

引用格式: 李舒情, 张往祥, 申轶乾. 观赏海棠开花物候特征与气候适应性[J]. 西北植物学报, 2024, 44(10): 1656-1664. [LI S Q, ZHANG W X, SHEN Y Q. Flowering phenology characteristics and climate adaptability of ornamental crabapple[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(10): 1656-1664.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240154

观赏海棠开花物候特征与气候适应性

李舒情, 张往祥*, 申轶乾

(南京林业大学 林草学院, 水土保持学院, 南京 210037)

摘要 【目的】观赏海棠是优秀的春季观花树种, 研究其开花物候特点、稳定性及变化规律, 并探索其与气候变迁之间的关系, 对预测与调控海棠花期具有重要意义。【方法】基于 67 个品种 8 年的物候观测数据, 分别对海棠的花期早晚、长短及稳定性进行划分, 结合气象数据分析各品种对气候变化的适应性。【结果】(1) 海棠品种群初花时序稳定性较高, 绝大多数品种 (68.7%) 的初花期时序波动幅度为 0~0.04。(2) 海棠花期寿命对气候高度敏感, 仅部分品种 (18%) 的花期长度较为稳定, 波动幅度为 1~2 个月。(3) 海棠开花需要一定的低温刺激, 不同品种开花的低温需求不同。(4) 日最高温 ≥ 25 °C、日降水量 ≥ 5 mm、日相对湿度 $\geq 80\%$ 时均会使海棠花期缩短。【结论】花前低温会显著影响海棠初花期稳定性, 开花期间维持适宜的气候对延长海棠花期有重要意义。

关键词 观赏海棠; 开花物候; 初花时序; 花期长度; 标准偏差

中图分类号 S685.99

文献标志码 A

Flowering phenology characteristics and climate adaptability of ornamental crabapple

LI Shuqing, ZHANG Wangxiang*, SHEN Yiqian

(College of Forestry and Soil Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract [Objective] Ornamental crabapple is an excellent spring flowering tree species. Studying its flowering phenology characteristics and stability and change rules, and exploring its relationship with climate change are of great significance for the prediction and regulation of the flowering period of crabapple. [Methods] Based on the phenological observation data of 67 varieties for 8 years, the flowering date, length, and stability of crabapple were divided, and the adaptability of each variety to climate change was analyzed in combination with meteorological data. [Results] (1) The stability of the initial flowering time of the crabapple variety group was high, and the fluctuation range of the initial flowering time of most varieties (68.7%) was 0~0.04. (2) The flowering life of crabapple was highly sensitive to climate, and only some varieties (18%) had a relatively stable flowering length, with a fluctuation range of 1~2 months. (3) Ornamental crabapple flowering required a certain low temperature stimulation, and different varieties had different low temperature requirements for flowering. (4) When daily maximum temperature ≥ 25 °C, daily precipitation ≥ 5 mm, or daily relative humidity $\geq 80\%$, the flowering period of crabapple was shortened. [Conclusion] Low temperature before flowering significantly affects the stability of the initial flowering period of crabapple, and maintaining a suitable climate during flowering is of great significance for prolonging the flowering period of crabapple.

收稿日期: 2024-03-09; 修改稿收到日期: 2024-05-19

基金项目: 国家林业和草原局推广项目 (2023133114)

作者简介: 李舒情 (1999—), 女, 硕士, 主要从事观赏海棠开花物候研究。E-mail: shu110042@qq.com

* 通信作者: 张往祥, 教授, 博士生导师, 主要从事观赏海棠等木本花卉良种选育研究。E-mail: malus2011@163.com

Key words ornamental crabapple; flowering phenology; initial flowering time; flowering length; standard deviation

物候学是研究自然界中动植物与环境变化内在联系的学科^[1]。植物物候主要研究植物的萌芽、展叶、开花、结实和落叶等生长周期对环境变化的反应^[2-3]。研究植物物候不仅有助于更好地理解其对环境的适应性,还能为研究气候变化提供重要的参考^[4]。开花习性是植物物候研究的重要部分^[5],研究开花物候的规律及差异对植物育种与栽培具有重要意义^[6-7]。花器官发育常受非生物因素影响,如光照^[8]、温度^[9-11]、水分^[12]、海拔^[13-14]等对花器官的寿命、大小等有显著影响,这表明外界环境与植物生殖系统发育密切相关。此外,开花植物季节性变化形成的多种自然景观通常受到游客的青睐,春季山花烂漫、秋季五彩缤纷,衍生出一系列观赏类旅游活动,如武汉樱花节、北京香山红叶、沙兰镇杜鹃花海等^[15]。综上,研究植物开花物候对于指导相关园艺生产实践,促进旅游业季节性开发及市场营销策略的制定都具有重要价值。

观赏海棠 (*Malus* spp.) 为蔷薇科 (Rosaceae) 苹果属 (*Malus* Mill.) 落叶灌木或小乔木,是重要的果树、砧木及观赏树种,因其树形优美、花形多样、花色丰富,且具有较强的环境适应性和抗逆性,深受大众喜爱并被广泛应用于园林景观建设^[16-17]。欧美园艺工作者历经多年选育出一批高观赏价值的海棠杂交品种群,尤其是红色系观花及优良观果品种,选育成就非凡^[18]。近 20 年来,中国引种栽培数量达百余种,多数品种表现优异^[19-20]。为加强海棠品种群在园林景观建设及专类园搭建上的应用,对多品种海棠开花物候的研究就显得尤为重要。目前,国内外有关海棠开花物候的研究主要集中在开花习性、花期预测、调控等方面^[21-23]。然而,关于多品种海棠的花期变化规律和生理特性尚缺乏系统深入的研究,这会对海棠的花期调控及花期预报模型的精度造成影响。因此,文章拟通过对 67 个观赏海棠品种的多年花期数据进行分析,研究其开花物候规律,探究始花期、花期长度与部分气象因子的内在联系,并在品种水平上揭示其花期稳定性及其变化规律,为多品种海棠培育、花期预报、花期调控提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验地位于江苏省扬州市江都区仙女镇(119°55'

E, 32°42'N) 国家海棠种质基因库,地处北亚热带季风气候区,具有明显的季节性特征。试验场地为沙壤土,土壤肥沃,排灌条件良好。年平均气温约 16.5 °C,年降水量约 1 000 mm,无霜期 320 d 左右。供试品种共 67 个(表 1),皆引自美国,花色各异,花型多样,其中个别品种如图 1 所示。每个品种 30 株,按 2 m×3 m 的行株距栽植,未郁闭,光照充足,小气候条件一致。所选材料都是生长 5~8 年的健康成年株,并且连续 3 年以上能稳定开花结果。

1.2 数据测定

1.2.1 数据获取

气象资料均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。参考儒略日法,以每年的 3 月 1 日为起点 1,将日期转化日序数^[24]。参考翟盘茂等^[25]的研究,采用相关气象指标以分析气候动态变化。观赏海棠物候的观测方法参照《中国物候观测方法》^[26]。每个品种观测样本 30 株,取具有代表性的 3 株做记录。观测内容包括初花期起始日(10%左右花朵开放)^[21]及花期长度。8 年(2012—2017 年、2022—2023 年)的花期数据均源于江苏省扬州市国家海棠种质基因库,由于保存不当,2015 年的花期长度数据丢失。

1.2.2 相关指标

相对初花日 (R_{ID}) 是指某一年内单个品种的初花日与群体平均初花日的比值,表示某品种开花时间在群体中的相对早晚。相对花期长度 (R_{FL}) 是指某一年内单个品种的花期长度与群体平均花期长度的比值,表示某品种开花寿命在群体中的相对长短。

$$\begin{cases} R_{ID} = t_{ij} / \bar{t}_j \\ \bar{t}_j = \sum t_{ij} / n \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_{FL} = x_{ij} / \bar{x}_j \\ \bar{x}_j = \sum x_{ij} / n \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_{ij} 为第 i 个品种第 j 年的初花日序; \bar{t}_j 为第 j 年的群体平均初花日序; n 为群体中海棠品种的数目; x_{ij} 为第 i 个品种第 j 年的开花持续时间; \bar{x}_j 为第 j 年的群体开花持续时间均值。

初花时序稳定性 (S_{IF}) 是指某一品种多年相对初花日的偏离程度。花期长度稳定性 (S_{FL}) 是指某一品种多年花期长度的偏离程度。考虑到标准差可以反映一组数据资料的离散性^[23],本研究中采用标准差 σ 计算初花时序和花期长度稳定性。

表 1 供试观赏海棠品种名称

Table 1 A list of ornamental crabapple cultivars applied in the test

编号 Number	品种名 Cultivar name	编号 Number	品种名 Cultivar name	编号 Number	品种名 Cultivar name
1	红衣主教 M. 'Cardinal'	24	斯普伦格教授 M. 'Professor Sprenger'	47	绣球 M. 'Hydrangea'
2	粉冠 M. 'Pink Spires'	25	盛花 M. 'Abundance'	48	李斯特 M. 'Liset'
3	芭蕾舞 M. 'Ballet'	26	唐·怀曼 M. 'Donald Wyman'	49	粉红公主 M. 'Pink Princess'
4	草莓果冻 M. 'Strawberry Jelly'	27	莱姆 M. × <i>purpurea</i> 'Lemoinei'	50	时光秀 M. 'Show Time'
5	春之雪 M. 'Spring Snow'	28	印第安魔术 M. 'Indian Magic'	51	五月欢歌 M. 'May's Delight'
6	印第安之夏 M. 'Indian Summer'	29	红巴伦 M. 'Red Baron'	52	高原红 M. 'Prairifire'
7	春之颂 M. 'Spring Glory'	30	红玉 M. 'Red Jade'	53	玛丽波特 M. 'Mary Potter'
8	阿美 M. 'Almey'	31	熔岩 M. 'Molten Lava'	54	金色仙踪 M. 'Fairtail Gold'
9	凯尔西 M. 'Kelsey'	32	珠穆朗玛 M. 'Everest'	55	灰姑娘 M. 'Cinderella'
10	日本海棠 M. <i>floribunda</i>	33	美果海棠 M. × <i>zumi</i> 'Calocarpa'	56	薄荷糖 M. 'Candymint'
11	红丽 M. 'Red Splendor'	34	亚当斯 M. 'Adams'	57	金色冬季 M. 'Winter Gold'
12	东哥 M. 'Dolgo'	35	超甜时光 M. 'Sweet Sugartyme'	58	希利尔 M. 'Hillier'
13	龙游路易莎 M. 'Louisa Contort'	36	紫王子 M. 'Purple Prince'	59	罗格 M. 'Roger's Selection'
14	豪帕 M. 'Hopa'	37	皇家 M. 'Royalty'	60	亚瑟王 M. 'King Arthur'
15	完美紫色 M. 'Perfect Purple'	38	爱丽 M. 'Eleyi'	61	金丰收 M. 'Harvest Gold'
16	丽莎 M. 'Lisa'	39	白色瀑布 M. 'White Cascade'	62	黄油果 M. 'Butterball'
17	皇家宝石 M. 'Royal Gem'	40	兰斯洛特 M. 'Larcelot'	63	春之韵 M. 'Spring Sensation'
18	洋溢 M. 'Radiant'	41	红哨兵 M. 'Red Sentinel'	64	金雨滴 M. 'Golden Raindrop'
19	马凯米克 M. 'Makamik'	42	雪堆 M. 'Snowdrift'	65	火鸟 M. 'Firebird'
20	丰盛 M. 'Profusion'	43	鲁道夫 M. 'Rudolph'	66	白兰地 M. 'Brandywine'
21	罗宾逊 M. 'Robinson'	44	垂枝麦当娜 M. 'Weeping Madonna'	67	高原玫瑰 M. 'Praire Rose'
22	皇家美人 M. 'Royal Beauty'	45	珊瑚礁 M. 'Coralburst'		
23	百夫长 M. 'Centurion'	46	金黄蜂 M. 'Golden Hornet'		



A. 珠穆朗玛; B. 亚当斯; C. 凯尔西。

图 1 不同品种观赏海棠

A. M. 'Everest'. B. M. 'Adams'. C. M. 'Kelsey'.

Fig. 1 Different varieties of ornamental crabapple

2 结果与分析

2.1 观赏海棠开花期间天气动态

表 2 表明,在观测的 8 年期间,气温整体表现为上升趋势,每年 1 月至 4 月的最低气温均值为(11.48

±0.75) °C,最高气温均值为(20.93±0.65) °C,平均气温为(15.98±0.75) °C。8 年的降水量均值为(2.48±1.38) mm,各年度间降水情况有显著差异,如 2016 年与 2022 年的降水量强度显著高于其他年份。8 年内的风力均较小,且相对稳定,最大风力常

维持在 3~4 级,部分时间风力能达到 4~6 级。可认为,观测期内的风力对开花物候无显著影响。

2.2 初花期及花期持续时间变化趋势

观赏海棠的花期一般为 3 月中下旬至 4 月中上旬,品种群的开花持续时间约为 (30.6 ± 3.55) d。

由图 2 可知,海棠品种群花期整体呈提前趋势,其中,初花期提前了近 1 周,末花期提前了 3 d 左右;海棠品种的花期长度波动较大。此外,与 2012 年相比,海棠品种群的花期寿命在其他年份表现出不同程度的延长(除 2016 年)。

表 2 历年开花期间气象指标数值(3—5 月)

Table 2 Meteorological index values during flowering over the years (March to May)

指标 Index	年份 Year							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2022	2023
$T_0/^\circ\text{C}$	19.95	18.60	16.91	18.10	20.12	18.33	18.95	18.12
$T_1/^\circ\text{C}$	-3.95	-2.29	-1.24	-1.59	-1.70	0.55	1.46	2.23
$T_2/^\circ\text{C}$	8.84	7.52	9.18	8.44	9.66	8.98	9.64	9.78
$T_3/^\circ\text{C}$	29.86	31.26	28.04	27.91	30.07	30.30	31.30	31.37
$T_4/^\circ\text{C}$	5.12	6.37	7.96	5.30	6.09	8.48	6.29	6.64
$T_5/^\circ\text{C}$	17.29	18.07	17.84	17.21	18.26	18.46	19.41	19.47
SU/d	5	10	2	10	7	10	10	12
P_{\max}/mm	22.44	12.59	26.56	24.02	35.81	31.02	36.80	34.36
P/mm	165.11	56.98	145.02	173.50	228.52	97.85	230.13	97.80
R_{10}/d	6	3	5	7	8	1	9	2
R_{20}/d	1	0	2	3	4	1	4	1
R_1/d	21	8	20	21	18	19	14	10
SDII/mm	7.86	7.12	7.25	8.26	12.70	5.15	16.44	9.78

注: T_0 指日最低温极大值; T_1 指日最低温极小值; T_2 指日最低温平均值; T_3 指日最高温极大值; T_4 指日最高温极小值; T_5 指日最高温平均值;SU 指最高气温 $> 25^\circ\text{C}$ 的时间; P_{\max} 指单日最大降水量; P 指日降水量 > 1 mm 的累计值; R_{10} 指日降水量 ≥ 10 mm 的时间; R_{20} 指日降水量 ≥ 20 mm 的时间; R_1 指日降水量 ≥ 1 mm 的时间;SDII 指降水总量与湿日时间(日降水量 > 1 mm)的比值。

Note: T_0 refers to the maximum value of daily minimum temperature. T_1 refers to the minimum value of daily minimum temperature. T_2 refers to the average value of daily minimum temperature. T_3 refers to the maximum value of daily maximum temperature. T_4 refers to the minimum value of daily maximum temperature. T_5 refers to the average value of daily maximum temperature. SU refers to time with the highest temperature $> 25^\circ\text{C}$. P_{\max} refers to the maximum daily precipitation. P refers to the cumulative value of daily precipitation > 1 mm. R_{10} refers to time with daily precipitation ≥ 10 mm. R_{20} refers to time with daily precipitation ≥ 20 mm. R_1 refers to time with daily precipitation ≥ 1 mm. SDII refers to the ratio of total precipitation to wet time (daily precipitation > 1 mm).

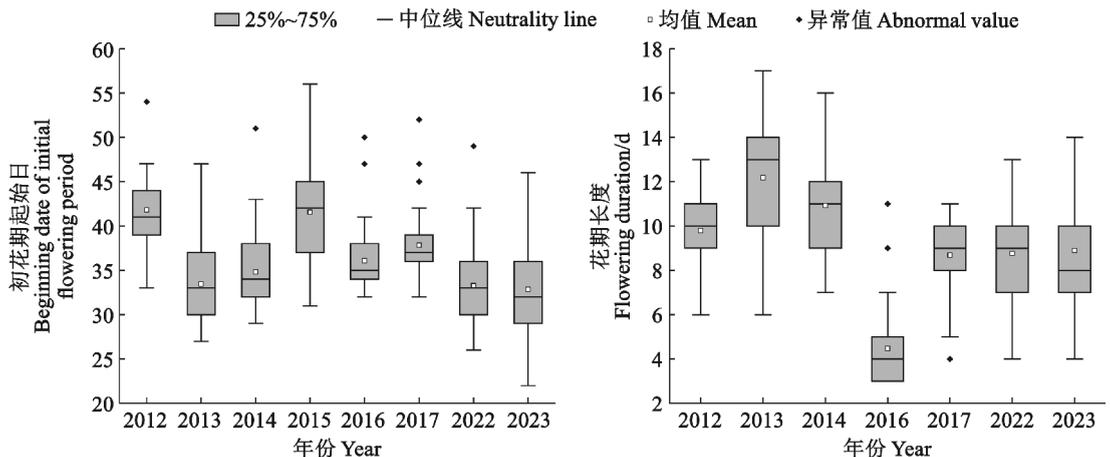


图 2 初花期起始日和花期长度年际变化

Fig. 2 Interannual variation of initial flowering date and flowering duration

2.3 观赏海棠花期早晚类群划分及初花时序稳定性计算

由图3可知,67个观赏海棠品种的相对初花日(R_{ID})连续分布于区间(0.8, 1.4)。 R_{ID} 值越小表示品种开花越早,反之则越晚,而值靠近1则说明该品种开花早晚在群体中位于中间段。因此,根据 R_{ID} 值的大小,可划分出早、中、晚三大类群: $R_{ID} \leq 0.95$ 属于早花期类群(共26个品种,占38.8%); $0.95 < R_{ID} \leq 1.1$ 属于中花期类群(共30个品种,占44.8%); $R_{ID} > 1.1$ 属于晚花期类群(共11个品种,占16.4%)。

受环境条件的影响,海棠品种群的初花时序存在轻微波动。为探究其波动程度,计算品种相对初花日的标准差,结果如图3所示。海棠品种的初花时序稳定性(S_{IFT})连续分布,最小为0.02,最大为0.08。 S_{IFT} 值越小说明品种在群体中的初花时序越稳定,反之则越差。

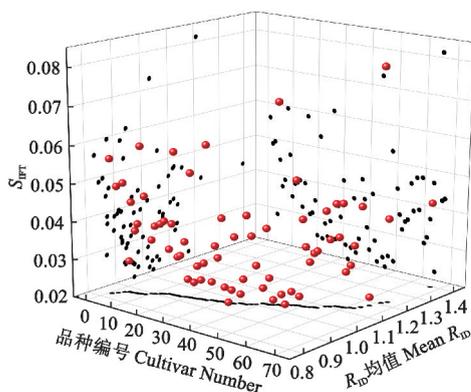


图3 初花时序及其稳定性分布

Fig. 3 Initial flowering time and its stability distribution

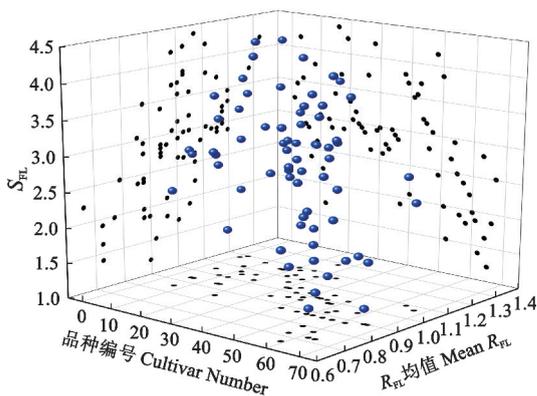


图4 花期长度及其稳定性分布

Fig. 4 Flowering duration and its stability distribution

根据 S_{IFT} 值极差等距划分,可将67个品种分为三大类群:初花时序高稳定性类群($S_{IFT} < 0.04$,共46个品种,占68.7%);初花时序中稳定性类群($0.04 \leq S_{IFT} \leq 0.06$,共19个品种,占28.3%);初花时序低稳定性类群($S_{IFT} > 0.06$,仅2个品种,占3%)。

2.4 观赏海棠花期长度类群划分及花期长度稳定性计算

不同品种的花期长度差异显著,花期寿命最短为 (6.2 ± 2.23) d、最长为 (12.4 ± 1.95) d。由图4可知,各品种的相对花期长度(R_{FL})连续分布于区间(0.7, 1.4)。 R_{FL} 值表示品种在群体中的花期长短。因此,根据 R_{FL} 值的大小划分出3个花期长度等级类群:短花期类群($R_{FL} \leq 0.90$,花期寿命为5~7 d,有17个品种,占25.4%);中等长度花期类群($0.90 < R_{FL} < 1.10$,花期寿命8~10 d,共33个品种,占49.2%);长花期类群($R_{FL} \geq 1.10$,花期寿命11~13 d,共17个品种,占25.4%)。

受环境条件影响,各品种的花期长度均有所波动。计算各品种花期长度稳定性(S_{FL}),发现品种的 S_{FL} 一般在1~5之内。据此可划分出3个花期长度稳定性类群:花期长度高稳定性类群($S_{FL} < 2$,共12个品种,占18%);花期长度中稳定性类群($2 \leq S_{FL} \leq 3$,共30个品种,占44.8%)花期长度低稳定性类群($S_{FL} > 3$,共25个品种,占37.2%)。

2.5 观赏海棠初花时序与花前低温的相关性分析

采用相关性分析法,进一步探究初花时序稳定性(S_{IFT})与花前低温的关系,结果如表3所示:早花期类群的 S_{IFT} 与开花前1年10月1日至12月1日(A)的低温时间(气温 $< 7^\circ\text{C}$)呈极显著负相关;中花期类群的 S_{IFT} 与A时间段内的低温时间(气温 $< 3^\circ\text{C}$)显著负相关;晚花期类群的 S_{IFT} 与开花前1年10月1日至开花当年1月1日(B)的低温时间(气温 $< 5^\circ\text{C}$)显著负相关。此外,三大花期类群的 S_{IFT} 与开花前1年10月1日至开花当年3月1日(D)的低温时间无显著相关性。

由此可推出,观赏海棠正常开花需要经过一定的低温刺激,早、中类群的休眠期都是在开花前1年10月至开花前1年12月1日,但二者低温刺激范围不同。晚花期类群的休眠期从开花前1年10月1日持续到开花当年2月1日(C),其低温刺激范围与中花期类群相近,但休眠持续时长多1~2个月。

表 3 类群初花时序与花前低温时间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between group initial flowering time and low temperature time before flowering

时间段 Time period	早晚类群 Early and late group	气温 Air temperature						
		<1 °C	<2 °C	<3 °C	<4 °C	<5 °C	<6 °C	<7 °C
A	早花期 Early group	-0.253	-0.253	-0.514	-0.511	-0.655	-0.837**	-0.897**
	中花期 Medium group	-0.399	-0.399	-0.731*	-0.714*	-0.470	-0.518	-0.479
	晚花期 Late group	0.526	0.526	0.761*	0.786*	0.806*	0.857**	0.554
B	早花期 Early group	0.292	0.195	0.715*	0.731*	0.705	0.754*	0.569
	中花期 Medium group	0.577	0.625	0.565	0.671	0.673	0.495	0.604
	晚花期 Late group	-0.437	-0.413	-0.737*	-0.760*	-0.794*	-0.504	-0.481
C	早花期 Early group	-0.027	0.175	0.290	0.414	0.312	0.376	0.461
	中花期 Medium group	0.187	0.406	0.252	0.616	0.573	0.355	0.480
	晚花期 Late group	-0.100	-0.301	-0.345	-0.472	-0.726*	-0.580	-0.572
D	早花期 Early group	-0.084	-0.045	0.017	0.124	0.029	0.063	0.296
	中花期 Medium group	0.120	0.139	0.196	0.482	0.300	0.160	0.273
	晚花期 Late group	-0.202	-0.275	-0.260	-0.406	-0.571	-0.525	-0.620

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

Note: * indicates $P < 0.05$. ** indicates $P < 0.01$.

2.6 气象因子对观赏海棠花期长度的影响

以日最高气温 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T=28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为分界线构建分段函数,结果如图 5 所示。不同区间的拟合函数差异显著,当 $T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, T 与相对花期长度 (R_{FL}) 的拟合度极低 ($R^2 = 0.01$); 当 $25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, T 与 R_{FL} 的拟合度中等 ($R^2 = 0.32$); 当 $T \geq 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, T 与 R_{FL} 的拟合度较高 ($R^2 = 0.51$), 花期长度随气温上升而缩短。且当 $T > 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, R_{FL} 普遍小于 1。

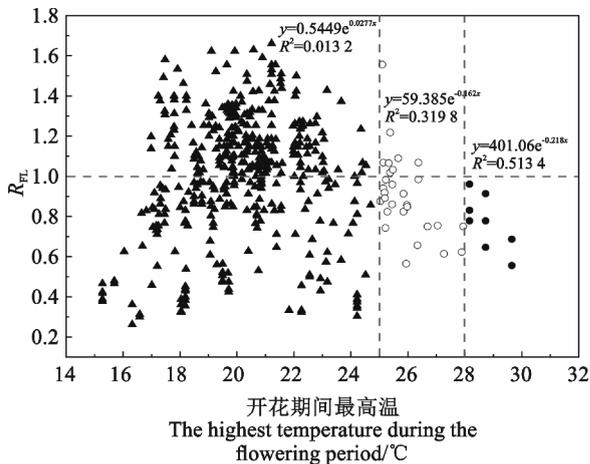


图 5 日最高温对花期长度的影响

Fig. 5 Effects of the highest temperature on flowering length

以降水量 $P=5\text{ mm}$ 为分界线构建分段函数,结果如图 6 所示。当 $P < 5\text{ mm}$ 时,二者之间的拟合度极低 ($R^2 = 0.0118$),而当 $P \geq 5\text{ mm}$,二者之间的拟合度高达 0.77,此时花期长度随降水量增加而缩短,且 R_{FL} 普遍小于 1。

以相对湿度 $RH=80\%$ 为分界线构建分段函数,结果如图 7 所示。花期长度随相对湿度的上升而缩短,当 $RH < 80\%$ 时,这种关联性并不强 ($R^2 = 0.19$),而当 $RH \geq 80\%$ 时,二者之间的拟合度达到 0.38,且 R_{FL} 普遍小于 1。

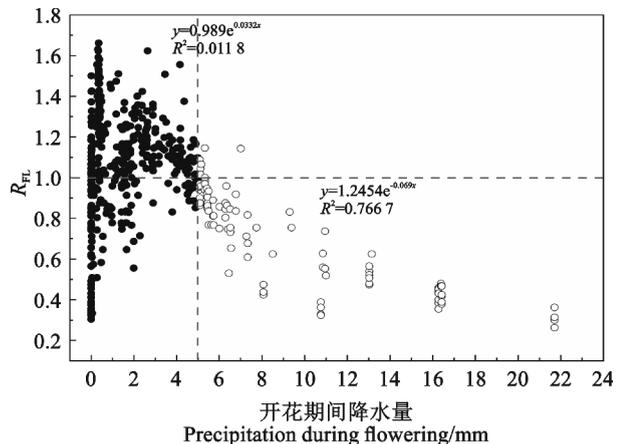


图 6 日降水量对花期长度的影响

Fig. 6 Effects of daily precipitation on flowering length

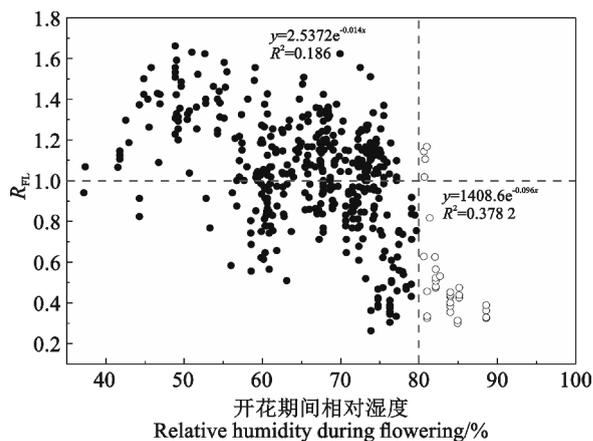


图7 日相对湿度对花期长度的影响

Fig. 7 Effects of relative humidity on flowering length

3 讨论

3.1 温度对海棠花期影响显著但初花时序稳定性高

品种的花期早晚及其在群体中的开花时序是开花植物的重要性状^[27], 由于对气候的敏感性, 同种植物在不同空间和时间上有很大的差异^[28]。研究发现, 尽管初花日期在不同年度间存在较大波动, 但品种群初花时序稳定性高, 各品种的时序偏离度不超过 0.08。初花时序的稳定性反映了遗传因素在开花物候中的主导地位, 然而初花期早晚不仅受遗传影响, 还与开花前的有效积温状况密切相关, 包括开花前一定时期内冷积温和热积温两方面^[29]。一般而言, 冬季温度的上升会促使早春物候提前^[30], 但也有研究表明冬季气候变暖阻碍了植物休眠期的冷量积累, 使热量积累的提前效应被抵消^[31]。本研究中, 海棠品种群初花时序与一定时期内的冬季低温时间显著负相关, 低温时间越长, 开花时序稳定性越强, 且不同类群对低温时间变化的反应有所差异。同时, 海棠花期早晚与开花前的热积温关联性极强, 例如, 早花品种的初花期与花前 3 个月内日均温 ≥ 7 °C 的积温相关系数达 -0.90 。综上可以推断, 海棠开花需要经过一定时期的冷积温和热积温, 但具体积温量因品种而异, 这种差异的形成可能与其亲本原产地所处的气候区不同有关。

3.2 海棠花期寿命对气象变化的反应存在区间效应

本研究表明海棠花期寿命长短因品种而异, 同

一品种在不同的年度间呈现较大波动, 且海棠花期寿命对各气象变化的反应存在明显的区间效应, 当日最高温 T 处于 $25 \sim 28$ °C 时, 花期寿命主要由温度和遗传因素共同主导 ($R^2 = 0.32$), 但不同品种温度敏感性不同; 当 $T \geq 28$ °C 时, 花期持续时间则主要由温度主导 ($R^2 = 0.5134$)。此外, 当日降水量超过 5 mm 时, 花期寿命由降水量大小主导 ($R^2 = 0.77$)。这表明, 海棠花期长短是由遗传因素和气象条件共同决定的, 二者对海棠寿命影响的权重大小与气象因子所处的区间有关。一般而言, 植物开花寿命对外界环境变化的适应有一个舒适度范围, 当环境变化波动在此范围内, 植物可能不发生或发生轻微的反应, 一旦超出界限, 植物则表现出明显的反应现象, 如生长期缩短或生物量降低等^[32]。普遍认为高温会影响植物的呼吸和蒸腾生理^[33], 强降水则会对花朵造成机械损伤, 从而使花期寿命缩短。研究表明, 高温会对植物的多条代谢通路造成消极影响^[34-36], 开花期间的温度升高则主要通过加快植物的生理代谢, 使花期寿命缩短^[37], 也有研究认为高温促使生物传粉媒介活动频繁, 促使植物花期缩短^[38-39]。目前, 有关海棠对非生物因素响应的研究已取得一定成果^[40], 但仍局限于叶片的抗逆性形态指标和生理特征等方面, 而针对海棠花器官方向的研究相对薄弱, 尤其是海棠花器官如何适应气象变化的生理机制, 有待后续进一步探讨。

4 结论

(1) 海棠品种群群体观赏期较长。单个品种花期寿命约 1 周, 而品种群的开花持续时间约为 30 d, 延长了 2 倍, 能够为丰富春季观赏类旅游活动服务。

(2) 海棠品种群初花时序稳定性高, 各品种的时序偏离度不超过 0.08。海棠开花的冷积温需求因品种而异, 早花和晚花类群的低温需求分别为 < 7 °C (2 个月) 和 < 5 °C (4 个月)。

(3) 花期寿命对气象变化较敏感。在观赏海棠开花期间, 维持温度低于 25 °C, 降水量小于 5 mm, 相对湿度低于 80% 的环境条件, 将更加有利于延长花期。

参考文献:

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
[2] LI J X, JIN Y T, ZHAO Y, et al. The intra-annual rhythm

of *Pinus sylvestris* growth-climate responses under a warming climate at its southern distribution limits[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 346: 109871.

- [3] 张福春. 北京春季的树木物候与气象因子的统计学分析[J]. 地理研究, 1983, 2(2): 55-64.
ZHANG F C. Statistic analysis on the phenophase of trees in spring of Beijing[J]. *Geographical Research*, 1983, 2(2): 55-64.
- [4] FITCHETT J M, GRAB S W, THOMPSON D I. Plant phenology and climate change[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2015, 39(4): 460-482.
- [5] LI H L, ALI A, LUO X, *et al.* China's subtropical deciduous plants are more sensitive to climate change than evergreen plants by flowering phenology[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(2).
- [6] 杨柳, 周天华, 王勇, 等. 珍稀濒危植物陕西羽叶报春的开花及传粉生物学研究[J]. 西北植物学报, 2023, 43(7): 1218-1226.
YANG L, ZHOU T H, WANG Y, *et al.* Flowering and pollination biology of rare and endangered plant *Primula filchnerae* Knuth[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(7): 1218-1226.
- [7] LI Y Y, GUO L L, WANG Z Y, *et al.* Genome-wide association study of 23 flowering phenology traits and 4 floral agronomic traits in tree peony (*Paeonia* section *Moutan* DC.) reveals five genes known to regulate flowering time[J]. *Horticulture Research*, 2022, 10(2): uhac263.
- [8] 何嘉诚, 李建安, 任爽爽, 等. 光周期对油茶开花及生理特性的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 273-281.
HE J C, LI J A, REN S S, *et al.* Effects of photoperiod on flowering and physiological characteristics of *Camellia oleifera* [J]. *Non-wood Forest Research*, 2023, 41(1): 273-281.
- [9] 李奥, 张英杰, 孙纪霞, 等. 植物生长调节剂和温度对蝴蝶兰双梗率、花期及花朵性状的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(3): 732-738.
LI A, ZHANG Y J, SUN J X, *et al.* Effects of plant growth regulators and temperature on the rate of double peduncle, flowering period and flower characteristics of *Phalaenopsis* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 732-738.
- [10] 谭静, 陈正洪, 肖玫. 武汉大学樱花花期长度特征及预报方法[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 38-47.
TAN J, CHEN Z H, XIAO M. Characteristics and forecast of flowering duration of cherry blossoms in Wuhan University [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 38-47.
- [11] 杨永娥, 张晓煜, 梁小娟, 等. 苹果花期至幼果期花朵和果实对低温的敏感性研究[J]. 西北植物学报, 2023, 43(10): 1694-1703.
YANG Y E, ZHANG X Y, LIANG X J, *et al.* Studies on the sensitivity of apple flowers and fruits to low temperatures from flowering to young fruiting stage[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(10): 1694-1703.
- [12] 时羽杰, 邬晓勇, 唐媛, 等. 藜麦花期水分胁迫下的代谢组学分析[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(6): 921-930.
SHI Y J, WU X Y, TANG Y, *et al.* Metabonomic analysis of *Chenopodium quinoa* under water stress at flowering stage [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(6): 921-930.
- [13] 郭传超, 周伟权, 石荡, 等. 新疆野杏开花物候与花器官对海拔的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 789-797.
GUO C C, ZHOU W Q, SHI D, *et al.* The flowering phenological period and floral organ response to altitude in *Prunus armeniaca* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2): 789-797.
- [14] 王一峰, 苟文霞, 李蕾, 等. 柳叶菜风毛菊盛花期营养和繁殖特征对海拔变化的响应[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 118-126.
WANG Y F, GOU W X, LI L, *et al.* Responses of flowering vegetative and reproductive characteristics of *Saussurea epilobioides* Maxim. to elevation[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2023, 59(1): 118-126.
- [15] GE Q S, DAI J H, LIU J, *et al.* The effect of climate change on the fall foliage vacation in China[J]. *Tourism Management*, 2013, 38: 80-84.
- [16] 李育农. 苹果属植物种质资源研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [17] 唐菲, 丁增成, 任杰, 等. 我国观赏海棠种类及品种概述[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(16): 190-195.
TANG F, DING Z C, REN J, *et al.* Overview of ornamental *Malus* species and varieties in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(16): 190-195.
- [18] 许剑峰, 张往祥, 朱玲玲, 等. 78个北美海棠品种果实表型多样性分析[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), (2024-04-28)[2024-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20240428.0943.002.html>.
XU J F, ZHANG W X, ZHU L L, *et al.* Phenotypic diversity analysis of fruit traits of 78 North American crabapple cultivars [J/OL]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, (2024-04-28)[2024-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20240428.0943.002.html>.
- [19] 郭冉, 吴博威, 李剑雄. 观赏海棠在北京市城市公园中的景观应用调查[J]. 现代园艺, 2021(17): 56-58.
GUO R, WU B W, LI J X. Investigation on landscape application of ornamental *Malus* in Beijing urban parks[J]. *Contemporary Horticulture*, 2021(17): 56-58.
- [20] 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.
- [21] 张往祥, 魏宏亮, 江志华, 等. 观赏海棠品种群的花期物候特征研究[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 713-725.
ZHANG W X, WEI H L, JIANG Z H, *et al.* Studies on flowering phenological characteristics of ornamental crabapple cultivar group[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(4): 713-725.

- [22] 张往祥, 袁靓, 江志华, 等. 观赏海棠品种群开花进程中色素组分动态特征研究[J]. 园艺学报, 2014, 41(6): 1145-1156. ZHANG W X, QIU J, JIANG Z H, *et al.* Studies on dynamic characteristics of the pigment components of ornamental crabapple cultivars groups in flowering process[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(6): 1145-1156.
- [23] 储吴樾, 范俊俊, 张往祥. 观赏海棠花期物候稳定性及其对温度变化的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 49-54. CHU W Y, FAN J J, ZHANG W X. Phenological stability of ornamental crabapple and its response to temperature change[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2020, 44(5): 49-54.
- [24] SHI P J, CHEN Z H, REDDY G V P, *et al.* Timing of cherry tree blooming: Contrasting effects of rising winter low temperatures and early spring temperatures[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240: 78-89.
- [25] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63. ZHAI P M, LIU J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(9): 55-63.
- [26] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [27] ZHU Y H, YANG G J, YANG H, *et al.* Forecasting regional apple first flowering using the sequential model and gridded meteorological data with spatially optimized calibration[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 196: 106869.
- [28] RAMIREZ-PARADA T H, PARK I W, RECORD S, *et al.* Plasticity and not adaptation is the primary source of temperature-mediated variation in flowering phenology in North America[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(3): 467-476.
- [29] PANTELIDIS G, DROGOUDI P. Exploitation of genotypic variation in chilling and heat requirements for flowering in *Prunus armeniaca* and *Prunus persica* (L.) Batsch cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 321: 112287.
- [30] LI X F, WANG X, FANG Y T, *et al.* Phenology advances uniformly in spring but diverges in autumn among three temperate tree species in response to warming[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 336: 109475.
- [31] GUO L, DAI J H, WANG M C, *et al.* Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: A case study of apricot flowering in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 1-7.
- [32] BHAT R N, BHATT A, SULEIMAN K M. Physiology of growth and development in horticultural plants[M]. CRC Press, 2024.
- [33] SONG B, SUN L, BARRETT S C H, *et al.* Global analysis of floral longevity reveals latitudinal gradients and biotic and abiotic correlates[J]. *The New Phytologist*, 2022, 235(5): 2054-2065.
- [34] 郭卫珍, 宋垚, 章丹峰, 等. 9个山茶品种对高温胁迫的光合生理响应及其耐热性综合评价[J]. 西北植物学报, 2024, 44(4): 539-550. GUO W Z, SONG Y, ZHANG D F, *et al.* Photosynthetic and physiological responses of 9 *Camellia* cultivars to high temperature stress and comprehensive evaluation of heat tolerance[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(4): 539-550.
- [35] WANG Y Y, QIAN Q X, XU H Z, *et al.* Dynamic physiological responses of *Cinnamomum camphora* with monoterpane protection under high temperature shock[J]. *Forests*, 2023, 14(10): 2005.
- [36] 刘春风, 谢寅峰, 张往祥. 不同品种海棠对高温胁迫的生理响应[J]. 林业科技开发, 2015, 29(4): 31-36. LIU C F, XIE Y F, ZHANG W X. Physiological response of different crabapple varieties to high temperature stress[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2015, 29(4): 31-36.
- [37] DUDLEY L S, ARROYO M T K, FERNÁNDEZ-MURILLO M P. Physiological and fitness response of flowers to temperature and water augmentation in a high Andean geophyte[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 150: 1-8.
- [38] WANG Y Y, LI Y C, LUO A, *et al.* Evolutionary history and climate co-determine the geographical variation in pollination modes of angiosperms in China[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2023, 32(12): 2189-2198.
- [39] ARROYO M T K, DUDLEY L S, JESPERSEN G, *et al.* Temperature-driven flower longevity in a high-alpine species of *Oxalis* influences reproductive assurance[J]. *The New Phytologist*, 2013, 200(4): 1260-1268.
- [40] 刘慧春, 朱开元, 周江华, 等. 我国观赏海棠抗逆性研究进展[J]. 浙江林业科技, 2020, 40(5): 84-88. LIU H C, ZHU K Y, ZHOU J H, *et al.* Research progress on resistance of ornamental crabapple in China[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2020, 40(5): 84-88.