

王静茹, 张往祥, 狄昌毅, 等. 48 份观赏海棠种质不同叶位叶片色彩组分及分类研究 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (9): 1167-1175.
WANG J R, ZHANG W X, DI C Y, et al. Leaf Color and Pigments of 48 Ornamental Crabapple Germplasms Leaves [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (9): 1167-1175.

48 份观赏海棠种质不同叶位叶片色彩组分及分类研究

王静茹¹, 张往祥^{1,2*}, 狄昌毅¹, 陆晓吉¹

(1. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037; 2. 扬州小苹果园艺有限公司, 江苏 扬州 225200)

摘 要:【目的】探究 48 份观赏海棠种质不同叶位的叶片在观赏期内的色彩与色素组分变化规律, 对主要观赏叶位的叶片色彩参数进行分类研究, 建立观赏海棠叶色评价体系。【方法】以 48 份观赏海棠种质为试验材料, 使用色差仪和光谱仪对不同品种的上、中、下位叶进行色彩参数和色素含量的测定。【结果】(1) 基于 6 月份不同叶位色彩参数的亮度值 (L^*)、饱和度 (C^*)、色调角 (h°) 在 CIELCH 色空间中的分布以及不同叶位的叶色频率分布图分析, 所测观赏海棠品种的叶片位点随着叶位下降呈现逐渐集中趋势, 上位叶色彩表现最为丰富, 位点最为分散。(2) 色素相对含量的分析结果表明 48 份观赏海棠种质叶片中的花青素 (Anthocyanin)、类胡萝卜素 (Carotenoid) 相对含量位点随着叶位下降整体呈左移 (减小) 的趋势, 叶片中叶绿素 (Chlorophyll) 相对含量的位点随着叶位下降整体呈上移 (增大) 趋势。(3) 叶色聚类分析将 48 个观赏海棠种质划分为绿色类群 A (亮绿色系 A_1 、深绿色系 A_2)、棕色类群 B 和红色类群 C (红棕色系 C_1 、紫红色系 C_2) 3 大类群。【结论】 A_1 色系叶绿素相对含量高, 叶片色彩亮度高, 颜色饱满, 为优良的亮绿色观叶品种; B 类群各色彩参数与色素相对含量差异性显著, 类胡萝卜素相对含量显著高于其他类群, 可作为进行叶色改良的试验品种; C_1 色系花青素与叶绿素相对含量的比值高 ($\text{Anth}/\text{Chl}=1.22\pm0.24$), 色调角位于红色区域 ($h^\circ=29.74^\circ\pm4.74^\circ$), 红色特性显著, 是优良的红叶观赏品种。

关键词: 观赏海棠; 叶片色彩; 色素相对含量; 评价分析

中图分类号: S 685.99 文献标志码: A 文章编号: 1008-0384 (2022) 09-1167-09

Leaf Color and Pigments of 48 Ornamental Crabapple Germplasms Leaves

WANG Jingru¹, ZHANG Wangxiang^{1,2*}, DI Changyi¹, LU Xiaoji¹

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2. Yangzhou Crabapple Horticulture Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225200, China)

Abstract: 【Objective】Variations in color and pigments on leaves of ornamental crabapple germplasms in season were used to classify the plants for establishing an evaluation system for landscaping. 【Method】Luminosity L^* , saturation C^* , and hue angle h° as well as pigments in the upper, middle, and lower parts of the leaf of 48 ornamental crabapple germplasms were measured using a colorimeter and a spectrometer. 【Results】① The color measurements on all crabapple varieties in June distributed in the CIELCH space more concentrated in the upper part and gradually lessened toward the lower part of a leaf. The color was richer and the loci more scattered in the upper part as well. ② The relative contents of anthocyanin and carotenoid decreased, but that of chlorophyll increased, from the upper to the lower leaf. ③ The germplasms clustered by leaf color were classified into the green Group A that included bright green A_1 and dark green A_2 , the brown Group B, and the red Group C that included reddish brown C_1 and reddish purple C_2 . 【Conclusion】Of all crabapple groups, Group A_1 had a high relative chlorophyll content displaying bright green foliage; Group B had significantly varied color measurements and a significantly higher carotenoids content than the other groups making it suitable for breeding programs; and Group C_1 had a high anthocyanin to chlorophyll ratio of (1.22 ± 0.24) and an h° of (29.74 ± 4.74) $^\circ$ rendering it the choice of a showy red-leaf crabapple variety.

Key words: Ornamental crabapple; leaf color; relative pigment content; evaluation and analysis

收稿日期: 2022-06-01 初稿; 2022-06-24 修改稿
作者简介: 王静茹 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 观赏植物应用 (E-mail: 1453160171@qq.com)
* 通信作者: 张往祥 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 观赏植物应用 (E-mail: malus2011@163.com)
基金项目: 江苏省科技计划重点项目 (BE2019389)

0 引言

【研究意义】海棠 (*Malus* spp.) 是蔷薇科 (Rosaceae) 苹果属 (*Malus* Mill.) 中果实直径较小 (≤ 5 cm) 的落叶乔木或小乔木, 我国海棠品种资源丰富, 是世界海棠资源分布中心, 距今约有 2 000 年栽培历史^[1-3]。海棠在中国传统园林中应用历史悠久, 随着育种和栽培技术的提高, 目前已经培育出许多具有优良性状的新品种^[4-5]。在园林景观中, 将具有观叶、观花、观果等多种观赏价值的称为观赏海棠^[6]。观赏海棠在我国栽培范围广泛, 观赏期长, 适应性强, 属于维护成本较低的优质绿化树种。近年来, 随着保护生态环境意识的增强以及园林景观市场需求量的增大, 对木本彩叶植物栽培育种的研究逐渐得到重视。【前人研究进展】目前多采用国内外引种、变异选种、杂交育种等育种途径来获得彩叶植物新品种, 对彩叶植物呈色机理的研究以及抗寒性彩叶植物的改良也逐渐成为主流^[7-10]。观赏海棠作为重要的园林造景植物, 目前研究主要集中于对花色特征与动态变化^[11-13]以及果香、果色时序变化等^[14-16]。【本研究切入点】而关于不同叶位叶片色彩与色素组成的分类研究较少。【拟解决的关键问题】以 48 份观赏海棠种质为试验材料, 采用色差仪和光谱仪对不同品种的上、中、下位叶进行色彩参数和色素含量的测定, 对该群体的观赏海棠种质进行数字化叶色评价分析体系的建立, 为筛选优良观赏海棠种质以及观赏植物叶色品质的改良提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

江苏省扬州市 ($32^{\circ}42'N$, $119^{\circ}55'E$), 属亚热带季风气候, 年降水量达 1000 mm, 年平均气温 $14.9^{\circ}C$, 最冷月平均气温在 $0^{\circ}C$ 以上, 全年无霜期较长。48 份观赏海棠种质主要来源于扬州市海棠国家林木种质资源库选育的新品种 (序号 1~41) 和扬州小苹果园艺有限公司 (序号 42~48), 为实生苗优株的嫁接子代, 生长健壮, 养护管理条件一致, 可用于叶色测定, 具体种质名称见表 1。

1.2 试验方法

于 2021 年 6 月上旬天气晴朗的上午 7:00~8:00 进行叶片采集。由于叶片成熟时颜色和大小已趋于稳定, 为使采样更具有客观性且兼顾叶片色彩梯度变化, 供试种质的植株皆选择具有代表性、长势相

同、性状稳定且无明显病虫害的健康植株, 供试叶片皆选自苗木向阳处同一方位的健康叶片, 分别按照上、中、下 3 个叶位进行叶片的采集, 其中位于苗干下部、叶片较大的成熟叶为下位叶, 位于苗干中部且面积约为成熟叶 1/2 的叶片为中位叶, 苗干新梢完全展开且面积约为成熟叶 1/3 以下的为上位叶^[17-18]。每个叶位各采集 5 枚健康叶片, 采摘后置于便携式冷藏箱带回室内, 并在 6 h 内完成测量。

1.3 试验测定

1.3.1 色彩测定 叶片色彩参数测定采用 X-Rite CI64 型色差仪 (爱色丽 CI64, 美国) 进行测定, 色差仪参数设置如下: D65 光源, 色斑测量直径 8 mm, 观测角度 10° 。测量点为每个叶片上表皮对称的 6 个点, 避开主叶脉, 每个叶位重复 30 次。叶片色彩参数亮度值 (L^*)、饱和度 (C^*)、色调角 (h°) 均由色差仪测量后直接获得。

1.3.2 色素含量测定 叶片色素相对含量测定采用 Unispec-SC 光谱分析仪 (PP System, 美国) 分别对 48 份观赏海棠品种上、中、下位叶中花青素 (Anth)、类胡萝卜素 (Car) 和叶绿素 (Chl) 的反射光谱指标进行测定, 每个叶片测量 6 个点, 避开主叶脉, 每个叶位重复次数为 30 次。

各色素相对含量计算公式如下: 花青素 (Anth) = $R_{800} (1/R_{550} - 1/R_{700})$; 类胡萝卜素 (Car) = $R_{800} (1/R_{520} - 1/R_{700})$; 叶绿素 (Chl) = $(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$ ^[19-22]。

1.4 数据处理

3D 散点图和折线图使用 Origin 2021 软件进行绘制, 叶色聚类分析图和参数相关性统计使用 SPSS 26.0 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 观赏海棠不同叶位叶色变化规律

48 份海棠种质的 3 个叶位叶色位点多集中于中亮度值区域, 在 CIELCH 色空间中呈现由两端向中间集中的趋势 (图 1)。其中低亮度值的品种权重 (当 $L^* < 31$ 时, 上、中和下位叶分别为 16.67%、25.00% 和 39.58%) 呈现逐渐递增趋势, 中亮度值的品种权重 (当 $31 \leq L^* < 40$ 时, 上、中和下位叶分别为 58.33%、68.75% 和 58.32%) 呈现先增后减的趋势, 而高亮度值 (当 $40 \leq L^* < 50$ 时, 上、中和下位叶分别为 25.00%、6.25% 和 2.08%) 的品种权重呈现减小趋势 (图 2)。

观赏海棠品种群的 3 个叶位叶色多集中于低色彩饱和度区域, 在 CIELCH 色空间中呈左移趋势

表 1 48 份观赏海棠种质种质信息
Table 1 Information on 48 sampled ornamental crabapple germplasms

序号 Code	种质名称 Cultivars	品种审定号 Variety validation number	序号 Code	种质名称 Cultivars	品种审定号 Variety validation number
1	琉璃盏 <i>M. Liu Lizhan</i>	20190169	25	白云 <i>M. Bai Yun</i>	20210210
2	红与黑 <i>M. Hong Yuhei</i>	20190170	26	橙之梦 <i>M. Cheng Zhimeng</i>	20190076
3	云卷云舒 <i>M. Yunjuan Yunshu</i>	20190361	27	茶花女 <i>M. Cha Huanv</i>	20210208
4	影红秀 <i>M. Ying Hongxiu</i>	20190171	28	二乔 <i>M. Er Qiao</i>	20210207
5	忆红莲 <i>M. Yi Honglian</i>	20190364	29	红晨 <i>M. Hong Chen</i>	20210206
6	疏红妆 <i>M. Shu Hongzhuang</i>	20190172	30	红粉佳人 <i>M. Hongfen Jiaren</i>	20210205
7	棱镜 <i>M. Leng Jing</i>	20190168	31	红色经典 <i>M. Hongse Jingdian</i>	20210204
8	白羽扇 <i>M. Bai Yushan</i>	20190173	32	红云 <i>M. Hong Yun</i>	20210203
9	涟漪 <i>M. Lian Yi</i>	20190167	33	浪花 <i>M. Lang Hua</i>	20210202
10	卷珠帘 <i>M. Juan Zhulian</i>	20190363	34	飘 <i>M. Piao</i>	20210209
11	依人 <i>M. Yi Ren</i>	20190365	35	水袖 <i>M. Shui Xiu</i>	20210201
12	洛可可女士 <i>M. Luokeke Nvshi</i>	20190080	36	西子姑娘 <i>M. Xizi Guniang</i>	20210200
13	胭脂雨 <i>M. Yan Zhiyu</i>	20180299	37	夏荷 <i>M. Xia He</i>	20210199
14	羊脂玉 <i>M. Yang Zhiyu</i>	20190078	38	紫嫣 <i>M. Zi Yan</i>	20210198
15	紫蝶儿 <i>M. Zi Dieer</i>	20190081	39	红颜 <i>M. Hong Yan</i>	20210411
16	红色依恋 <i>M. Hongse Yilian</i>	20180296	40	金秋 <i>M. Jin Qiu</i>	20210414
17	云想容 <i>M. Yun Xiangrong</i>	20190079	41	春花秋月 <i>M. Chunhua Qiuyue</i>	20210410
18	粉芭蕾 <i>M. Fen Balei</i>	20170082	42	满堂红 <i>M. Man Tanghong</i>	20170094
19	画轴 <i>M. Hua Zhou</i>	20180298	43	香荷 <i>M. Xiang He</i>	20170096
20	烟雨江南 <i>M. Yanyu Jiangnan</i>	20190366	44	香云 <i>M. Xiang Yun</i>	20160062
21	晚宴 <i>M. Wan Yan</i>	20180297	45	昌红 <i>M. Chang Hong</i>	20160061
22	粉红霓裳 <i>M. Fenhong Nichang</i>	20190077	46	昌辉 <i>M. Chang Hui</i>	20160058
23	红珊瑚 <i>M. Hong Shanhu</i>	20190367	47	丽辉 <i>M. Li Hui</i>	20160060
24	千层金 <i>M. Qian Cengjin</i>	20190362	48	蕊沁 <i>M. Rui Qin</i>	20160059

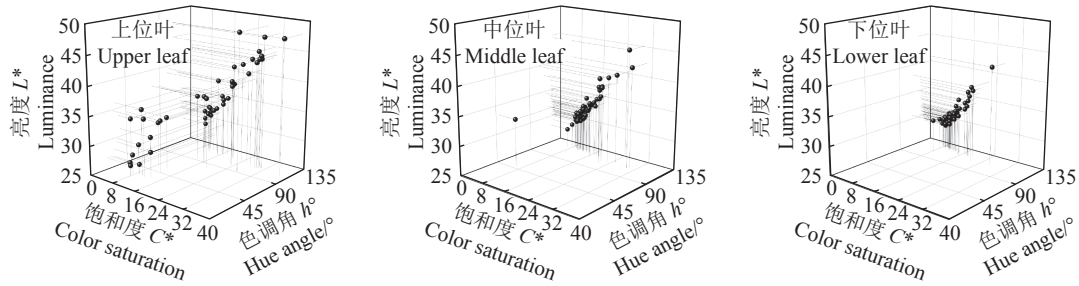


图 1 观赏海棠种质不同叶位叶片 CIELCH 色空间变化

Fig. 1 Color measurements on upper to lower leaf portions of ornamental crabapple germplasms as distributed in CIELCH space

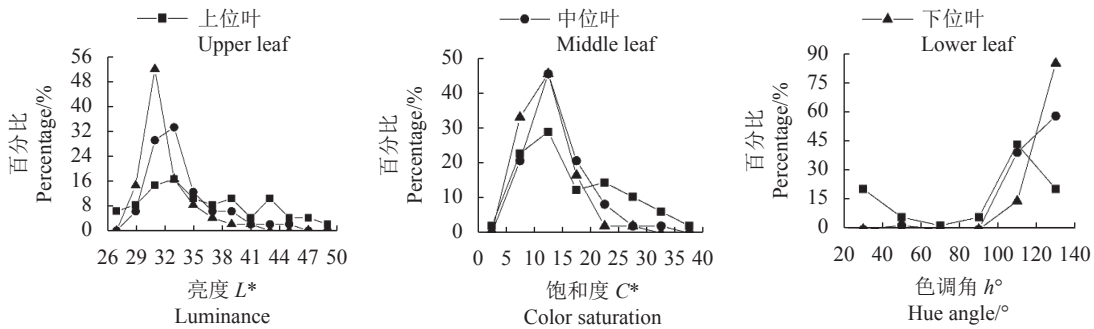


图 2 观赏海棠种质不同叶位叶色参数频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of leaf color measurements on upper to lower leaf of ornamental crabapple germplasms

(图 1)。其中低色彩饱和度的品种权重(当 $C^* < 15$ 时, 上、中和下位叶分别为 54.17%、66.66%、79.17%)呈递增趋势, 中色彩饱和度品种权重(当 $15 \leq C^* < 25$ 时, 上、中和下位叶分别为 25.00%、29.17%和 18.75%)呈先增后减趋势, 而高色彩饱和度品种权重(当 $C^* \geq 25$ 时, 上、中、下位叶分别为 20.83%、4.17%、2.08%)呈减小趋势(图 2)。

观赏海棠品种群的上位叶多集中于中色调角区域, 中、下位叶位点多集中于高色调角区域, 3 个叶位在 CIELCH 色空间中表现为向绿色区域集中的趋势(图 1)。其中低色调角品种权重(当 $h^\circ < 100^\circ$ 时, 上、中、下位叶分别为 35.42%、2.08%、0.00%)逐渐递减趋势, 中色调角品种权重(当 $100^\circ \leq h^\circ < 120^\circ$ 时, 上、中、下位叶分别为 41.66%、39.58%、16.67%)呈逐渐递减趋势, 高色调角品种权重(当 $h^\circ \geq 120^\circ$ 区间, 上、中、下位叶分别为 22.92%、58.34%、83.33%)呈递增趋势(图 2)。

综上表明, 48 份观赏海棠种质的叶片色彩呈整体性变化, 上位叶 L^* 、 C^* 、 h° 参数位点在 CIELCH 色空间中最为分散, 即幼嫩时期的上位叶色彩表现最为丰富, 最具园林观赏价值, 而中位叶、下位叶的 L^* 、 C^* 值逐渐下降, h° 值呈增大趋势, 即叶片颜色随着叶位降低逐渐转化为深绿状态。

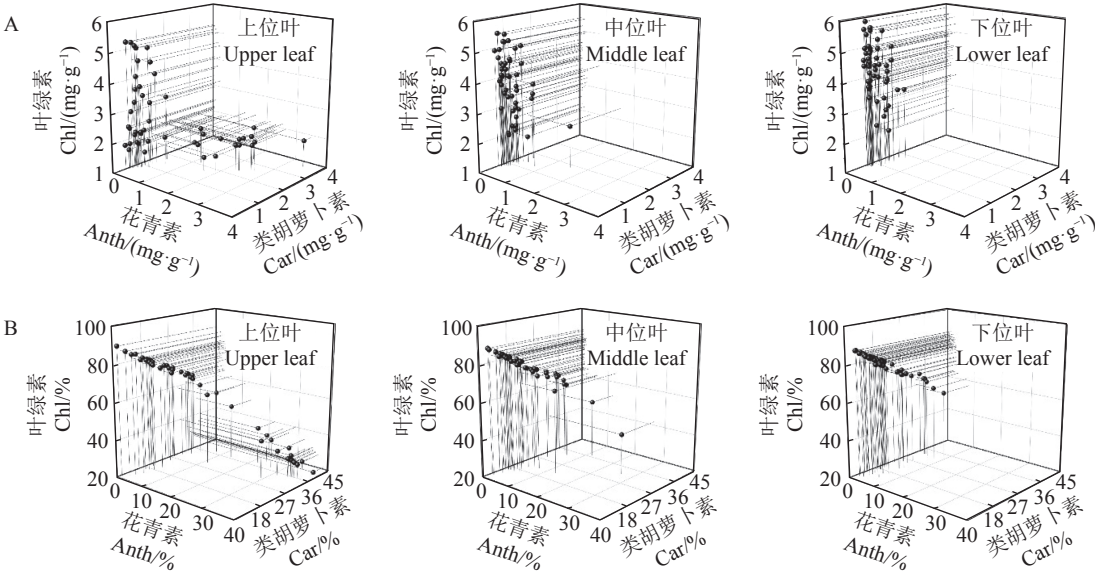
2.2 观赏海棠不同叶位叶片色素相对含量的空间变化分布格局

48 份观赏海棠种质叶片中的花青素 (Anth)、类胡萝卜素 (Car) 相对含量位点随着叶位下降整体均呈左移 (减小) 趋势 (Anth: 上位叶 $0.01 \sim 3.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 中位叶 $0 \sim 1.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 下位叶 $0.01 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; Car: 上位叶 $0.43 \sim 3.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 中位叶 $0.66 \sim 1.84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 下位叶 $0.73 \sim 1.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) (图 3-A)。Anth 和 Car 的权重随着叶位下降整体呈逐渐递减趋势 (Anth: 上位叶 0.47%~38.32%, 中位叶 0.10%~26.32%, 下位叶 0.31%~7.98%; Car: 上位叶 10.18%~43.27%, 中位叶 11.68%~36.92%, 下位叶 11.47%~35.04%) (图 3-B)。

观赏海棠种质叶片的叶绿素 (Chl) 相对含量位点随着叶位下降整体呈现上移 (增大) 趋势。其中上位叶叶绿素相对含量 $1.47 \sim 5.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 权重占比 21.13%~89.35%; 中位叶叶绿素相对含量 $1.92 \sim 5.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 权重占比 41.88%~87.76%; 下位叶叶绿素相对含量 $2.22 \sim 5.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 权重占比 56.98%~87.29% (图 3-A、B)。

2.3 观赏海棠种质色彩与色素参数统计与聚类分析

基于上位叶为观赏海棠的主要观赏叶位, 对上位叶色彩参数 (L^* 、 C^* 、 h°) 进行聚类分析(图 4),



A 为观赏海棠种质不同叶位色素相对含量的空间分布，B 为观赏海棠种质不同叶位色素权重占比的空间分布。
A shows the spatial distribution of relative pigment content in different leaf positions of ornamental crabapple germplasms, and B shows the spatial distribution of pigment weight ratio in different leaf positions of ornamental crabapple germplasms.

图 3 观赏海棠种质不同叶位色素相对含量与权重的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of relative content and weight of pigments in upper to lower leaf of ornamental crabapple germplasms

将 48 份观赏海棠种质划分为绿色系（A）、棕色系（B）和红色系（C）3 大色系类群，其中，将绿色系又分为亮绿色 A₁、深绿色 A₂ 等 2 个子色系，红色系又分为红棕色 C₁ 和紫红色 C₂ 等 2 个子色系。基于上位叶色彩参数的聚类分析结果对各类群色彩与色素参数进行统计分析，结果见表 2。

A 类群共 32 个种质，亮度值 L^* 分布在 29.54~48.29，饱和度 C^* 分布在 7.89~37.79，色调角 h° 分布在 92.20°~125.94°，花青素与叶绿素相对含量之比属于较低水平 ($\text{Anth}/\text{Chl}=0.05\pm0.06$)，叶绿素相对含量在 3 种类群中最高，从而主导叶片颜色呈绿色。其中，A₁ 亮绿色系的亮度和饱和度在所有色系类群中处于最高水平 ($L^*=42.58\pm3.29$, $C^*=26.09\pm5.42$)，色调角位于绿色区域 ($h^\circ=109.72^\circ\pm6.47^\circ$)，包含棱镜、白羽扇、卷珠帘、胭脂雨、紫蝶儿、橙之梦、云想容、茶花女等 17 个品种。A₂ 深绿色系的亮度和饱和度均低于 A₁ 类群 ($L^*=32.58\pm1.74$, $C^*=11.94\pm2.96$)，饱和度在所有色系类群中处于最高水平 ($h^\circ=121.47^\circ\pm2.42^\circ$)，在 3 种色素相对含量中，叶绿素相对含量最高，叶片绿色特征更显著， Anth/Chl 的值较 A₁ 类群低 ($\text{Anth}/\text{Chl}=0.04\pm0.03$)，包含涟漪、羊脂玉、粉芭蕾、影红秀、红珊瑚、白云等 15 个品种。

B 类群共 3 个种质，亮度、饱和度和色调角较 C 类群高 ($L^*=36.78\pm0.44$, $C^*=16.63\pm3.25$, $h^\circ=86.27^\circ\pm7.18^\circ$)， Anth/Chl 的值在所有类群中属于中等水平 ($\text{Anth}/\text{Chl}=0.65\pm0.10$)，花青素相对含量高于 A

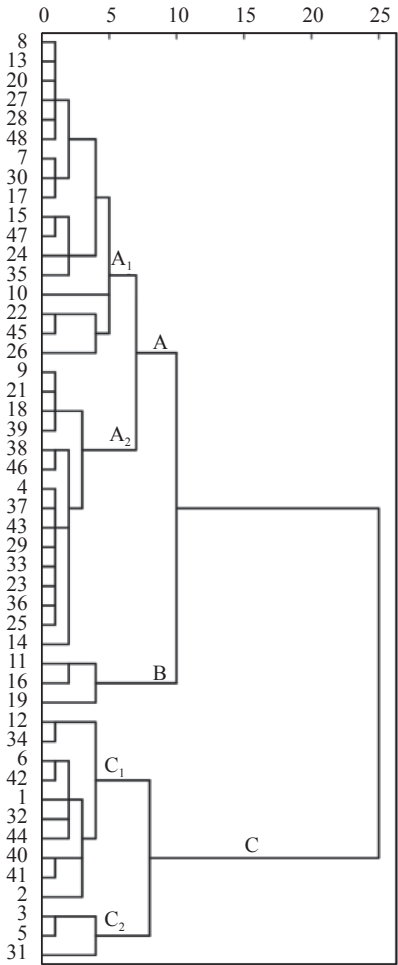


图 4 观赏海棠上位叶叶色聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis on germplasms based on color of upper portion of an ornamental crabapple leaf

表 2 各类群色彩与色素参数统计
Table 2 Statistics on color measurements and pigment contents of each taxon

色系分类 Color category	种质数量 Quantity	色彩参数 Color parameters			色素含量 Pigment parameters			
		<i>L</i> *	<i>C</i> *	<i>h</i> [°]	花青素Anth/%	类胡萝卜素Car/%	叶绿素Chl/%	花青素/叶绿素Anth/Chl
A 绿色系 Green	32	37.89±5.71 ab	19.46±8.40 ab	115.23±7.73 ab	0.03±0.03 c	0.24±0.08 cd	0.73±0.09 a	0.04±0.06 c
A ₁ 亮绿色系 Bright green	17	42.58±3.29 a	26.09±5.42 a	109.72±6.47 b	0.03±0.04 c	0.28±0.07 bc	0.68±0.09 a	0.06±0.07 c
A ₂ 深绿色系 Dark green	15	32.58±1.74 bc	11.94±2.96 bc	121.47±2.42 a	0.03±0.02 c	0.19±0.06 d	0.78±0.07 a	0.04±0.03 c
B 棕色系 Brown	3	36.78±0.44 b	16.63±3.25 bc	86.27±7.18 c	0.24±0.02 b	0.38±0.00 a	0.38±0.02 b	0.65±0.10 b
C 红色系 Red	13	31.13±3.27 c	9.51±2.32 c	35.18±11.41 e	0.34±0.03 a	0.37±0.04 ab	0.29±0.05 b	1.19±0.26 a
C ₁ 红棕色系 Reddish brown	10	30.44±3.43 c	9.14±2.32 c	29.74±4.74 e	0.35±0.03 a	0.37±0.03 ab	0.29±0.03 b	1.22±0.24 a
C ₂ 紫红色系 Red purple	3	33.44±0.80 bc	10.77±2.20 c	53.28±6.42 d	0.32±0.03 a	0.37±0.06 ab	0.31±0.08 b	1.09±0.34 a

数值表示为平均值±标准差；同列数据后无相同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。
Data are presented as mean±standard deviation; data with different lowercase letters on same column indicate significant difference (*P*<0.05).

类群所有品种，类胡萝卜素相对含量在所有类群中处于最高水平，色调角接近于黄色区域，包含依人、红色依恋、画轴 3 个品种。

C 类群共 13 个种质，亮度值 *L** 分布在 26.76~36.12，饱和度 *C** 分布在 4.83~12.75，色调角 *h*[°] 分布在 20.56°~57.68°，花青素相对含量最高，Anth/Chl 的值较 A、B 类群高（Anth/Chl=1.19±0.26），使得该类群叶片颜色呈红色。C₁ 红棕色系，色彩参数值在所有类群中最低（*L**=30.44±3.43，*C**=9.14±2.32，*h*[°]=29.74°±4.74°），Anth/Chl 的值在所有类群中最高（Anth/Chl=1.22±0.24），红色属性最明显，包含洛可可女士、琉璃盏、香云、红与黑、疏红妆等 10 个品种。C₂ 紫红色系，亮度和饱和度较 A、B 类群低（*L**=33.44±0.80，*C**=10.77±2.20），色调角较 C₁ 类群高（*h*[°]=53.28°±6.42°），包含云卷云舒、忆红莲、红色经典 3 个品种。

3 讨论与结论

3.1 观赏植物叶色变化机制

植物色彩搭配是园林造景中的重要内容，同时也带给人们最直接的视觉和心理感受，它直接影响着造园呈现效果的好坏。随着木本彩叶植物市场需求量的增大，探究观赏植物叶色变化机制，挖掘和培育出具有更多优良性状的彩叶观赏植物已经成为

当下林木育种的重要工作内容。叶片颜色呈现不同主要是内在遗传和外部环境共同作用的结果，是叶片中多种色素作用下产生的综合效应，叶片中的主要色素相对含量的占比以及对光线的吸收程度导致了叶片呈色的不同^[23]。在吴飞洋等^[24]的研究中发现，乌桕在中度水分胁迫下叶片中叶绿素降解量和花色素苷合成量最多，叶片颜色更加鲜艳，红色效果更显著。低温环境可以促进紫叶李、鸡爪槭等彩叶植物体内 pH 值的变化和叶片中花青素等色素组分的合成，从而影响叶片的显色效果^[25-26]。

目前多采用 RHSCC 比色卡对植物新品种的花、叶等器官的颜色性状进行色彩描述，相比于目测法虽然更加标准化，但当样本数量比较大时，还是避免不了外部环境对比色卡造成的损伤以及视觉疲劳带来的人为误差，精确度会有所降低^[27]。沈星诚等^[28]研究发现，相比于使用 RHSCC 比色卡，采用色差计结合 CIELCH 色空间分布图对日本红枫的不同生长发育时期的叶色进行定量描述的方法，拟合度更高，更能够区分相近颜色属性的品种，可以更直观地看到叶片在不同生长时期的色彩变化。本研究通过测量 48 份观赏海棠 3 个叶位的色彩与色数参数绘制了 CIELCH 色空间分布图以及不同叶位的叶色频率分布图，发现在 6 月份观赏海棠上位叶的色彩表现最为丰富，花青素相对含量最高，这与前文上位叶色彩参数 *L**、*C**、*h*[°] 位点在 CIELCH 色空间中

为分散的结果一致。随着叶位下降, 叶片成熟度增加, 花青素相对含量降低, 叶绿素相对含量增大, 色彩参数位点呈逐渐集中的趋势, 其中, L^* 、 C^* 的值逐渐下降, h° 值呈增大趋势。因此, 叶片颜色随着叶位降低逐渐转化为深绿状态, 这与龚洪泳等^[29]的研究结果一致。

3.2 观赏海棠叶片色彩评价与改良途径

观赏海棠叶片色彩的变化受多种因素的影响, 赵圃圃等^[30]研究发现, 观赏海棠上位叶在7~9月份的叶色位点呈逐渐集中趋势, 影响叶片呈色的主要色素占比随着月份增长呈现不同的变化。观赏海棠品种群在4月幼叶时期品种间差异较大, 5~6月幼叶逐渐成熟, 色彩趋于稳定阶段, 而同一品种叶位不同, 叶片色彩也存在一定差异, 因此本研究是在叶片观赏期较好的6月上旬对观赏海棠叶片的3个叶位色彩与色素相对含量进行研究, 从而获得观赏海棠叶片色彩与色素参数变化的时空分布规律, 得到48份观赏海棠种质在6月份的最佳观赏叶位以及色彩表达效果与色素相对含量的关系。基于上位叶观赏价值最高的结果, 对上位叶色彩与色素参数进行参数统计与聚类分析后发现, 绿色系中 A_1 子色系的叶绿素相对含量高, 色调角位于绿色区域($h^\circ=109.72^\circ\pm 6.47^\circ$), 奠定了该色系的绿色基调, 且相比于其他类群又具有高亮度值、高饱和度的特点, 是绿色类群中绿色属性表达较好的亮绿色观叶品种。B类群各色彩参数与色素相对含量差异性显著, 类胡萝卜素相对含量显著高于其他类群, 因此色调角接近于黄色区域($h^\circ=86.27^\circ\pm 7.18^\circ$), 可作为观赏海棠中进行叶色改良的试验品种。C类群中 C_1 子色系的色调角位于红色区域($h^\circ=29.74^\circ\pm 4.74^\circ$), 叶绿素相对含量最低, 花青素与叶绿素相对含量之比为所有类群中最高的水平($\text{Anth}/\text{Chl}=1.22\pm 0.24$), 红色特征显著, 是48个观赏海棠种质中的优质红叶观赏品种。研究表明, 48份观赏海棠上位叶的 L^* 处于 $26.76\sim 48.29$, C^* 处于 $4.83\sim 37.79$, h° 处于 $20.56^\circ\sim 125.94^\circ$ 。江皓等^[31]通过对观赏海棠不同叶位的叶片色彩参数范围的研究发现色彩参数 L^* 为 $30.69\sim 72.14$, C^* 为 $9.10\sim 41.50$, h° 为 $67.60^\circ\sim 123.51^\circ$, 研究结果存在一定差异。因此, 在今后对观赏海棠叶片色彩的研究中, 应综合考虑多方面因素对叶片色彩变化的影响, 尽可能扩大样本的比例, 综合考虑种间差异以及叶片色彩与温度、光照、物候期和叶位采集标准的关系进行采样, 以期获取更加充足的观赏海棠叶片色彩与色素参数数据库, 得到更为精准的观赏海棠不同叶位叶色评价体系, 为丰富种质资源的

多样性以及观赏海棠新品种的选育工作提供更多参考依据。

目前通过低温诱导、调节土壤酸碱度、改变光照条件、杂交育种、诱变育种、分子修饰等手段以改变3种色素含量和比例, 是观赏植物叶色改良的重要途径^[32]。韩文学等^[33]研究发现, 观赏海棠叶片色彩参数中代表红绿属性的色相值 a^* 与花青素相对含量呈正相关, 代表黄蓝属性的色相值 b^* 与类胡萝卜素相对含量呈正相关。因此可以通过改变观赏海棠生长的环境因子、调节植物体内的主要色素含量从而达到对叶片色彩的调节效果。本研究基于48个观赏海棠品种的色彩参数和色素占比, 对该群体上位叶进行量化分析得到3个色系类群和5个子色系类群, 对该群体的观赏海棠进行叶色评价分析, 为观赏海棠选育提供初步参考依据, 但由于未对整个叶片发育期的多个叶位进行全面观测, 观赏海棠最佳观赏时期不同叶位色素变化差异, 以及呈色与植物体内遗传物质的相关性, 有待今后从色素代谢、环境因素等进一步研究其显色机制。

参考文献:

- [1] 钱关泽, 汤庚国. 苹果属植物分类学研究进展 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29 (3): 94-98.
QIAN G Z, TANG G G. A review on the plant taxonomic study on the genus *Malus* miller [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2005, 29 (3): 94-98. (in Chinese)
- [2] 郑杨, 曲晓玲, 郭翎, 等. 观赏海棠资源谱系分析及育种研究进展 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39 (1): 152-160.
ZHENG Y, QU X L, GUO L, et al. Advances on ornamental crabapple resources [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2008, 39 (1): 152-160. (in Chinese)
- [3] 穆茜, 张丹丹, 李千惠, 等. 5个海棠品种果实品质分析及评价 [J]. 南方农业学报, 2018, 49 (5): 971-978.
MU Q, ZHANG D D, LI Q H, et al. Evaluation of fruit quality of five crabapple (*Malus* spp.) cultivars [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49 (5): 971-978. (in Chinese)
- [4] 胡丁猛, 许景伟, 王立辉, 等. ‘蕊沁’等7个海棠新品种 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45 (4): 238-242.
HU D M, XU J W, WANG L H, et al. Seven new crabapple cultivars such as ‘Rui qin’ [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 45 (4): 238-242. (in Chinese)
- [5] 沙广利, 马荣群, 黄粤, 等. 观赏海棠新品种‘白富美’的选育 [J]. 中国果树, 2021 (8): 75, 109.
SHA G L, MA R Q, HUANG Y, et al. Breeding of a new ornamental crabapple cultivar ‘Baifumei’ [J]. *China Fruits*, 2021 (8): 75, 109. (in Chinese)
- [6] 唐孝祥, 傅俊杰. 海棠造景的审美文化探析 [J]. 中国城市林业, 2019, 17 (3): 91-95.

- TANG X X, FU J J. Analysis of the aesthetic culture of crabapple landscape [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2019, 17 (3): 91–95. (in Chinese)
- [7] 何梅, 王华, 胡玉安, 等. 彩叶树种研究与开发利用现状 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40 (6): 1134–1144.
- HE M, WANG H, HU Y A, et al. Research status, development and utilization of color-leaf trees [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, 40 (6): 1134–1144. (in Chinese)
- [8] 商彩丽, 刘青, 王明晓, 等. 植物叶色变异的分子机理研究进展 [J]. 山东农业科学, 2021, 53 (7): 127–134.
- SHANG C L, LIU Q, WANG M X, et al. Research progress on molecular mechanisms of leaf color variation in plants [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53 (7): 127–134. (in Chinese)
- [9] 曾明颖. 木本彩叶植物的分类及育种途径和技术研究进展 [J]. 分子植物育种, 2021, 19 (19): 6495–6502.
- ZENG M Y. Research progress on classification and breeding ways and techniques of woody color-leaved plants [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19 (19): 6495–6502. (in Chinese)
- [10] 潘晶晶, 董胜君. 金叶复叶槭叶色时序性变化研究 [J]. 经济林研究, 2021, 39 (3): 215–226.
- PAN J J, DONG S J. The time-order change of leaf color of *Acer negundo* ‘Aurea’ [J]. *Non-Wood Forest Research*, 2021, 39 (3): 215–226. (in Chinese)
- [11] 张往祥, 江志华, 袁靓, 等. 观赏海棠花色时序动态分布格局研究 [J]. 园艺学报, 2013, 40 (3): 505–514.
- ZHANG W X, JIANG Z H, QIU J, et al. Studies on sequence dynamic distribution pattern of flower color parameters of ornamental crabapple [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40 (3): 505–514. (in Chinese)
- [12] 浦静, 张晶, 赵聪, 等. ‘紫王子’海棠半同胞家系花色特征分析及选优 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43 (1): 18–24.
- PU J, ZHANG J, ZHAO C, et al. Analysis and evaluation on flower color characteristics of the *Malus* ‘Purple Prince’ half-sib progenies [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43 (1): 18–24. (in Chinese)
- [13] 张全全, 张龙, 李丽娟, 等. 观赏海棠自由授粉子代花色特征及选优 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (8): 56–59, 77.
- ZHANG Q Q, ZHANG L, LI L J, et al. Selection of color characteristics of free pollinated progeny of ornamental crabapple [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49 (8): 56–59, 77. (in Chinese)
- [14] 张丹丹, 李千惠, 范俊俊, 等. 观赏海棠果实香气电子鼻检测 [J]. 北方园艺, 2018 (19): 88–93.
- ZHANG D D, LI Q H, FAN J J, et al. Crabapple fruit aroma by electronic nose [J]. *Northern Horticulture*, 2018 (19): 88–93. (in Chinese)
- [15] 张丹丹, 范俊俊, 王欢, 等. 不同观赏海棠种质果色动态变化规律研究 [J]. 经济林研究, 2017, 35 (3): 161–167.
- ZHANG D D, FAN J J, WANG H, et al. Study on dynamic changes of peel color in different cultivars of ornamental crabapple [J]. *Nonwood Forest Research*, 2017, 35 (3): 161–167. (in Chinese)
- [16] 梅志轩, 王改萍. 不同授粉方式对观赏海棠座果率及果实品质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (8): 60–63.
- MEI Z X, WANG G P. Effects of different pollination methods on fruit setting rate and fruit quality of ornamental crabapple [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49 (8): 60–63. (in Chinese)
- [17] 姜文龙, 范俊俊, 张丹丹, 等. 观赏海棠不同叶位色彩特征及特异种质挖掘 [J]. 园艺学报, 2017, 44 (6): 1135–1144.
- JIANG W L, FAN J J, ZHANG D D, et al. Research on the characteristics of different leaf positions of crabapple's leaf color and elite germplasm excavation [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44 (6): 1135–1144. (in Chinese)
- [18] 姜文龙, 李千惠, 周婷, 等. 观赏海棠不同叶位色素组分动态研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39 (4): 99–106.
- JIANG W L, LI Q H, ZHOU T, et al. Study on dynamic accumulation of pigment components at different leaf positions in ornamental crabapple [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39 (4): 99–106. (in Chinese)
- [19] WANG L S, SHIRAISHI A, HASHIMOTO F, et al. Analysis of petal anthocyanins to investigate flower coloration of Zhongyuan (Chinese) and daikon island (Japanese) tree peony cultivars [J]. *Journal of Plant Research*, 2001, 114 (1): 33–43.
- [20] WHITE S A, SCOGGINS H L. Fertilizer concentration affects growth response and leaf color of *Tradescantia virginiana* L [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28 (10): 1767–1783.
- [21] MERZLYAK M N, SOLOVCHENKO A E, GITELSON A A. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 27 (2): 197–211.
- [22] GOULD K S, MARKHAM K R, SMITH R H, et al. Functional role of anthocyanins in the leaves of *Quintinia serrata* A. Cunn [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51 (347): 1107–1115.
- [23] 陈延惠, 李跃霞, 郭晓丽, 等. 园艺植物叶色变化机制研究进展 [J]. 河南农业科学, 2011, 40 (12): 30–34.
- CHEN Y H, LI Y X, GUO X L, et al. Research progress of mechanism on leaf color transformation of horticultural plants [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40 (12): 30–34. (in Chinese)
- [24] 吴飞洋, 柳新红, 王成龙, 等. 土壤水分对乌柏秋叶生理指标及观赏效果的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49 (5): 19–23, 44.
- WU F Y, LIU X H, WANG C L, et al. Effects of soil water content on physiological indexes and ornamental effects of *Triadica sebifera* leaves in autumn [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49 (5): 19–23, 44. (in Chinese)
- [25] 吕福梅. 四种李属彩叶树木叶片色素及光合特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- LYU F M. Study on the characteristics of anthocyanin and photosynthesis in the leaves of four species leaf-colored plants of *prunus*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [26] 蔡雁雁, 李厚华, 李玲, 等. 鸡爪槭叶片色素组成及叶色变化 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43 (7): 63–67.

- CAI X Y, LI H H, LI L, et al. Pigment composition and leaf color change in *Acer palmatum* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43 (7) : 63–67. (in Chinese)
- [27] 李明媛, 刘月, 王雪, 等. 观赏海棠不同颜色评价方法比较 [J]. 分子植物育种, 2019, 17 (22) : 7521–7530.
- LI M Y, LIU Y, WANG X, et al. Comparison of different color evaluation methods for ornamental crabapple [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17 (22) : 7521–7530. (in Chinese)
- [28] 沈星诚, 周婷, 范俊俊, 等. 日本红枫春季叶片色彩评价 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44 (6) : 213–220.
- SHEN X C, ZHOU T, FAN J J, et al. Evaluation of leaf colors of Japanese maples in spring [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44 (6) : 213–220. (in Chinese)
- [29] 龚洪泳, 赵明明, 范俊俊, 等. 不同海棠品种不同叶位叶片3种色素含量的研究 [J]. 浙江林业科技, 2016, 36 (2) : 44–48.
- GONG H Y, ZHAO M M, FAN J J, et al. Determination of pigment content in different cultivars of *Malus* spp. leaves at different position [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2016, 36 (2) : 44–48. (in Chinese)
- [30] 赵圃圃, 张全全, 江皓, 等. 观赏海棠叶色动态变化及色彩分类研究 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (8) : 845–850.
- ZHAO P P, ZHANG Q Q, JIANG H, et al. Changes and classification on leaf color of ornamental crabapple [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (8) : 845–850. (in Chinese)
- [31] 江皓, 姜文龙, 周婷, 等. 观赏海棠种不同叶位色彩动态分布及叶色分类研究[C]//中国园艺学会观赏园艺专业委员会, 国家花卉工程技术研究中心. 中国观赏园艺研究进展2018. 中国园艺学会, 2018: 129–133.
- [32] 陈璇, 谢军, 岳远征, 等. 彩叶植物叶片呈色分子机制研究进展 [J]. 西北植物学报, 2020, 40 (2) : 358–364.
- CHEN X, XIE J, YUE Y Z, et al. Advances in research on leaf coloration mechanism of colored leaf plants [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40 (2) : 358–364. (in Chinese)
- [33] 韩文学, 江皓, 卞健, 等. 10个观赏海棠品种叶片春季色彩变化及其与色素含量的相关性 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46 (5) : 562–570.
- HAN W X, JIANG H, BIAN J, et al. Leaf color change and its correlation with pigment content in 10 ornamental crabapple varieties in spring [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2020, 46 (5) : 562–570. (in Chinese)

(责任编辑：黄爱萍)