种过程中,可以针对这些材料的优异性状进一步开展油菜新品系的选育。

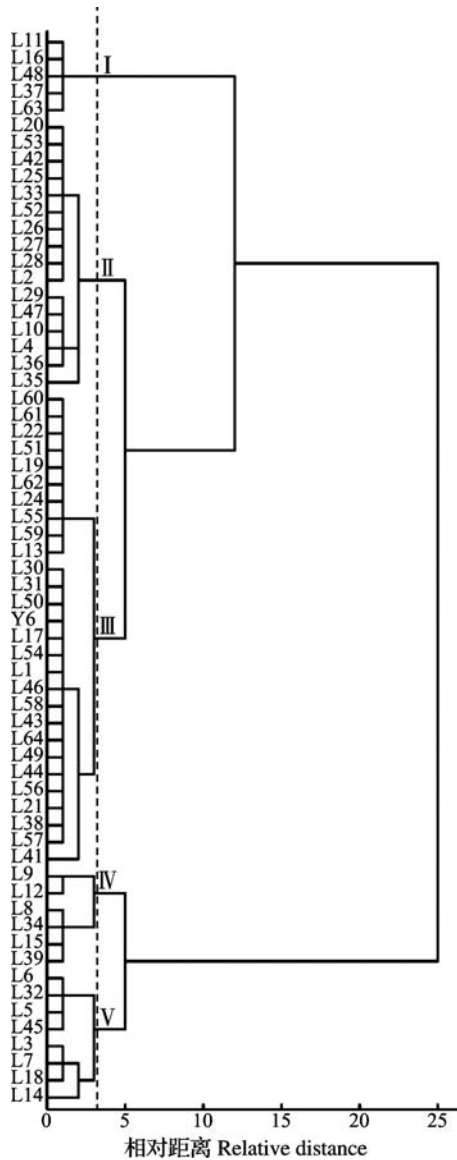


图 5 主要农艺性状的聚类分析

Fig.5 Dendrogram of cluster analysis for agronomic traits

表 3 单一性状表现突出的渐渗系株系

Table 3 Agronomic traits of prominent introgression lines

株系编号 Lines	性状 Traits
L3	分枝部位低,分枝数目多,单株产量高
L6	分枝部位低
L7	分枝数目多
L8	角果数目多,单株产量高
L9	分枝部位低,角果数目多
L12	分枝数目多,角果数目多,单株产量高
L14	分枝部位低,单株产量高
L15	角果数目多
L34	分枝部位低
L39	分枝部位低,分枝数目多,角果数目多,单株产量高
L42	千粒重大
L49	千粒重大
L63	千粒重大

2.7 种子品质性状分析

利用 FOSS 公司 NIRS DS2500F 近红外多功能品质快速分析仪对渐渗系材料的种子品质性状进行分析(表 4),与亲本 Y6 相比,大部分材料在含油量、蛋白质、硫代葡萄糖苷、芥酸、油酸等几个指标方面均表现出了明显差异。在测定的 12 种品质性状中,硫代葡萄糖苷含量变异较大,硫代葡萄糖苷最高为 76.74%。芥酸含量也出现了较大的变异,最大值达到了 3.08%。其中棕榈一烯酸变异最小,其含量最为稳定,无明显变化。油菜作为主要的油料作物,其种子品质性状与产油品质紧密相关,在选育优良农艺性状材料的同时,也应该兼顾油菜籽的品质,这对于育种实践工作具有十分重要的意义。

表 4 渐渗系株系主要品质性状变异情况

Table 4 Variation of main qualitative characters of introgression lines

组分(%)	最小值	最大值	极差	平均数	标准差	变异系数(%)
Components	Min.	Max.	Range	Mean	SD	CV
水分 Water content	4.63	6.31	1.68	5.41	0.37	6.84
含油量 Oil content	24.74	44.56	19.82	37.11	3.69	9.94
蛋白质 Protein content	22.33	35.07	12.74	28.96	3.10	10.70
硫代葡萄糖苷 Glucosinolate	22.09	76.74	54.65	43.78	12.24	27.96
芥酸 Erucic acid	0.81	3.08	2.27	1.68	0.38	22.62
棕榈酸 Palmitic acid	4.12	5.55	1.43	4.84	0.33	6.82
棕榈一烯酸 Palmitoleic acid	0.20	0.21	0.01	0.20	0.01	5.00
硬脂酸 Stearic acid	0.99	2.39	1.4	1.93	0.24	12.44
油酸 Oleic acid	26.56	65.41	38.85	55.80	5.75	10.30
亚油酸 Linolic acid	16.19	26.10	9.91	22.00	2.24	10.18
亚麻酸 Linolnic acid	6.63	12.32	5.69	10.00	1.44	14.40

3 讨论

种质资源是作物品种改良选育的基础,而远缘杂交则是促进作物遗传改良和种质创新的一种重要手段。前人已利用远缘杂交技术成功获得了许多新种质材料并将一系列优异性状导入到甘蓝型油菜中^[32-33]。胡琼等^[33]将甘蓝型油菜品种中双4号与新疆野生油菜野油18的原生质体进行融合,得到了2株雄性不育杂种,随后将中双4号作为轮回亲本与不育株回交至BC₃代,调查发现大部分株系接近完全不育且不育性状能够稳定遗传到BC₄代,该研究获得了一种新的雄性不育材料。汤洁等^[34]和涂玉琴等^[35]将甘蓝型油菜与蔊菜远缘杂交获得了一些具有较强营养生长和生殖生长优势的品系。前人还通过甘蓝型油菜与萝卜型甘蓝之间的杂交和回交,成功获得了抗根肿病、高产的新材料和细胞质雄性不育新材料^[36]。

本实验室前期基于电融合技术获得了甘蓝型油菜Y6与白芥的体细胞杂种,将体细胞杂种与甘蓝型油菜进行回交,发现回交后代中出现了一些籽粒种皮颜色为黄色的材料,这些材料相对于遗传背景相近的褐籽材料而言具有种皮较薄、木质素含量较低、含油量较高等特点,为甘蓝型油菜的品质改良提供了遗传资源^[37]。韦存虚等^[38]利用光学显微镜和电子显微镜对这些具有黄籽性状的株系和两个亲本(甘蓝型油菜、白芥)的种子结构进行观察,发现回交后代株系种子解剖结构与甘蓝型油菜相近,而种皮颜色、栅栏层厚度以及胚子叶细胞面积、油体和蛋白体等受到亲本白芥的影响发生了不同程度的变化。张永泰等^[39]对甘蓝型油菜-白芥单体附加系进行小孢子培养和秋水仙素处理获得了二体异附加系,为远缘杂交后代中外源基因的保存、纯合和利用提供了基础。张云虹等^[29]则利用随机碰撞法对抗裂角性状进行鉴定,从甘蓝型油菜-白芥杂种后代中筛选出一些抗裂角的材料。

提高油菜产量和改良油菜品质一直是甘蓝型油菜育种的重要目标。甘蓝型油菜的产量是一个受遗传背景、种植环境、种植密度等多种因素影响的复杂性状。本实验室前期在利用电融合技术获得甘蓝型油菜Y6与白芥体细胞杂种的基础上^[28],将杂种与轮回亲本Y6连续回交和自交获得了若干渐渗系株系。在渐渗系株系材料中,与轮回亲本Y6相比,我们发现了一些分枝数目等农艺性状发生了较大改变的材料,有望从中筛选出产量潜力提高的材料。因

此,本研究以62份甘蓝型油菜和白芥渐渗系材料进行了田间观察和农艺性状考察。结果表明,渐渗系材料各主要农艺性状的变异较为丰富,其中,二次有效角果数变异最大,株高变异最小,各主要品质性状也出现了一些变异,其中,硫代葡萄糖苷和芥酸变异较大,棕榈一烯酸变异最小,说明利用甘蓝型油菜与白芥远缘杂交对于拓宽甘蓝型油菜的遗传背景是行之有效的。根据渐渗系株系材料各农艺性状之间的相关性分析结果,单株产量与角果数和分枝数呈现极显著正相关关系,而分枝点高度与大部分农艺性状整体上呈现负相关关系,因此,筛选培育高产甘蓝型油菜材料可以从选择有效分枝数和结角数适当增加,而分枝点高度适当降低的角度来考虑。主成分分析的结果表明,渐渗系株系的主要农艺性状可归纳为4个主成分,主成分1主要与角果数目性状相关,主成分2主要与株高性状相关,主成分3主要与角果长度性状相关,主成分4主要与千粒重性状相关,这4个主成分的累计贡献率达82.052%,在甘蓝型油菜的育种过程中可结合实际情况根据不同的育种目标对相应主成分因子进行有侧重性地选择。回归分析结果表明,增加全株有效角果数、有效分枝数、每角粒数、千粒重和株高有利于提高甘蓝型油菜产量。基于上述研究结果,我们初步筛选出一些单一性状表现突出的株系,如L8、L9、L12、L15、L39角果数目较多,L3、L7、L12、L39分枝数目较多,L42、L49、L63千粒重较大,可以为后续进一步育种应用提供有利材料。

本研究对甘蓝型油菜和白芥属间杂种后代渐渗系材料进行表型观察和主要农艺性状考察,为开展甘蓝型油菜种质资源创新,并进一步围绕这些种质资源进行育种实践提供了理论依据。本研究仅对渐渗系株系的主要农艺性状进行了分析,进一步结合品质分析和分子鉴定手段有利于对渐渗系株系材料进行更为全面和客观的综合评价。此外,由于田间种植条件和气候环境变化较大,农作物新品系材料的推广种植需要综合考虑多方面的因素,因此,虽然我们目前已获得遗传相对稳定的渐渗系材料,但是对这些材料进行大范围推广应用还需要更进一步的田间试验和选育。

参考文献

- [1] 范成明,田建华,胡赞民,王珏,吕慧颖,葛毅强,魏珣,邓向东,张蕾颖,杨维才.油菜育种行业创新动态与发展趋势.植物遗传资源学报,2018,19(3):447-454

- Fan C M, Tian J H, Hu Z M, Wang J, Lv H Y, Ge Y Q, Wei X, Deng X D, Zhang L Y, Yang W C. Advances of oilseed rape breeding. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(3): 447-454
- [2] 王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议. *中国油料作物学报*, 2014, 36(3): 414-421
Wang H Z, Yin Y. Analysis and strategy for oil industry in China. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, 36(3): 414-421
- [3] Prakash S, Bhat S, Quiros C, Kirti P, Chopra V, Quiros C, Kirti P, Chopra V, Quirós F. *Brassica* and its close allies: cytogenetics and evolution. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 21-94
- [4] 王爱凡, 康雷, 李鹏飞, 李再云. 我国甘蓝型油菜远缘杂交和种质创新研究进展. *中国油料作物学报*, 2016, 38(5): 691-698
Wang A F, Kang L, Li P F, Li Z Y. Review on new germplasm development in *Brassica napus* through wide hybridizations in China. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2016, 38(5): 691-698
- [5] Takeshita M, Kato M, Tokumasu S. Application of ovule culture to the production of intergeneric or interspecific hybrids in *Brassica* and *Raphanus*. *Genes & Genetic Systems*, 1980, 55(5): 373-387
- [6] Fahleson J, Råhlén L, Glimelius K. Analysis of plants regenerated from protoplast fusions between *Brassica napus* and *Eruca sativa*. *Theoretical & Applied Genetics*, 1988, 76(4): 507-512
- [7] Ripley V L, Arnison P G. Hybridization of *Sinapis alba* L. and *Brassica napus* L. via embryo rescue. *Plant Breeding*, 2010, 104(1): 26-33
- [8] Fahleson J, Dixelius J, Sundberg E, Glimelius K. Correlation between flow cytometric determination of nuclear DNA content and chromosome number in somatic hybrids within *Brassicaceae*. *Plant Cell Reports*, 1988, 7(1): 74-77
- [9] Zhao Z G, Hu T T, Ge X H, Du X Z, Ding L, Li Z Y. Production and characterization of intergeneric somatic hybrids between *Brassica napus* and *Orychophragmus violaceus* and their backcrossing progenies. *Plant Cell Reports*, 2008, 27(10): 1611-1621
- [10] Sjodin C, Glimelius K. *Brassica naponigra*, a somatic hybrid resistant to *Phoma lingam*. *Theoretical & Applied Genetics*, 1989, 77(5): 651-656
- [11] Hu Q, Hansen L, Laursen J, Dixelius C, Andersen S. Intergeneric hybrids between *Brassica napus* and *Orychophragmus violaceus* containing traits of agronomic importance for oilseed rape breeding. *Theoretical & Applied Genetics*, 2002, 105(6-7): 834-840
- [12] 戴兴临, 程春明, 宋来强, 汤洁, 熊任香, 张弢, 邹小芬, 张建模. 油菜 × 蔊菜远缘杂交创新油菜种质资源研究. *植物遗传资源学报*, 2005, 6(2): 242-244
Dai X L, Cheng C M, Song L Q, Tang J, Xiong R X, Zhang T, Zou X F, Zhang J M. Germplasm enhancement through wide crosses of *Brassica napus* × *India rorippa*. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2005, 6(2): 242-244
- [13] Du X Z, Ge X H, Yao X C, Zhao Z G, Li Z Y. Production and cytogenetic characterization of intertribal somatic hybrids between *Brassica napus* and *Isatis indigotica* and backcross progenies. *Plant Cell Reports*, 2009, 28(7): 1105-1113
- [14] 陈树忠, 殷家明, 唐章林, 李加纳. 甘蓝型油菜与羽衣甘蓝远缘杂交初步研究. *西南农业大学学报*, 2000, 22(3): 208-210
Chen S Z, Yin J M, Tang Z L, Li J N. A preliminary study on interspecific hybridization between *Brassica napus* and *B.oleracea* var. *acephala*. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2000, 22(3): 208-210
- [15] Qian W, Chen X, Fu D, Zou J, Meng J. Intersubgenomic heterosis in seed yield potential observed in a new type of *Brassica napus* introgressed with partial *Brassica rapa* genome. *Theoretical & Applied Genetics*, 2005, 110(7): 1187-1194
- [16] 忻如颖, 管荣展, 张丽君, 姜淑慧, 张红生, 郑秀. 甘蓝型油菜与播娘蒿原生质体融合杂种后代的遗传. *作物学报*, 2009, 35(6): 1044-1050
Xin R Y, Guan R Z, Zhang L J, Jiang S H, Zhang H S, Zheng X. Genetical studies on progenies of somatic hybrids between *Brassica napus* and *Descurainia sophia*. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1044-1050
- [17] 朱程, 黄桃翠, 刘希忠, 唐世义. 甘蓝型油菜与诸葛菜属间杂交后代形态学与细胞学研究. *安徽农业科学*, 2019, 47(5): 53-55
Zhu C, Huang T X, Liu X Z, Tang S X. Morphological and cytological studies on intergeneric hybrid progenies of *Brassica napus* and *Orychophragmus violaceus*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(5): 53-55
- [18] 唐道城, 张礼, 王艳萍, 李宗仁. 白芥及油菜产量性状抗旱性及抗旱性鉴定指标研究初探. *干旱地区农业研究*, 1999, 17(3): 62-66
Tang D C, Zhang L, Wang Y P, Li Z R. Drought resistance and its estimate index of seed yield and tis characters of white mustard and rapes. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(3): 62-66
- [19] Maataoui A, Talouizte A, Benbella M, Bouhache M. Effect of water stress on the agressiveness of oilseed rape (*Brassica napus* L.) and two mustards (*Sinapis alba* L. and *S.arvensis* L.). *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2003, 68(4): 433-440
- [20] Dang J K, Sangwan M S, Mehta N, Kaushik C D. Multiple disease resistance against four fungal foliar diseases of rapeseed-Mustard. *Indian Phytopathology*, 2000, 53(4): 455-458
- [21] Kaasik R, Kovács G, Toome M, Metspalu L, Veromann E. The relative attractiveness of *Brassica napus*, *B.rapa*, *B.juncea* and *Sinapis alba* to pollen beetles. *Journal of the International Organization for Biological Control*, 2014, 59(1): 19-28
- [22] 刘秦, 范惠玲, 姚正良. 白芥优异性状研究进展. *现代农业科技*, 2010(19): 44-45
Liu Q, Fan H L, Yao Z L. Research advances on excellent characters of *Sinapis alba*. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(19): 44-45
- [23] 吴国欣, 林跃鑫, 欧敏锐, 檀东飞. 白芥子提取物抑制前列腺增生的实验研究(I). *中国中药杂志*, 2002, 27(10): 766-768
Wu G X, Lin Y X, Ou M R, Tan D F. An experimental study(I) on the inhibition of prostatic hyperplasia with extract of seeds of *Brassica alba*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2002, 27(10): 766-768
- [24] Primard C, Vedel F, Mathieu C, Pelletier G, Chevre A M. Interspecific somatic hybridization between *Brassica napus* and *Brassica hirta* (*Sinapis alba* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 1988, 75(4): 546-552
- [25] Ripley V L, Arnison P G. Hybridization of *Sinapis alba* L. and *Brassica napus* L. via embryo rescue. *Plant Breeding*, 1990, 104: 26-33

- [26] Chevre A M, Eber F, Margale E, Kerlan M C, Primard C, Vedel F, Delseny M, Pelletier G. Comparison of somatic and sexual *Brassica napus*-*Sinapis alba*, hybrids and their progeny by cytogenetic studies and molecular characterization. *Genome*, 1994, 37(3): 367-374
- [27] 巩振辉,王鸣,何玉科.白芥抗黑腐病基因导入白菜的研究.西北农业学报,1996,5(3):59-64
Gong Z H, Wang M, He Y K. Studies on transfer genes of black rot resistance from *Sinapis alba* to *Brassica Campestris*. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1996, 5(3): 59-64
- [28] Wang Y P, Sonntag K, Rudloff E, Chen J M. Intergeneric somatic hybridization between *Brassica napus* L. and *Sinapis alba* L. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(1): 84-91
- [29] 张云虹,张永吉,周如美,张永泰,李爱民.甘蓝型油菜与白芥杂种后代抗裂角性及其与角果性状的相关性.中国油料作物学报,2017,39(1):18-22
Zhang Y H, Zhang Y J, Zhou R M, Zhang Y T, Li A M. Silique shattering resistance in interspecific hybrids between *Brassica napus* and *Sinapis alba*. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 2017, 39(1): 18-22
- [30] Li A, Wei C, Jiang J, Zhang Y, Snowdon R J, Wang Y. Phenotypic variation in progenies from somatic hybrids between *Brassica napus* and *Sinapis alba*. *Euphytica*, 2009, 170(3): 289-296
- [31] 郑本川,崔成,张锦芳,李浩杰,柴靛,蒋俊,蒋梁材.甘蓝型油菜育种亲本单株产量与农艺性状相关性分析.植物遗传资源学报,2019,20(1):113-121
Zheng B C, Cui C, Zhang J F, Li H J, Chai L, Jiang J, Jinag L C. Correlation analysis of yield per plant and agronomic traits in breeding lines in *Brassica napus* L. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(1): 113-121
- [32] Li Z Y, Wang Y P. Cytogenetics and germplasm enrichment in *Brassica* allopolyploids in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2698-2708
- [33] 胡琼,李云昌,梅德圣,方小平,Hansen L N, Andersen S B. 属间体细胞杂交创建甘蓝型油菜细胞质雄性不育系及其鉴定.中国农业科学,2004,37(3):333-338
Hu Q, Li Y C, Mei D S, Fang X P, Hansen L N, Andersen S B. Establishment and identification of cytoplasmic male sterility in *Brassica napus* by intergeneric somatic hybridization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(3): 333-338
- [34] 汤洁,戴兴临,张弢,宋来强,邹晓芬,张建模,贺芳.甘蓝型油菜与蔊菜远缘杂交选育新品系的主要农艺及产量性状研究.江西农业学报,2008,20(9):35-37
Tang J, Dai X L, Zhang T, Song L Q, Zhou X F, Zhang J M, He F. Study on major agronomy and yield characters of new rapeseed lines from distant hybridization between *B. napus* L. and *Rorippa motana* (wall) small. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2008, 20(9): 35-37
- [35] 涂玉琴,汤洁,涂伟凤,戴兴临,张弢.甘蓝型油菜与蔊菜属间杂种后代的苗期耐湿性综合评价.植物遗传资源学报,2015,16(4):895-902
Tu Y Q, Tang J, Tu W F, Dai X L, Zhang T. Comprehensive evaluation of waterlogging tolerance of progenies between *Brassica napus* L. and *Rorippa indica* L. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(4): 895-902
- [36] 舒畅,刘超,吴江生.甘蓝型油菜新型细胞质雄性不育类型 NRO4270A 的鉴定.西北植物学报,2015,35(5):898-905
Shu C, Liu C, Wu J S. Identification of a new cytoplasmic male sterility type NRO4270A in *Brassica napus*. *Acta Botany Boreali-Occident Sinica*, 2015, 35(5): 898-905
- [37] Li A, Jiang J J, Zhang Y T, Snowdon R J, Liang G H, Wang Y P. Molecular and cytological characterization of introgression lines in yellow seed derived from somatic hybrids between *Brassica napus* and *Sinapis alba*. *Molecular Breeding*, 2012, 29(1): 209-219
- [38] 韦存虚,李爱民,张永泰,周卫东,王幼平.白芥和甘蓝型油菜属间杂种后代种子结构比较.作物学报,2009,35(6):1139-1145
Wei C X, Li A M, Zhang Y T, Zhou W D, Wang Y P. Comparison of seed structure of progenies from intergeneric hybrids between *Sinapis alba* and *Brassica napus*. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1139-1145
- [39] 张永泰,李爱民,陆莉,陈柳,惠飞虎,王幼平.通过甘蓝型油菜和白芥属间杂种后代的小孢子培养获得二体异附加系.作物学报,2006,32(11):1764-1766
Zhang Y T, Li A M, Lu L, Chen L, Hui F H, Wang Y P. Disomic alien addition lines generated through microspore culture from progeny of intergeneric hybrids between *Brassica napus* and *Sinapis alba*. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(11): 1764-1766