

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: 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, 测定了杂交 F_1 的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性-显性-上位性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、管状花宽和最深齿裂长两两之间呈极显著的正相关。根据舌状花的花色值(L^*, a^*, b^*)将 F_1 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, 测定了亲本及 F_1 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5个色系共10个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。本研究结果为菊花托桂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: In this study, two F_1 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 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

收稿日期: 2023-09-27 网络出版日期: 2023-12-02

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>

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

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(6212022); 大学生创新创业训练计划项目(202210022030)

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

the flower color values (L^* , a^* , b^*) of inside epidermis of disc florets and upper epidermis of ray florets. The results suggest a respectively significant positive correlation of L^* , a^* and b^* values between the two. Through examining 10 anemone-type chrysanthemums with 5 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. The 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 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5个瓣型,包括30个花型和13个亚型^[1],其中托桂花型(AT, 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。栽培小菊作为菊花的重要类群,多为异源六倍体,遗传背景十分复杂,花型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^[2],随后在植物中逐步发展完善^[3-4],最终主基因+多基因混合遗传模型的单世代分离分析逐渐被应用于大豆研究^[5-7]。近年来,该方法在菊花^[8]、小麦^[9]、烟草^[10]、茄子^[11]、冬瓜^[12]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^[13]和QTL定位^[14]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,这与前人研究中心花直径存在两个主基因控制,管状花数存在1个主基因控制的结果存在差异^[15],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。杂种优势及遗传模型的适配可能会受到亲本品种的影响^[16],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 的影响程度尚不清晰。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,近年来该方法在菊花^[17]、彩马蹄莲^[18]、姜花^[19]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^[20-21],颜色丰富。研究表明菊花舌状花因上下表皮细胞形态大小、色素物质种类和含量的差别导致上侧和下侧的颜色差

异^[22],但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,与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,并根据舌状花 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 试验材料

选取北京林业大学三顷园苗圃长期保育的非托桂型白色小菊1907029为父本材料,托桂型红色小菊1920063和2003016为母本材料(图1),设计两对杂交组合,杂交组合一(1920063×1907029)和杂交组合二(2003016×1907029),分别获得种子342粒和488粒。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,于2021年春季播种并获得 F_1 植株,所有试验材料常规苗圃管理养护并保存在北京林业大学三顷园苗圃内。

1.2 花型性状测定

于2021年秋季盛花期调查亲本与 F_1 植株的花型性状,包括花径、心花直径、舌状花数、舌状花轮数、舌状花长、舌状花宽、管状花数、管状花轮数、管状花长、管状花宽、最深齿裂长共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舌状花和管状花各1朵,计算平均值。测量标准参照中国国家市场监督管理总局和中国国家标准化委员会于2018年发布的《植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 菊花》^[23](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]。

1.3 花色值测定及色素分布观察

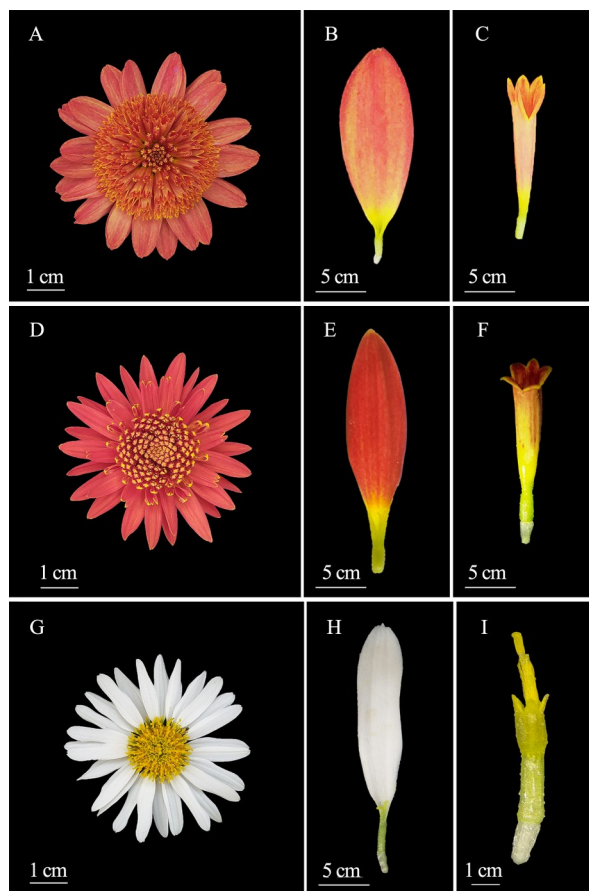
使用NF333色差仪(Nippon Denshoku Industries Co. Ltd., 日本)测定亲本与两个杂交组合全部 F_1 共244株的花色值,每个单株选取3个完全盛开的花序,每个花序选取最外轮舌状花和管状花(沿最深齿裂展开花瓣)各一朵置于干净的白纸上,色差仪光源对准舌状花上侧和管状花内侧的中部测定花色值:亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*),每朵花测定5次,取平均值。

从亲本和 F_1 中选取5个色系共10个托桂型菊花,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,用光学显微镜采用40×10倍数进行花瓣表皮细胞形态及色素分布情况观察。

1.4 数据分析

利用SPSS 2020对两个杂交组合 F_1 群体花型性状的遗传特性指标进行计算,其中,变异系数=(标准差/平均值)×100%,偏度和峰值分别采用函数SKEW和KURT计算。将 F_1 的平均数(F_m)与中亲值(MPV, mid-parents value)之差定义为中亲优势(H_m), ($F_m - MPV$)/MPV × 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 为各类群组分占比)计算。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层次聚类分析。利用Origin 2021软件绘制花型性状的小提琴图和相关性图、花色值的箱线图和相关性图。利用Ai 2021绘制杂交 F_1 单花图。



A: 1920063; B: 1920063 舌状花; C: 1920063 管状花; D: 2003016; E: 2003016 舌状花; F: 2003016 管状花; G: 1907029; H: 1907029 舌状花; I: 1907029 管状花
B: Ray floret of 1920063; C: Disc floret of 1920063; E: Ray floret of 2003016; F: Disc floret of 2003016; 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



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); The same as below

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

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^[25],将F₁杂交群体认为是用于遗传分析的伪F₂群体,利用SEA软件包(<https://cran.r-project.org/web/packages/SEA/index.html>)中的F₂程序,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,选取最小AIC值及与最小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_1^2 、 U_2^2 、 U_3^2)、Smirnov检验(M^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,为了保证遗传模型的准确性,选取两个杂交组合同一性状均相同的模型为该性状的最适遗传模型,最后根据各个花型性状遗传模型参数的极大似然估计值估计主基因的效应值和主基因遗传率等遗传参数。

表1 两个杂交组合F₁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 F₁ population

性状 Traits	组合 Combination	变异系数(%) CV	偏度 Skewness	峰值 Kurtosis	中亲值 MPV	中亲优势 H_m	中亲优势率(%) RH_m
花径(cm)	组合一	16.80	0.01	0.38	4.97	-1.34**	-26.96
FD	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
DFD	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
NRF	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
RRF	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
RFL	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
RFW	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
NDF	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
RDF	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
DFL	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
DFW	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
LLL	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;**：在P<0.01水平上差异显著;下同

The difference between F₁ and mid-parent value was analyzed by one-sample t test; **: The difference was significant at P < 0.01 level; NRF: Number of ray florets; RRF: Round of ray florets; NDF: Number of disc florets; RDF: Round of disc florets; CV: Coefficient of variation; MPV: Mid-parents value; H_m : Mid-parent heterosis; RH_m : Rate of mid-parent heterosis; The same as below

2 结果与分析

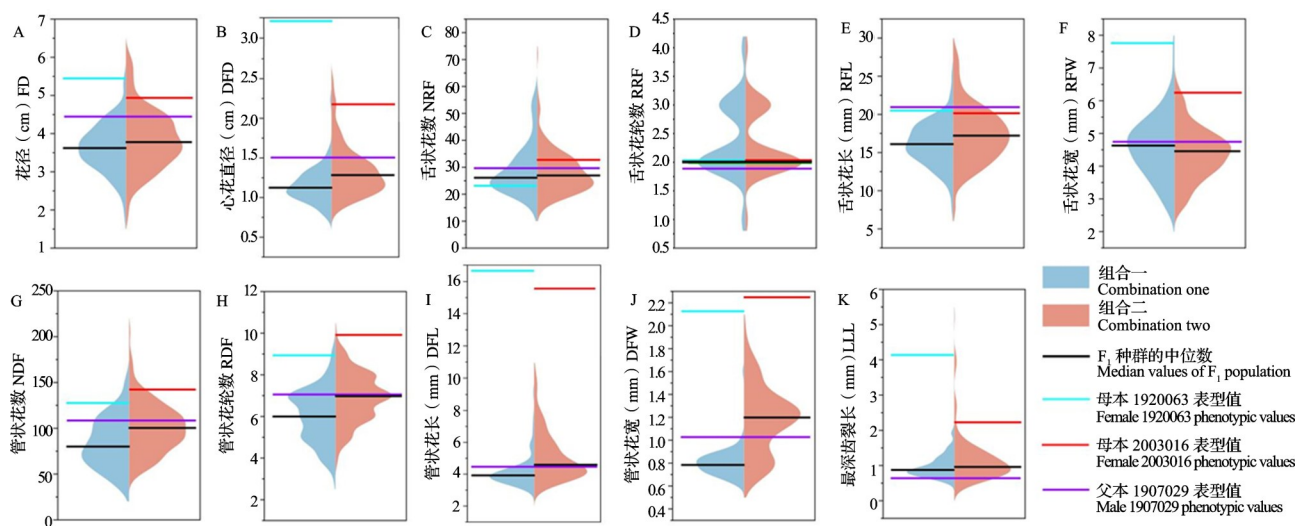
2.1 托桂型菊花杂交F₁群体的花型性状遗传特性

杂交组合一(1920063×1907029)和杂交组合二(2003016×1907029)分别获得F₁植株111株和133株(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>,附图1),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%。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%(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>,附表1、表1),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3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%,表明亲本可能对子代的分离程度产生影响。

两个杂交组合中11个花型性状在 F_1 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。除舌状花数和舌状花轮数外，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 F_1 呈下降趋势，可能存在显性遗传效应。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显著差异(表1)。尽管 F_1 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。

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(图3、表1)，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均存在较大的偏度差异，可能受到亲本品种的影响。



横坐标表示该性状数值的个体数量占比

The horizontal coordinate represents the number proportion of individuals for the trait data value

图3 两个杂交组合 F_1 花型性状的小提琴图

Fig. 3 Violin-plot distribution of inflorescence traits of F_1 population derived from two hybrid combinations

综上所述，管状花长、管状花宽和最深齿裂长这3个性状的遗传特征数据在两个组合间存在较大差异，由于菊花托桂花型是由管状花变化而成，表明托桂花型的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可直接影响后代性状表现。综合两个杂交组合的结果，组合二 F_1 中托桂型植株占比33.83%，远高于组合一 F_1 中托桂型植株占比8.11%，变异程度更为丰富，因此，在组合二中选取与母本2003016性状相似，即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 F_1 群体，更有利于优质单株的选择。

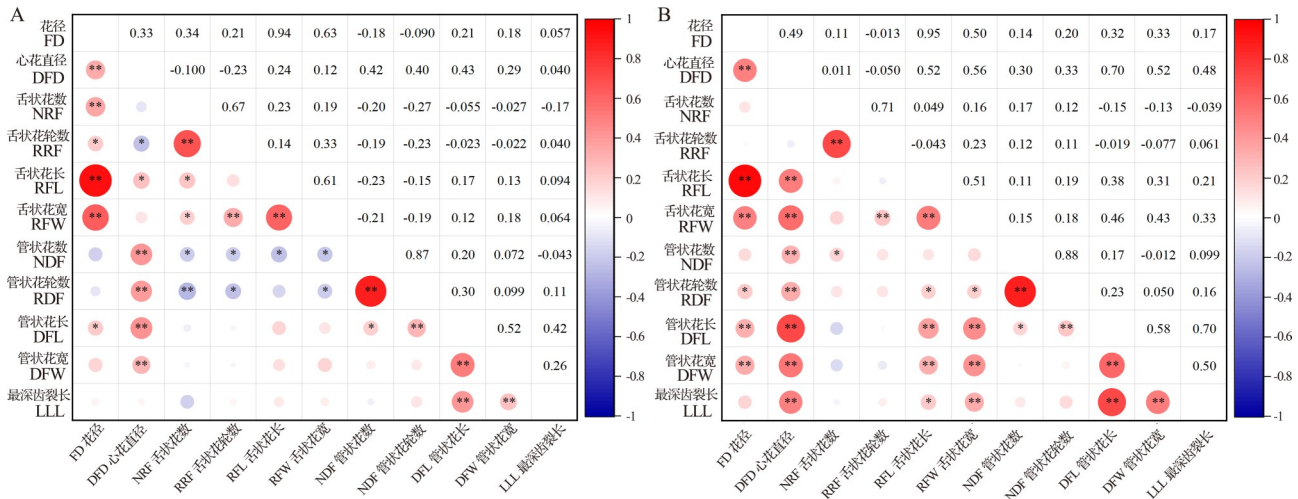
2.2 托桂型菊花花型性状的相关性分析

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个花型性状进行相关性分析(图4)，选取两个杂交组合一致的相关性为最终结果，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3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。

2.3 托桂型菊花花型性状最适遗传模型选择

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，对本研究两个杂交组合 F_1 花型性状表型数据均值进行分析，由于舌状花轮数和管状花轮数数据差异过小，所以仅选取了花径、心花直径、舌状花数、舌状花长、舌状花



A: 组合一 1920063 × 1907029; B: 组合二 2003016 × 1907029; *: 在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同

A: Combination one 1920063 × 1907029; B: Combination two 2003016 × 1907029; *: The difference was significant at $P < 0.05$ level, the same as below

图 4 两个杂交组合 F_1 各花型性状的 Spearman 相关性

Fig. 4 Spearman correlation between inflorescence traits in two hybrid combinations F_1 population

宽、管状花数、管状花长、管状花宽、最深齿裂长 9 个花型性状 (详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>, 附表 2、附表 3)。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, 可能是多基因控制受环境影响比较大。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, 并具有加性-显性-上位性效应。

2.4 托桂型菊花花型性状的遗传参数估计

根据 2MG-ADI 模型, 对 5 个性状进行遗传参数分析 (详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>, 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, 显性效应除组合二管状花宽外均为负向效应, 且舌状花数显性效应较大, 表明舌状花数更易受到主基因表达的影响。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, 遗传力较

高。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间存在较大差异, 表明菊花花型性状可能在不同的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 F_1 群体的舌状花进行测定, 根据 L^* 、 a^* 、 b^* 值将 F_1 群体聚类为 5 个色系 (表 2、详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>, 附图 1), 在两个组合中黄色系占比最高, 分别为 46.85% 和 45.86%, 其次为白色系, 分别占 36.94% 和 36.09%, 粉色系分别占 10.81% 和 6.02%, 橙色系分别占 5.41% 和 6.02%, 红色系分别为 0 和 6.02%, 两个杂交组合 F_1 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 F_1 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 F_1 population

组合 Combination	色系 Color group	样本数量 Number of sample	样本比例 (%) Percentage of sample	花色值 Flower color value			香农-维纳指数 H
				L^*	a^*	b^*	
组合一 Combination one	白	41	36.94	81.44~92.05	-2.27~4.43	0.35~7.45	1.12
	黄	52	46.85	80.23~89.55	-12.44~-0.68	14.50~73.75	
	橙	6	5.41	66.02~77.98	3.38~12.21	16.93~37.12	
	粉	12	10.81	57.15~84.78	4.12~29.05	-6.83~1.64	
	红	0	0	-	-	-	
总计 Total		111	100.00	57.15~92.05	-12.44~29.05	-6.83~73.75	

表2(续)

组合 Combination	色系 Color group	样本数量 Number of sample	样本比例(%) Percentage of sample	花色值 Flower color value			香农-维纳指数 <i>H</i>
				<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	
组合二 Combination two	白	48	36.09	82.75~92.66	-5.56~6.94	0.73~18.45	1.23
	黄	61	45.86	75.93~89.40	-11.76~4.34	31.44~74.65	
	橙	8	6.02	66.00~77.08	2.12~13.64	22.21~37.68	
	粉	8	6.02	65.75~80.41	7.70~24.20	-6.88~-1.25	
	红	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	

样本比例=样本数量/样本总数; -: 空缺

Percentage of sample=Number of sample/total of sample; -: Vacancy

F_1 群体舌状花的 L^* 、 a^* 、 b^* 值分布连续,并与亲本呈现较大幅度的分离(详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230927002>,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 F_1 群体的 L^* 和 a^* 值主要介于双亲之间,但绝大部分黄色系 F_1 个体的 a^* 值低于双亲,仅极少白色系 F_1 个体的 L^* 高于亲本;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 F_1 群体中选取不同花色总共30个托桂型菊花,利用色差仪测定管状花内侧花色值 L^*_1 、 a^*_1 、 b^*_1 ,舌状花上侧花色值 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上侧花色相近。

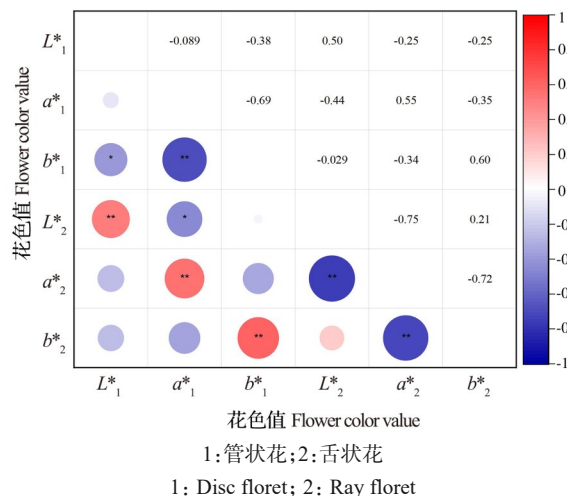


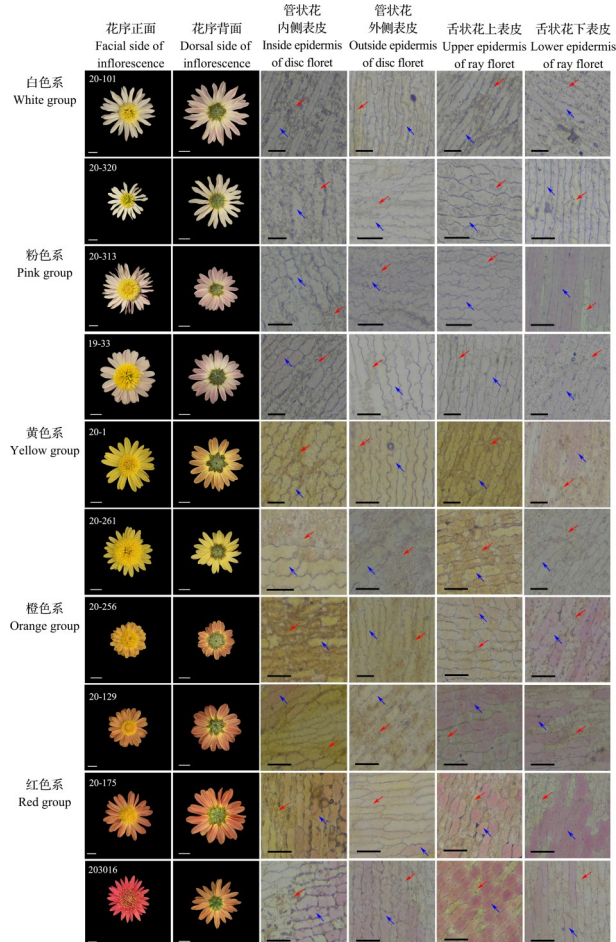
图5 托桂型菊花管状花和舌状花花色值的Spearman相关性
Fig. 5 Spearman correlation of color values between disc florets and ray florets of anemone-type chrysanthemum

进一步从亲本和 F_1 群体中选取不同色系共10个托桂型菊花,对管状花的内外侧表皮和舌状花的上下表皮分别做切片观察(图6),发现管状花内侧表皮和舌状花上表皮的细胞均呈椭圆形,而管状花的外侧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观察,发现管状花内侧表皮与舌状花上表皮、管状花外侧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侧表皮与舌状花上表皮、管状花外侧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。

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世代分离分析,该方法在菊花^[7, 15, 24]和草坪草^[26-27]等异质性植物中均被使用 and 验证。本研究利用单世代分离分析对托桂型菊花花型性状进行遗传分析,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,可能是多基因控制受环境影响比较大。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有加性-显性-上位性效应的主基因控制的主基因控制的2MG-ADI模型,其中管状花长和最深齿裂长的主基因遗传率均在70%左右,遗传力较高,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],这与本研究的结果相似,



第一列白色数字:植株编号;红色箭头:颗粒色素物质;蓝色箭头:可溶性色素物质;白色比例尺=1 cm;黑色比例尺=200 μm
 First column of white numbers: Plant number; Red arrow: Granular pigment substance; Blue arrow: Soluble pigment substance;
 White bar=1 cm; Black bar=200 μm

图6 不同色系托桂型菊花两类小花花色色素分布

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

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。前人的研究表明非托桂型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],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3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、舌状花数和管状花宽在本研究的两个杂交组合中均表现出杂种优势和遗传参数的较大差异,表明其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等都进行了较为详细的研究^[24, 28],然而对于管状花的形态研究较少。本研究发现管状花长、管状花宽以及最深齿裂长3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,管状花的相关性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。已有研究表明花色为偏母性遗传,并表现出不完全显性和镶嵌显性的特点^[29]。在本研究中,两个红色托桂型小菊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 各色系占比相似,均以黄白色为主,表明其花色在 F_1 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 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^[17],本研究两个杂交组合 F_1 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 均以黄色系为主,因此推测菊花杂交 F_1 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^[20-21],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^[30],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^[31],此外,表皮细胞形态大小的差别也可导致颜色差异^[22],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。本研究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,托桂型菊花管状花内侧和舌状花上侧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,这导致黄色、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。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上侧、管状花外侧与舌状花下侧花色相近。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^[32],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它们色素含量和组成比例不同有关。本研究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。

参考文献

- [1] 李鸿渐, 邵健文. 中国菊花品种资源的调查收集与分类. 南京农业大学学报, 1990(1): 30-36
Li H J, Shao J W. Investigation, collection and classification of chrysanthemum cultivars in China. Journal of Nanjing Agricultural University, 1990(1): 30-36
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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. Theoretical and Applied Genetics, 1986, 72(3): 377-383
- [5] 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
- [6] 王建康, 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(5): 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(5): 432-440
- [7] 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, 2005, 27(1): 130-136
- [8] 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(5): 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(5): 907-916
- [9] 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(4): 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(4): 56-63
- [10] 方敦煌, 焦芳婵, 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, 2023, 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, 2023, 21(18): 6072-6079
- [11] 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, 22(2): 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, 22(2): 1-14
- [12] 弭宝彬, 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
- [13] 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): 48
- [14] 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): 136
- [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] 杨云燕, 温超, 王珂永, 马男, 赵梁军. 切花菊杂交 F_1 代若干性状的遗传分析. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 179-187
- Yang Y Y, Wen C, Wang K Y, Ma N, Zhao L J. Heredity analysis of several characters in F_1 hybrid generation of cut-flower chrysanthemums. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(5): 179-187
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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 F_1 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 F_1 population of *Hedychium coronarium* 'COR01' × *H.* 'Jin'. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(10): 1921-1933
- [20] 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): 846
- [21] 李风童, 陈素梅, 陈发棣, 房伟民, 刘兆磊, 张飞. 托桂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
- [22] 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// 张启翔. 中国观赏园艺研究进展. 长沙: 中国林业出版社, 2016: 110-117
- Fu J, Liu L Z, Dai S L. The anatomic observation on ray flowers of different color chrysanthemum varieties// Zhang Q X. *Advances in ornamental Horticulture of China*. Changsha: China Forestry Publishing House, 2016: 110-117
- [23] 王江民, 张建华, 义鸣放, 刘艳芳, 屈云慧, 薛建平, 殷长生, 赫京辉, 杨坤, 管俊娇, 王建军, 杨晓洪, 黄清梅, 张鹏, 张惠. GB/T 19557.19-2018 植物品种特异性、一致性和稳定性测试指南 菊花. 中国: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2018
- Wang J M, Zhang J H, Yi M F, Liu Y F, Qu Y H, Xue J P, Yin C S, Hao J H, Yang K, Guan J J, Wang J J, Yang X H, Huang Q M, Zhang P, Zhang H. GB/T 19557.19-2018 Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability *Chrysanthemum* × *morifolium* Ramat. (*Chrysanthemum* × *grandiflorum* Ramat.), *Chrysanthemum pacificum* Nakai (*Ajania pacifica* Bremer and Humphries) and hybrids between them. China: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2018
- [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] 王靖天, 张亚雯, 杜应雯, 任文龙, 李宏福, 孙文献, 葛超, 章元明. 数量性状主基因+多基因混合遗传分析 R 软件包 SEA v2.0. 作物学报, 2022, 48(6): 1416-1424
- Wang J T, Zhang Y W, Du Y W, Ren W L, Li H F, Sun W X, Ge C, Zhang Y M. SEA v2.0: An R software package for mixed major genes plus polygenes inheritance analysis of quantitative traits. *Acta Agronomica Sinica*. 2022, 48(6): 1416-1424
- [26] 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(4): 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(4): 147-153
- [27] 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(6): 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(6): 264-269
- [28] 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
- [29] 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*, 2005, 27(6): 948-952
- [30] 安天齐. 花色的生理生化. 北京: 中国林业出版社, 1989: 213-214
- An T Q. *Physiological biochemistry of flower color*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989: 213-214
- [31] 岳娟. 单子叶植物蓝色花花瓣表型观察与解剖结构研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- Yue J. Phenotype observation and anatomic structure research of petals from the monocotyledons blue flower. Yangling: Northwest A&F University, 2013
- [32] 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): uhac020

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	花径 (cm)	心花直径	舌状花数	舌状花轮	舌状花长	舌状花宽	管状花数	管状花轮	管状花长	管状花宽	最深齿裂
Combination	number	FD	(cm)	NRF	数	(mm)	(mm)	NDF	数	(mm)	(mm)	长 (mm)
			DFD		RRF	RFL	RFW		RDF	DFL	DFW	LLL
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
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
组合二	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

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

组合	模型	花径 (cm)	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	FD	(cm) DFD	NRF	(mm) RFL	(mm) RFW	NDF	(mm) DFL	(mm) DFW	(mm) LLL
组合一	0MG	208.436	-31.786	813.594	547.389	304.235	1050.815	298.720	-159.719	46.892
Comb one	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
	2MG-EAD	210.446	-29.788	815.592	549.399	306.236	1052.817	300.717	-157.722	48.890
组合二	0MG	316.160	77.797	948.257	733.046	320.810	1262.959	496.967	57.039	297.918
Comb two	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

combinations F₁ population

MG: 主基因模型; A、D、I 和 E : 加性、显性、上位性和相等效应; -: 表示空缺。

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

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 Trait	模型 Model	组合 Combination	均匀性检测统计量 U_1^2	均匀性检测统计量 U_2^2	均匀性检测统计量 U_3^2	斯米尔诺夫 (Smirnow) 检测 统计量 nW^2	柯尔莫哥洛夫 (Kolomogorov) 检 测统计量 D_n
花径 (cm)	0MG	组合 1	0.0001 (0.9942)	0.0066 (0.9353)	0.1244 (0.7244)	0.0219 (0.9948)	0.0395 (0.9951)
FD		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 (cm)	2MG-	组合 1	0.0634 (0.8012)	0.0259 (0.8720)	0.1093 (0.7409)	0.0611 (0.8098)	0.0631 (0.7691)
DFD	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)
NRF	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 (mm)	0MG	组合 1	0.0005 (0.9830)	0.0045 (0.9464)	0.1235 (0.7252)	0.0227 (0.9937)	0.0463 (0.9712)
RFL		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 (mm)	0MG	组合 1	0.0111 (0.9163)	0.0423 (0.8370)	0.1730 (0.6774)	0.0261 (0.9871)	0.0406 (0.9931)
RFW		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)
NDF		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 (mm)	2MG-	组合 1	0.0688 (0.7931)	0.6073 (0.4358)	4.4158 (0.0356) *	0.1659 (0.3455)	0.0751 (0.5585)
DFL	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 (mm)	2MG-	组合 1	0.0046 (0.9459)	0.0080 (0.9287)	0.3853 (0.5348)	0.0496 (0.8792)	0.0701 (0.6471)
DFW	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 (mm)	2MG-	组合 1	0.0141 (0.9055)	0.0090 (0.9246)	0.0066 (0.9353)	0.0355 (0.9549)	0.0528 (0.9159)
LLL	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 statistical 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 Combi-nati on	m	d_a	d_b	h_a	h_b	i	j_{ab}	j_{ba}	l	σ^2_{mg}	h^2_{mg} (%)
心花直径 (cm)	2MG-A	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
DFD	DI	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-A	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
NRF	DI	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 (mm)	2MG-A	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
DFL	DI	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 (mm)	2MG-A	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
DFW	DI	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 (mm)	2MG-A	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
LLL	DI	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 × 加性互作效应; j_{ab} : 第 1 对主基因间加性 × 第 2 对主基因显性互作效应; j_{ba} : 第 2 对主基因间加性 × 第 1 对主基因显性互作效应; l : 2 个主基因间显性 × 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 × additive interaction between two major genes; j_{ab} : Additive effect of the first major gene × dominant effect of the second major gene; j_{ba} : Additive effect of the second major gene × dominant effect of the first major gene; l : Dominant × dominant interaction between two major genes; σ^2_{mg} : Major-gene variance; h^2_{mg} : Major-gene heritability/%

