

托桂型菊花花型和花色性状遗传规律分析

张一驰¹, 叶雨晴¹, 辜源馨¹, 张德平², 牛雅静³, 张蒙蒙³, 黄河¹

(¹北京林业大学园林学院/花卉种质资源创新与分子育种北京市重点实验室/国家花卉工程技术研究中心/城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;

²成都市龙泉驿区农业农村局, 成都 610100; ³北京市植物园管理处/北京市花卉园艺工程技术研究中心, 北京 100093)

摘要: 菊花 (*Chrysanthemum × morifolium* Ramat.) 具有丰富的花型, 托桂型是较为特殊的一种, 具有较高的观赏价值, 但其花型和花色性状的遗传规律尚不清晰。此外, 托桂型菊花管状花颜色丰富, 是否与舌状花花色有关目前尚无研究。本研究以一个白色非托桂型小菊为父本, 两个红色托桂型小菊为母本, 设计两个杂交组合, 测定 F₁ 代 11 个花型性状。遗传分析表明, 花径、舌状花长、舌状花宽和管状花数均符合无主基因控制的 0MG 模型, 心花直径、舌状花数、管状花长、管状花宽和最深齿裂长均符合由两个加-显-上位效应的主基因控制的 2MG-ADI 模型, 其中管状花长和最深齿裂长的主基因遗传率均约 70%, 属于高度遗传力。相关性分析表明, 托桂型菊花管状花长、宽和最深齿裂长之间有极显著的正相关性。根据舌状花的花色值 (L^* , a^* , b^*) 将 F₁ 代聚类为 5 个不同色系, 两个杂交组合舌状花花色的香农-威纳指数 (H) 分别为 1.12 和 1.23, 花色变化丰富。此外, 我们测定了亲本及 F₁ 代共 30 个不同花色的托桂型菊花管状花内侧表皮和舌状花上表皮的花色值 (L^* , a^* , b^*), 发现两者的 L^* , a^* , b^* 值分别呈极显著正相关; 对 10 个不同色系的托桂型菊花做切片观察, 发现管状花内侧与舌状花上表皮、管状花外侧与舌状花下表皮色素种类相同且细胞形态大小相似因而花色相近。这些结果为菊花托桂花型性状的基因定位以及优质托桂型菊花品种的培育提供理论依据。

关键词: 菊花; 托桂花型; 花型性状; 遗传规律; 花色分析

Analysis of Genetic Law of Inflorescence Traits and Floret Color of Anemone-type Chrysanthemum

ZHANG Yichi¹, YE Yuqing¹, GU Yuanxin¹, ZHANG Deping², NIU Yajing³, ZHANG Mengmeng³, HUANG He¹

¹School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University / Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding / National Engineering Research Center for Floriculture / Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083; ²Chengdu Longquanyi Agricultural and Rural Bureau, Chengdu 610100; ³Administrative Office of Beijing Botanical Garden / Beijing Floriculture Engineering Technology Research Centre, Beijing 100093)

Abstract: Chrysanthemums (*Chrysanthemum × morifolium* Ramat.) exhibits a diverse range of flower types, with particular interest in the anemone type due to its high ornamental value. However, the genetic basis of inflorescence traits and floret color remains unclear. The disc florets in anemone-type chrysanthemums are known for their rich pigmentations, but whether they correlate with the color of the ray florets has not been studied. In this study, two F₁ hybrid combinations via crossing white non-anemone-type chrysanthemum (male) with two red anemone-type chrysanthemums (female) were used to determine 11 inflorescence traits. Genetic analysis revealed that flower diameter, ray floret length, ray floret width and number of disc florets were accordant with the 0MG model without major gene control. Disc flower diameter, number of ray florets, disc floret length, disc floret width and the longest lobe length fitted to the 2MG-ADI model controlled by two major genes with add-demonstration-epistatic effect. Major genes for disc floret

收稿日期: 修回日期: 网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为花卉种质资源与遗传育种, E-mail: 972344299@qq.com; 叶雨晴为共同第一作者

通信作者: 黄河, 研究方向为园林植物遗传育种和花卉分子生物学, E-mail: 101navy@163.com

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (6212022); 大学生创新创业训练计划项目 (202210022030)

Foundation project: Beijing Municipal Natural Science Foundation Project (6212022); College Students' Innovative Entrepreneurial Training Plan Program (202210022030)

length and the longest lobe length had a heritability of approximately 70%, indicating high heritability. Correlation analysis revealed significant positive correlation among disc floret length, disc floret width and the longest lobe length. According to the color values (L^* , a^* , b^*) of ray florets, F_1 populations were grouped into 5 different colors. The Shannon-Wiener index (H) of the ray florets of two hybrid combinations were 1.12 and 1.23, the colors varied widely. Additionally, we selected 30 anemone-type chrysanthemums with different colors from the parents and F_1 population and measured the flower color values (L^* , a^* , b^*) of inside epidermis of disc florets and upper epidermis of ray florets. Our results suggest a respectively significant positive correlation of L^* , a^* and b^* values between the two. Through examining 10 anemone-type chrysanthemums with different colors, the same pigment as well as similarity on cell morphology and size were observed between inside epidermis of disc florets and upper epidermis of ray florets, as well as outside epidermis of disc florets and lower epidermis of ray florets possess. These results provided a theoretical foundation for the genetic mapping of inflorescence traits and the cultivation of high-quality anemone-type chrysanthemum varieties.

Key words: chrysanthemum; anemone type; inflorescence traits; genetic law; floret color analysis

菊花 (*Chrysanthemum* $\times$ *morifolium* Ramat.) 是中国十大传统名花之一, 也是世界四大切花之一, 具有较高的观赏价值和经济价值。中国园艺学会、中国花卉盆景协会以花瓣、花型两级作为分类的主要依据, 初步确定菊花共分为五个瓣型, 包括 30 个花型和 13 个亚型, 托桂花型 (anemone type) 是菊花众多花型中较为特殊的一种, 盛开时管状花伸长, 宛如托起的桂花, 因而又称为桂瓣, 具有较高的观赏价值。栽培小菊多为异源六倍体, 遗传背景十分复杂, 且花型性状以数量性状为主, 性状的遗传可能受主基因或多基因控制, 因而需要利用主基因+多基因混合遗传模型对其进行遗传分析, 该方法最早由 Elston 和 Stewart 提出^[1], 随后植物混合模型逐步发展起来^[2-3], 最终单世代分离分析逐渐被应用^[4-6]。近年来, 该方法在菊花^[7]、小麦^[8]、烟草^[9]、茄子^[10]、冬瓜^[11]等均有应用, 极大地推进了园艺作物性状遗传机制的研究。

目前, 在托桂型菊花遗传规律研究方面, 前人进行了 SCAR 标记^[12]和 QTL 定位^[13]的相关分析, 唐海强等^[7]对托桂型菊花展开遗传分析, 结果表明心花直径、管状花数无主基因控制, 这与前人研究结果中心花直径和管状花数的主基因数量存在差异^[14-16], 表明托桂型菊花花型性状的遗传模式可能与非托桂型菊花不同。此外, 杂种优势及遗传模型的适配可能会受到亲本品种的影响^[17], 亲本管状花宽度、最深齿裂长等托桂花型直接相关性状的差异对 F_1 代影响程度尚不清晰。菊花花色遗传复杂, CIELAB 颜色空间极大地便利了颜色表型的量化, 近年来在菊花^[18]、彩色马蹄莲^[19]、姜花^[20]等多种花卉的花色表型分析中被应用。此外, 托桂型菊花管状花结构类似于舌状花, 内部有多层叶肉细胞^[21-22], 颜色丰富。已有研究表明菊花舌状花因上下表皮细胞形态大小及色素物质种类和含量的差别导致正面和背面的颜色差异^[23], 托桂型菊花管状花内外侧表皮与舌状花上下表皮的花色是否有关联尚不清楚, 探究托桂型菊花管状花和舌状花的花色值相关性和表皮色素分布模式有助于揭示托桂花型两类小花花色的内在联系。

本研究选取两个托桂型红色小菊作为母本, 以同一个非托桂型白色小菊为父本, 设计两个组合进行杂交, 并采用植物数量性状主基因+多基因混合遗传模型分析法, 确定控制菊花托桂花型性状的主基因个数及各遗传参数, 此外, 根据舌状花 L^* 、 a^* 、 b^* 值聚类情况对子代花色的遗传规律进行分析, 通过对不同花色托桂型菊花的管状花和舌状花进行花色值相关性分析及表皮切片观察, 探究托桂型菊花两类小花花色的关联性, 以期对菊花托桂花型遗传规律的揭示以及托桂型菊花新品种的培育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选取非托桂型小菊‘1907029’为父本材料, 托桂型小菊‘1920063’ (组合一) 和‘2003016’ (组合二) 为母本材料 (图 1), 设计两对杂交组合, 杂交亲本均经多年无性繁殖, 性状稳定, 其中, ‘1920063’管状花最深齿裂长约 4.13 mm, ‘2003016’管状花最深齿裂长约 2.35 mm, 差异显著。杂交于 2020 年秋季进行, 所有实验材料保存在北京林业大学三顷园苗圃内。



A: 托桂型小菊‘1920063’; B: ‘1920063’舌状花; C: ‘1920063’管状花; D: 托桂型小菊‘2003016’; E: ‘2003016’舌状花;

F: ‘2003016’管状花; G: 非托桂型小菊‘1907029’; H: ‘1907029’舌状花; I: ‘1907029’管状花

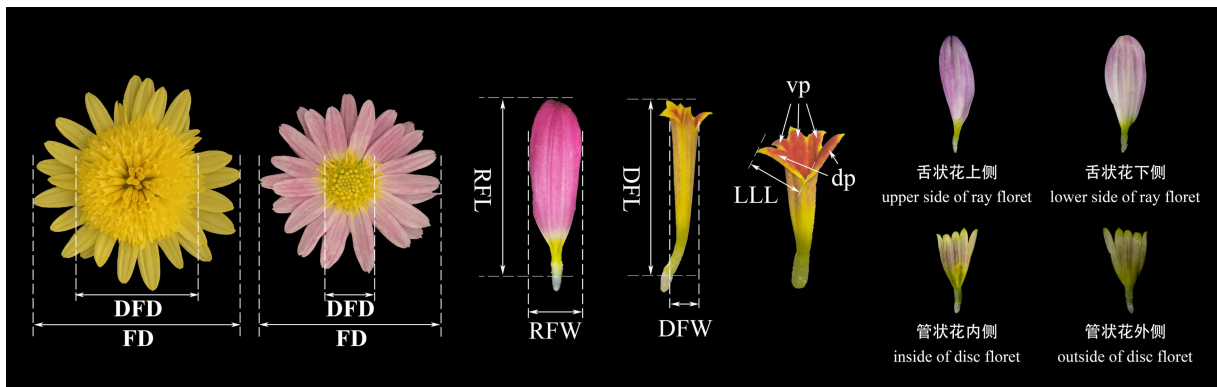
A: anemone-type chrysanthemum ‘1920063’; B: ray floret of ‘1920063’; C: disc floret of ‘1920063’; D: anemone-type chrysanthemum ‘2003016’; E: ray floret of ‘2003016’; F: disc floret of ‘2003016’; G: non-anemone-type chrysanthemum ‘1907029’; H: ray floret of ‘1907029’; I: disc floret of ‘1907029’

图 1 杂交亲本的花部形态

Fig. 1 Flower morphology of the hybrid parents

1.2 花型性状测定方法

于 2021 年秋季调查亲本与 F_1 代植株的花型性状，花型性状包括花径（FD）、心花直径（DFD）、舌状花数（NRF）、舌状花轮数（RRF）、舌状花长（RFL）、舌状花宽（RFL）、管状花数（NDF）、管状花轮数（RDF）、管状花长（DFL）、管状花宽（DFW）、最深齿裂长（LLL）共 11 个，每个单株调查 5 个完全盛开的花序，每个花序选取最外轮完全盛开的舌状花和管状花各一朵，并计算平均值，参照 NARO（National Agriculture and Food Research Organization）2020 年发布的《DUS Test for CHRYSANTHEMUM》制定测量标准（图 2），其中，管状花两个背瓣之间的齿裂被定义为最深齿裂，其长度沿齿裂边缘测定。性状的命名参考唐海强等^[7]和 Song 等^[24]。



FD: 花径; DFD: 心花直径; RFW: 舌状花宽度; RFL: 舌状花长度; DFW: 管状花宽度; DFL: 管状花长度;

LLL: 最深齿裂长; dp: 背瓣; vp: 腹瓣（花器官来自杂交群体）

FD: Flower diameter; DFD: Disc flower diameter; RFW: Ray floret width; RFL: Ray floret length; DFW: Disc floret width; DFL: Disc floret length;

LLL: The longest lobe length; dp: dorsal petal; vp: ventral petal (Flower organs come from hybrid populations)

图 2 形态特征和测量方法示意图

Fig. 2 Schematic plots of the morphological characteristics and measurement methods

1.3 花色值测定及色素分布观察

花色值使用 NF333 色差仪（Nippon Denshoku Industries Co. Ltd., Japan）测定，每个单株选取 3 个完全

盛开的花序，每个花序选取最外轮舌状花和管状花（沿最深齿裂展开花瓣）各一朵置于干净的白纸上，色差仪光源对准舌状花和管状花正面中部测定亮度值（ L^* ）、红度值（ a^* ）和黄度值（ b^* ），每朵花测定 5 次，并取平均值。

从亲本和 F_1 代中选取 10 个不同色系的托桂型菊花，分别撕取完全盛开的管状花内外表皮和舌状花上下表皮，并制作临时切片，用光学显微镜进行观察。

1.4 数据分析

变异系数（ CV ，%）由（标准差/平均值） $\times 100$ 计算得出，偏度和峰值分别由函数 $SKEW$ 和 $KURT$ 计算得出。计算双亲性状平均值得到中亲值（ MPV ），将 F_1 代的平均数（ F_m ）与中亲值之差定义为中亲优势 H_m ， $(F_m - MPV) / MPV \times 100$ 定义为中亲优势率（ RH_m ，%）。香农-维纳指数由公式 $H = -\sum(P_i)(\ln P_i)$ （ P_i 为类别占比）计算得出。利用 SPSS 2020 进行花型性状的样本均值 t 检验，选用最远邻近法（Furthest neighbor）对舌状花的花色表型值进行 Hierarchical 聚类分析。利用 Origin 2021 软件绘制花型性状的小提琴图和相关性图及花色值的箱线图和相关性图。利用 Ai 2021 绘制杂交 F_1 代单花图。

将 F_1 杂交群体认为是用于遗传分析的伪 F_2 群体，利用 SEA 软件包（<https://cran.r-project.org/web/packages/SEA/index.html>）中的 F_2 程序，计算两个杂交组合 9 个花型性状数据在 11 个模型下的极大似然值，进而计算出 AIC，排除数据异常模型后，根据 AIC 最小原则和适合性检验结果选择两个杂交组合同一性状相同的模型为最适遗传模型，最后采用最小二乘法对最佳模型进行主基因的效应值和主基因遗传率等遗传参数估计。

2 结果与分析

2.1 托桂型菊花杂交 F_1 代群体的花型性状遗传特性

杂交组合一（‘1920063’ $\times$ ‘1907029’）和杂交组合二（‘2003016’ $\times$ ‘1907029’）分别获得 F_1 代植株 111 株和 133 株（图 S1），两个组合中托桂型子代分别为 9 株和 45 株，占比分别为 8.11%和 33.83%。为评价两个遗传群体的质量，探究杂交 F_1 代植株花型性状的分离情况及杂种优势，对 F_1 代群体的花型性状遗传特性进行分析（附表 1、表 1），两个杂交组合 11 个花型性状的变异系数分别为 15.00%~ 32.11%和 16.62%~ 60.83%，分离明显，为托桂型菊花遗传特性分析提供了较好的遗传群体。此外，在管状花长、管状花宽和最深齿裂长三个性状中，组合二具有更大的变异程度，其中，最深齿裂长的变异系数高达 60.83%，这表明亲本可能对子代的分离程度产生影响。

表 1 两个杂交组合 F_1 代花型性状的表型特征及杂种优势表现

Table 1 Phenotypic statistic values and heterosis of inflorescence traits in two hybrid combinations F_1 population

性状	组合	变异系数/%	偏度	峰值	中亲值	中亲优势	中亲优势率/%
Trait	Combination	CV	Skewness	Kurtosis	MPV	H_m	RH_m
花径/cm	组合一	16.80	0.01	0.38	4.97	-1.34**	-26.96
Flower diameter	组合二	20.21	0.36	0.32	4.68	-0.82**	-17.52
心花直径/cm	组合一	18.26	1.38	5.73	2.34	-1.19**	-50.85
Disc flower diameter	组合二	23.88	1.33	1.88	1.82	-0.48**	-26.37
舌状花数	组合一	32.10	1.27	1.37	26.80	2.11**	7.87
Number of ray florets	组合二	29.63	1.74	5.60	30.20	-1.78**	-5.89
舌状花轮数	组合一	27.00	0.50	0.22	2.00	0.37**	18.50
Round of ray florets	组合二	25.00	0.72	0.53	2.00	0.32**	16.00
舌状花长/mm	组合一	17.32	0.03	0.61	20.95	-4.78**	-22.82
Ray floret length	组合二	21.53	0.41	0.62	20.89	-3.47**	-16.61
舌状花宽/mm	组合一	20.57	0.29	0.60	6.23	-1.66**	-26.65
Ray floret width	组合二	18.18	0.15	-0.08	5.44	-1.04**	-19.12
管状花数	组合一	32.11	0.32	-0.47	118.30	-34.15**	-28.87

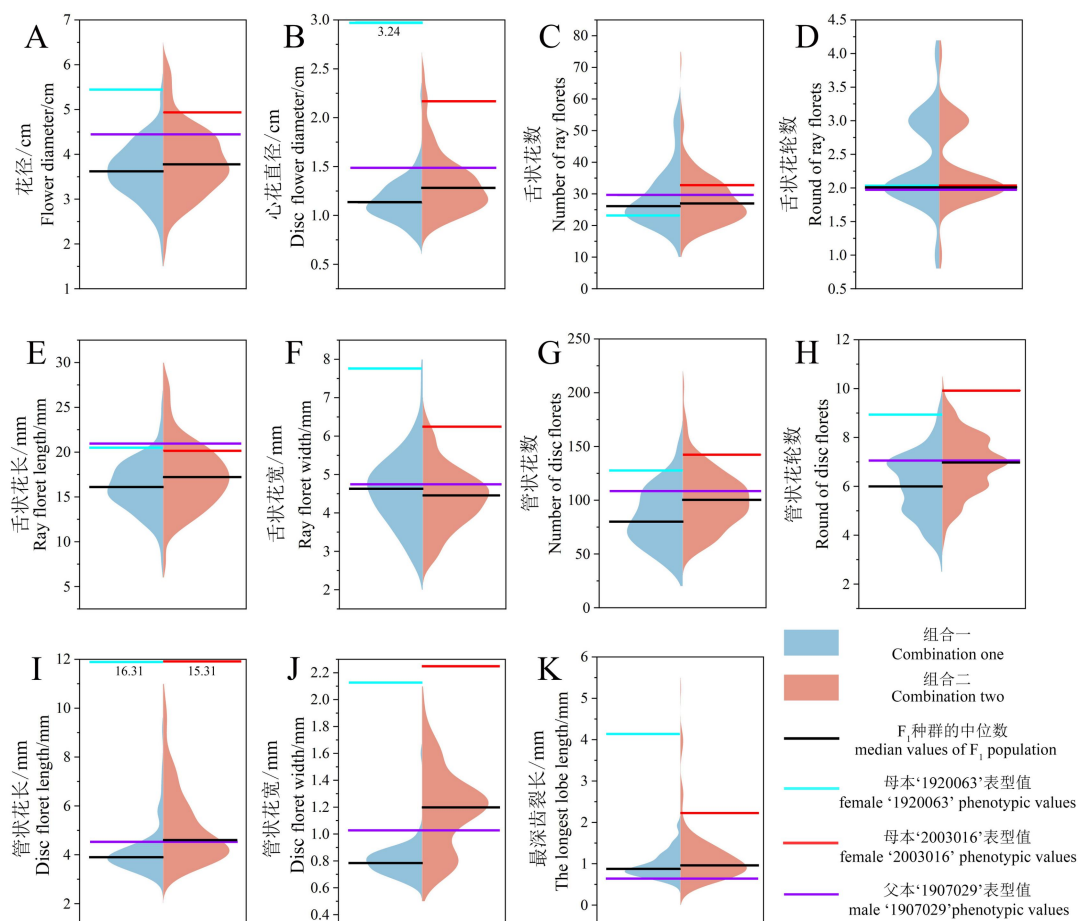
Number of disc florets	组合二	27.16	0.65	0.99	124.00	-22.77**	-18.36
管状花轮数	组合一	20.63	-0.04	-0.46	8.00	-1.94**	-24.25
Round of disc florets	组合二	16.62	-0.09	-0.23	8.50	-1.58**	-18.59
管状花长/mm	组合一	22.03	2.68	9.53	10.47	-6.34**	-60.55
Disc floret length	组合二	29.84	1.37	1.60	9.97	-4.81**	-48.24
管状花宽/mm	组合一	15.00	2.97	19.40	1.69	-0.89**	-52.66
Disc floret width	组合二	25.42	0.20	-0.30	1.88	-0.70**	-37.23
最深齿裂长/mm	组合一	30.21	1.23	1.56	2.39	-1.43**	-59.83
The longest lobe length	组合二	60.83	3.08	11.13	1.50	-0.30**	-20.00

F₁ 群体中亲优势显著性检验为 F₁ 单株目标性状平均值与中亲值的单样本均值 t 检验结果。**: 显著水平 (P < 0.01)。

The difference between F₁ and mid-parent value was analyzed by one-sample t test. **: Significant level(P < 0.01).

两个杂交组合 11 个花型性状在 F₁ 代的中亲优势率分别为-60.55%~18.50%和-48.24%~16.00%，且中亲优势值均达极显著水平，其中，舌状花数在两个杂交组合中的中亲优势值出现正负差异，除舌状花轮数外的其他 9 个性状中亲优势值均为负值，说明这 9 个性状的杂种优势在 F₁ 代呈下降趋势，存在显性遗传效应，此外，两个杂交组合心花直径、管状花数、管状花宽和最深齿裂长的中亲优势值表现出较大差异，尽管 F₁ 群体中大部分个体花型性状都介于双亲之间，但存在正向或负向超出亲本的个体，这也表明了杂交后代超亲分离现象存在的普遍性。

小提琴图（图 3）及偏度和峰值数据表明，在 11 个花型性状中，花径、舌状花轮数、舌状花长、舌状花宽、管状花数和管状花轮数偏度较小，近似正态分布，存在多基因控制，受环境因素影响大；而心花直径、舌状花数、管状花长、管状花宽和最深齿裂长存在较大的偏度，说明除多基因外还受到主基因控制，其中，管状花长、管状花宽和最深齿裂长在两个组合中存在较大的偏度差异，可能受到亲本品种的影响。



A: 花径; B: 心花直径; C: 舌状花数量; D: 舌状花轮数; E: 舌状花长; F: 舌状花宽;

G: 管状花数量; H: 管状花轮数; I: 管状花长; J: 管状花宽; K: 最深齿裂长

A: Flower diameter; B: Disc flower diameter; C: Number of ray florets; D: Round of ray florets; E: Ray floret length; F: Ray floret width;

G: Number of disc florets; H: Round of disc florets; I: Disc floret length; J: Disc floret width; K: The longest lobe length

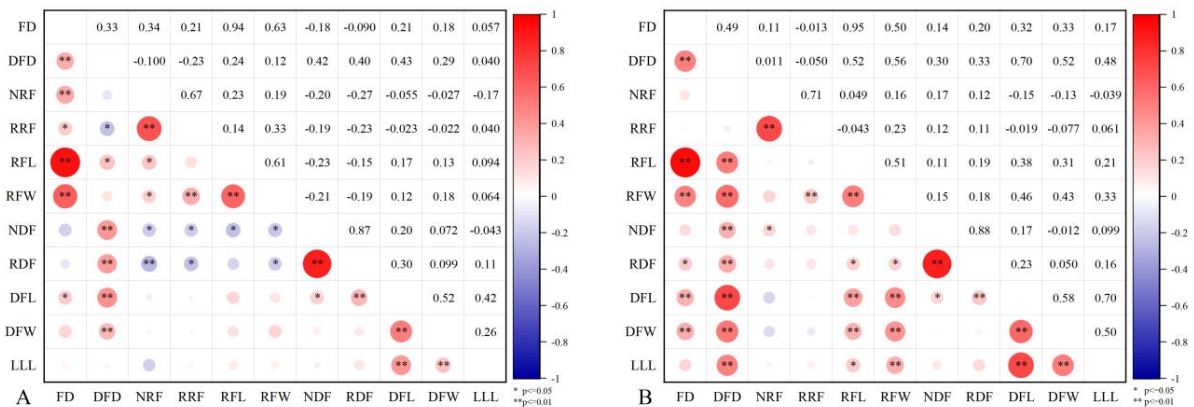
图 3 两个杂交组合 F₁ 代花型性状的小提琴图分布

Fig. 3 Violin-plot distribution of inflorescence traits of F₁ population derived from two hybrid combinations

综上，发现管状花长、管状花宽和最深齿裂长这三个性状遗传特征数据在两个组合中存在较大差异，由于菊花托桂花型是由管状花变化所致，表明托桂花型直接相关性状在遗传过程中分离更为明显，且不同托桂型菊花亲本直接影响了后代性状质量。综合两个杂交组合的结果，组合二 F₁ 代中托桂型植株占比远高于组合一，变异程度更为丰富，因此，选取组合二母本‘2003016’这类管状花最深齿裂长较小的托桂型菊花作为亲本，可以获得托桂花型变异更为丰富、超亲个体更多的 F₁ 群体，更有利于优质单株的选择。

2.2 托桂型菊花花型性状的相关性分析

为探究托桂型菊花不同花型性状间是否具有相似的遗传倾向，对两个杂交组合 11 个花型性状分别进行相关性分析（图 4），发现在 55 对花型性状中有 18 对在两个杂交组合中均具有显著相关性，其中 15 对达到极显著正相关水平。其中，心花直径与管状花数、管状花轮数、管状花长、管状花宽之间呈极显著正相关；管状花数与管状花轮数之间呈极显著正相关，与管状花长之间显著正相关；管状花轮数与管状花长之间呈极显著正相关；管状花长、管状花宽以及最深齿裂长三个性状之间两两呈极显著正相关。以上结果表明，管状花较长的托桂型菊花个体通常管状花更宽、最深齿裂长更长，这些不同性状间相似的遗传倾向为托桂型菊花定向育种过程中亲本的选择提供了参考依据。



A: 组合一 ‘1920063’ × ‘1907029’; B: 组合二 ‘2003016’ × ‘1907029’

A: combination one ‘1920063’ × ‘1907029’; B: combination two ‘2003016’ × ‘1907029’

图 4 两个杂交组合 F₁ 代各花型性状的 Spearman 相关性

Fig. 4 Spearman correlation between inflorescence traits in two hybrid combinations F₁ population

2.3 托桂型菊花花型性状最适遗传模型的选择

为探究托桂型菊花不同花型性状的遗传模式，是否受到主基因控制，采用植物数量性状主基因+多基因混合遗传模型单个分离世代的分离分析方法，对本研究中两个杂交组合 F₁ 代花型性状表型数据均值进行混合遗传模型分析，由于舌状花轮数和管状花轮数数据差异过小，所以仅选取花径、心花直径、舌状花数、舌状花长、舌状花宽、管状花数、管状花长、管状花宽、最深齿裂长 9 个花型性状。首先计算 11 种模型与表型数据的配伍情况，得到极大似然值和 AIC 值（附表 2），排除数据异常模型后，根据遗传模型选取的 AIC 最小准则，选取 AIC 值最小及与最小 AIC 值比较接近的遗传模型作为备选模型，并进行适合性检验，包括均匀性检验 (U^2 、 U_2^2 、 U_3^2)、Smirnov 检验 (nW^2) 和 Kolmogorov 检验 (D_n)，选择统计量达到显著个数最少的模型作为最适模型（附表 3），为了保证遗传模型的准确性，选取两个杂交组合同一性状相同的模型为该性状的最适遗传模型。结果表明花径、舌状花长、舌状花宽和管状花数均符合 0MG 模型，即无

主基因控制，可能受环境影响比较大的多基因控制。心花直径、舌状花数、管状花长、管状花宽和最深齿裂长均为 2MG-ADI 模型，即由两个主基因控制，并具有加-显-上位效应。

2.4 托桂型菊花花型性状的遗传参数估计

为进一步探究各个花型性状受主基因的调控程度，根据各个花型性状遗传模型参数的极大似然估计值估计最适遗传模型的遗传参数（附表 4），结果表明 5 个花型性状两对主基因的加性效应均为正向增效，显性效应均为负向效应，均对舌状花数作用较大，表明舌状花数更易受到基因表达的影响。此外，管状花长和最深齿裂长的主基因遗传率在两个杂交组合中差异较小，均在 70%左右，属于高度遗传力。最后，心花直径、舌状花数和管状花宽的主基因遗传率在两个组合中存在较大差异，表明菊花花型性状可能在不同托桂型亲本中遗传力不同。

2.5 托桂型菊花花色性状遗传特性

舌状花是菊花花序中最具观赏价值的部位，其颜色种类丰富，为探究托桂型菊花舌状花花色的遗传特性，利用色差仪对两个杂交组合亲本及其 F₁ 群体的舌状花上表面进行测定，根据 L^* 、 a^* 、 b^* 值将 F₁ 群体聚类为不同色系（表 2、附图 1），其中黄色系占比最高，分别为 46.85%和 45.86%，其次为白色系，分别占 36.94%和 36.09%，橙色系分别占 5.41%和 6.02%，粉色系分别占 10.81%和 6.02%，红色分别为 0.00%和 6.02%，两个杂交组合 F₁ 群体各色系占比大致相似。两个杂交组合舌状花花色的香农-威纳指数（ H ）分别为 1.12 和 1.23，表明后代舌状花花色变化丰富，分离明显。

表 2 两个杂交组合 F₁ 代不同色系的占比及 L^* 、 a^* 、 b^* 值范围

Table 2 The proportion and range of L^* , a^* and b^* values of different color groups of two hybrid combinations F₁ population

组合	色系	样本数量	样本百分数				香农-维纳指数 (H)
Combination	Color group	Number of advanced lines	Percentage of total advanced lines	L^*	a^*	b^*	Shannon-Wiener index
组合一 Com one	白 White	41	36.94%	81.44~92.05	-2.27~4.43	0.35~7.45	1.12
	黄 Yellow	52	46.85%	80.23~89.55	-12.44~-0.68	14.50~73.75	
	橙 Orange	6	5.41%	66.02~77.98	3.38~12.21	16.93~37.12	
	粉 Pink	12	10.81%	57.15~84.78	4.12~29.05	-6.83~1.64	
	总计 Total	111	100.00%	57.15~92.05	-12.44~29.05	-6.83~73.75	
组合二 Com two	白 White	48	36.09%	82.75~92.66	-5.56~6.94	0.73~18.45	1.23
	黄 Yellow	61	45.86%	75.93~89.40	-11.76~4.34	31.44~74.65	
	橙 Orange	8	6.02%	66.00~77.08	2.12~13.64	22.21~37.68	
	粉 Pink	8	6.02%	65.75~80.41	7.70~24.20	-6.88~-1.25	
	红 Rad	8	6.02%	52.45~71.80	11.10~24.53	8.98~33.41	
总计 Total		133	100.00%	52.45~92.66	-11.76~24.53	-6.88~74.65	

F₁ 群体舌状花的 L^* 、 a^* 、 b^* 值分布连续，并与亲本呈现较大程度的分离（附图 2）。两个杂交组合的父本 L^* 为 91.14， a^* 为 -0.82， b^* 为 2.19；组合一母本 L^* 为 55.97， a^* 为 18.29， b^* 为 8.39；组合二母本 L^* 为 56.27， a^* 为 23.27， b^* 为 11.09。两个杂交组合 F₁ 群体的 L^* 和 a^* 值主要介于双亲之间，仅有黄色系的 a^* 值低于双亲；而 b^* 值则有显著的超亲现象，黄色系和橙色系均有较高的 b^* 值。

2.6 托桂型菊花两类小花花色关联性

托桂型菊花管状花具有类似于舌状花的花瓣结构，为探究托桂型菊花管状花和舌状花的花色是否具有相关性，从亲本和 F₁ 群体中选取总共 30 个不同花色的托桂型菊花，利用色差仪测定管状花内侧花色值 L^*_1 、 a^*_1 、 b^*_1 ，舌状花正面花色值 L^*_2 、 a^*_2 、 b^*_2 ，并进行相关性分析（图 5），结果显示 L^*_1 与 L^*_2 、 a^*_1 与 a^*_2 、 b^*_1 与 b^*_2 分别呈现极显著的正相关，表明托桂型菊花的管状花内侧与舌状花正面花色相近。

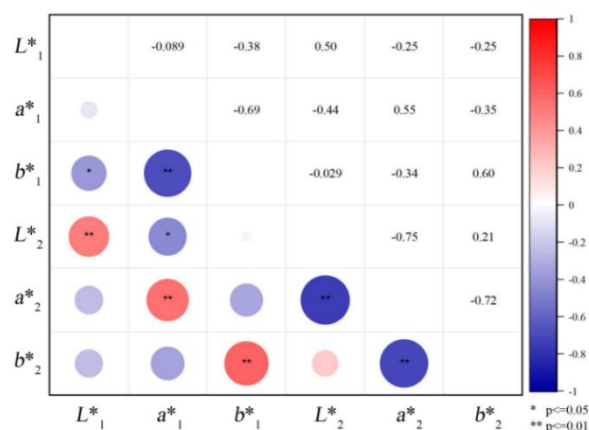


图5 托桂型菊花管状花和舌状花花色值的 Spearman 相关性

Fig. 5 Spearman correlation of color values between disc florets and ray florets of anemone-type chrysanthemum

进一步从亲本和 F_1 群体中选取 10 个不同色系的托桂型菊花，对管状花的内外表皮和舌状花的上下表皮分别做切片观察（图 6），发现管状花的内表皮和舌状花的上表皮细胞均呈椭圆形，而管状花的外表皮和舌状花的下表皮细胞则均呈长条形，这表明两类小花同侧的表皮细胞形态大小相似。此外，通过对两类小花表皮色素种类的观察，发现管状花内表皮与舌状花上表皮、管状花外表皮与舌状花下表皮分别存在相似颜色的颗粒色素物质和可溶性色素物质，说明两类小花同侧表皮花色素种类可能相同，但管状花中红色可溶性色素物质分布较少且在内外表皮分布不均匀。以上结果表明托桂型菊花管状花内表皮与舌状花上表皮、管状花外表皮与舌状花下表皮分别具有相似的细胞形态大小和相同的色素物质从而颜色相近。

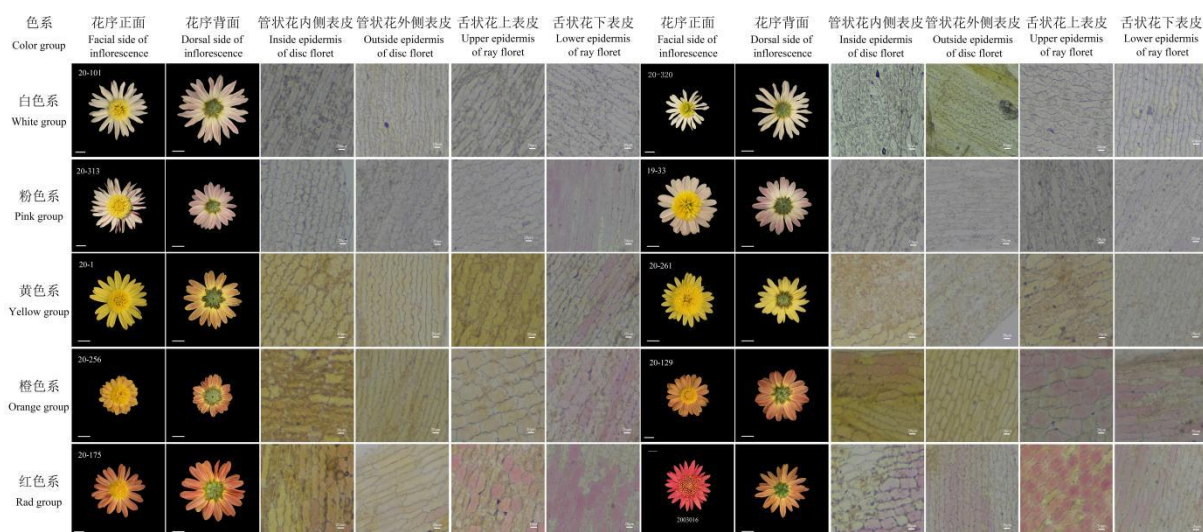


图6 不同色系托桂型菊花两类小花花色素分布

Fig. 6 Distribution of pigment in two types of florets of different color groups of anemone-type chrysanthemums

3 讨论

3.1 托桂型菊花花型性状遗传规律及管状花形态特征

菊花基因组复杂、杂合度高且具有自交不亲和性，因此，通常利用 F_1 群体作为伪 F_2 群体进行主基因+多基因混合遗传模型的单个 F_2 世代分离分析，该方法在菊花^[7, 15, 16, 24]和草坪草^[25-26]等异质性植物中均被使用和验证。在本研究中，单世代分离分析被用于托桂型菊花花型性状遗传分析，结果表明，花径、舌状花长、舌状花宽和管状花数均符合 0MG 模型，即无主基因控制，可能受环境影响比较大的多基因控制。心花直径、舌状花数、管状花长、管状花宽和最深齿裂长均符合由两个具加-显-上位效应主基因控制的 2MG-ADI 模型，

其中管状花长和最深齿裂长的主基因遗传率均在 70%左右,属于高度遗传力,表明其主要受到遗传因素控制。已有研究表明,菊花舌状花数量和花冠筒融合度的遗传均受两对加性-显性主基因控制^[24],这与本研究中的结果是相似的,托桂型菊花管状花可能由于融合度的变化产生不同大小的最深齿裂长,从而影响形态与对称性。前人的研究表明菊花舌状花长和舌状花宽不受主基因控制,花径、心花直径、舌状花数和管状花数存在主基因控制且多表现为加性遗传效应^[15-16],这与本研究结果不尽相同,表明托桂型菊花部分花型性状的遗传模式可能与非托桂型菊花存在差异,唐海强等^[7]以托桂型菊花为材料进行杂交,结果表明舌状花数、管状花宽、最深齿裂长由表现为加性-显性-上位性的两对主基因控制,这与本研究的结果是相同的,表明这三个性状的遗传较为稳定,受到亲本品种的影响较小,而心花直径和管状花长无主基因控制,与本研究结果不同,表明托桂型菊花花型性状的遗传可能还受到其他因素的影响,也侧面反映出其遗传的复杂性和不稳定性。此外,心花直径和管状花宽在本研究的两个杂交组合中同时表现出杂种优势和遗传参数的较大差异,表明这两个性状的遗传可能受到亲本个体差异和其他因素的影响,有待后续进一步验证。

菊花的头状花序由管状花和舌状花两类小花组成,前人的研究多集中在舌状花,对于舌状花的数量和形态^[24, 27]等都进行了较为详细的研究,然而对于管状花的形态变异研究较少。本研究发现管状花长、宽以及最深齿裂长三个性状之间两两呈极显著正相关,管状花较长的托桂型菊花个体通常管状花更宽、最深齿裂长更长,管状花的相关形状是影响托桂型菊花观赏价值的重要因素,这些性状间的相似遗传倾向为托桂型菊花定向育种过程中亲本的选择提供了参考依据。

3.2 托桂型菊花舌状花花色遗传规律及两类小花花色相关性

菊花的舌状花色彩丰富,是主要的观赏部位,高度杂合的遗传背景导致其遗传规律十分复杂。已有研究表明其为偏母性遗传,并表现出不完全显性和镶嵌显性的特点^[28],在本研究中,两个红色托桂型小菊被作为母本与白色非托桂型小菊进行杂交,两个杂交组合 F_1 代各色系占比相似,均以黄白色为主,表明其花色在 F_1 代的杂种优势较弱;此外,两个杂交组合舌状花花色的香农-威纳指数 (H) 分别为 1.12 和 1.23,表明 F_1 代花色分离明显。已有研究表明菊花花色值 a^* 与花青素、 b^* 与类胡萝卜素具显著相关关系^[18],两个杂交组合 F_1 代群体的 a^* 值主要介于双亲之间,仅有黄色系的 a^* 值低于双亲,可能是由于黄色系含有较少的花青素;而 b^* 值则有显著的超亲现象,黄色系和橙色系均有较高的 b^* 值,可能由于其类胡萝卜素含量较高,考虑到两个杂交组合 F_1 代均以黄色系为主,因此推测菊花杂交 F_1 代舌状花中可能更容易积累类胡萝卜素而花青素则积累较少,而这有待后续进一步结合花色素含量进行验证。

菊花的管状花通常为淡黄色,但由于托桂型菊花管状花花瓣内部有多层叶肉细胞^[21-22],导致其同样拥有丰富的颜色,具有较高的观赏价值。在菊花中,决定花色的类黄酮、类胡萝卜素等色素物质一般多存在于花瓣的上下表皮层^[29],且花瓣呈色与花瓣内部色素细胞团所呈现的颜色大致相符^[30],此外,表皮细胞形态大小的差别也可导致颜色差异^[23],因此,花瓣表皮中细胞形态大小、色素物质种类以及色素细胞团的颜色和分布都对花色起到决定性作用。在本研究中,发现托桂型菊花管状花内表皮与舌状花上表皮、管状花外表皮与舌状花下表皮细胞形态大小相近,推测管状花与舌状花同侧具有相同的花瓣结构,这很可能是管状花与舌状花具有相似花色的细胞学基础。此外,发现托桂型菊花管状花内侧和舌状花正面的花色值呈极显著正相关,管状花内表皮与舌状花上表皮、管状花外表皮与舌状花下表皮分别具有相同的色素物质,说明它们的色素组成成分很可能是相同的。另外还观察到管状花中红色可溶性色素物质分布较少且在内外表皮分布不均匀,前人研究表明菊花花瓣中红色色素物质仅存在于表皮中,而黄、白色色素物质则存在于各个组织结构中^[23],管状花花瓣表皮中红色可溶性色素物质分布相比舌状花较少,导致黄、白色色素物质占比较高,色素组成的含量比例不同,因此颜色与舌状花相近而非完全一致,说明舌状花和桂瓣的呈色机制不完全相同,此外,由于管状花花瓣边缘为黄色,因此托桂型菊花的心花区域通常在视觉上为黄色从而形成“双色花”。综上,托桂型菊花管状花内表皮与舌状花上表皮、管状花外表皮与舌状花下表皮细胞形态大小相似、色素物质种类相同,因而管状花内侧与舌状花正面、管状花外侧与舌状花背面花色相近。已有研究表明结构基因 *CmCCD4A-2* 的差异表达导致托桂型菊花两类小花中产生不同的类胡萝卜素含量^[31],因此,托桂型菊花管状花和舌状花可能具有相似的色素合成通路,但两类小花的颜色不完全相同很可能与他们色素含量和组成比例不同有关。以上的花色分析仅停留在花色值测定与花色素物质切片观察,有待后续

进一步的花色素定性定量分析验证。

4 总结

在本研究中, 遗传分析表明托桂型菊花的心花直径、舌状花数、管状花长、管状花宽和最深齿裂长由两个主基因控制, 其中, 管状花宽和最深齿裂长为高遗传力, 受环境影响较小, 在早世代即可选择。此外, 本研究结果表明托桂型菊花部分花型性状的遗传规律与非托桂型不尽相同, 且不同托桂型亲本对子代品质影响存在较大差异, 选取管状花最深齿裂长较小的托桂型小菊作为母本有利于超亲 F_1 个体的选择。最后, 发现托桂型菊花 F_1 代舌状花花色分离明显, 且管状花内侧与舌状花正面、管状花外侧与舌状花背面因表皮细胞形态大小相似、花色素物质种类相同而花色相近。这些结果可以进一步揭示托桂型菊花花型及花色性状的遗传规律, 同时为托桂型菊花新品种的培育提供参考与依据。

参考文献

- [1] Elston R C, Stewart J. The analysis of quantitative traits for simple genetic models from parental, F_1 and backcross data. *Genetics*, 1973, 73(4): 695-711.
- [2] Yonatan E, Avigdor C, Nachum K. A mixed model for the effects of single gene, polygenes and their interaction on quantitative traits. 2. The effects of the nor gene and polygenes on tomato fruit softness. *Heredity*, 1990, 64(2): 205-213.
- [3] Elkind Y, Cahaner A. A mixed model for the effects of single gene, polygenes and their interaction on quantitative traits: 1. The model and experimental design. *Tag. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische Und Angewandte Genetik*, 1986, 72(3): 377-383.
- [4] Zhang Y M, Gai J Y, Yang Y H. The EIM algorithm in the joint segregation analysis of quantitative traits. *Genetical Research*, 2003, 81(2): 157-163.
- [5] 王健康, 盖钧镒. 利用杂种 F_2 世代鉴定数量性状主基因-多基因混合遗传模型并估计其遗传效应. *遗传学报*, 1997(05): 432-440.
Wang J K, Gai J Y. Identification of major gene and polygene mixed inheritance model and estimation of genetic parameters of a quantitative trait from F_2 Progeny. *Journal of Genetics and Genomics*, 1997(05): 432-440.
- [6] 盖钧镒. 植物数量性状遗传体系的分离分析方法研究. *遗传*, 2005, 27(1): 130-136.
Gai J Y. Segregation analysis of genetic system of quantitative traits in plants. *Hereditas(Beijing)*, 2005, 27(1): 130-136.
- [7] 唐海强, 张飞, 陈发棣, 房伟民, 王楚楚, 陈素梅. 托桂型菊花花器性状杂种优势与混合遗传分析. *园艺学报*, 2015, 42(05): 907-916.
Tang H Q, Zhang F, Chen F D, Fang W M, Wang C C, Chen S M. Heterosis and mixed genetic analysis of inflorescence traits of anemone-typed chrysanthemum. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(05): 907-916.
- [8] 常丹丹, 金星娜, 田新会, 杜文华. 小黑麦穗部性状的主基因+多基因混合遗传模型分析. *草原与草坪*, 2021, 41(04): 56-63.
Chang D D, Jin X N, Tian X H, Du W H. Genetic analysis on the mixed model of major gene plus polygenes for the panicle related traits in triticale. *Grassland and Turf*, 2021, 41(04): 56-63.
- [9] 方敦煌, 焦芳婢, 卢灿华, 谢贺, 曾建敏, 陈学军, 童治军. 烟草青枯病抗性的主基因+多基因混合遗传分析. *分子植物育种*, 21(18): 6072-6079.
Fang D H, Jiao F C, Lu C H, Xie H, Zeng J M, Chen X J, Tong Z J. Genetic analysis on resistance to bacterial wilt of tobacco by mixture model of major gene plus polygene. *Molecular Plant Breeding*, 21(18): 6072-6079.
- [10] 张永楠, 黄诗诗, 胡胜平, 王鹏, 钟川, 阳燕娟, 于文进. 茄子果实形状的主基因+多基因遗传分析. *分子植物育种*, 2021: 1-14.
Zhang Y N, Huang S S, Hu S P, Wang P, Zhong C, Yang Y J, Yu W J. Genetic analysis of eggplant fruit shape by mixture model of major genes and polygenes. *Molecular Plant Breeding*, 2021: 1-14.
- [11] 弭彬彬, 谢玲玲, 肖伟, 戴雄泽, 张竹青, 汪端华, 周火强. 冬瓜果实与种子性状的遗传规律及单果质量通径分析. *园艺学报*, 2021, 48(12): 2414-2426.
Mi B B, Xie L L, Xiao W, Dai X Z, Zhang Z Q, Wang D H, Zhou H Q. Genetic law of fruit and seed traits of wax gourd and path analysis of single fruit weight. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(12): 2414-2426.
- [12] Yang X D, Wu Y Y, Su J S, Ao N, Guan Z Y, Jiang J F, Chen S M, Fang W M, Chen F D, Zhang F. Genetic variation and development of a SCAR marker of anemone-type flower in chrysanthemum. *Molecular Breeding*, 2019, 39(3).
- [13] Yang X D, Fang X Q, Su J S, Ding L, Guan Z Y, Jiang J F, Chen S M, Chen F D, Fang W M, Zhang F. Genetic dissection of floral traits in anemone-type chrysanthemum by QTL mapping. *Molecular Breeding*, 2019, 39(9).
- [14] 陈发棣, 蒋甲福, 郭维明. 小菊花器若干性状在 F_1 代的表现. *园艺学报*, 2003, 30(2): 175-182.

- Chen F D, Jiang J F, Guo W M. Heredity of several flower characters in *Dendranthema grandiflora* with small inflorescences. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(2): 175-182.
- [15] 张飞, 陈发棣, 房伟民, 陈素梅, 李凤童. 菊花花器性状杂种优势与混合遗传分析. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2953-2961.
- Zhang F, Chen F D, Fang W M, Chen S M, Li F T. Heterosis and mixed genetic analysis of inflorescence traits of chrysanthemum. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(14): 2953-2961.
- [16] 付瀚森, 张亚雯, 赵阳阳, 罗婷婷, 邓慧杰, 孟晨伟, 王彩云. 菊花‘绿叮当’与毛华菊杂交后代花部性状杂种优势与混合遗传分析. *园艺学报*, 2021, 48(01): 96-106.
- Fu H S, Zhang Y W, Zhao Y Y, Luo T T, Deng H J, Meng C W, Wang C Y. Heterosis and mixed inheritance analysis of flower head traits in the progeny of the cross between *Chrysanthemum x morifolium* 'Ludingdang' and *Chrysanthemum vestitum*. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(01): 96-106.
- [17] 杨云燕, 温超, 王珂永, 马男, 赵梁军. 切花菊杂交 F₁ 代若干性状的遗传分析. *中国农业大学学报*, 2015, 20(05): 179-187.
- Yang Y Y, Wen C, Wang K Y, Ma N, Zhao L J. Heredity analysis of several characters in F₁ hybrid generation of cut-flower chrysanthemums. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(05): 179-187.
- [18] Lu C F, Li Y F, Wang J Y, Qu J P, Chen Y, Chen X Y, Huang H, Dai S L. Flower color classification and correlation between color space values with pigments in potted multiflora chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 2021, 283: 110082.
- [19] Lei T, Song Y, Jin X H, Su T Y, Pu Y W. Effects of pigment constituents and their distribution on spathe coloration of *Zantedeschia hybrida*. *HortScience*, 2017, 52 (12): 1840-1848.
- [20] 周熠玮, 许国宇, 王琴, 严福龙, 玉云祎, 余让才, 范燕萍. ‘白姜花’×‘金姜花’杂交 F₁ 代花色遗传分析及其相关 SSR 分子标记开发. *园艺学报*, 2021, 48 (10): 1921 - 1933.
- Zhou Y W, Xu G Y, Wang Q, Yan F L, Yu Y Y, Yu R C, Fan Y P. Genetic analysis and development of associated SSR markers of the flower color in F₁ population of *Hedychium coronarium* ‘COR01’ × *H. ‘Jin’*. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48 (10): 1921-1933.
- [21] Fan J W, Huang J L, Pu Y, Niu Y J, Zhang M M, Dai S L, Huang H. Transcriptomic analysis reveals the formation mechanism of anemone-type flower in chrysanthemum. *BMC Genomics*, 2022, 23(1).
- [22] 李凤童, 陈素梅, 陈发棣, 房伟民, 刘兆磊, 张飞. 托桂花型菊花花发育的组织结构观察. *园艺学报*, 2010, 37(12): 1961-1968.
- Li F T, Chen S M, Chen F D, Fang W M, Liu Z L, Zhang F. Histological structure observation on the floral development of anemone type chrysanthemum. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(12): 1961-1968.
- [23] 伏静, 刘琳子, 戴思兰. 不同花色菊花品种舌状花解剖结构观察. *中国观赏园艺研究进展*, 2016: 110-117.
- Fu J, Liu L Z, Dai S L. The anatomic observation on ray flowers of different color chrysanthemum varieties. *Advances in Ornamental Horticulture of China*, 2016: 110-117.
- [24] Song X B, Zhao X G, Fan G X, Gao K, Dai S L, Zhang M M, Ma C F, Wu X Y. Genetic analysis of the corolla tube merged degree and the relative number of ray florets in chrysanthemum (*Chrysanthemum × morifolium* Ramat.). *Scientia Horticulturae*, 2018, 242: 214-224.
- [25] 郭海林, 陈宣, 薛丹丹, 郑轶琦, 王志勇, 刘建秀. 结缕草属植物青绿期的遗传分析. *草业学报*, 2009, 18(04): 147-153.
- Guo H L, Chen X, Xue D D, Zheng Y Q, Wang Z Y, Liu J X. Genetic analysis of green period of *Zoysia*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(04): 147-153.
- [26] 郑轶琦, 符心童, 郭海林, 刘建秀. 假俭草杂交后代部分外部性状的遗传分析. *草业学报*, 2009, 18(06): 264-269.
- Zheng Y Q, Fu X T, Guo H L, Liu J X. Genetic analysis of morphological characters of centipedegrass hybrids. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(06): 264-269.
- [27] Jin H L, Myung S S, Sung-Chur S, Kwan H O, Ji Y S. Genetic variation of flower characteristics in a population derived from a cross between the chrysanthemum cultivars 'Falcao' and 'Frill Green'. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2014, 55(4): 322-328.
- [28] 栗茂腾, 余龙江, 王丽梅, 刘建民, 雷呈. 菊花花色遗传及花色嵌合体发现. *遗传*, 2005, 27(6): 948-952.
- Li M T, Yu L J, Wang L M, Liu J M, Lei C. The heredity of flower colors and the discovery of flower color chimera in *Chrysanthemum* species. *Hereditas(Beijing)*, 2005, 27(6): 948-952.
- [29] 安天齐. 花色的生理生化. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- An T Q. Physiological biochemistry of flower color. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989.
- [30] 岳娟. 单子叶植物蓝色花花瓣表型观察与解剖结构研究. 西北农林科技大学, 2013.
- Yue J. Phenotype observation and anatomic structure research of petals from the monocotyledons blue flower. Northwest A&F University, 2013.

- [31] Lu C F, Qu J P, Deng C Y, Liu F Y, Zhang F, Huang H, Dai S L. The transcription factor complex CmAP3-CmPI-CmUIF1 modulates carotenoid metabolism by directly regulating the carotenogenic gene *CmCCD4a-2* in chrysanthemum. Horticulture Research, 2022, 9.

附表 1 两个杂交组合 F₁ 代各花型性状统计值

Table S1 Statistical value of inflorescence traits in two hybrid combinations F₁ population

组合	编号	心花直径		舌状花数	舌状花轮数	舌状花长/mm	舌状花宽/mm	管状花数	管状花轮数	管状花长/mm	管状花宽/mm	最深齿裂长/mm
		花径/cm	/cm									
Combination	number	Flower diameter	Disc flower diameter	Number of ray florets	Round of ray florets	Ray floret length	Ray floret width	Number of disc florets	Round of disc florets	Disc floret length	Disc floret width	The longest lobe length
组合一	3	3.96	1.35	27	2	16.49	5.65	91	7	5.82	0.78	1.11
Com one	4	2.31	0.78	32	3	10.20	3.51	69	5	4.28	0.71	1.38
	5	3.16	0.95	21	2	15.18	4.02	78	6	4.62	0.76	0.87
	6	3.99	0.97	35	3	20.52	5.76	67	6	3.80	0.82	1.25
	12	3.37	1.41	24	2	13.28	3.47	79	7	4.43	0.97	0.98
	13	3.31	1.14	19	1	15.49	3.61	79	7	6.97	0.83	1.92
	14	3.19	1.17	30	2	14.74	3.56	52	5	4.35	0.75	0.89
	21	4.14	1.25	37	3	19.42	5.74	47	4	4.27	0.89	1.32
	22	3.41	1.36	16	1	15.55	4.69	89	7	3.67	0.80	1.19
	23	4.46	1.37	28	2	20.12	4.50	67	5	3.85	0.89	0.99
	24	3.51	1.01	22	2	16.15	3.58	57	5	3.38	0.65	0.89
	25	3.30	0.96	24	2	14.76	4.98	108	7	3.88	0.84	1.23
	26	3.82	1.14	50	3	16.33	5.22	74	5	3.48	0.68	0.67
	27	4.59	1.29	31	2	19.62	4.32	70	5	3.82	0.78	0.75
	29	3.37	1.04	21	2	15.02	4.97	56	5	4.16	0.86	1.21
	30	3.03	0.97	24	2	14.14	4.16	112	7	4.78	0.69	1.31
	31	1.88	0.80	26	3	7.80	3.19	79	5	3.11	0.79	0.98
	32	2.89	1.04	28	2	12.97	5.05	49	4	3.80	0.87	0.91
	33	4.75	2.23	29	2	21.08	4.90	92	5	9.12	0.91	1.19
	36	3.88	1.28	22	2	16.68	4.63	98	7	5.78	0.89	0.91
	42	3.82	1.18	32	2	16.44	3.68	119	8	4.31	0.88	0.94
	46	4.74	1.15	18	2	22.79	6.14	51	5	4.17	0.78	1.26

49	3.27	1.05	25	2	14.84	3.46	152	8	3.87	0.82	0.88
50	2.99	1.04	24	2	13.26	4.07	109	7	3.38	0.86	1.11
56	2.64	1.26	14	1	14.10	4.66	81	6	3.93	0.87	0.88
58	4.30	1.35	33	3	19.00	4.84	109	6	4.36	0.95	0.54
59	3.25	1.10	42	3	14.45	4.78	76	4	3.41	0.63	0.60
61	4.14	1.23	41	3	18.88	4.21	104	7	3.88	0.85	0.79
62	3.29	1.02	23	1	15.51	2.92	63	5	4.30	0.71	0.69
64	3.89	1.01	36	3	18.99	4.49	59	5	3.43	0.82	0.81
65	4.14	1.01	47	3	18.30	5.33	54	4	3.45	0.78	0.77
68	3.61	1.20	26	2	15.34	4.32	119	8	3.64	0.67	0.88
69	3.62	1.29	22	2	17.69	4.24	73	5	4.42	0.80	0.73
81	3.63	1.61	27	2	15.46	4.13	89	7	6.10	0.80	1.08
82	3.85	1.36	26	2	17.99	4.68	154	9	5.84	0.92	1.19
83	3.64	0.99	28	2	18.36	5.35	60	4	3.13	0.64	0.76
86	2.75	0.87	22	2	12.65	3.31	93	7	3.42	0.73	0.73
88	3.72	1.21	21	2	16.72	4.53	83	6	4.68	0.90	1.27
89	2.70	1.07	25	2	11.29	3.99	84	5	3.62	0.84	0.64
90	2.78	1.09	24	2	12.73	3.09	76	6	3.96	0.85	1.01
91	3.89	1.06	24	3	17.98	5.25	83	6	3.28	0.70	1.12
92	3.35	1.09	35	3	14.52	4.72	142	8	5.87	0.95	1.04
97	3.35	1.38	25	2	14.60	3.32	103	7	3.53	0.87	0.88
98	3.71	1.07	55	3	17.27	4.50	73	5	4.94	0.88	1.22
103	3.77	0.89	35	3	17.28	4.89	38	4	3.62	0.71	1.91
105	3.87	1.21	23	2	17.45	4.80	62	6	4.04	0.82	0.89
116	4.21	1.17	46	4	18.69	4.87	70	6	3.95	0.80	1.02
118	3.93	0.91	36	3	18.24	6.22	66	6	3.84	0.79	0.85
121	2.28	0.82	20	1	9.83	2.46	52	5	3.33	0.85	0.58
123	3.70	1.22	24	2	15.86	4.87	115	9	3.90	0.84	0.92
124	4.42	1.07	29	2	19.36	4.36	105	7	3.73	0.71	0.75
126	3.95	1.02	19	2	18.05	4.63	51	5	3.25	0.73	1.01
133	3.75	1.19	21	2	18.27	4.06	93	7	4.02	0.80	0.84

138	3.14	1.26	19	2	13.19	4.27	105	7	4.04	0.69	1.06
140	3.62	1.19	30	2	15.11	4.28	129	8	4.15	0.89	0.89
144	3.13	1.32	24	2	13.89	4.17	121	8	3.81	0.68	0.73
145	3.72	1.08	21	2	17.16	4.10	94	7	3.42	0.69	1.58
146	4.47	1.39	31	3	19.90	4.91	70	6	4.40	0.72	0.79
152	2.86	1.13	23	2	11.82	3.10	85	6	3.81	0.90	0.82
153	2.77	1.00	26	2	12.31	3.75	61	5	3.73	0.70	1.44
158	3.47	1.31	31	2	13.47	2.75	96	7	3.93	0.82	0.96
160	4.12	0.95	40	3	17.22	5.49	61	6	3.66	0.66	0.72
164	3.40	0.99	28	3	13.75	4.68	65	5	3.91	1.02	0.86
167	2.54	1.07	21	2	11.94	2.76	104	7	4.07	0.77	0.78
168	3.07	1.15	27	2	12.70	3.40	85	6	3.07	0.64	0.61
170	2.66	1.29	22	3	11.80	4.29	99	7	7.54	1.60	1.47
179	3.30	1.13	21	2	15.85	3.84	65	7	3.95	0.61	0.86
180	3.55	1.07	24	2	16.51	4.63	78	6	3.17	0.75	0.68
184	5.38	1.39	21	2	25.09	7.75	51	6	6.62	0.92	1.93
198	4.46	1.42	27	2	19.49	5.69	111	7	3.80	0.74	0.73
205	3.61	0.91	14	3	17.92	7.11	90	7	5.56	0.85	1.57
207	4.32	1.14	34	3	18.22	5.30	71	6	3.59	0.74	0.89
211	3.08	0.84	24	2	15.16	3.72	70	5	3.48	0.74	0.73
214	3.97	1.04	32	3	15.64	5.17	74	6	4.47	0.82	0.91
217	3.39	0.90	21	2	15.52	3.52	41	4	3.32	0.74	0.91
219	3.84	1.30	34	3	16.49	5.22	56	5	4.31	0.84	0.67
221	3.01	1.16	25	3	12.80	4.19	117	7	3.83	0.73	0.76
225	4.41	0.96	48	3	19.55	5.02	62	5	4.10	0.86	0.86
229	3.42	1.12	21	2	15.20	5.18	75	5	3.80	0.88	0.71
235	3.35	1.54	26	3	14.47	4.94	126	7	5.54	0.83	1.52
238	4.19	1.29	23	2	19.29	5.41	101	7	4.15	0.92	1.02
251	4.51	1.01	28	2	19.51	5.99	47	4	3.71	0.79	0.68
252	3.14	1.16	16	2	14.14	4.00	105	7	3.84	0.67	0.89
257	4.43	1.25	32	2	19.03	5.53	91	7	4.13	0.82	1.12

组合一	260	3.88	1.21	25	2	16.31	5.72	65	5	3.69	0.78	0.54
	263	3.49	1.29	22	2	15.48	5.04	110	7	4.46	0.79	0.79
	265	4.04	1.17	33	3	16.91	5.84	76	6	3.98	0.88	0.82
	270	3.69	1.06	25	2	16.72	5.28	39	4	4.13	0.88	1.10
	278	4.16	1.41	25	2	17.72	4.76	107	7	3.93	0.74	0.78
	280	3.75	0.95	25	2	17.32	4.58	72	6	3.24	0.63	0.88
	281	3.04	1.30	35	3	12.28	4.99	117	6	3.57	0.71	0.69
	285	3.34	0.86	30	3	14.63	4.88	110	7	3.42	0.68	0.56
	286	4.14	1.21	26	2	18.18	4.10	93	6	4.16	0.76	0.79
	287	4.24	1.10	53	4	17.65	4.49	83	7	4.54	0.84	0.80
	288	5.26	1.48	53	4	22.34	4.86	68	6	4.73	0.79	1.53
	289	3.92	1.14	21	3	17.11	5.31	141	9	4.18	0.90	0.96
	291	3.28	1.04	33	2	14.32	3.90	113	7	4.01	0.71	0.73
	294	4.32	1.12	28	2	18.72	5.47	89	6	4.19	1.02	0.77
	298	3.61	1.10	35	3	16.15	4.42	60	4	3.40	0.63	0.62
	305	4.36	1.33	25	2	19.39	4.71	124	8	4.33	0.81	1.21
	308	3.75	1.29	26	2	16.00	4.00	129	7	3.51	0.76	0.62
	321	2.69	1.06	25	2	11.79	2.85	126	7	3.95	0.72	0.79
	323	4.48	0.99	54	3	18.89	6.47	40	3	4.07	0.78	1.12
	325	3.48	0.77	53	4	14.47	3.51	57	5	3.80	0.73	1.46
	337	3.03	0.98	40	3	13.78	2.93	91	7	3.67	0.73	0.77
	339	3.46	0.78	58	4	14.62	5.18	48	5	3.64	0.83	0.57
	340	4.05	1.49	21	2	18.30	6.28	113	7	3.77	0.76	0.75
	342	3.71	1.56	36	2	15.85	3.91	119	7	4.01	0.84	0.86
	345	3.45	0.96	34	3	16.06	3.94	32	4	3.64	0.74	1.35
	347	3.25	1.08	21	3	14.54	5.26	104	6	3.78	0.74	1.26
	348	3.89	1.06	39	3	16.92	5.56	35	4	3.72	0.81	0.75
组合一	1	4.34	1.81	22	2	21.03	5.24	88	8	7.00	1.59	2.76
Com two	6	1.91	1.11	32	2	7.81	2.70	84	6	4.01	0.74	0.69
	10	2.42	1.02	35	3	11.65	3.66	64	6	5.84	1.42	2.02

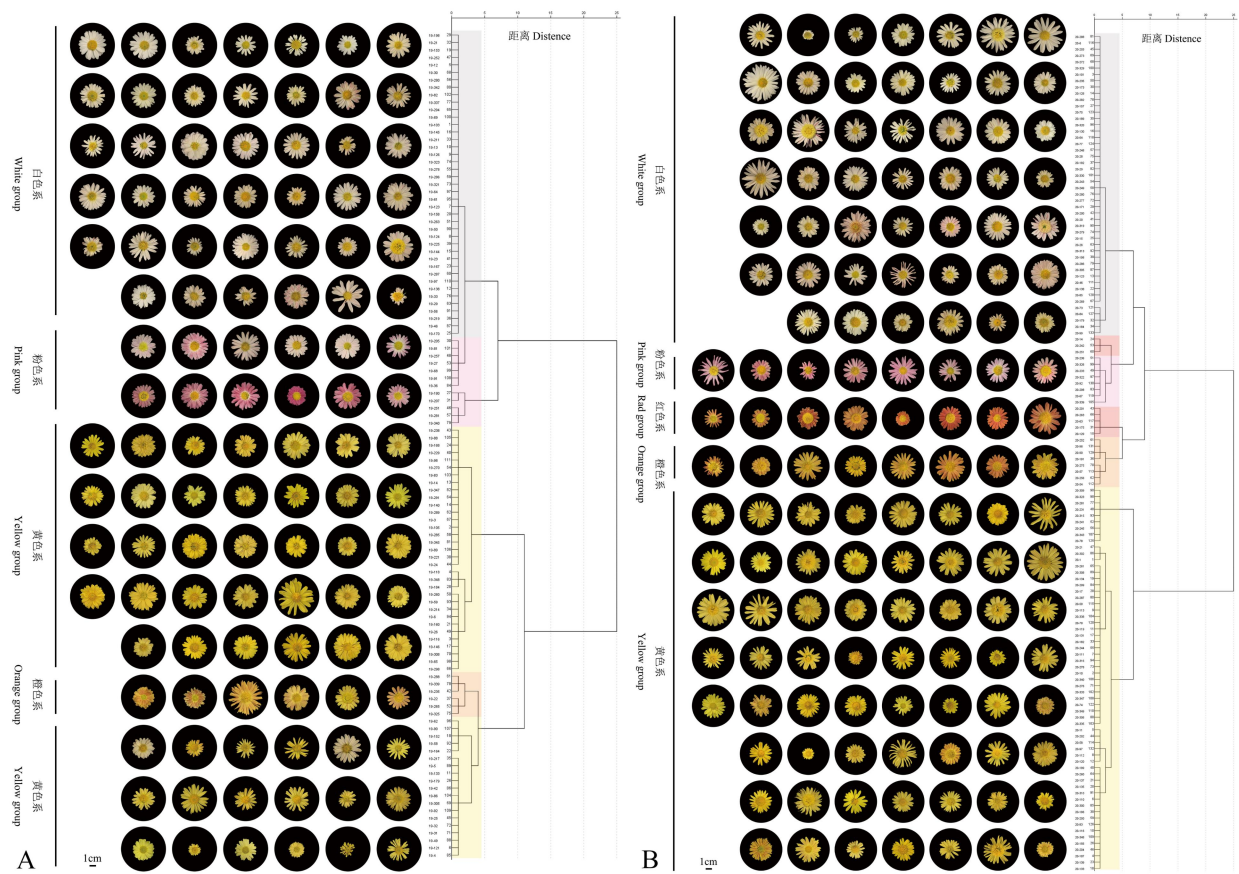
11	3.43	1.16	24	2	16.88	3.88	56	5	4.52	0.83	1.06
14	2.82	1.49	28	3	13.23	4.56	95	7	5.72	1.24	1.24
15	3.37	1.17	38	3	14.29	3.67	119	8	3.67	0.72	0.78
17	4.08	1.04	29	3	18.90	4.36	89	7	3.89	0.81	0.74
20	3.13	0.99	25	2	13.73	3.32	104	7	3.63	0.87	0.93
21	3.69	1.80	19	2	17.21	4.48	101	7	7.97	1.44	1.42
26	5.01	1.94	38	4	21.84	4.68	121	9	8.20	1.68	5.24
28	3.74	1.08	30	3	17.75	3.76	56	5	4.58	0.73	0.84
29	5.74	1.62	30	3	28.48	5.05	172	10	4.94	0.82	0.93
46	3.74	1.21	13	2	17.66	4.84	101	7	5.98	1.13	1.35
54	4.50	1.66	29	3	19.83	4.89	94	7	6.04	1.16	1.38
57	3.83	1.36	30	2	16.93	5.33	91	7	4.10	0.78	0.73
58	3.78	1.07	24	2	17.30	3.77	79	5	3.36	0.67	0.92
59	3.43	1.87	32	3	15.85	5.39	91	6	7.47	1.57	1.79
63	2.93	1.25	44	3	12.63	4.45	70	6	3.82	0.75	0.81
64	5.38	2.44	34	2	26.89	6.04	121	8	9.70	1.53	1.64
67	4.67	1.11	41	3	20.91	4.46	98	6	4.01	0.76	0.97
70	4.45	1.33	34	2	20.02	4.88	123	8	5.41	0.91	0.93
73	4.24	1.92	35	3	19.67	3.98	114	8	7.81	0.87	1.13
74	3.84	1.15	30	3	17.30	4.92	119	7	6.06	1.18	1.40
75	5.88	1.09	52	3	25.02	4.48	83	6	4.17	0.82	0.89
77	3.27	1.45	20	2	15.70	4.81	77	7	7.73	1.77	1.36
78	2.69	1.54	35	3	19.52	5.60	206	9	6.44	0.77	1.28
83	2.98	0.94	40	3	14.52	3.46	86	6	3.79	0.99	0.64
84	2.87	1.16	24	2	13.42	4.53	125	8	3.88	0.77	0.88
85	4.27	1.47	30	2	18.90	4.42	131	8	5.07	0.83	0.95
90	4.58	1.21	25	2	21.06	5.21	75	6	4.48	1.22	0.71
92	4.08	1.23	28	2	17.73	4.72	104	7	4.02	1.23	0.93
96	4.33	1.36	25	2	19.01	4.15	107	7	4.34	1.32	0.93
97	4.03	1.43	39	3	17.66	4.56	84	6	5.68	1.66	2.75

99	4.33	1.64	33	3	18.82	5.93	127	8	5.27	1.45	1.51
101	5.83	2.14	31	2	26.79	5.21	89	7	8.84	1.30	1.99
107	3.84	1.02	72	3	16.43	2.80	110	8	6.45	1.12	2.68
110	3.53	1.34	26	1	16.59	2.90	77	6	4.04	1.31	0.65
111	3.83	1.72	18	2	17.97	4.31	86	6	7.11	1.35	1.38
112	4.09	1.61	20	2	18.73	4.61	70	7	6.94	1.89	3.72
113	5.26	1.37	21	2	24.45	5.02	107	8	5.69	1.26	1.17
116	2.59	0.97	51	4	11.01	3.38	87	6	3.56	1.11	0.71
119	5.35	1.68	33	2	23.25	5.82	67	6	7.23	1.77	1.28
120	3.45	1.20	40	3	15.20	4.31	88	7	4.62	1.19	1.16
123	3.96	1.12	24	2	18.28	4.47	86	7	4.24	1.14	0.70
128	3.71	0.98	34	2	16.32	4.05	57	5	3.78	1.12	0.87
129	4.16	1.61	25	3	19.43	6.34	89	7	7.16	1.63	1.44
130	3.43	1.47	37	3	15.24	4.94	131	8	6.08	1.20	1.43
131	4.36	1.23	27	2	18.85	4.76	56	6	5.75	1.59	1.51
133	4.74	2.26	24	2	21.01	4.09	113	7	10.01	1.31	1.26
134	4.33	1.18	32	3	18.27	5.39	114	7	3.99	1.34	0.70
135	3.48	0.96	26	3	15.56	4.07	120	7	4.06	1.25	0.72
137	4.59	1.41	25	2	21.32	3.39	128	8	4.54	1.19	0.68
138	4.79	1.32	57	3	20.72	5.22	98	7	4.32	1.54	0.65
139	3.43	0.99	23	2	14.83	3.83	64	5	4.01	1.07	0.85
156	3.79	1.43	25	2	16.09	4.38	115	7	5.05	1.29	0.87
157	4.22	1.36	30	2	18.56	3.77	144	8	4.76	1.33	0.89
171	2.99	1.18	22	2	12.61	3.60	113	8	3.92	1.05	0.83
173	3.38	1.24	21	2	15.43	3.50	80	6	5.45	1.16	1.20
175	5.05	1.79	27	2	23.50	6.13	132	8	7.51	1.59	1.18
179	4.46	1.33	35	2	19.98	3.91	125	8	4.84	1.32	1.41
182	3.81	1.08	22	2	17.21	3.98	92	7	5.50	1.14	0.80
184	3.31	1.20	30	3	14.08	3.89	138	8	4.64	1.24	0.98
189	4.22	1.08	37	3	18.25	4.11	109	7	3.58	1.26	0.82

191	3.53	1.11	23	2	15.09	4.08	122	8	3.61	1.15	0.74
192	3.79	1.28	35	3	15.76	5.86	147	8	5.48	1.43	0.80
196	3.96	1.05	20	2	18.22	4.50	84	7	4.09	1.24	1.09
198	3.32	1.32	24	2	14.70	4.77	97	6	5.52	1.20	0.96
199	3.11	1.12	29	2	14.49	4.08	108	7	3.97	1.25	0.87
200	3.54	1.11	42	3	14.82	4.07	73	6	3.89	1.26	1.26
201	3.58	1.20	29	2	15.97	4.02	91	6	3.29	1.00	0.69
202	3.10	1.05	39	4	13.02	4.43	82	6	3.76	1.16	0.92
203	5.74	1.52	22	2	26.35	5.97	98	7	5.20	1.54	1.12
204	2.96	1.18	20	2	12.45	3.60	113	7	4.68	1.13	1.18
231	5.39	1.71	17	2	24.33	4.54	63	5	7.01	1.66	1.24
233	3.02	1.18	27	2	13.14	3.02	87	7	3.58	1.00	0.72
235	3.40	1.30	32	2	13.63	4.52	142	7	4.29	0.75	1.34
236	3.18	1.34	23	2	14.14	4.50	112	7	4.41	1.20	0.79
241	3.49	1.36	32	3	14.90	5.01	102	7	3.94	1.00	1.06
242	3.02	1.50	22	2	13.40	4.99	104	7	6.15	1.23	1.46
243	3.68	1.09	18	1	16.61	4.10	63	6	4.52	1.25	1.13
244	3.37	1.38	20	2	15.97	3.53	97	7	6.86	1.34	4.05
245	3.79	1.15	22	2	16.61	3.94	113	8	4.27	1.28	0.77
248	4.71	1.36	35	3	21.47	5.27	106	8	4.26	1.24	1.02
249	3.77	1.41	33	3	16.89	4.59	137	9	4.28	1.26	1.38
250	4.56	2.16	35	2	20.69	4.98	179	8	6.13	1.25	1.47
251	3.02	0.88	16	1	14.30	3.36	65	5	3.19	1.20	0.85
252	4.63	1.42	21	2	21.79	4.64	134	9	4.54	1.21	0.82
256	3.05	1.40	51	4	12.54	4.67	97	7	5.56	1.42	0.88
260	1.96	0.96	27	2	7.76	3.02	104	6	3.88	0.74	1.06
261	4.27	2.46	26	2	19.47	4.57	102	6	10.67	1.77	2.51
263	3.75	1.59	26	2	16.96	4.64	117	9	5.65	1.20	1.25
269	2.86	1.13	21	2	12.65	2.91	138	9	4.47	1.14	1.26
272	4.16	1.42	23	2	20.26	5.05	70	6	5.97	1.34	1.32

273	4.34	1.12	33	2	20.86	4.11	52	4	3.82	1.16	0.61
275	3.48	0.99	24	2	15.79	4.04	119	8	4.17	1.36	1.05
276	4.47	1.44	21	2	19.98	4.89	89	6	6.40	1.36	1.18
277	3.45	1.21	21	2	16.36	3.14	101	7	4.03	0.93	0.71
278	2.77	1.00	23	2	12.60	4.28	113	7	4.65	1.08	0.52
279	3.16	1.12	25	2	11.23	3.28	64	6	4.12	0.86	0.87
280	4.32	1.19	34	3	18.73	4.48	84	6	4.00	1.06	0.68
281	4.67	1.56	34	2	20.33	4.81	134	8	4.28	0.80	0.72
282	4.16	1.48	28	2	18.13	4.63	65	5	3.79	1.33	0.68
286	2.83	1.17	21	2	13.11	3.42	103	6	5.28	1.07	1.44
287	4.49	2.17	24	2	19.88	6.50	120	8	9.18	1.70	1.57
288	3.74	1.47	32	3	16.88	5.00	161	9	6.15	1.27	1.49
298	4.15	1.77	25	2	18.51	5.51	107	7	7.31	2.02	3.97
299	3.47	1.36	28	2	15.38	4.02	106	7	5.93	1.53	4.03
300	3.89	1.45	24	2	17.06	4.04	128	8	4.48	1.26	0.88
302	5.99	1.86	27	2	27.60	6.03	162	9	5.05	1.58	1.22
305	4.38	1.26	22	2	19.02	2.83	113	8	4.60	1.03	0.73
306	4.33	1.01	20	2	19.44	4.84	58	5	3.57	1.36	0.79
308	4.49	1.21	27	2	21.48	4.63	94	6	4.59	1.13	1.03
309	3.17	1.48	25	2	14.14	4.79	113	7	5.07	1.38	0.75
310	2.71	1.20	25	2	13.09	3.46	69	5	3.56	1.13	0.89
313	4.54	2.19	26	3	21.02	5.70	66	4	9.61	1.59	1.81
315	3.99	1.03	31	3	17.30	4.27	110	7	3.93	0.82	1.48
316	3.41	1.12	24	2	14.65	3.05	112	8	4.34	0.94	0.76
319	4.63	1.42	29	2	20.57	4.46	134	8	4.03	0.84	0.82
320	4.06	1.42	19	1	18.89	3.80	63	5	6.88	1.22	0.97
322	4.72	1.44	17	2	22.70	4.71	94	7	7.94	1.37	1.09
323	4.43	1.45	25	2	19.72	4.06	145	9	4.72	0.82	0.98
326	3.69	1.39	27	2	16.93	3.64	112	8	4.94	1.31	1.52
329	2.55	0.91	21	2	11.68	2.84	80	6	4.47	0.72	0.62

330	3.64	1.26	33	3	15.52	5.15	77	6	4.58	0.92	0.84
333	2.75	1.18	20	2	11.66	4.28	121	8	5.29	1.13	0.83
335	3.06	0.91	19	2	14.49	5.05	54	5	6.20	1.30	1.52
338	3.44	1.16	32	3	14.83	5.24	87	7	4.04	0.79	0.75
339	3.55	1.03	23	2	17.44	3.78	72	6	3.67	0.73	0.67
340	3.75	1.07	19	2	17.51	4.07	89	7	3.88	0.61	0.99
343	3.74	1.09	33	3	16.86	4.62	101	7	4.09	0.72	0.66
347	3.63	1.32	25	2	15.25	3.92	83	5	3.92	0.63	0.68
348	4.24	1.13	33	3	18.82	4.66	135	8	4.65	0.70	0.94
349	3.87	1.29	29	2	17.22	4.21	86	7	4.02	0.86	1.02



A: 组合一 '1920063' × '1907029'; B: 组合二 '2003016' × '1907029'

A: combination one '1920063' × '1907029'; B: combination two '2003016' × '1907029'

附图 1 两个杂交组合 F₁ 代单花图

Fig. S1 F₁ population single flower diagram of two hybrid combinations

附表 2 两个杂交组合 F₁ 代各花型性状遗传模型的 AIC 值

Table S2 Akaike's information criterion (AIC) values of genetic model of inflorescence traits in two hybrid combinations F₁ population

组合	模型	花径	心花直径	舌状花数	舌状花长	舌状花宽	管状花数	管状花长	管状花宽	最深齿裂长
Combination	Model	Flower diameter	Disc flower diameter	Number of ray florets	Ray floret length	Ray floret width	Number of disc florets	Disc floret length	Disc floret width	The longest lobe length
组 合 一 Comb one	0MG	208.436	-31.786	813.594	547.389	304.235	1050.815	298.720	-159.719	46.892
	1MG-A	209.881	-43.410	783.475	548.162	304.341	1046.524	233.014	-191.765	22.829
	1MG-AD	211.812	-41.784	773.457	549.077	303.962	1048.468	207.807	-193.753	17.831
	1MG-EAD	211.936	-34.201	784.446	550.161	307.697	1048.701	249.759	-165.790	25.339
	1MG-NCD	212.439	-28.842	781.550	551.390	307.895	1050.920	239.900	-156.255	29.934
	2MG-A	203.895	-46.387	769.822	539.397	306.459	1047.045	216.333	-201.178	5.602
	2MG-AD	215.784	-54.530	-	541.752	298.845	1045.546	208.828	-208.108	-1.274
	2MG-ADI	223.810	-36.567	780.775	562.390	318.228	1057.276	251.888	-195.696	26.324
	2MG-CD	212.445	-27.788	817.592	551.398	308.237	1054.817	302.717	-155.722	50.890
	2MG-EA	209.909	-49.874	-	543.522	301.151	1044.955	210.656	-206.361	13.213
组 合 二 Comb two	2MG-EAD	210.446	-29.788	815.592	549.399	306.236	1052.817	300.717	-157.722	48.890
	0MG	316.160	77.797	948.257	733.046	320.810	1262.959	496.967	57.039	297.918
	1MG-A	314.278	39.117	908.418	729.592	319.378	1257.216	448.526	27.959	189.119
	1MG-AD	316.278	34.591	910.355	729.547	320.853	1256.684	429.171	25.858	132.077
	1MG-EAD	317.580	55.917	930.942	733.656	324.447	1263.587	441.148	40.623	213.457
	1MG-NCD	317.903	49.030	940.855	734.749	324.305	1264.412	464.658	60.366	191.620
	2MG-A	311.785	36.773	907.193	725.433	324.501	1255.515	429.287	22.211	137.913
	2MG-AD	293.912	29.281	904.251	730.135	305.410	1244.245	416.898	25.405	123.280
	2MG-ADI	316.352	42.255	929.728	739.751	336.201	1271.825	450.090	39.101	203.569
	2MG-CD	320.162	81.796	952.256	737.048	324.816	1266.960	500.966	61.044	301.916
	2MG-EA	312.954	35.740	905.752	728.247	313.893	1249.069	432.921	27.026	135.317
	2MG-EAD	318.162	79.796	950.256	735.048	322.816	1264.960	498.966	59.044	299.916

MG 为主基因模型；A、D、I 和 E 为加性、显性、上位性和相等效应。

MG: The main gene model; A: Additive effect; D: Dominant effect; I: Epistatic effect; E: Equal.

附表 3 入选模型的适合性检验

Table S3 Test for goodness-of-fit of selected genetic model

性状	模型	组合	U_1^2	U_2^2	U_3^2	${}_nW^2$	D_n
Trait	Model	Combination					
花径	0MG	组合 1	0.0001 (0.9942)	0.0066 (0.9353)	0.1244 (0.7244)	0.0219 (0.9948)	0.0395 (0.9951)
Flower diameter		组合 2	0.1290 (0.7195)	0.2231 (0.6367)	0.2483 (0.6183)	0.0727 (0.7434)	0.0674 (0.5814)
心花直径	2MG-	组合 1	0.0634 (0.8012)	0.0259 (0.8720)	0.1093 (0.7409)	0.0611 (0.8098)	0.0631 (0.7691)
Disc flower diameter	ADI	组合 2	0.0001 (0.9913)	0.0001 (0.9931)	0.0001 (0.9938)	0.0296 (0.9775)	0.0521 (0.8631)
舌状花数	2MG-	组合 1	0.0026 (0.9590)	0.0016 (0.9684)	0.1279 (0.7206)	0.0541 (0.8518)	0.0762 (0.5388)
Number of ray florets	ADI	组合 2	0.1613 (0.6880)	0.0725 (0.7877)	0.2284 (0.6327)	0.1597 (0.3624)	0.1056 (0.1030)
舌状花长	0MG	组合 1	0.0005 (0.9830)	0.0045 (0.9464)	0.1235 (0.7252)	0.0227 (0.9937)	0.0463 (0.9712)
Ray floret length		组合 2	0.1533 (0.6954)	0.3292 (0.5662)	0.6062 (0.4362)	0.0626 (0.8011)	0.0491 (0.9052)
舌状花宽	0MG	组合 1	0.0111 (0.9163)	0.0423 (0.8370)	0.1730 (0.6774)	0.0261 (0.9871)	0.0406 (0.9931)
Ray floret width		组合 2	0.0125 (0.9111)	0.0334 (0.8550)	0.0894 (0.7650)	0.0431 (0.9168)	0.0442 (0.9570)
管状花数	0MG	组合 1	0.1036 (0.7475)	0.0164 (0.8982)	0.5407 (0.4622)	0.0949 (0.6224)	0.0707 (0.6354)
Number of disc florets		组合 2	0.2012 (0.6537)	0.2887 (0.5910)	0.1698 (0.6803)	0.0577 (0.8304)	0.0545 (0.8247)
管状花长	2MG-	组合 1	0.0688 (0.7931)	0.6073 (0.4358)	4.4158 (0.0356) *	0.1659 (0.3455)	0.0751 (0.5585)
Disc floret length	ADI	组合 2	0.1698 (0.6803)	0.0730 (0.7870)	0.2653 (0.6065)	0.1508 (0.3888)	0.0807 (0.3521)
管状花宽	2MG-	组合 1	0.0046 (0.9459)	0.0080 (0.9287)	0.3853 (0.5348)	0.0496 (0.8792)	0.0701 (0.6471)
Disc floret width	ADI	组合 2	0.0008 (0.9773)	0.0000 (0.9988)	0.0135 (0.9075)	0.0181 (0.9984)	0.0323 (0.9991)
最深齿裂长	2MG-	组合 1	0.0141 (0.9055)	0.0090 (0.9246)	0.0066 (0.9353)	0.0355 (0.9549)	0.0528 (0.9159)
The longest lobe length	ADI	组合 2	0.3841 (0.5354)	1.0051 (0.3161)	2.5915 (0.1074)	0.4021 (0.0741)	0.1166 (0.0536)

U_1^2 , U_2^2 , U_3^2 : 均匀性检测统计量; 括号内: 概率值; ${}_nW^2$: Smirnow 检测统计量; D_n : Kolomogorov 检测统计量; *: 显著水平 ($P < 0.05$)

U_1^2 , U_2^2 , U_3^2 : Uniformity test statistical unit; In parentheses: Probability value; ${}_nW^2$: Smirnow test statistical unit; D_n : Kolomogorov test statistica unit; *: Significant level($P < 0.05$)

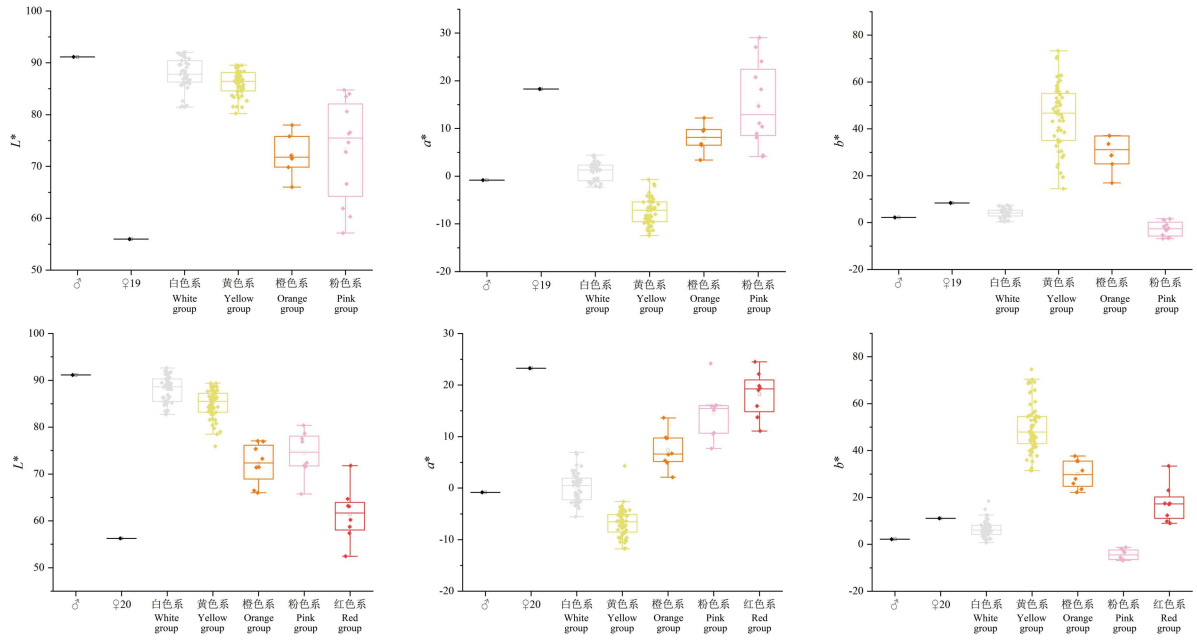
附表 4 托桂型菊花不同花型性状在各最优模型下遗传参数的估计值

Table S4 Estimation of genetic parameters for inflorescence traits of anemone-type chrysanthemum at its optimal genetic model

性状 Trait	模型 Model	组合	m	d_a	d_b	h_a	h_b	i	j_{ab}	j_{ba}	l	σ^2_{mg}	h^2_{mg}
		Combi -nation											
心花直径	2MG-	组合 1	1.4068	0.2770	0.2713	-0.4101	-0.2653	0.2701	-0.2652	-0.1303	0.4034	0.0111	25.9390
Disc flower diameter	ADI	组合 2	1.4719	0.3792	0.2038	-0.3934	-0.0447	0.2038	-0.0447	0.1611	0.2854	0.0917	89.2931
舌状花数	2MG-	组合 1	33.3756	10.1012	4.1770	-11.2898	-3.9991	4.0765	-4.0103	4.5570	5.4456	73.6044	84.6992
Number of ray florets	ADI	组合 2	34.0723	7.2184	6.9373	-10.6442	-6.1867	6.9061	-6.1825	-3.2252	9.7675	32.0204	44.8007
管状花长	2MG-	组合 1	4.5385	0.6505	0.6502	-0.9756	-0.6494	0.6502	-0.6494	-0.3249	0.9746	0.5769	68.6378
Disc floret length	ADI	组合 2	6.0728	1.7192	0.9006	-2.5690	-0.3810	0.9000	-0.3808	-0.0329	1.2355	1.9997	83.2642
管状花宽	2MG-	组合 1	0.9930	0.2045	0.2017	-0.3035	-0.1992	0.2007	-0.1992	-0.0981	0.3014	0.0060	44.0956
Disc floret width	ADI	组合 2	1.1604	0.3494	0.1411	-0.3160	0.0250	0.1411	0.0250	0.2417	0.3570	0.0777	88.3621
最深齿裂长	2MG-	组合 1	1.1750	0.3550	0.1571	-0.5291	-0.1034	0.1569	-0.1033	0.0230	0.2794	0.0660	75.9045
The longest lobe length	ADI	组合 2	1.6668	0.6305	0.6302	-0.9456	-0.6291	0.6302	-0.6291	-0.3148	0.9443	0.3925	72.9929

d_a : 第 1 对主基因的加性效应; d_b : 第 2 对主基因的加性效应值; h_a : 第 1 对主基因显性效应; h_b : 第 2 对主基因显性效应; i : 2 个主基因间加性 $\times$ 加性互作效应; j_{ab} : 第 1 对主基因间加性 $\times$ 第 2 对主基因显性互作效应; j_{ba} : 第 2 对主基因间加性 $\times$ 第 1 对主基因显性互作效应; l : 2 个主基因间显性 $\times$ 显性互作效应; σ^2_{mg} : 主基因方差; h^2_{mg} : 主基因遗传率/%

d_a : Additive effect of the first major gene; d_b : Additive effect of the second major genes; h_a : Dominant effect of the first major gene; h_b : Dominant effect of the second major gene; i : Additive $\times$ additive interaction between two major genes; j_{ab} : Additive effect of the first major gene $\times$ dominant effect of the second major gene; j_{ba} : Additive effect of the second major gene $\times$ dominant effect of the first major gene; l : Dominant $\times$ dominant interaction between two major genes; σ^2_{mg} : Major-gene variance; h^2_{mg} : Major-gene heritability/%



附图2 两个杂交组合亲本及不同色系 F₁ 代舌状花的 L^* 、 a^* 、 b^* 值

Fig. S2 L^* , a^* and b^* values of ray floret from two hybrid combinations parents and F₁ population of different color groups