

油茶杂交子代花器官性状的遗传分析

郭鑫淼, 袁迎春, 胡观兴, 姜毅, 李楠昕, 龚文芳

(中南林业科技大学林学院/油茶育种湖南省普通高等学校重点实验室/

中南林业科技大学经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南长沙 410004)

摘要: 为分析油茶杂交子代花器官性状的变异程度、杂种优势及遗传倾向,以322株油茶杂交子代(德油2×华硕)及其亲本为试材,调查花横径、花纵径、花瓣数、花药数、花柱裂数、雄蕊群长、花柱长和雌蕊长8个花器官数量性状,并进行遗传变异分析、正态性检验和概率分级、杂种优势分析及聚类分析。结果表明:(1)子代群体花器官性状变异系数区间为11.74%~22.10%,平均为16.26%。(2)K-S正态性检验和频率分布显示,花横径、花纵径、花药数和雄蕊群长符合正态分布;花瓣数和花柱长为双态分布;花柱裂数与雌蕊长呈偏态分布特征。频率分布占比最高的位于III级,平均占比43.05%;V级占比最低,平均为8.07%。(3)花器官各性状的中亲优势范围为-28.48%~5.65%,超高亲优势范围为-49.29%~-9.12%,超低亲优势范围在-18.06%~29.12%。除超高亲优势全为负值,存在一定程度的衰退现象外,其余2个优势度量指标呈现正负双向分布趋势,其中花柱裂数和花药数在中亲优势、超低亲优势中均表现为正向,优势明显且稳定;花柱长和雌蕊长在超低亲优势中显示为正值。相对遗传力分析结果显示,父本的花药数和花柱裂数优于母本,子代具有亲父倾向;其余6个数量性状中母本更占优势,子代倾向于母本特性。(4)聚类分析将试验材料分为三大类群,其中,第II类群综合表现最优,具有较高的杂种优势利用价值。以上结果表明,杂交子代群体的遗传变异程度较高,杂种优势明显,可为丰富油茶综合评价体系以及早期优株筛选提供参考依据。

关键词: 数量性状;油茶花器官;杂种优势;遗传变异;杂交育种

Genetic Analysis of Floral Organ Traits in Hybrid Progenies of *Camellia oleifera*

GUO Xinmiao, YUAN Yingchun, HU Guanxing, JIANG Yi, LI Nanxin, GONG Wenfang

(College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology / Hunan Provincial Key Laboratory of the Breeding of *Camellia oleifera* in Common University / Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-Wood Forest Trees of Ministry of Education, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan)

Abstract: The study aimed to analyze the degree of variation, heterosis and genetic tendency of floral traits in hybrid progenies of *Camellia oleifera*. 322 hybrid progenies and their parents (DY2×HS) were analyzed at eight characters, including flower transverse diameter, flower longitudinal diameter, petal number, anthers number, style dehiscence number, stamens group length, style length and pistils length, followed by the genetic variation analysis, test of normality and probability grading, heterosis analysis and cluster analysis. The results showed that: (1) The coefficient of variation ranged from 11.74% to 22.10%, with an average of 16.26%. (2) The normal distribution was observed at the flower transverse diameter, flower longitudinal diameter, anthers number and stamens group length, the bi-modal distribution was detected at the number of petals and style length, and the skewness distribution was detected at style dehiscence number and pistils length. The class III showed highest proportion of frequency distribution with an average of 43.05%, while grade V accounted for the lowest proportion, with an average of 8.07%.

收稿日期: 2023-04-11 修回日期: 2023-05-06 网络出版日期: 2023-07-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230411001>

第一作者研究方向为经济林栽培与利用, E-mail: g18202021001@163.com

通信作者: 龚文芳, 研究方向为油茶倍性育种与新种质创制, E-mail: T20182415@csuft.edu.cn

基金项目: 湖南省创新型省份建设专项经费(2021NK1007); 湖南省青年科技人才项目(2022RC1152); 湖南省教育厅重点项目(20A524)

Foundation projects: Special Funds for the Construction of Innovative Provinces in Hunan (2021NK1007); Program of Young Science and Technology Talent in Hunan Province (2022RC1152); Key Program of Education Department of Hunan Province (20A524)

(3) The mid-parent heterosis of floral organs ranged from -28.48% to 5.65% , the ultra-high parent heterosis ranged from -49.29% to -9.12% , and the ultra-low parent heterosis ranged from -18.06% to 29.12% . Except for the ultra-high parent heterosis was all negative which suggested a certain degree of heterosis decline, the other two indicators showed a trend of positive and negative bidirectional distribution, among which the style dehiscence number and anthers number were positive in the mid-parent heterosis and the ultra-low parent heterosis, and the advantages were obvious and stable; the style length and the pistils length are positive in the ultra-low parent heterosis. The results of relative heritability showed that the male parent was superior than the female parent in number of anthers and style dehiscence, and the progenies had a paternal tendency. For the remaining 6 quantitative traits, female parent was more dominant and the progenies had a maternal characteristics. (4) The test materials were divided into three groups by cluster analysis, among which the group II had the best comprehensive performance and heterosis utilization value. These results demonstrate that hybrid progeny populations have a high degree of genetic variation and the heterosis of significance, which can provide a reference basis for enriching the comprehensive evaluation system of *C. oleifera* and screening of excellent individuals early.

Key words: quantitative traits; *Camellia* flower organs; heterosis; genetic variation; cross-breeding

油茶(*Camellia oleifera*)属山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*),常绿小乔木或灌木,是我国木本粮油产业重点发展的主要树种之一,具有较高的综合利用价值^[1]。我国油茶培植面积大,物种资源丰富,集中分布于长江流域及以南的省市地区,如湖南、福建、贵州、浙江等地^[2-3]。国内主要栽培的油茶物种包括普通油茶、越南油茶、攸县油茶、小果油茶、腾冲红花油茶等20余种,主推的油茶品种达160多个^[4-5]。近年来,由于茶油需求量的不断增加,油茶产业的提质增量成为亟待解决的问题^[6],挖掘油茶新种质资源、选育优良新品种、丰富油茶选育和评价的综合指标,对于加快油茶产业高质量发展至关重要。

杂交育种是聚合优良性状的有效方法,也是创新种质资源、培育新品种的重要手段,子代杂种优势是评判杂交育种成功与否的直接指标。探索杂交子代群体表型性状的遗传规律和变异程度可为挖掘并利用子代群体杂种优势提供参考依据^[7-8]。王东雪等^[9]分析油茶62个杂交F₁单株的叶表型性状,发现子代群体叶表型性状存在广泛分离,变异水平和离散程度均较高,为杂交后代早期选择提供可靠依据。黄勇等^[10]以18个居群的小果油茶为研究对象,全面分析其种实及花叶的相关性状,结果表明研究性状间相关关系密切,居群内和居群间均变异丰富。邓少春等^[11]对137份茶树杂交子代的芽叶性状进行测定,结果显示群体遗传特性复杂,子代分离出9个亲父性状和3个亲母性状,表现为正负双向特性。韩飞等^[12]分析猕猴桃种间杂交后代果实性状的遗传倾向,发现部分性状优势率出现负值且广泛分离,存在远高于高亲值和远低于低亲值

的极端单株,具有选育优良单株的潜力。吴昊等^[13]调查分析枣的22个果实性状,发现13个与果实品质关联的数量性状具有广泛的变异程度,9个质量性状的遗传多样性均较为丰富,最终筛选出14份综合表现优异的种质资源,具有较大的指导价值。

花器官在植物传粉受精、执行生殖功能、繁衍后代过程中发挥着极其重要的作用,是种子植物特有的繁殖器官,也是植物最重要的表型性状之一^[14],花器官的表型特征与昆虫传粉、树体坐果及产量特征密切相关^[15]。因此,分析油茶花器官性状的变异程度和遗传倾向,是杂交后代早期筛选及选育新品种必不可少的环节。当前,油茶的研究工作主要集中于良种选育和栽培^[16]、油茶产品加工^[17-18]、果实经济和营养性状评价^[19-20]、花期物候观察^[21-22]等方面,而对于杂交子代群体花器官数量性状的杂种优势分析及其与亲本之间的遗传倾向研究较少,因此,本研究以322株油茶杂交子代及其亲本为试验材料,通过遗传变异分析、正态性检验和概率分级、杂种优势分析及聚类分析等多元统计方法,探索子代群体花器官性状的变异程度、杂种优势和遗传倾向,旨在探明油茶花器官性状的遗传规律,丰富油茶表型综合评价体系,并为油茶育种早期筛选、发掘优异基因及新品种创制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以本课题组前期审定的油茶新品种德油2(DY2)为母本、国审良种华硕(HS)为父本,杂交获

得500株子代,经前期初筛,去除病株、死株后最终得到322株杂交子代。本研究以322株杂交子代及其亲本为试验材料对花器官性状进行测定。亲本

花型具有明显差异,母本德油2多为小花型,单瓣,花瓣狭长,呈舌状型,排列疏松;父本华硕花瓣宽大,重瓣,排列紧密(图1)。



A: 母本德油2; B: 父本华硕; C: 杂交子代

A: Female parent DY2; B: Male parent HS; C: Hybrid progeny

图1 亲本与子代整花

Fig.1 The whole flower of the parent and their progenies

1.2 试验方法

子代群体于2017年3月份定植于湖南省长沙市天心区中南林业科技大学油茶种苗试验基地(112°59'E, 28°6'N),该基地属亚热带季风气候,年平均气温17.2℃,年积温5457℃,平均降水量1422.4 mm,土壤类型以红壤为主,土层深厚,养分丰富,肥力高,较为适宜油茶生长。栽植方式为小区单行,行长50~100 m不等,行间距1.3 m,株间距1 m,常规水肥管理。

2022年10月下旬杂交子代群体进入花期后开始花器官测定,每株材料随机选取3朵处于盛花期完全展开的花朵,人工记录花瓣数、花药数、花柱裂数;采用数显游标卡尺(分辨率为0.01 mm)测量花横径、花纵径、雄蕊群长、花柱长、雌蕊长,取3朵花的平均值。雌蕊长为花柱长与子房长之和。

1.3 数据处理

油茶花器官数量性状的分布特征应用Kolmogorov-Smirnov检验,对符合正态分布的性状参照刘孟军^[23]的分级方法,按照 $(X-1.2818S)$ 、 $(X-0.5246S)$ 、 $(X+0.5246S)$ 、 $(X+1.2818S)$ 4个点分为5个等级,使各级概率分布分别占整体的10%、20%、40%、20%和10%,其中X为各花器官性状的平均值,S为标准差。

杂种优势计算公式:

$$\text{变异系数}(CV) = \frac{S}{X} \times 100\%$$

$$\text{中亲优势}(MPH) = \frac{F_m - MPV}{MPV} \times 100\%$$

$$\text{超高亲优势}(BPH) = \frac{F_m - BPV}{BPV} \times 100\%$$

$$\text{超低亲优势}(LPH) = \frac{F_m - LPV}{LPV} \times 100\%$$

式中S表示标准差,X表示平均值, F_m 表示子代某一性状的平均值, MPV 表示双亲某一性状的平均值, BPV 表示双亲中较大的亲本值, LPV 表示双亲中较小的亲本值^[24]。

相对遗传力计算公式:

$$a_f = \frac{F_m - P_m}{P_f - P_m} \quad a_m = \frac{F_m - P_f}{P_m - P_f}$$

其中, P_f 表示父本值, P_m 表示母本值; a_f 表示父本的相对遗传力, a_m 表示母本的相对遗传力,且 $a_f + a_m = 1$ ^[25]。

利用Office 2021软件对原始数据进行整理;采用SPSS26.0软件统计分析平均值、标准差、变异系数、杂种优势及相对遗传力,并进行Kolmogorov-Smirnov正态性检验;采用R语言Stats包进行聚类分析,并绘制聚类谱系图。

2 结果与分析

2.1 油茶花器官数量性状的基本参数和变异情况

油茶杂交子代8个花器官性状的遗传变异情况见表1。各花器官性状的变异水平具有明显差异,变异系数区间为11.74%~22.10%,平均值为16.26%,均大于10%。其中,花柱长的变异系数最大,花柱裂数和花药数次之,变异程度较为丰富;花纵径和花横径的变异系数最为接近,变异较小。变异系数从大到小依次为:花柱长(22.10%)>花柱裂数(18.75%)>花药数(18.39%)>雌蕊长(17.27%)>花瓣数(16.19%)>雄蕊群长(13.61)>花横径(12.07%)>花纵径(11.74%)。花药数的标准差最大,说明群体

离散程度高,出现极值单株的概率较大;花柱裂数标准差最小,分布相对集中。分析花柱裂数的数据

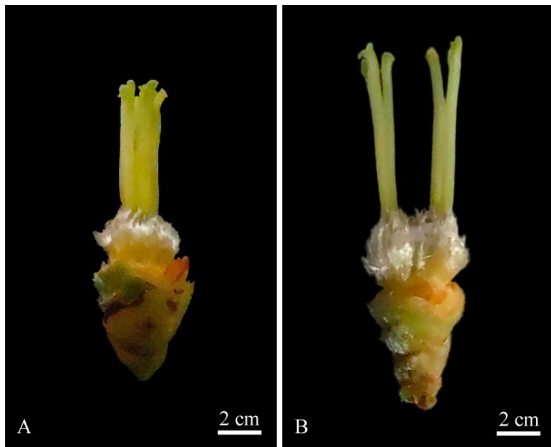
发现,出现最大值为8.00的极值个体(表1),且表型特异(图2)。

表1 油茶花器官数量性状基本参数

Table 1 Basic parameter value of quantitative traits of *Camellia oleifera* floral organs

性状 Traits	华硕 HS	德油2 DY2	杂交子代 Hybird progeny					
			最小值 Min.	最大值 Max.	极差 Range	平均值 Average	标准差 SD	变异系数(%) CV
花横径(mm)FTD	86.63	78.86	36.99	89.13	52.14	64.62	7.80	12.07
花纵径(mm)FLD	92.21	80.70	39.03	95.70	56.67	67.98	7.98	11.74
花瓣数PN	8.33	6.67	4.67	9.33	4.66	6.45	1.04	16.19
花药数AN	112.33	88.33	53.67	150.00	96.33	102.09	18.78	18.39
花柱裂数SDN	4.33	3.00	3.00	8.00	5.00	3.87	0.73	18.75
雄蕊群长(mm)SGL	19.85	16.17	9.18	21.20	12.02	15.45	2.10	13.61
花柱长(mm)SL	15.22	6.36	3.04	12.13	9.09	7.72	1.71	22.10
雌蕊长(mm)PL	18.11	9.18	4.89	14.67	9.78	10.59	1.83	17.27

FTD: Flower transverse diameter; FLD: Flower longitudinal diameter; PN: Petal number; AN: Anthers number; SDN: Style dehiscence number; SGL: Stamens group length; SL: Style length; PL: Pistils length; The same as below



A: 正常花柱; B: 变异花柱

A: Normal style; B: Variant style

图2 花柱变异情况

Fig.2 The variation on style of the flower

2.2 油茶花器官数量性状的正态性检验

通过 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验对杂交子代8个花器官性状总体分布趋势进行分析,结果如表2和图3所示, P 值 >0.05 的性状指标有4个,分别是花横径、花纵径、花药数、雄蕊群长,符合正态分布;花瓣数和花柱长的 P 值均 <0.05 ,结合图3C、G分析,属于双态分布;花柱裂数和雌蕊长的 P 值 <0.05 ,从图3E、H可知,这两个数量性状呈现显著的偏态分布特征。结果表明,油茶杂交子代花器官性状符合累加性微效多基因作用下的数量性状遗传特征。

2.3 油茶花器官数量性状的概率分级和频率分布

根据正态性检验结果,对符合正态分布的花横径、花纵径、花药数、雄蕊群长和呈双态分布及偏态

分布的花瓣数、花柱长、雌蕊长7个数量性状按照1.3的分级方法分为5个等级;对于呈偏态分布的花柱裂数,参照上述分级方法并结合实际测定情况制定分级标准,使该性状的概率分布更加均匀合理(表3)。

由表4可知,花器官数量性状各等级比例范围在0~61.80%。在5个等级中,性状指标频率分布的最高占比均位于III级,多数性状V级占比最低,各等级占比平均值由大到小依次为:III级(43.05%) $>$ IV级(21.78%) $>$ II级(18.24%) $>$ I级(8.85%) $>$ V级(8.07%)。表明各数量性状的分布呈集中趋势,为植株筛选提供参考范围。

表2 油茶花器官数量性状 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验

Table 2 Kolmogorov-Smirnov test of quantitative traits of *Camellia oleifera* floral organs

性状 Traits	极差绝对值 Absolute value	正极差 Positive	负极差 Negative	Z值	P值
				Z value	P value
花横径(mm)FTD	0.022	0.022	-0.021	0.022	0.200
花纵径(mm)FLD	0.038	0.038	-0.025	0.038	0.200
花瓣数PN	0.147	0.147	-0.067	0.147	0
花药数AN	0.034	0.023	-0.034	0.034	0.200
花柱裂数SDN	0.146	0.146	-0.114	0.146	0
雄蕊群长(mm)SGL	0.049	0.049	-0.034	0.049	0.061
花柱长(mm)SL	0.074	0.039	-0.074	0.074	0
雌蕊长(mm)PL	0.086	0.039	-0.086	0.086	0

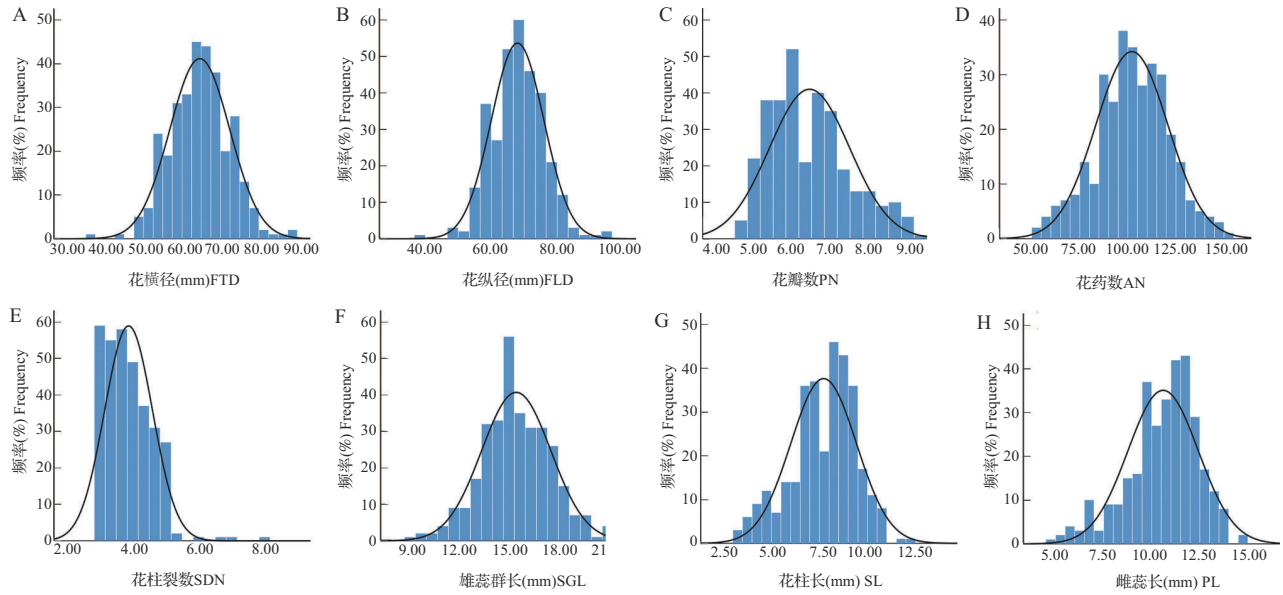


图3 油茶花器官数量性状的正态分布

Fig.3 Normal distribution of quantitative traits in *Camellia oleifera* floral organs

表3 油茶花器官数量性状概率分级标准

Table 3 Hierarchical criterion of probability grading of *Camellia oleifera* floral organs

性状 Traits	分级 Grade				
	I	II	III	IV	V
花横径(mm)FTD	<54.63	54.63~60.53	60.53~68.71	68.71~74.62	≥74.62
花纵径(mm)FLD	<57.75	57.75~63.79	63.79~72.16	72.16~78.20	≥78.20
花瓣数PN	<5.11	5.11~5.90	5.90~6.99	6.99~7.79	≥7.79
花药数AN	<78.02	78.02~92.24	92.24~111.94	111.94~126.15	≥126.15
花柱裂数SDN	<3.00	3.00~3.30	3.30~4.50	4.50~8.50	≥8.50
雄蕊群长(mm)SGL	<12.75	12.75~14.34	14.34~16.55	16.55~18.14	≥18.14
花柱长(mm)SL	<5.53	5.53~6.82	6.82~8.61	8.61~9.90	≥9.90
雌蕊长(mm)PL	<8.25	8.25~9.63	9.63~11.55	11.55~12.94	≥12.94

表4 油茶花器官数量性状频率分布

Table 4 Frequency distribution of quantitative traits in *Camellia oleifera* floral organs (%)

性状 Traits	分级频率 Grade frequency				
	I	II	III	IV	V
花横径FTD	10.56	19.88	40.37	19.25	9.94
花纵径FLD	10.56	18.32	42.55	19.88	8.70
花瓣数PN	8.39	23.60	35.09	20.81	12.11
花药数AN	10.25	17.39	40.37	23.60	8.39
花柱裂数SDN	0	18.32	61.80	19.88	0
雄蕊群长SGL	8.39	21.12	40.68	19.57	10.25
花柱长SL	11.49	14.29	41.30	24.53	8.39
雌蕊长PL	11.18	13.04	42.24	26.71	6.83
平均值 Average	8.85	18.24	43.05	21.78	8.07

2.4 油茶花器官数量性状的杂种优势和相对遗传力分析

由表5可知,杂交子代群体花器官性状的中亲优势范围为-28.48%~5.65%,存在明显差异,其中花柱

裂数和花药数为正向中亲优势,优势率分别为5.65%和1.75%,表明子代群体杂种优势在这2个性状上表现为上升趋势,其余6个花器官性状指标的中亲优势均为负值。子代群体8个性状指标的超高亲优势全为负值,范围在-49.29%~-9.12%,存在一定程度的衰退现象,说明在子代群体中选育出各方面优于父本的单株具有一定的难度。超低亲优势范围在-18.06%~29.12%,其中花柱裂数(29.12%)、花柱长(21.29%)、花药数(15.57%)、雌蕊长(15.40%)4个性状的优势率均>15%,表现为显著的负向超亲优势,表明子代群体在这4个性状上具有较高的选择潜力,其余4个性状为负值,选优难度相对较大。通过子代群体各数量性状的优势对比,花药数、花柱裂数、花柱长和雌蕊长4个性状指标具有较高的杂种优势和选育潜力。

相对遗传力是亲本的具体性状向杂交子代传递遗传特征能力的相对大小或强弱^[26]。从各花器官性状的分析结果来看(表5),父本的花药数和花

表5 油茶花器官数量性状的杂种优势和相对遗传力

Table 5 Heterosis and the relative heritability of quantitative traits of *Camellia oleifera* floral organs

性状 Traits	华硕 HS	德油2 DY2	中亲值 MPV	中亲优势 (%) MPH	超高亲优势 (%) BPH	超低亲优势 (%) LPH	相对遗传力 Relative heritability	
							a_f	a_m
花横径(mm)FTD	86.63	78.86	82.75	-21.90	-25.40	-18.06	-1.83	2.83
花纵径(mm)FLD	92.21	80.70	86.46	-21.37	-26.28	-15.76	-1.10	2.10
花瓣数PN	8.33	6.67	7.50	-14.04	-22.63	-3.29	-0.13	1.13
花药数AN	112.33	88.33	100.33	1.75	-9.12	15.57	0.57	0.43
花柱裂数SDN	4.33	3.00	3.67	5.65	-10.61	29.12	0.66	0.34
雄蕊群长(mm)SGL	19.85	16.17	18.01	-14.24	-22.18	-4.50	-0.20	1.20
花柱长(mm)SL	15.22	6.36	10.79	-28.48	-49.29	21.29	0.15	0.85
雌蕊长(mm)PL	18.11	9.18	13.65	-22.36	-41.50	15.40	0.16	0.84

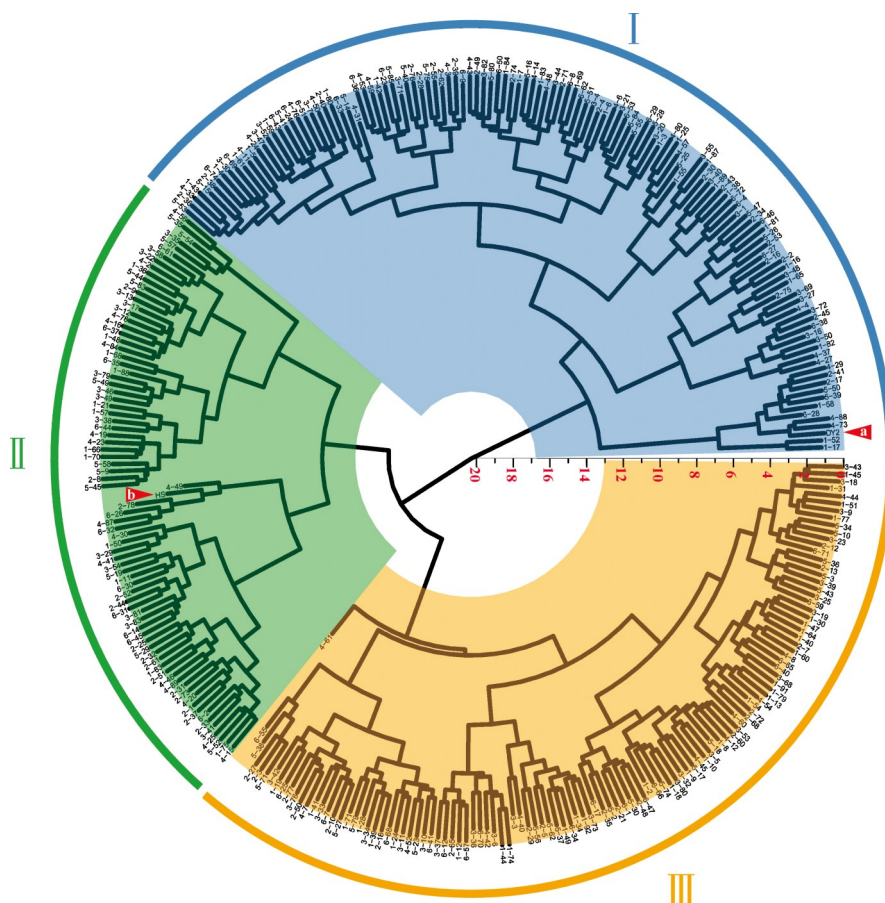
a_f : 父本相对遗传力; a_m : 母本相对遗传力

a_f : Relative heritability of male parent; a_m : Relative heritability of female parent; MPV: Mid-parent value; MPH: Mid-parent heterosis; BPH: Better parent heterosis; LPH: Lower parent heterosis

柱裂数优于母本, 子代具有亲父倾向; 在花横径、花纵径、花瓣数、雄蕊群长、花柱长和雌蕊长6个数量性状上母本对父本更占优势, 子代倾向于母本特征。结果表明, 亲本某性状的相对遗传力越强, 杂交子代的表现与该亲本越相似。

2.5 油茶花器官数量性状的聚类分析

利用油茶花器官的8个性状指标对322株杂交子代及其亲本进行系统聚类分析(图4), 并计算各个类群花器官数量性状的平均值(表6)。在欧式距离为14时, 可将324份试验材料分为I、II、III 3大类。



分支末端数字为单株编号; 红色三角区 a: 母本德油2; 红色三角区 b: 父本华硕

The number at the end of the branch is the number of individual; Red triangle area a: Female parent DY2; Red triangle area b: Male parent HS

图4 子代群体及其亲本的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of the progenies and their parent

表6 3个类群花器官数量性状比较

Table 6 Comparison of quantitative traits of floral organs in three groups

性状 Traits	类群I Group I	类群II Group II	类群III Group III	排名 Range
花横径(mm)FTD	66.57	70.76	58.62	II>I>III
花纵径(mm)FLD	69.92	74.32	61.84	II>I>III
花瓣数PN	5.98	6.90	6.66	II>III>I
花药数AN	84.15	118.84	109.49	II>III>I
花柱裂数SDN	3.65	4.16	3.91	II>III>I
雄蕊群长(mm)SGL	15.28	16.46	14.95	II>I>III
花柱长(mm)SL	7.37	8.54	7.55	II>III>I
雌蕊长(mm)PL	10.16	11.50	10.46	II>III>I

第I类群包括母本德油2在内共126株材料,占聚类总群体的38.89%,占比最大。由3个类群平均值及排名可看出,该类群总体特征倾向于母本,因此可称为母本类群。花横径、花纵径和雄蕊群长处于居中水平,花瓣数、花药数、花柱裂数、花柱长和雌蕊长均值相对较低,尤其是花药数比第II类群低41.22%。

第II类群包括父本华硕在内共81株,占聚类总群体的25.00%,占比最小。从表6可知,该类群虽然群体占比较小,但各个性状在3个类群中均排名第一,表现最优。特别是花药数、花柱裂数、雄蕊群长、花柱长和雌蕊长5个与油茶繁殖特征有关的性状,分别高于排名第三的类群41.22%、14.12%、10.14%、15.76%和13.22%。从整体特点看,该群体可称为父本类群。

第III类群共117株材料,占总群体的36.11%,占比居中,群体性状分离具有差异。花瓣数、花药数、花柱裂数、花柱长和雌蕊长繁殖特征仅次于第II类群,排名第二;花横径、花纵径和雄蕊群长最小,在3个类群中排名最后。因此又可称为小花型群体或者中间型群体。

3 讨论

3.1 油茶花器官数量性状的变异系数

变异系数是衡量群体中各观测值变异程度大小的指标,优良基因型选择潜力的相对大小与变异系数密切相关^[27]。郭玉红等^[28]研究表明,腾冲红花油茶的花瓣、雄蕊及花柱等数量性状在单株间具有极显著的差异;傅志强等^[29]研究认为油茶雄蕊群直径变异较为丰富,外雄蕊具有高的变异情况且相对稳定。本研究中,花柱、花瓣及雌雄蕊变异程度较高,花横径和花纵径变异最小,这与郭玉红等^[28]的

研究结果一致,与傅志强等^[29]具有一定差异,其原因可能是研究样本量大小及栽培环境不同。柱头上花粉的数量影响昆虫传粉的数量,且通常与果实种子数呈正相关^[15],本研究与生殖相关的花药数、花柱裂数、花柱长及雌蕊长变异程度大于其他数量性状,从而增加了子代座果成功的概率,这与尹明宇等^[30]的研究结果基本一致。本研究可为定向选育优良单株提供至关重要的参考依据和基础数据。

此外子代中花柱裂数存在最大值为8.00的极值个体,在调查过程中通过人工解剖法观察,发现存在双层花柱以及双子宫现象,猜测该现象可能是由于基因突变而导致雌性繁殖器官发生变异,至于内在基因突变的原因和过程以及对子代群体生长发育的影响还需进一步从分子层面进行观察分析。

3.2 油茶花器官数量性状的概率分级

合理科学的概率分级方法有助于种质资源的科学利用^[31]。刘孟军^[23]将传统的经验分级方法与概率分级进行对比,发现概率分级方法更具客观性和标准性,分级结果可比性更强,指导价值也更高,并运用在枣和桃树上,取得了较为理想的效果。因此,本研究沿用此分级方法将杂交子代群体按4个点分为5个等级,除花柱裂数受偏态分布的影响导致其频率分布存在一定程度偏差外,其余各性状总体符合该分级标准,进一步完善了油茶花器官数量性状的分级体系。

3.3 油茶花器官数量性状的杂种优势和相对遗传力

杂种优势是杂合体在一种或多种性状上优于两个亲本的现象,主要体现于双亲的特异性,分析杂交后代花器官性状的变异水平和杂种优势对提高育种效率及选育具有优良性状的品种具有重要意义^[32-33]。本研究中花柱裂数和花药数的中亲优势与超低亲优势以及花柱长和雌蕊长的超低亲优势明显且稳定,而雄蕊群长、花横径、花纵径及花瓣数在3个杂种优势度量指标中均为负值,存在优势衰退现象。与陈雅^[34]的研究结果具有差异,其认为油茶花直径、花瓣数的杂种优势显著,这可能是所研究的油茶品种不同所致。王艺儒等^[35]研究发现柿果实数量性状具有正负双向分布特征,存在高于或低于亲本的单株,表明杂交子代的杂种优势存在广泛分离。本研究中子代群体的中亲优势和超低亲优势呈正负双向分布趋势,超高亲优势则均为负值,存在一定程度的退化现象,这与王艺儒等^[35]研究结果较为一致,表明杂种优势生物学现象较为复

杂,同一性状不同物种甚至同一物种之间,由于基因间差异和互作的影响导致杂种优势产生分离^[36],从而在子代群体中表现出正负双向的优势分布以及各种程度的中间类型,因此,在进行杂交育种时要根据特定物种的特定性状作出具体分析,合理指导生产实践,避免因杂种优势低或无优势体现而放弃筛选,从而遗漏极优个体。

相对遗传力的变异较为复杂,其强弱因不同亲本或不同性状而异。本研究中8个数量性状在杂交子代中的表现为2个性状倾向于父本,6个性状倾向于母本。亲母性状占比较大,可能制约父本的优良特性在子代群体中的表现程度,因而在配置亲本时,应充分考虑双亲的性状值差异^[37],使其优势特征最大程度呈现。

3.4 油茶花器官数量性状的聚类分析

聚类分析可根据不同单株的表现进行类别划分,从而分析不同类群的特点并进行定向选择。本研究将子代单株划分为3大类群,双亲分别处于两个不同的群体中,表明亲本之间具有显著差异,这与邓少春等^[11]的研究结果一致。本研究中第II类群整体特征倾向于父本,表现最优,占比最小,属于大花型类群。张志强等^[38]研究表明,大花型植株有利于吸引更多传粉昆虫,从而增加授粉机会,因此该类群可作为高品质、高产育种亲本加以利用。第I类群样本占比最大,表现为母本特性,花器官性状优异性表现稍弱,还需进一步结合叶表型和果实经济性状指标进行选育。

4 结论

本研究以322株油茶杂交子代及其亲本为研究对象,围绕8个油茶花器官数量性状的杂种优势和遗传变异倾向展开探讨。调查分析表明油茶杂交子代花器官性状表型变异丰富,杂种优势表出现正负双向分离,其中花药数、花柱裂数、花柱长和雌蕊长4个与繁殖能力有关的数量性状的杂种优势明显且稳定,可作为选育优良单株的指标;子代群体花器官性状的遗传倾向显著,其中38.89%的子代花器官性状倾向于母本,25%的子代趋向于父本,36.11%的子代呈现趋中变异特征。本研究为丰富油茶表型性状指标、进行早期筛选以及发掘优质新品种奠定良好基础。但花器官性状只是油茶表型性状研究的部分重要内容,对于进一步挖掘优异基因和新种质资源还需结合叶表型性状和果实经济性状等方面进行深入调查研究。

参考文献

- [1] 庄瑞林. 中国油茶. 2版. 北京:中国林业出版社, 2008:1-366
Zhuang R L. Chinese *Camellia oleifera*. 2nd edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008:1-366
- [2] 陈永忠, 邓绍宏, 陈隆升, 马力, 何宏, 王湘南, 彭邵锋, 刘彩霞, 王瑞, 许彦明, 张震. 油茶产业发展新论. 南京林业大学学报:自然科学版, 2020, 44(1):1-10
Chen Y Z, Deng S H, Chen L S, Ma L, He H, Wang X N, Peng S F, Liu C X, Wang R, Xu Y M, Zhang Z. A new view on the development of oil tea *Camellia* industry. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2020, 44(1):1-10
- [3] 姚小华, 王开良, 罗细芳, 任华东, 龚榜初, 费学谦. 我国油茶产业化现状及发展思路. 林业科技开发, 2005, 19(1):3-6
Yao X H, Wang K L, Luo X F, Ren H D, Gong B C, Fei X Q. Current situation and development strategy of *Camellia oleifera* industrialization in China. Forestry Science and Technology Development, 2005, 19(1):3-6
- [4] 陈丰林, 谢海, 游昌乔, 蒋帅, 彭果, 周苹, 郭新红. 我国油茶资源研究与开发利用现状及展望. 生命科学研究, 2021, 25(5):425-431
Chen F L, Xie H, You C Q, Jiang S, Peng G, Zhou P, Guo X H. Current situation and prospect of research, development and utilization of *Camellia oleifera* resources in China. Life Science Research, 2021, 25(5):425-431
- [5] 国家林业局. 关于印发《全国油茶主推品种目录》的通知. (2017-06-30) [2023-04-11]. <http://www.forestry.gov.cn/sites/main/main/gov/content.jsp?TID=2400>
State Forestry Bureau. Notice on the issuance of the National Catalogue of Main *Camellia oleifera* varieties. (2017-06-30) [2023-04-11]. <http://www.forestry.gov.cn/sites/main/main/gov/content.jsp?TID=2400>
- [6] 王金凤, 谭新建, 吴喜昌, 李清平, 钟秋平, 晏巢, 郭红艳, 葛晓宁. 我国油茶产业发展现状与对策建议. 世界林业研究, 2020, 33(6):80-85
Wang J F, Tan X J, Wu X C, Li Q P, Zhong Q P, Yan C, Guo H Y, Ge X N. Development status and suggestions of *Camellia* industry in China. World Forestry Research, 2020, 33(6):80-85
- [7] 刘增兵, 姜景彬, 杨欢欢, 姜秀明, 李景富. 植物杂种优势的研究进展. 分子植物育种, 2019, 17(12):4127-4134
Liu Z B, Jiang J B, Yang H H, Jiang X M, Li J F. Research advance of plant heterosis. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(12):4127-4134
- [8] Zhang T Z, Xuan L S, Mao Y, Hu Y. Cotton heterosis and hybrid cultivar development. Theoretical and Applied Genetics, 2023, 136(4):89
- [9] 王东雪, 曾雯珺, 江泽鹏, 蔡娅, 张乃燕. 油茶F₁代苗期叶表型性状遗传多样性研究. 西北林学院学报, 2019, 34(1):113-118
Wang D X, Zeng W J, Jiang Z P, Cai Y, Zhang N Y. Genetic diversity of leaf phenotypic traits in F₁ progeny of *Camellia*

- oleifera*. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1):113-118
- [10] 黄勇, 谢一青, 李志真, 王开良, 林萍, 姚小华. 小果油茶表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2014, 15(2):270-278
Huang Y, Xie Y Q, Li Z Z, Wang K L, Lin P, Yao X H. Analysis of *Camellia meiocarpa* phenotype diversity. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(2):270-278
- [11] 邓少春, 田易萍, 陈林波, 陈春林, 庞丹丹, 徐丕忠, 包云秀, 朱兴正. 137份茶树人工杂交F₁代单株表型性状及遗传多样性分析. 山东农业科学, 2022, 54(2):23-28
Deng S C, Tian Y P, Chen L B, Chen C L, Pang D D, Xu P Z, Bao Y X, Zhu X Z. Analysis on phenotypic traits and genetic diversity of 137 tea individual plants from artificial hybrid F₁ generation. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(2):23-28
- [12] 韩飞, 赵婷婷, 刘小莉, 张琦, 李大卫, 田华, 彭珏, 钟彩虹. 山梨猕猴桃与中华猕猴桃种间杂交后代果实性状的遗传倾向分析. 植物科学学报, 2022, 40(4):505-512
Han F, Zhao T T, Liu X L, Zhang Q, Li D W, Tian H, Peng Y, Zhong C H. Genetic analysis of fruit traits in *Actinidia rufa* (Siebold and Zuccarini) Planchon ex Miquel × *Actinidia chinensis* var. *chinensis* C. F. Liang kiwifruit hybrid population. Plant Science Journal, 2022, 40(4):505-512
- [13] 吴昊, 苏万龙, 石美娟, 薛晓芳, 任海燕, 王永康, 赵爱玲, 李登科. 枣种质果实性状多样性分析与综合评价. 植物遗传资源学报, 2022, 23(6):1613-1625
Wu H, Su W L, Shi M J, Xue X F, Ren H Y, Wang Y K, Zhao A L, Li D K. Diversity analysis and comprehensive evaluation of Jujube fruit traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(6):1613-1625
- [14] 何汉杏, 康文星, 何秀春. 普通油茶及其优树生殖生态研究. 经济林研究, 2002, 20(4):10-13
He H X, Kang W X, He X C. Studies on *Camellia olifera* and its dominant trees ecological and reproduction. Non-wood Forest Research, 2002, 20(4):10-13
- [15] 黄双全, 郭友好. 传粉生物学的研究进展. 科学通报, 2000, 45(3):225-237
Huang S Q, Guo Y H. Research advances on the pollination Biology. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(3):225-237
- [16] 彭邵锋, 陆佳, 陈永忠, 陈隆升, 王瑞, 王湘南, 马力. 油茶品种资源现状与良种筛选技术. 经济林研究, 2012, 30(4):174-179
Peng S F, Lu J, Chen Y Z, Chen L S, Wang R, Wang X N, Ma L. Current status of variety resources and selection of improved varieties in *Camellia oleifera*. Non-wood Forest Research, 2012, 30(4):174-179
- [17] 熊道陵, 许光辉, 张团结, 陈金洲, 陈超. 油茶壳残渣制备活性炭的工艺. 化工进展, 2015, 34(12):4280-4284
Xiong D L, Xu G H, Zhang T J, Chen J Z, Chen C. Activated carbon prepared from *camellia oleifera* shell residue after alcohol extraction. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(12):4280-4284
- [18] Zong J F, Wang R L, Bao G H, Ling T J, Zhang L, Zhang X F, Hou R Y. Novel triterpenoid saponins from residual seed cake of *Camellia oleifera* Abel. show anti-proliferative activity against tumor cells. Fitoterapia, 2015, 104(2):7-13
- [19] Yang L, Gao C, Xie J J, Qiu J, Deng Q E, Zhou Y C, Liao D S, Deng C Y. Fruit economic characteristics and yields of 40 superior *Camellia oleifera* Abel plants in the low-hot valley area of Guizhou province, China. Scientific Reports, 2022, 12(1):7068
- [20] 袁军, 韩志强, 贺舍予, 黄丽媛, 周乃富. 海南省油茶资源主要形态和经济性状及聚类分析. 植物遗传资源学报, 2014, 15(6):1380-1384
Yuan J, Han Z Q, He S Y, Huang L Y, Zhou N F. Investigation and cluster analysis of main morphological and economical characters for Oiltea resource in Hainan province. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(6):1380-1384
- [21] 曾燕如, 黎章矩, 戴文圣. 油茶开花习性的观察研究. 浙江林学院学报, 2009, 26(6):802-809
Zeng Y R, Li Z J, Dai W S. Flowering habits in *Camellia oleifera*. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(6):802-809
- [22] 谢佰承, 郭凌曜, 杜东升, 谭俨, 王国栋. 油茶产量对关键生长期热积温和高温日数的响应. 林业科学, 2021, 57(5):34-42
Xie B C, Guo L Y, Du D S, Tan Y, Wang G D. Responses of *Camellia oleifera* yield to heat accumulation temperature and high temperature days in key growth period. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(5):34-42
- [23] 刘孟军. 枣树数量性状的概率分级研究. 园艺学报, 1996, 23(2):105-109
Liu M J. Studies on the variations and probability gradings of major quantitative characters of Chinese Jujube. Acta Horticulturae Sinica, 1996, 23(2):105-109
- [24] Arnel R Hallauer, Marcelo J Carena, J B Miranda Filho. 玉米育种的数量遗传学. 陈泽辉, 刘文欣, 雍洪军, 译. 北京: 科学出版社, 2019:351-354
Arnel R H, Marcelo J C, Miranda Filho J B. Quantitative in maize breeding. Chen Z H, Liu W X, Yong H J, trans. Beijing: Science Press, 2019:351-354
- [25] 夏友霖, 赖明芳, 曾彦, 漆燕, 崔富华, 曾孝平. 花生产量和品质性状的配合力及相对遗传力分析. 西南农业学报, 2006, 19(2):260-264
Xia Y L, Lai M F, Zeng Y, Qi Y, Cui F H, Zeng X P. Analysis of combining ability and relative heritability of yield and quality traits in peanut. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(2):260-264
- [26] 裴新澍. 相对遗传力理论与杂交育种. 遗传学报, 1976, 3(3):210-215
Pei X S. A theory of relative heritability and cross-breeding. Journal of Genetics and Genomics, 1976, 3(3):210-215
- [27] 章平生, 江锡兵, 龚榜初, 徐阳, 赖俊声, 吴聪连. 板栗与锥栗杂交F₁代叶片表型变异及杂种优势研究. 植物研究, 2021,

- 41(2):281-293
Zhang P S, Jiang X B, Gong B C, Xu Y, Lai J S, Wu C L. Leaf phenotype variation and heterosis in F_1 progeny of cross between *castanea mollissima* and *C. henryi*. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(2):281-293
- [28] 郭玉红, 司马永康, 徐德兵, 江期川, 吴兴波, 钱迎新, 张立新, 周凤林. 腾冲红花油茶花器官的数量性状变异研究. 西南林业大学学报: 自然科学, 2018, 38(6):203-207
Guo Y H, Sima Y K, Xu D B, Jiang Q C, Wu X B, Qian Y X, Zhang L X, Zhou F L. Floral organs quantitative character variation of *Camellia reticulata*. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2018, 38(6):203-207
- [29] 傅志强, 袁汕, 申春晖, 张恒, 陈锐帆, 奚如春. 基于花器官特征的油茶遗传多样性分析. 经济林研究, 2022, 40(4):12-18, 28
Fu Z Q, Yuan S, Shen C H, Zhang H, Chen R F, Xi R C. Genetic diversity analysis based on characteristics of floral organs of *Camellia oleifera*. Non-wood Forest Research, 2022, 40(4):12-18, 28
- [30] 尹明宇, 朱绪春, 刘慧敏, 柳江群, 乌云塔娜. 西伯利亚杏种质资源花表型变异. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(2):92-103
Yin M Y, Zhu X C, Liu H M, Liu J Q, Wuyun T N. Flower phenotypic variations of germplasm resources of Siberian apricot (*Armeniaca sibirica*). Journal of Northwest A&F University: Natural Sciences Edition, 2018, 46(2):92-103
- [31] 杨雷, 周俊义, 刘平, 赵智慧, 杨莉, 李莉, 郝保春. 酸枣种质资源果实主要数量性状变异及概率分级. 河北农业大学学报, 2006(1):34-37
Yang L, Zhou J Y, Liu P, Zhao Z H, Yang L, Li L, Hao B C. Variation and probability grading of main quantitative characters of wild jujube germplasm resource. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006(1):34-37
- [32] 张媛媛, 杨艳华, 陈克平. 杂种优势的研究进展. 生命科学研究, 2016, 20(5):447-454
Zhang Y Y, Yang Y H, Chen K P. Advances in heterosis research. Life Science Research, 2016, 20(5):447-454
- [33] Wu X L, Liu Y, Zhang Y W, Gu R. Advances in research on the mechanism of heterosis in plants. Frontiers in Plant Science, 2021(12):745726
- [34] 陈雅. 油茶种间杂交 F_1 代18个优良单株主要性状比较分析. 长沙: 中南林业科技大学, 2020
Chen Y. Comparative analysis on the main characters of 18 excellent individual plants in F_1 generation of interspecific hybridization of *Camellia Oleifera*. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020
- [35] 王艺儒, 刁松锋, 韩卫娟, 王军, 李华威, 孙鹏, 傅建敏, 索玉静. 甜柿杂交 F_1 代重要性状及果实表型多样性. 中国农业大学学报, 2021, 26(12):76-88
Wang Y R, Diao S F, Han W J, Wang J, Li H W, Sun P, Fu J M, Suo Y J. Important characters and fruit phenotypic diversity of F_1 progeny of non-astringent persimmon. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(12):76-88
- [36] 崔会会, 项超, 石英尧, 王文生, 高用明. 杂种优势形成的表观遗传学研究进展. 植物遗传资源学报, 2015, 16(5):933-939
Cui H H, Xiang C, Shi Y Y, Wang W S, Gao Y M. The research progress of epigenetic insights into bases of heterosis. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(5):933-939
- [37] 赖明芳, 曾彦, 漆燕, 夏友霖, 崔富华. 花生主要经济性状遗传特点分析. 中国油料作物学报, 2007, 29(2):148-151
Lai M F, Zeng Y, Qi Y, Xia Y L, Cui F H. Analysis on the genetic characteristics of major economic traits in peanut. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(2):148-151
- [38] 张志强, 李庆军. 花寿命的进化生态学意义. 植物生态学报, 2009, 33(3):598-606
Zhang Z Q, Li Q J. Review of evolutionary ecology of floral longevity. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3):598-606