

岳瑶琴,王敏娟,赵志刚. 埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜复交后代遗传规律分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):89-96.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.012

# 埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜复交后代遗传规律分析

岳瑶琴<sup>1</sup>, 王敏娟<sup>2</sup>, 赵志刚<sup>1</sup>

(1. 青藏高原种质资源研究与利用实验室/青海大学农林科学院/青海省春油菜工程技术研究中心, 青海西宁 810016;

2. 青海省柴达木农垦集团有限公司, 青海西宁 810016)

**摘要:**为进一步揭示埃塞俄比亚芥、芥菜型油菜和甘蓝型油菜种间远缘复交后代材料的遗传变异规律,以埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜杂交,再与甘蓝型油菜复交的后代群体(复交  $F_1$  代~复交  $F_3$  代)为材料,对复交后代表型偏甘蓝型油菜变异群体进行花粉可染性、形态、细胞学方面的研究。花粉可染性分析表明,复交的远缘杂交后代育性极差;形态学分析表明,利用人工去杂,杂种后代中偏甘蓝型油菜占比随世代增长而增加;亲和性分析表明,复交  $F_3$  代群体的结角率与  $F_1$  代、复交  $F_2$  代相比呈极显著差异,但各代间亲和指数间无显著性水平;细胞学研究表明,复交  $F_2$  代、 $F_3$  代群体中各存在 1 个  $2n=38$  条的植株个体,复交后代群体中多数植株都为少于 38 条染色体的亚倍体,其减数分裂配对结果显示,复交  $F_3$  代群体中  $(600 \times 908) \times$  青油 14 号的染色体配对构型为  $2.43 \text{ I} + 16.26 \text{ II} + 0.35 \text{ III}$ ,染色体数比其他复交世代和其余杂交组合更接近于  $19 \text{ II}$ 。

**关键词:**埃塞俄比亚芥;芥菜型油菜;远缘杂交;花粉可染性;细胞学分析;配对构型

**中图分类号:**S634.303 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0089-08

油菜在植物分类上属于十字花科芸薹属,以收获种子榨油为主要目的,是我国重要的油料作物,也是我国食用油主要来源之一,其产油量占国产油料作物产油量 50% 以上<sup>[1]</sup>。埃塞俄比亚芥 (*Brassica carinata*,  $2n=4x=34$ ) 是由黑芥 (BB,  $n=$

8) 与甘蓝 (CC,  $n=9$ ) 通过自然界无人工干预条件下种间杂交并加倍产生的复合种,简称埃芥。埃芥是人工合成异源六倍体的“桥梁”,通过回交和选择的手段,可将埃芥自身的优良抗逆基因较为容易地转到重要的油料作物和蔬菜中去<sup>[2-5]</sup>。芥菜型油菜 (*Brassica juncea*,  $2n=4x=36$ ), 是由黑芥 (BB,  $n=8$ ) 与白菜 (AA,  $n=10$ ) 通过自然界无人工干预条件下种间杂交并加倍产生的复合种。二者拥有较多优良的农艺性状,如根深、叶片蜡质层厚、抗角果开裂、耐高温、耐旱、抗倒伏,抗病虫害<sup>[6-7]</sup>、耐高湿、黄籽<sup>[8-9]</sup>、早熟<sup>[10]</sup>等特性,且种质资源丰富<sup>[2,11]</sup>。

随着甘蓝型油菜育种工作的深入开展,高产、

收稿日期:2024-03-19

基金项目:国家科技重大专项(编号:2022ZD0401001);青海省自然科学基金—创新团队项目(编号:2022-ZJ-902)。

作者简介:岳瑶琴(1997—),女,甘肃兰州人,硕士,主要从事春油菜分子细胞遗传学研究。E-mail:3217560156@qq.com。

通信作者:赵志刚,博士,研究员,主要从事春油菜种质资源创新研究。E-mail:13897474887@126.com。

要养分含量特征[J]. 核农学报,2018,32(4):802-808.

[12] 李升东,王法宏,司纪升,等. 垄作小麦群体的光分布特征及其对不同叶位叶片光合速率的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3):465-468.

[13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[14] Guan D H, Al-Kaisi M M, Zhang Y S, et al. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 89-97.

[15] 高明,张磊,魏朝富,等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(4):343-348,354.

[16] 吕广动,黄璜,梁玉刚,等. 紫云英还田+稻鱼共生对水稻土壤养

分及产量的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(8):1729-1735.

[17] 丁蛟龙,陈璐,王忍,等. 鱼排泄物与分泌物对水稻土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2021,44(2):74-79.

[18] 车阳,程爽,田晋钰,等. 不同稻田综合种养模式下水稻产量形成特点及其稻米品质和经济效益差异[J]. 作物学报,2021,47(10):1953-1965.

[19] 孙永健,郑洪帆,徐徽,等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报,2014,30(20):10-18.

[20] 梁玉刚,胡文彬,刘烨,等. 中国垄作栽培模式的研究进展[J]. 生态学杂志,2022,41(7):1414-1422.

[21] 陈璐,陈灿,黄璜,等. 不同稻鱼模式对再生稻产量和品质的影响[J]. 河南农业科学,2021,50(12):32-38.

优质基因不断聚合,商业品种的遗传背景渐趋狭窄,品种间的同质性越来越高,生产中受生物和非生物逆境影响的风险进一步加大,限制了油菜种业及相关产业的可持续发展,在芸薹属内外挖掘优异种质,拓宽甘蓝型油菜遗传基础已迫在眉睫。

本研究通过芥菜型油菜和埃芥种间杂交获得杂种  $F_1$  代植株,以  $F_1$  代为母本,以综合性状好的甘蓝型油菜品系为父本进行复交,获得复交  $F_1$  代,结合形态学和分子细胞学等技术,对复交  $F_1$  代后的每一代进行自交和筛选,用有丝分裂和减数分裂观察统计并分析不同复交群体内各植株的染色体个数和染色体分裂行为;用花粉可染性记录不同杂交组合的育性水平;记录形态学特征,初步鉴定并筛选出偏甘蓝型油菜的植株个体,进行观察和统计,进而揭示埃塞俄比亚芥和芥菜型油菜复交后代的遗传规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

为避免不同杂交组合间、同一杂交组合内种间杂交试验存在差异,同时防止后代中亲和性极差未能产生可成活后代,故本试验中以埃塞俄比亚芥中 2 个品系(908、914,具有多分枝、抗角果开裂、耐旱、抗跳甲等优良性状)和以芥菜型油菜中 4 个品系(600、598,双低芥,具有低芥酸、低硫代、抗旱、耐瘠薄、抗裂荚等特征;x112、x113,多室芥,具有多果室、多粒、抗裂荚等特性)为双亲,双亲杂交(600 × 908、598 × 908、x112 × 914、x113 × 914)得到基因型为  $BBA^1C^c$  的  $F_1$  代群体共 53 株(表 1、图 1)。

上述材料由青海省农林科学院提供,于 2020 年 9 月种植在青海省农林科学院试验基地温室中。

表 1 亲本油菜品系编号、类型及品种名称

品系(品种)编号	类型	特性
908	埃塞俄比亚芥	
914	埃塞俄比亚芥	
600	芥菜型油菜	双低芥
598	芥菜型油菜	双低芥
x112	芥菜型油菜	多室芥
x113	芥菜型油菜	多室芥
青油 14 号	甘蓝型油菜	审定品种

### 1.2 试验方法

1.2.1 人工选择 2021 年 10 月,从复交  $F_1$  代开始进行人工选择。为加快育种进程,提高育种效率,选择植株表型性状偏甘蓝型的植株个体,淘汰其他类型的个体。

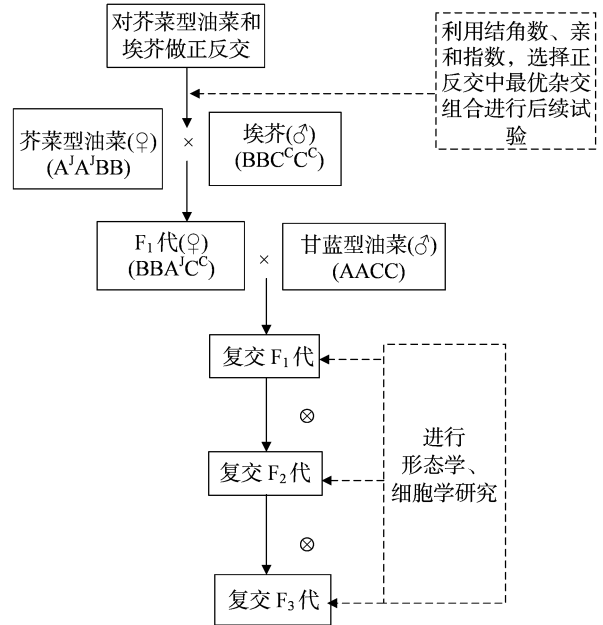


图 1 试验材料来源及系谱

1.2.2 花粉可染率观察 取材前对未开花花蕾进行套袋。晴朗天气,选取袋中新开放的 2 朵花,花粉涂抹于载玻片上,用醋酸洋红染色,显微镜 10 倍镜下进行观察,统计可染花粉粒占视野花粉粒总数的比率,即花粉可染率<sup>[12-13]</sup>。

1.2.3 亲和性分析 (1) 结角率及亲和指数<sup>[13-16]</sup>

结角率 = 结角数 / 授粉花朵数 × 100% ;

亲和指数 = 饱满种子数 / 授粉花朵数。

(2) 花粉管萌发观察

将亲本套袋,授粉后分别取 2、4、6、8、12、24、36、72 h 的雌蕊,加 FAA (formalin - acetic acid - alcohol) 固定液保存于 4 ℃ 冰箱。镜检时用 7 mol/L 的 NaOH 溶液浸泡 14 h 左右,再用 ddH<sub>2</sub>O 清洗后用含 0.18 mL/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 值为 8.2) 的 0.1% 苯胺蓝溶液处理 24 h,观察花粉粒的萌发及在胚珠中的延伸情况<sup>[2,15-16]</sup>。

1.2.4 细胞学研究 子房和花药处理及细胞学观察参照 Li 等的方法<sup>[17]</sup>。常规数据处理等利用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据分析,花粉可染性和细胞学观察利用尼康荧光显微镜和 NIS - Elements D 5.21.00 软件,植株形态学照片利用佳能 ixus210 相机拍摄。

## 2 结果与分析

### 2.1 芥菜型油菜和埃芥的亲和性分析

将 2 份埃芥和 4 份芥菜型油菜进行有性杂交,由表 2 可知,正交(芥菜型油菜 × 埃芥)的结角率和

表 2 杂交结角率和亲和指数

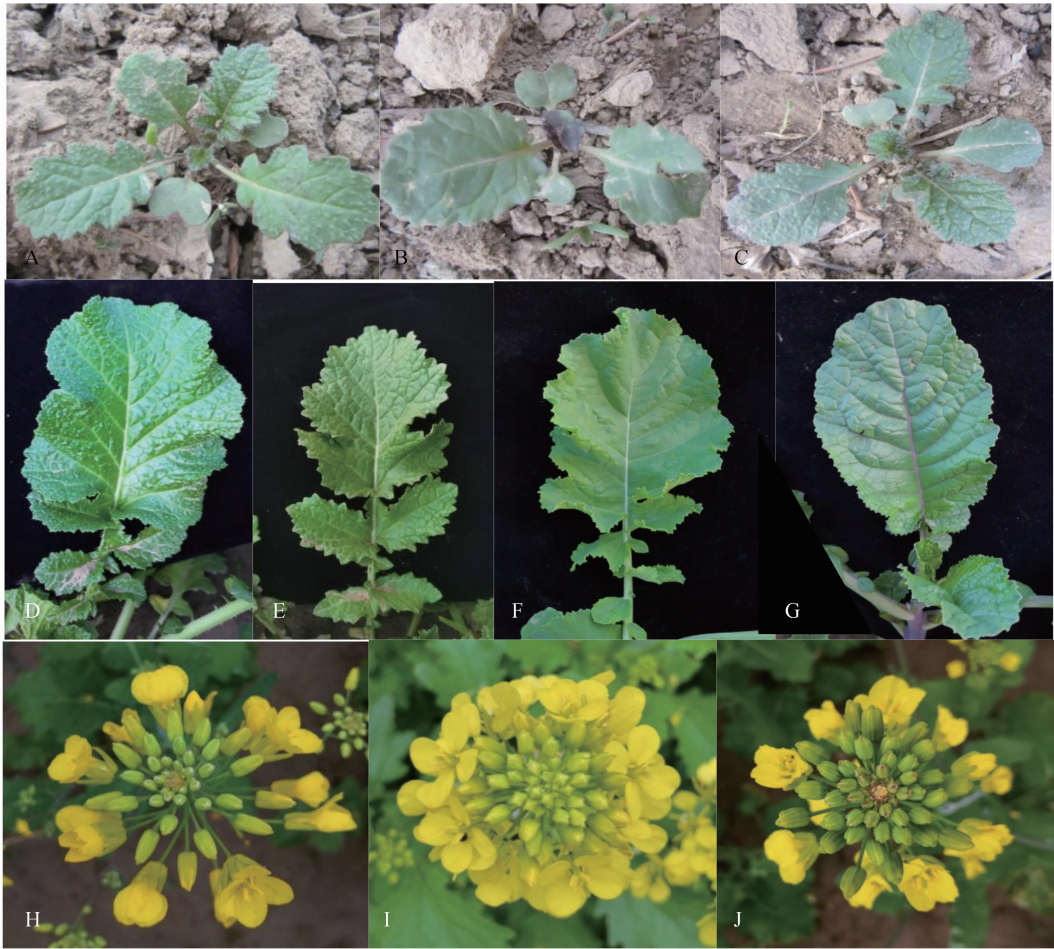
杂交类型	授粉花数 (朵)	结角数 (个)	结角率 (%)	饱满种子数 (粒)	亲和指数
正交	38	7	18.42	21	0.56
	54	5	9.26	75	1.31
	137	60	43.80	29	0.21
	89	35	39.33	83	0.93
	85	31	36.47	80	0.94
	65	7	10.77	16	0.24
	54	7	12.96	13	0.24
	33	8	24.24	9	0.27
反交	78	10	12.82	0	0.00
	26	4	6.25	0	0.00
	32	10	31.25	0	0.00
	84	12	26.19	0	0.00
	49	2	4.08	0	0.00
	134	13	9.70	0	0.00
	103	13	12.62	0	0.00
	108	17	15.75	0	0.00

亲和指数均高于反交(埃芥×芥菜型油菜),故选用芥菜型油菜作母本、埃芥作父本的杂交方式来获得后代群体。

2.2 复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代中形态变异

埃塞俄比亚芥中 2 个品系(908、914),具有多分枝,花瓣较大,花与花之间有距离,花药顶端、叶柄接合处、茎干、叶脉和豆荚处部分呈红色的形态学特征。芥菜型油菜中 4 个品系(600、598、x112、x113),具有薹茎叶有叶柄,叶表有毛刺,叶被蜡粉,花瓣窄小,开花时 4 瓣分离,种子小等形态学特征。复交后代植株性状表现见图 2。

由表 3 可知,复交 F<sub>1</sub> 代群体中植株偏中间型的占比最多,为 34.21%;复交 F<sub>2</sub> 代群体和复交 F<sub>3</sub> 代群体中偏甘蓝型油菜类型的占比最多,分别为 38.64%、72.92%,形态表现为枝叶繁茂、叶面平滑多被蜡粉、花瓣较大、开花时花瓣不重叠。



A~G 为苗期复交后代。A—叶表面呈毛刺的植株;B—幼叶呈紫色的植株;C—叶表面呈毛刺且叶柄呈紫色的植株;D~E—表面具有毛刺的叶片;F—表面未具毛刺的叶片,似甘蓝型油菜叶片;G—主叶脉与茎呈紫色;H~J 为盛花期复交后代花蕾形态。H—花蕾极不紧密;I—花蕾极紧密;J—花蕾较紧密;K~P 为复交后代形态变异植株。K—幼叶卷缩;L—叶缘光滑;叶脉较细,叶片呈凸状;M—叶色呈深绿色;Q~T 为花期复交后代形态变异植株。Q—偏甘蓝型油菜(偏甘型),且植株分枝角度较甘蓝型油菜的大;R~S—偏芥菜型油菜(偏芥型);T—中间型,植株分枝偏下且分枝较多

图2 复交后代植株形态学表现





图2(续)

表 3 复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代的形态变异

不同世代 群体	各世代总株数 (株)	偏芥菜型油菜		偏埃芥		偏甘蓝型油菜		中间型	
		株数(株)	比例(%)	株数(株)	比例(%)	株数(株)	比例(%)	株数(株)	比例(%)
复交 F <sub>1</sub> 代	38	6	15.79	8	21.05	11	28.95	13	34.21
复交 F <sub>2</sub> 代	44	14	31.82	3	6.82	17	38.64	10	22.72
复交 F <sub>3</sub> 代	48	7	14.58	1	2.08	35	72.92	5	10.42

2.3 复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代中花粉可染率变化

由表 4、表 5、表 6 可知,F<sub>1</sub> 代群体平均花粉可染率高于复交 F<sub>1</sub> 代和复交 F<sub>2</sub> 代的群体,F<sub>1</sub> 代群体中最低花粉可染率也高于复交 F<sub>1</sub> 代和复交 F<sub>2</sub> 代的群体,说明经过复交的远缘杂交后代育性极差;且由表 4 可知,复交 F<sub>3</sub> 代群体的平均花粉可染率未恢复至亲本花粉可染率水平。

2.4 复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代中亲和性分析

复交 F<sub>1</sub> 代大田表现为自交亲和性较差,群体内部分植株结实极差,单株套帐进行自交,自交不结

表 4 亲本花粉可染率

亲本	品系(品种)编号	花粉可染率 (%)	平均花粉 可染率(%)
埃芥	908	95.56	97.78
	914	100.00	
芥菜型油菜	600	100.00	91.84
	598	89.71	
	x112	85.68	
	x113	91.96	
甘蓝型油菜	青油 14 号	100.00	100.00

表 5 复交 F<sub>1</sub> 代花粉育性遗传变异

不同世代群体	各世代总株数(株)	花粉可染率 0% ~ 30%		花粉可染率 >30% ~ 50%		花粉可染率 >50% ~ 80%		花粉可染率 >80%		花粉可染率 变化范围 (%)	平均花粉 可染率 (%)
		株数 (株)	比例 (%)	株数 (株)	比例 (%)	株数 (株)	比例 (%)	株数 (株)	比例 (%)		
F <sub>1</sub> 代	53	1	1.89	26	49.05	11	20.75	15	28.31	29.19 ~ 100.00	55.87
复交 F <sub>1</sub> 代	38	22	57.89	5	13.16	6	15.79	5	13.16	6.01 ~ 94.44	40.92
复交 F <sub>2</sub> 代	44	10	22.74	5	11.36	20	45.45	9	20.45	9.50 ~ 98.32	52.20
复交 F <sub>3</sub> 代	48	0	0	5	10.42	12	25.00	31	64.58	40.47 ~ 98.79	81.60

表 6 后代平均花粉可染率

杂交组合	F <sub>1</sub> 代 (%)	复交 F <sub>1</sub> 代 (%)	复交 F <sub>2</sub> 代 (%)	复交 F <sub>3</sub> 代 (%)
(600 × 908) × 青油 14 号	64.81	54.91	50.77	83.09
(598 × 908) × 青油 14 号	67.00	26.27	63.34	79.32
(x112 × 914) × 青油 14 号	40.66	54.04	58.21	82.38
(x113 × 914) × 青油 14 号	51.00	28.44	66.58	

实没有种子;自由授粉情况下,单株结实率较低,单株平均结实不超过 20 粒。由表 7 可知,复交 F<sub>3</sub> 代的结角率和亲和指数较复交 F<sub>2</sub> 代明显提高,且对不同世代的结角率和亲和指数作 *t* 测验进行显著性分

析,可知复交 F<sub>3</sub> 代群体的结角率与 F<sub>1</sub> 代、复交 F<sub>2</sub> 代相比呈极显著差异,而各代间亲和指数间无显著性水平(表 8)。

表 7 复交 F<sub>2</sub> 代和复交 F<sub>3</sub> 代的结角率、亲和指数

杂交组合	授粉花朵数(朵)		结角数(个)		结角率(%)		饱满种子数(粒)		亲和指数	
	复交 F <sub>2</sub> 代	复交 F <sub>3</sub> 代	复交 F <sub>2</sub> 代	复交 F <sub>3</sub> 代	复交 F <sub>2</sub> 代	复交 F <sub>3</sub> 代	复交 F <sub>2</sub> 代	复交 F <sub>3</sub> 代	复交 F <sub>2</sub> 代	复交 F <sub>3</sub> 代
(600 × 908) × 青油 14 号	997	2134	232	1242	23.27	58.20	273	20272	0.27	9.50
(598 × 908) × 青油 14 号	210	474	41	332	19.52	70.04	20	1269	0.10	2.68
(x112 × 914) × 青油 14 号	302	192	70	100	23.18	52.08	43	241	0.14	1.26
(x113 × 914) × 青油 14 号	252	549	65	376	25.79	68.49	58	940	0.23	1.71

表 8 后代结角率和亲和指数

杂交组合	F <sub>1</sub> 代		复交 F <sub>2</sub> 代		复交 F <sub>3</sub> 代	
	结角率(%)	亲和指数	结角率(%)	亲和指数	结角率(%)	亲和指数
(600 × 908) × 青油 14 号	13.84	0.94	23.27	0.27	58.20 **	9.50
(598 × 908) × 青油 14 号	41.57	0.57	19.52	0.10	70.04 **	2.68
(x112 × 914) × 青油 14 号	23.62	0.59	23.18	0.14	52.08 **	1.26
(x113 × 914) × 青油 14 号	18.60	0.26	25.79	0.23	68.49 **	1.71

注:\*\*表示与 F<sub>1</sub> 代、复交 F<sub>2</sub> 代群体相比在 0.01 水平上差异显著。

2.5 复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代细胞学分析

在 F<sub>1</sub> 代的花粉母细胞减数分裂时,观察到了部分多价体(图 3 - A),其中有 2 个植株的减数分裂过程中存在 27 条染色体(图 3 - B),该种配对类型占后期 I 配对类型的 14.97%,后期 I/II 的花粉母细胞出现落后染色体和染色体桥(图 3 - C)。

由表 9 可知,观察 38 个复交 F<sub>1</sub> 代植株共 76 个体细胞的染色体数目,复交 F<sub>1</sub> 代群体中不存在 38 条染色体的植株个体,且群体中 34 条染色体数目的比例最高;观察 44 个复交 F<sub>2</sub> 代植株共 88 个体细胞的染色体数目,复交 F<sub>2</sub> 代群体中染色体存在 1 个 38 条的植株个体;观察 48 个复交 F<sub>3</sub> 代植株共 96 个

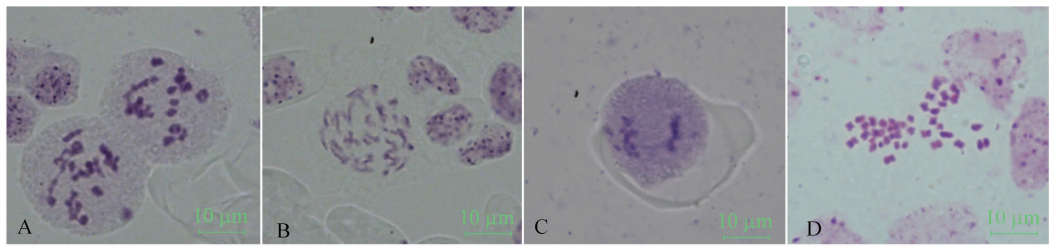


图3 细胞学观察

表9 复交后代体细胞染色体数目

染色体数目 (条)	复交 F <sub>1</sub> 代		复交 F <sub>2</sub> 代		复交 F <sub>3</sub> 代	
	植株数目 (株)	比例 (%)	植株数目 (株)	比例 (%)	植株数目 (株)	比例 (%)
30	0	0.00	0	0.00	3	6.25
31	0	0.00	0	0.00	6	12.50
32	6	15.79	3	6.82	6	12.50
33	2	5.26	7	15.91	0	0.00
34	8	21.05	4	9.10	10	20.84
35	3	7.89	0	0.00	6	12.50
36	6	15.78	7	15.91	7	14.58
37	6	15.78	8	18.17	0	0.00
38	0	0.00	1	2.27	1	2.08
39	3	7.89	7	15.91	6	12.50
40	2	5.26	0	0.00	3	6.25
41	2	5.26	7	15.91	0	0.00

体细胞的染色体数目,复交 F<sub>3</sub> 代群体中染色体存在 1 个 38 条的植株个体(图 3 - D)。

分别观察复交 F<sub>1</sub> 代群体花粉母细胞减数分裂 178 个、复交 F<sub>2</sub> 代群体花粉母细胞减数分裂 259 个,由表 10、表 11 可知,二者中二价体的数目和比例均最多,还有一部分染色体在减数分裂过程中以多价体形式(三价体、四价体)存在。复交 F<sub>1</sub> 代群体中(×112 × 914) × 青油 14 号的染色体配对构型为 2.98 I + 13.22 II + 1.06 III,复交 F<sub>2</sub> 代群体中(600 × 908) × 青油 14 号的染色体配对构型为 2.46 I + 16.08 II + 0.41 III,染色体数比其他杂交组合更接近 19 II。在后期 I / II 中,也均存在单价体落后现象;四分体时期(即末期 II)以四分孢子为主。

表10 偏甘蓝型油菜的复交 F<sub>1</sub> 代染色体配对类型

杂交组合	I		II		III		IV		花粉母细胞 总数(个)
	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	
(600 × 908) × 青油 14 号	244	3.70(0 ~ 6)	832	12.61(6 ~ 17)	76	1.15(0 ~ 5)	6	0.09(0 ~ 1)	66
(598 × 908) × 青油 14 号	166	3.64(1 ~ 7)	484	12.33(9 ~ 15)	81	2.30(1 ~ 3)	0	0.00(0)	40
(×112 × 914) × 青油 14 号	132	2.98(0 ~ 6)	326	13.22(9 ~ 18)	104	1.06(0 ~ 3)	0	0.00(0)	32
(×113 × 914) × 青油 14 号	240	6.00(1 ~ 7)	440	11.00(9 ~ 18)	80	2.00(0 ~ 3)	0	0.00(0)	40

注: I、II、III、IV 分别表示不同杂交组合花粉母细胞总数的单价体总数、二价体总数、三价体总数、四价体总数。下同。

表11 偏甘蓝型油菜的复交 F<sub>2</sub> 代植株染色体配对构型

杂交组合	I		II		III		IV		花粉母细胞 总数(个)
	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	数量	平均(范围)	
(600 × 908) × 青油 14 号	175	2.46(0 ~ 4)	1 142	16.08(11 ~ 18)	29	0.41(0 ~ 3)	0	0.00(0)	71
(598 × 908) × 青油 14 号	140	2.00(0 ~ 4)	1 040	14.86(12 ~ 20)	60	0.86(0 ~ 4)	0	0.00(0)	70
(×112 × 914) × 青油 14 号	250	4.17(3 ~ 6)	660	11.00(8 ~ 12)	25	2.92(2 ~ 3)	0	0.00(0)	60
(×113 × 914) × 青油 14 号	140	2.41(1 ~ 5)	876	15.10(12 ~ 18)	14	0.24(0 ~ 2)	0	0.00(0)	58

对复交 F<sub>3</sub> 代植株进行减数分裂染色体行为观察,只有(600 × 908) × 青油 14 号组合染色体配对构型接近于 19 II,其终变期染色体配对多为二价体,数目变化介于 13 ~ 19 之间,以 16 II 为最多(表

12),同时也存在不同数量的单价体和三价体(表 13),染色体配对构型为 2.41 I + 16.26 II + 0.33 III。后期 I / II 中,二价体正常分离,单价体随机分配,存在单价体落后现象,四分体时期以四分孢子为主。

表 12 2n=38 的复交 F<sub>3</sub> 代植株花粉母细胞中二价体数目变化及频率

二价体数目	花粉母细胞数目 (个)	频率 (%)
13 II	14	15.22
14 II	15	16.30
15 II	12	13.04
16 II	18	19.57
17 II	11	11.96
18 II	12	13.04
19 II	11	10.87
合计	92	100

表 13 2n=38 的复交 F<sub>3</sub> 代植株花粉母细胞染色体配对

配对类型	花粉母细胞 数目(个)	比例 (%)	变化范围 (个)	平均数 (个)
I	86	93.48	0~5	2.41
II	92	100.00	13~19	16.26
III	22	23.91	0~2	0.33

3 讨论与结论

埃芥和芥菜型油菜常作为油菜遗传改良的一种重要种质资源,其优良性状和抗性基因可通过一些远缘杂交的方式转移到我国种植面积较大的油菜品种中<sup>[2-5,18-19]</sup>,且芥菜型油菜<sup>[20-26]</sup>与甘蓝型油菜具有较大的亚基因组差异,是进行甘蓝型油菜遗传改良的宝贵资源。

对复交后代群体进行形态特征分析,发现复交 F<sub>1</sub> 代群体中偏中间型的植株占比最高,其次是偏甘蓝型油菜的植株类型;复交 F<sub>2</sub> 代群体和复交 F<sub>3</sub> 代群体中偏甘蓝型油菜的植株数最多。结果表明,通过前期形态学鉴定和自交或隔离自由授粉后,每个组合的偏甘蓝型占比均逐渐增大,后代中可能存在新型甘蓝型油菜。同时随着世代增加,相同品系不同杂交组合中(600×908)×青油 14 号和(598×908)×青油 14 号、(x112×914)×青油 14 号和(x113×914)×青油 14 号间形态类型的比重有所差异,不同品系杂交组合间不同形态学类型占比也有差异。这说明前期形态学鉴定选择十分必要,并且不同品系杂交组合对快速得到新型甘蓝型油菜也有着重要意义。

复交 F<sub>1</sub> 代~复交 F<sub>3</sub> 代群体的总平均花粉可染率分别为 40.92%、52.20%、81.60%。结果表明:复交 F<sub>1</sub> 代育性低于亲本和 F<sub>1</sub> 代,但从复交 F<sub>1</sub> 代开始,每代育性均有所提高,但各代间平均花粉可染

性间无显著性,这说明远缘杂交花粉育性恢复慢,还未恢复至亲本育性水平,育性也有可能一直低于亲本,这需要多代自交恢复育性直至稳定。同时,随着世代增加,相同品系杂交组合(600×908)×青油 14 号和(598×908)×青油 14 号育性有所差异,(x112×914)×青油 14 号和(x113×914)×青油 14 号间育性同样有所差异,并且在不同品系杂交组合间育性也有差异。

通过田间观察,复交 F<sub>1</sub> 代自交亲和性较差,群体内部分植株结实极差,单株套帐进行自交,自交不结实没有种子;自由授粉情况下,单株结实率较低,平均单株结实不超过 20 粒。本研究中,随着世代的增加,复交 F<sub>3</sub> 代结角率、自交亲和指数有所提高,但对各世代的结角率、亲和指数作显著性分析,发现复交 F<sub>3</sub> 代群体的结角率与复交 F<sub>1</sub> 代、复交 F<sub>2</sub> 代相比呈极显著差异,各代间自交亲和指数无显著性水平。结果表明,虽然在复交后的自交过程中,群体自交亲和性正在缓慢恢复,但随着复交世代的增加,后代自交亲和性改善不大。陈纪鹏等以甘蓝型油菜湘油 15 和白菜型油菜黄芽白为亲本,发现杂种二代花粉育性和自交结实率均比杂种一代高,预期经多代自交,杂种育性能得到较好恢复<sup>[27]</sup>,本试验结果与之不完全相同,这主要原因可能是试验亲本不同。同时,在做结角率试验时,对后代角果也进行了观察,发现随着世代增加,角果成熟前期形态表现为植株角果数增多,且角果内部分胎座处胚珠正常膨大,但获得饱满种子的量依旧较少,这可能是因为远缘杂交导致自交亲和性较差、雌性败育、胚败育等问题,膨大角果中正常籽粒的形成存在困难。

观察复交后代植株体细胞染色体数目,复交 F<sub>1</sub> 代群体中不存在 38 条染色体的植株个体,复交 F<sub>2</sub> 代植株、复交 F<sub>3</sub> 代植株各存在 1 个 38 条的植株个体。复交 F<sub>3</sub> 代较复交 F<sub>1</sub> 代、复交 F<sub>2</sub> 代相比,二价体构型占比变化不大,染色体行为仍旧复杂,还并未趋向于稳定遗传。同时,复交 F<sub>1</sub> 代群体中(x112×914)×青油 14 号的染色体配对构型为 2.98 I + 13.22 II + 1.06 III,复交 F<sub>2</sub> 代群体中(600×908)×青油 14 号的染色体配对构型为 2.46 I + 16.08 II + 0.41 III,复交 F<sub>3</sub> 代群体中(600×908)×青油 14 号的染色体配对构型为 2.41 I + 16.26 II + 0.33 III。这说明随着世代的增加,体细胞染色体数目都有向甘蓝型油菜 2n=38 升高和回归的趋势,并且染色



体数更接近于 19 II;随着世代的增长,二价体数目缓慢增多,单价体和多价体数目减少,这说明自交多次后染色体行为可能会逐渐趋向正常,但与甘白杂交<sup>[28-30]</sup>等相比恢复速度较慢。

埃塞俄比亚芥与芥菜型油菜做杂交时,芥菜型油菜为母本的正交组合更易获得杂交种。复交后代自交结实率和自交亲和性随着世代的变化而缓慢增长,但自交结实率和自交亲和性依然很低,推测还需要自交多代才能与亲本育性相持或复交后代育性很难达到亲本水平,群体内各植株自交种的获得有困难,无自交种的植株留存其自由授粉的种子。复交 F<sub>1</sub> 代群体的花粉母细胞中二价体数目变化范围为 6~18 个,复交 F<sub>2</sub> 代群体为 8~20 个,复交 F<sub>3</sub> 代群体为 13~19 个。复交后代中二价体的数目和比例都最多,单价体次之,还有部分染色体在减数分裂过程中以三价体、四价体形式存在,其中复交 F<sub>1</sub> 代中 (x112 × 914) × 青油 14 号的染色体配对构型为 2.98 I + 13.22 II + 1.06 III,复交 F<sub>2</sub> 代中 (600 × 908) × 青油 14 号的染色体配对构型为 2.46 I + 16.08 II + 0.41 III,复交 F<sub>3</sub> 代中 (600 × 908) × 青油 14 号染色体配对构型为 2.41 I + 16.26 II + 0.33 III。后期 I/II 中,二价体正常分离,单价体随机分配,也存在单价体落后现象,四分体时期以四分孢子为主。这说明随着世代增长,复交后代体细胞染色体数依然未稳定,染色体行为依然复杂。

#### 参考文献:

- [1] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613-617.
- [2] 江莹芬, 胡宝成, 陈凤祥, 等. 埃塞俄比亚芥研究进展[J]. 作物杂志, 2011(6): 6-9.
- [3] 史新杰. 人工合成芸薹属异源六倍体 (AABBCC) 细胞遗传学研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021: 13-21.
- [4] 谭亚飞, 张强, 赵艳艳, 等. 黄籽沙逊与黄籽埃塞俄比亚芥种间杂种的鉴定[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3): 107-111.
- [5] 江莹芬. 埃塞俄比亚芥的遗传多样性研究及芸薹属异源六倍体的创造[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005: 25-49.
- [6] 陈超权. 埃塞俄比亚芥种质资源遗传多样性分析与抗蚜机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 45-72.
- [7] Majdi M, Charnikhova T, Bouwmeester H. Genetical, developmental and spatial factors influencing parthenolide and its precursor costunolide in feverfew (*Tanacetum parthenium* L. Schulz Bip.) [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 47: 270-276.
- [8] Getinet A, Rakow G, Downey R K. Agronomic performance and seed quality of *Ethiopian mustard* in Saskatchewan [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1996, 76(3): 387-392.
- [9] 徐爱遐. 芥菜型油菜 (*Brassica juncea*) 遗传多样性及其黄籽与芥酸性状的分子标记[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 42-65.
- [10] 钱秀珍, 胡琼, 伍晓明. 中国芥菜型油菜的主要特性[J]. 作物品种资源, 1991(2): 14-15.
- [11] 刘后利. 几种芸薹属油菜的起源和进化[J]. 作物学报, 1984, 10(1): 9-18.
- [12] 刘红艳. 水稻灿梗亚种间杂交子一代不育机理的探讨[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003: 14-15.
- [13] 王爱云. 芸薹属与诸葛菜属间远缘杂交及种质创新的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006: 36-37.
- [14] 钱武, 李学才, 孙万仓, 等. 冬油菜远缘杂交亲和性分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(9): 2027-2033.
- [15] 牛妍, 赵志刚, 余青兰. 芥菜型油菜和白菜型油菜杂种后代自交亲和性研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(9): 36-42.
- [16] 牛妍. 芥菜型油菜遗传物质人工渗入白菜型油菜的研究[D]. 西宁: 青海大学, 2014: 18-19.
- [17] Li Z, Liu H L, Luo P. Production and cytogenetics of intergeneric hybrids between *Brassica napus* and *Orychophragmus violaceus* [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1995, 91(1): 131-136.
- [18] Navabi Z K, Stead K E, Chris Pires J, et al. Analysis of B-genome chromosome introgression in interspecific hybrids of *Brassica napus* × *B. carinata* [J]. Genetics, 2011, 187(3): 659-673.
- [19] Pan X, Caldwell C D, Falk K C, et al. The effect of cultivar, seeding rate and applied nitrogen on *Brassica carinata* seed yield and quality in contrasting environments [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2012, 92(5): 961-971.
- [20] 靖金杰. 向新型甘蓝型油菜导入多个芥菜型油菜品种的遗传变异[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 18-34.
- [21] 周清元. 甘蓝型油菜新种质资源创建及其株型性状遗传分析[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 17-82.
- [22] 韩甫. 芥菜型油菜与芥蓝种间杂交初步研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011: 45-46.
- [23] 刘淑艳, 刘忠松, 官春云. 芥菜型油菜种质资源研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(3): 351-358.
- [24] 明佳熠. 新型芥菜型油菜的创建及遗传多样性分析[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 11-26.
- [25] 孙欢, 虎满林, 赵志刚. 芥白杂交后代芥菜型油菜遗传物质渗入分析[J]. 青海大学学报, 2018, 36(1): 17-21.
- [26] 赵志刚. 利用青海大黄油菜与黑芥人工合成芥菜型油菜[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(8): 1746-1749.
- [27] 陈纪鹏, 刘小林, 李生强, 等. 白菜型油菜黄芽白与甘蓝型油菜湘油 15 种间杂交及其杂种后代的遗传学特征[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(7): 1170-1176.
- [28] 殷婷. 甘蓝型油菜和特早熟白菜型油菜种间杂交后代细胞遗传学研究[D]. 西宁: 青海大学, 2020: 12-37.
- [29] 殷婷, 赵彤, 柳海东, 等. 甘蓝型油菜与白菜型油菜杂种后代细胞学和分子标记分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 237-246.
- [30] 付绍红, 李云, 杨进, 等. 染色体加倍获得甘白 (甘蓝型 × 白菜型油菜) 杂交后代研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1164-1170.