

观赏海棠花期物候稳定性及其对温度变化的响应

储吴樾¹, 范俊俊¹, 张往祥^{1,2*}

(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】研究多品种海棠初花期物候特征,探究花期与温度的内在联系,并在品种水平上揭示花期稳定性差异及变化规律。【方法】使用67个海棠品种的4年初花期物候数据对多品种海棠初花期稳定性进行分析,并使用多年的气象数据对多品种海棠初花期群组物候标准偏差(σ)的计算结果进行研究。【结果】2014—2016年多品种海棠初花期日期顺序与2013年的初花期均有较高的相关性。晚花期品种的 σ 值大于早、中花期 σ 值。早花期品种群与中花期品种群的 σ 值和开花前一年10月1日至12月1日期间小于6℃的天数呈显著负相关($P<0.05$),而晚花期品种群 σ 值与开花前一年10月1日至开花当年2月1日期间小于4℃($P<0.05$)及开花前一年10月1日至开花当年3月1日期间小于4℃($P<0.05$)的天数呈显著负相关。【结论】低温对于海棠初花期稳定性有着重要影响:一方面,早、中花期品种相对于晚花期品种而言对低温需求更大,且休眠时间限制更加严格;另一方面,晚花期品种间初花期顺序的稳定性更低。

关键词:观赏海棠;初花期群组;花期物候;低温;标准偏差

中图分类号:S685.99 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2020)05-0049-06



Phenological stability of ornamental crabapple and its response to temperature change

CHU Wuyue¹, FAN Junjun¹, ZHANG Wangxiang^{1,2*}

(1.College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. Yangzhou Small Apple Gardening Co., Ltd., Yangzhou 225200, China)

Abstract: 【Objective】We study the phenological characteristics of the early-flowering stage of several varieties of ornamental crabapple, to explore the internal relationship between the flowering stage and temperature, and to reveal the differences and changes in flowering stability at a variety level. 【Method】Four-year phenological data from 67 varieties of ornamental crabapple were analyzed to determine the stability of multiple ornamental crabapple varieties, and the results of standard deviation of phenology (σ) of multiple varieties of ornamental crabapple were studied using temperature data over many years. 【Result】From 2014 to 2016, there was a strong correlation of the date sequence of early flowering with that of 2013. The σ value of late-flowering varieties was higher than that of early-and mid-flowering varieties. There was a significant negative correlation ($P<0.05$) between the σ value of the early florescence and middle florescence; this correlation was also noted between the σ value of the late florescence and days with temperature below 6℃ from October 1st to December 1st in the year before florescence, between the σ value of the late florescence and days with a temperature below 4℃ ($P<0.05$) from October 1st to February 1st in the year before florescence, and between October 1st to March 1st in the year before florescence. 【Conclusion】A low temperature has an important effect on the stability of ornamental crabapple at the early-flowering stage. The varieties in the early-and mid-flowering stage required a lower temperature than that required at the late-flowering stage, and the time limit for breaking dormancy was more strict. In contrast, the stability of the early-flowering sequence among the late-flowering varieties was lower.

Keywords: ornamental crabapple; florescence phenological order; flowering phenology; low temperature; standard deviation

收稿日期:2019-03-04 修回日期:2020-02-23

基金项目:国家林业和草原局知识产权转化运用项目([2019]14号);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(18)3076)。

第一作者:储吴樾(601170230@qq.com), ORCID(0000-0002-4907-4997)。* 通信作者:张往祥(malus2011@163.com), 教授, ORCID(0000-0002-2647-5608)。

引文格式: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. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201903010.

物候学反映了气候和生物发展的相互作用^[1]。对植物物候的研究可以有效了解植物对环境的适应状况,也为研究气候变化提供重要的参考^[2]。在对植株的多种物候(展叶、花期等)研究中,发现植物的花期更易于受周围环境的变化影响,如树木的年龄结构、干旱、光周期和降水,以及一些微观协同变量方面,包括坡度和树木高度的变化^[3-4],所以越来越多的研究者希望通过花期观测数据来研究花期规律,进而探究植株在不同环境下的生理变化规律^[5-7]。

海棠(*Malus* spp.)为蔷薇科(*Rosaceae*)苹果属(*Malus*)落叶灌木或小乔木,全世界约35种,分布于北温带,我国有21种,多数为重要的果树及砧木或观赏树种^[8]。我国观赏海棠的栽培始于2 000多年前,其种下变种和品种数量繁多,在园林应用上的品种有200多个^[9],最多的报道多达700个品种^[10]。对多品种海棠花期的研究就显得尤为重要。目前对海棠花期规律的研究主要集中在开花习性^[11-12]、花期预测^[13]及花期调控^[10]等方面,但这些研究对多品种海棠多年开花的规律及生理特性并未做出有效的阐述,这会对未来海棠花期调控

的研究及海棠花期预测模型的准确性造成影响。

本研究通过对67个海棠品种的初花期物候数据进行分析,研究其物候规律,探究花期与温度间的内在联系,并在品种水平上揭示花期稳定性差异及其变化规律,为未来多品种海棠花期的预报及建立多品种观赏海棠花期调控模型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省江都市仙女镇(119°55'E, 32°42'N)南京林业大学海棠种质资源圃,属于北亚热带季风气候,四季分明。试验地地势平坦开阔,土壤为沙壤土,土层深厚肥沃且灌排条件良好。年平均气温约14.9℃,年平均降雨量约1 000 mm,无霜期约320 d。

1.2 试验材料

供试海棠品种共67个(表1)。所有品种皆引自美国,每个品种30株,按照2 m×3 m株行距栽植,行间与株间未郁闭,光照充足,小气候条件一致。选取的材料均为5~8年生健康苗木,且3年以上能稳定开花结实的植株。

表1 供试观赏海棠
Table 1 Ornamental crabapple for experiment

编号 No.	品种 variety	编号 No.	品种 variety	编号 No.	品种 variety	编号 No.	品种 variety
1	‘粉冠’ <i>M.</i> ‘Pink Spires’	18	‘龙游路易莎’ <i>M.</i> ‘Louisa Contort’	35	‘红哨兵’ <i>M.</i> ‘Red Sentinel’	52	‘粉红公主’ <i>M.</i> ‘Pink princess’
2	‘阿美’ <i>M.</i> ‘Almey’	19	‘马凯米克’ <i>M.</i> ‘Makamik’	36	‘紫王子’ <i>M.</i> ‘Purple prince’	53	‘时光秀’ <i>M.</i> ‘Show Time’
3	‘春之雪’ <i>M.</i> ‘Spring Snow’	20	‘豪帕’ <i>M.</i> ‘Hopa’	37	‘超甜时光’ <i>M.</i> ‘Sweet Sugartyme’	54	‘薄荷糖’ <i>M.</i> ‘Candymint’
4	‘红衣主教’ <i>M.</i> ‘Cardinal’	21	‘红玉’ <i>M.</i> ‘Red Jade’	38	‘爱丽’ <i>M.</i> ‘Eleyi’	55	‘亚瑟王’ <i>M.</i> ‘King Arthur’
5	‘春之颂’ <i>M.</i> ‘Spring Glory’	22	‘皇家宝石’ <i>M.</i> ‘Royal Gem’	39	‘白色瀑布’ <i>M.</i> ‘White Cascade’	56	‘高原红’ <i>M.</i> ‘Prairifire’
6	日本海棠 <i>M. floribunda</i>	23	‘洋溢’ <i>M.</i> ‘Radiant’	40	‘鲁道夫’ <i>M.</i> ‘Rudolph’	57	‘希利尔’ <i>M.</i> ‘Hillier’
7	‘印第安之夏’ <i>M.</i> ‘Indian Summer’	24	‘斯普伦格教授’ <i>M.</i> ‘Professor Sprenger’	41	‘罗宾逊’ <i>M.</i> ‘Robinson’	58	‘金雨滴’ <i>M.</i> ‘Golden Raindrop’
8	‘完美紫色’ <i>M.</i> ‘Perfect purple’	25	‘百夫长’ <i>M.</i> ‘Centurion’	42	‘垂枝麦当娜’ <i>M.</i> ‘Weeping Madonna’	59	‘罗格’ <i>M.</i> ‘Roger’s Selection’
9	‘芭蕾舞’ <i>M.</i> ‘Ballet’	26	‘熔岩’ <i>M.</i> ‘Molten Lava’	43	‘珊瑚礁’ <i>M.</i> ‘Coralburst’	60	‘黄油果’ <i>M.</i> ‘Butterball’
10	‘草莓果冻’ <i>M.</i> ‘Strawberry Jelly’	27	‘丰盛’ <i>M.</i> ‘Profusion’	44	‘金黄蜂’ <i>M.</i> ‘Golden Hornet’	61	‘灰姑娘’ <i>M.</i> ‘Cinderella’
11	‘凯尔西’ <i>M.</i> ‘Kelsey’	28	‘莱姆’ <i>M.</i> × ‘Lemoinei’	45	‘绣球’ <i>M.</i> ‘Hydrangea’	62	‘金丰收’ <i>M.</i> ‘Harvest Gold’
12	‘丽莎’ <i>M.</i> ‘Lisa’	29	‘皇家美人’ <i>M.</i> ‘Royal Beauty’	46	‘玛丽波特’ <i>M.</i> ‘Mary potter’	63	‘金色冬季’ <i>M.</i> ‘Winter Gold’
13	‘红丽’ <i>M.</i> ‘Red Splendor’	30	‘美果海棠’ <i>M.</i> × <i>zumi</i> ‘Calocarpa’	47	‘李斯特’ <i>M.</i> ‘Liset’	64	‘春之韵’ <i>M.</i> ‘Spring Sensation’
14	‘盛花’ <i>M.</i> ‘Abundance’	31	‘唐·怀曼’ <i>M.</i> ‘Donald Wyman’	48	‘兰斯洛特’ <i>M.</i> ‘Larcelot’	65	‘白兰地’ <i>M.</i> ‘Brandywine’
15	‘东哥’ <i>M.</i> ‘Dolgo’	32	‘珠穆朗玛’ <i>M.</i> ‘Everest’	49	‘金色仙踪’ <i>M.</i> ‘Fairtail Gold’	66	‘火鸟’ <i>M.</i> ‘Firebird’
16	‘红巴伦’ <i>M.</i> ‘Red Baron’	33	‘雪堆’ <i>M.</i> ‘Snowdrift’	50	‘五月欢歌’ <i>M.</i> ‘May’s Delight’	67	‘高原玫瑰’ <i>M.</i> ‘Praire Rose’
17	‘印第安魔术’ <i>M.</i> ‘Indian Magic’	34	‘亚当斯’ <i>M.</i> ‘Adams’	51	‘皇家’ <i>M.</i> ‘Royalty’		

1.3 数据计算与测定

1.3.1 气象数据获取

气象数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),调查时间从2012年的10月1日至2016年5月1日,其中2013年至

2016年的日期皆转化日序数(从每年1月1日记为1,1月2日记为2,以此类推)^[14]。

1.3.2 海棠品种物候判断

海棠物候的观测方法依照《中国物候观测方法》^[15],观测时间为2013—2016年每日13:00—

14:00(植物的各种物候现象通常是在高温之后出现的,13:00—14:00 气温最高),观测内容为初花期(当 10%的植株上少数花的花瓣展开即视为该品种的初花期)。

依据前人的研究,参照 2013 年初花期顺序,分别将各品种观赏海棠划分为早花期品种群(early group,E,1—25 号)、中花期品种群(medium group,M,26—50 号)、晚花期品种群(late group,L,51—67 号)^[12](表 1)。

1.3.3 多品种观赏海棠初花期日期序列变换分析

根据各品种观赏海棠 2013 年初花期起始日期的早晚顺序,将其编码为 1—67(表 1)。之后将已编码的各品种观赏海棠依据 2014—2016 年初花期起始日期的早晚进行排序,并记录其 4 年的编码顺序。由于相关性分析(correlation analysis)具有对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关性密切程度的特点,所以在研究中采用相关性分析对其 4 年的编码顺序进行分析,从而对多品种观赏海棠初花期日期序列变换特点进行研究。

1.3.4 多品种观赏海棠群组稳定性分析

由于标准偏差具有反映一个数据集的离散程

度的特点,所以在研究中采用标准偏差(σ)对多品种观赏海棠群组稳定性进行分析。标准偏差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 / n}。$$

其中: x 表示品种群中单个品种海棠初花期日期(日序), $\bar{x}$ 表示品种群中所有品种海棠初花期日期(日序)的平均值。 n 表示品种群中所拥有多品种海棠的数目。

2 结果与分析

2.1 观赏海棠开花期间天气动态

由气象数据表明,在 4 年调查期间风力较小,且相对平稳,多数时期最大风力为 3~4 级,部分日期风力为 4~5 级和 5~6 级。4 年风力相似,且风力稳定,无大变化。

在 4 年调查期间,最高温度与最低温度之间的温差主要集中在 10~15℃,部分日期温差达到 17℃,4 年温差较为稳定。2013—2016 年各年在 1 月 1 日至 5 月 1 日的温度变化如图 1 所示。

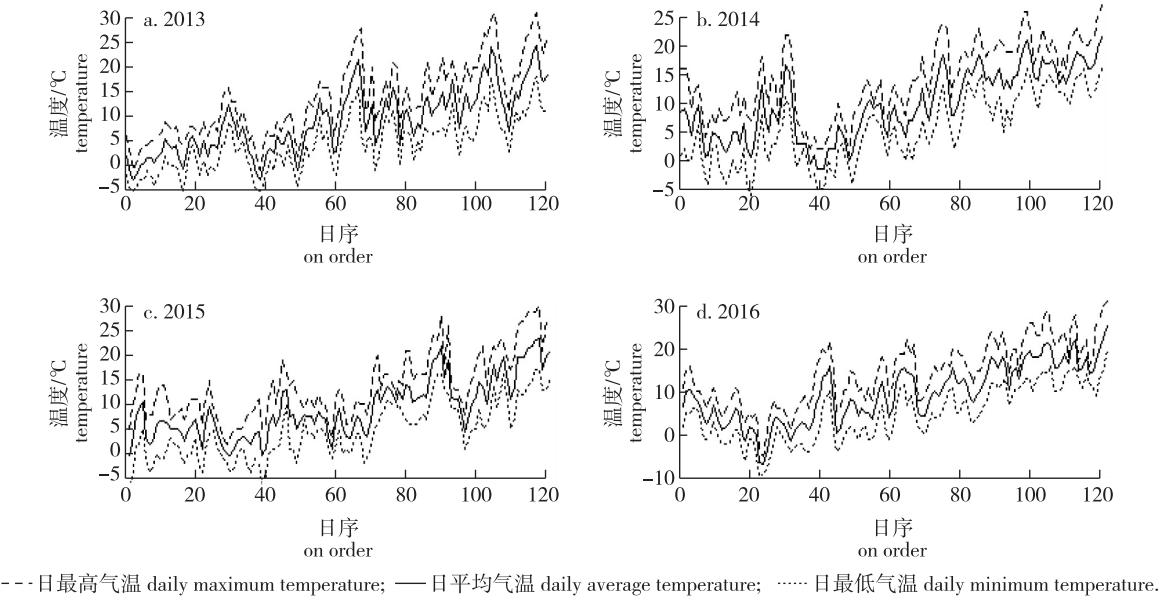


图 1 2013—2016 年各年调查期间(1 月 1 日至 5 月 1 日)气温变化

Fig.1 Changes of daily temperature during the survey period (January 1st to May 1st), 2013–2016

2.2 观赏海棠初花期相关性分析

通过对各品种海棠初花期 2013—2016 年物候的观察与计算,得到不同海棠品种的初花期日序见图 2。各品种海棠各年份初花期物候日期虽然有所波动,但仍具有一定的规律性。对各年份海棠初花期进行相关性分析,结果见表 2。由表 2 可见,

2014—2016 年多品种海棠初花期日期顺序与 2013 年的初花期均有较高的相关性($R_{2014} = 0.970$, $R_{2015} = 0.802$, $R_{2016} = 0.882$);2014 年的初花期日序与 2015—2016 年初花期显著相关($P < 0.01$);2015 年的初花期日序与 2016 年初花期显著相关($P < 0.01$)。

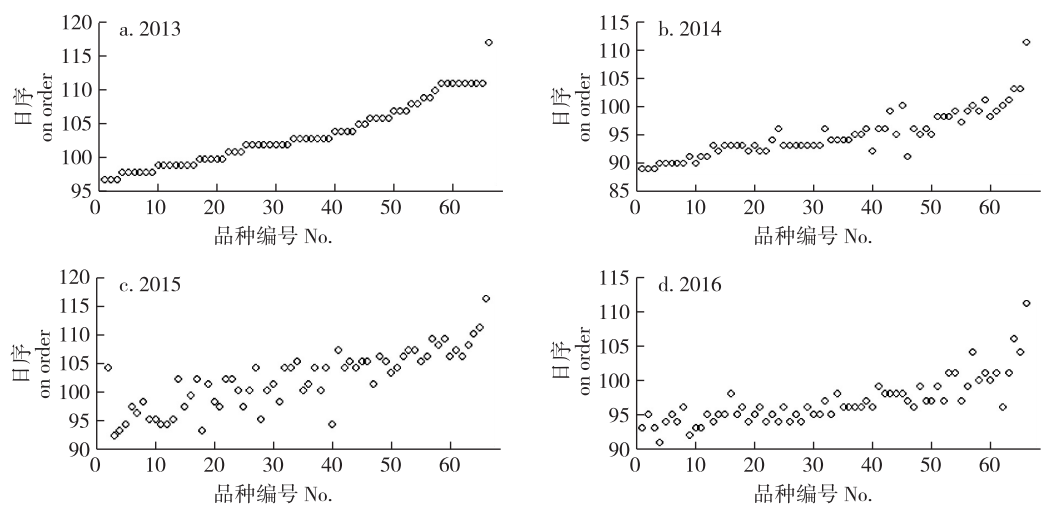


图2 多品种观赏海棠2013—2016年初花期日序

Fig.2 The early flowering date of order of ornamental crabapple cultivars in 2013—2016

表2 各年份海棠初花期相关性分析

年份 year	2013	2014	2015	2016
2013	1			
2014	0.970 **	1		
2015	0.802 **	0.777 **	1	
2016	0.882 **	0.842 **	0.681 **	1

注: **. 在0.01水平(双侧)上显著相关。*. significantly correlated at the 0.01 level (bilateral).

2.3 观赏海棠品种群稳定性计算

对观赏海棠2013—2016年3个品种群(早花期品种群E、中花期品种群M、晚花期品种群L)的标准偏差 σ 值分别进行计算,其结果如图3所示。

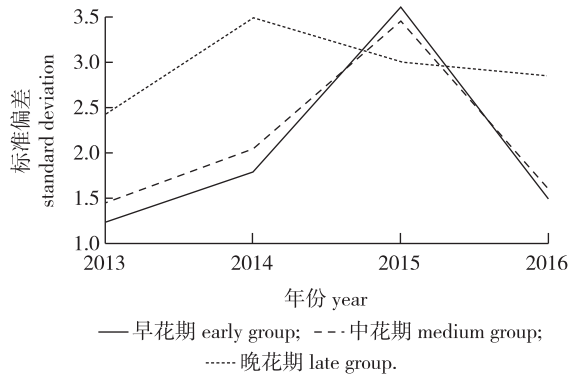


图3 2013—2016年观赏海棠各品种群花期标准偏差

Fig.3 σ value of florescence of each cultivar group in 2013—2016

由图3可以看出,晚花期品种与早、中花期品种具有一定差别,晚花期品种的标准偏差 σ 值大于早、中花

期 σ 值。早、中花期品种均在2015年出现峰值,晚花期品种在2014年出现峰值。这说明在此阶段,品种群物候相对于其他年份离散型较大,品种群内各品种初花期日期变化幅度较大。此外,晚花期品种与早、中花期品种的标准偏差(σ 值)峰值的差异性,说明早、中、晚花期品种分类具有一定的科学性,有效验证了前人研究成果的正确性^[12]。

2.4 观赏海棠品种群与温度相关性分析

参考前人对植物物候与温度关系的研究^[16],将3个品种群的4年 σ 值与开花前一年10月1日至12月1日、开花当年1月1日、2月1日、3月1日小于1~7℃的天数进行相关性分析(表3)。

由表3可以看出,早花期品种群与中花期品种群的 σ 值与开花前一年10月1日至12月1日期间小于6℃的天数呈显著负相关($P<0.05$),而晚花期品种群 σ 值与开花前一年10月1日至开花当年2月1日期间小于4℃($P<0.05$)及开花前一年10月1日至开花当年3月1日期间小于4℃($P<0.05$)的天数呈显著负相关。查阅往年气象数据(来源中国气象数据网)可知开花前一年10月1日至12月1日期间小于6℃的天数较开花前一年10月1日至开花当年3月1日期间小于4℃的天数而言更长。

由此可见,早花期与中花期品种休眠所经历的时长及起点温度相同,休眠期皆在开花前一年的10月1日至12月1日;而晚花期品种休眠期在前一年的10月1日至次年的2月1日。早、中花期品种在休眠阶段比晚花期品种低温时间更长,但低温范围更广。

表 3 观赏海棠品种群 σ 值与温度的天数相关性分析

Table 3 Correlation analysis between σ value of ornamental crabapple groups and date of temperature in 2013–2016													
花期 floreescence	I						II						
	<1 ℃	<2 ℃	<3 ℃	<4 ℃	<5 ℃	<6 ℃	<1 ℃	<2 ℃	<3 ℃	<4 ℃	<5 ℃	<6 ℃	<7 ℃
早花期 early group	-0.326	-0.063	-0.122	-0.122	-0.402	-0.979 *	-0.263	-0.263	0	0.498	0.188	0.137	0.201
中花期 medium group	-0.391	-0.111	-0.135	-0.135	-0.439	-0.961 *	-0.243	-0.243	0.075	0.543	0.233	0.138	0.182
晚花期 late group	-0.141	0.199	0.516	0.516	0.144	-0.093	-0.566	-0.566	0.117	0.017	-0.182	-0.599	-0.705

花期 floreescence	III						IV						
	<1 ℃	<2 ℃	<3 ℃	<4 ℃	<5 ℃	<6 ℃	<1 ℃	<2 ℃	<3 ℃	<4 ℃	<5 ℃	<6 ℃	<7 ℃
早花期 early group	-0.495	-0.687	0.076	-0.437	-0.147	0.018	-0.843	-0.923	-0.914	-0.206	-0.702	-0.543	-0.226
中花期 medium group	-0.572	-0.728	0.021	-0.479	-0.194	-0.043	-0.872	-0.949	-0.898	-0.265	-0.697	-0.557	-0.26
晚花期 late group	-0.893	-0.892	-0.911	-0.955 *	-0.95	-0.943	-0.758	-0.635	-0.431	-0.989 *	-0.663	-0.821	-0.912

注: I 是开花前一年 10 月 1 日—12 月 1 日<1~6℃的天数; II 是开花前一年 10 月 1 日至开花当年 1 月 1 日<1~7℃的天数; III 是开花前一年 10 月 1 日至开花当年 2 月 1 日<1~6℃的天数; IV 是开花前一年 10 月 1 日至开花当年 3 月 1 日<1~7℃的天数。I represents the number of days from October 1st to December 1st<1~6 ℃; II represents the number of days from October 1 to January 1<1~7 ℃; III represents the number of days from October 1st to February 1st<1~6 ℃; IV is the number of days from October 1st to March 1st<1~7 ℃. *.在 0.05 水平(双侧)上显著相关。*.significantly correlated at the level of 0.05 (bilateral).

3 讨 论

3.1 观赏海棠初花期的稳定性

开花物候模式是可遗传的,很可能是物种对选择压力变化的进化响应^[17]。遗传和环境因素影响许多物候事件的开始时间(如进入或打破休眠、繁殖启动),其中环境因素(如气温、降水量、光周期)可能直接控制着物候事件的开始时间^[18]。但有些易于受光周期等条件控制影响的植物,其物候期温度在植物满足临界日照长度后对植物生长调控的作用还是具有一定限制性^[19]。

通过对 2013—2016 年多品种观赏海棠初花期顺序的分析,各品种初花期顺序在 4 年间均会产生一定的变化,且品种间初花期日期离散性各不相同(图 3),但品种间初花期顺序均具有显著相关性($P<0.01$)。1 月 1 日至 5 月 1 日的温度对海棠品种间的稳定性有显著影响($F=0.991,P<0.01$),温度的波动变化直接影响海棠初花期日期的顺序。各品种初花期日期顺序虽然受外界环境因素的变化影响,但由于受海棠内在遗传因素的制约^[12],各品种初花期顺序并没有发生较大的变化。

3.2 观赏海棠品种群对温度的响应

植物物候对气温变化的响应程度不同,导致物候的顺序发生变化,但物候次序的变化只是物候和季节变化对气候变化响应不同步性造成的间接后

果^[20]。对于植物而言,温度对花期变化主要通过两个方面的影响:植物通过积累冷积温来打破休眠,从而进行生长;通过热积温的积累使得植物的芽发育成叶或者花^[21-22]。植株在一定的时间开始冷积温和热积温,并且在冷积温和热积温的组合之后会使得花期发生变化^[23-24],所以低温对花期稳定性变化具有一定的影响^[25]。

由于植物休眠期一般在春季来临前结束^[16],且在 10 月 1 日后温度缓慢下降,所以将植物的休眠起始日期定为 10 月左右。研究表明,低温对初花期稳定性具有显著的影响,低温天数的增加,使 σ 值下降,品种群的离散性减弱。结合前人研究推断:开花前一年的 10 月 1 日至当年 12 月 1 日(或次年的 2 月 1 日)出现的低温环境会使植物休眠时长改变^[14],导致多品种海棠植株内在遗传规律被破坏,使各品种海棠初花期出现顺序改变,所以低温对海棠初花期稳定性有着重要影响。

此外,不同品种群休眠所经历的时长不同,且起点温度也略有不同。早花期与中花期品种休眠所经历的时长及起点温度相同,休眠日期皆在开花前一年的 10 月 1 日至 12 月 1 日,且休眠温度<6℃;而晚花期品种休眠时期在前一年的 10 月 1 日至次年的 2 月 1 日,休眠温度<4℃。根据气象数据,在开花前一年的 10 月 1 日至次年的 12 月 1 日,且<6℃的天数较前一年的 10 月 1 日至次年的

2月1日 $<4^{\circ}\text{C}$ 的天数长。由此看出早、中花期品种在休眠阶段比晚花期品种低温时间更长,且低温范围更广。早、中花期品种相对于晚花期品种而言对低温需求量更大,且休眠时间要求更加严格;但另一方面,4年中在海棠休眠期间经常会发生气候异常现象,由于晚花期休眠时期 $<4^{\circ}\text{C}$ 天数相对较短,无法有效应对气候异常所产生低温时长变化,这难以满足晚花期品种后期生长需求,由此导致晚花期品种 σ 值相对于另外两个品种更高,稳定性更低。

参考文献(reference):

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学[M]. 增订本, 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] FITCHETT J M, GRAB S W, THOMPSON D I. Plant phenology and climate change progress in methodological approaches and application[J]. Prog Phys Geogr, 2015, 39(4): 460–482. DOI: 10.1177/0309133315578940.
- [3] GIENAPP P, HEMERIK L, VISSER M E. A new statistical tool to predict phenology under climate change scenarios[J]. Glob Chang Biol, 2005, 11(4): 600–606. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00925.x.
- [4] OHASHI Y, KAWAKAMI H, SHIGETA Y, et al. The phenology of cherry blossom (*Prunus yedoensis* 'Somei-yoshino') and the geographic features contributing to its flowering[J]. Int J Biometeorol, 2012, 56(5): 903–914. DOI: 10.1007/s00484-011-0496-4.
- [5] EL YAACOUBI A, MALAGI G, OUKABLI A, et al. Global warming impact on floral phenology of fruit tree species in Mediterranean region[J]. Sci Hort, 2014, 180: 243–253. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.10.041.
- [6] 龚春, 王慧, 易金生, 等. 赣无系油茶不同品系花期观测[J]. 经济林研究, 2012, 30(2): 121–124. GONG C, WANG H, YI J S, et al. Observation on florescence of difference Ganwu clones in *Camellia oleifera* [J]. Nonwood For Res, 2012, 30(2): 121–124. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2012.02.031.
- [7] 饶红欣, 彭信海, 王萍, 等. 日本樱花花期观测与规律分析[J]. 经济林研究, 2014, 32(2): 133–135. RAO H X, PENG X H, WANG P, et al. Observation and analysis on flowering phase in *Prunus yedoensis* [J]. Nonwood For Res, 2014, 32(2): 133–135. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2014.02.020.
- [8] 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.
- [9] 楚爱香, 汤庚国. 观赏海棠品种分类研究进展[J]. 生物学通报, 2008, 43(7): 15–17, 封4. CHU A X, TANG G G. Advances in research on classification of ornamental crabapple [J]. Bull Biol, 2008, 43(7): 15–17, cover 4. DOI: 10.3969/j.issn.0006-3193.2008.07.005.
- [10] 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]. J Shandong Agric Univ (Nat Sci Ed), 2008, 39(1): 152–160. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2008.01.033.
- [11] 魏宏亮. 观赏海棠开花节律特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015. WEI H L. Study on flowering rhythm characteristics of ornamental crabapple [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [12] 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 Hort Sin, 2014, 41(4): 713–725. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2014.04.015.
- [13] 孙凡雅, 沈向, 康鸾, 等. 观赏海棠杂交后代萌芽期观察及花期预测的灰色关联度分析[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(4): 51–54. SUN F Y, SHEN X, KANG L, et al. Observation of sprouting stage and grey relational degree analysis on flowering stage forecast of hybrid progenies of crabapple (*Malus* spp.) [J]. J Plant Resour Environ, 2008, 17(4): 51–54. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2008.04.010.
- [14] 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]. Agric For Meteorol, 2017, 240/241: 78–89. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.04.001.
- [15] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16] JOSE E, N O E, NEZ-GO M P M, et al. Chilling and heat requirements of almond cultivars for flowering [J]. Environmental and Experimental Botany, 2003(50): 79–85.
- [17] BRODY A K. Effects of pollinators, herbivores, and seed predators on flowering phenology [J]. Ecology, 1997, 78(6): 1624–1631. DOI: 10.1890/0012-9658(1997)078[1624:EOPHAS]2.0.CO;2.
- [18] FORREST J, MILLER-RUSHING A J. Toward a synthetic understanding of the role of phenology in ecology and evolution[J]. Philos Trans Royal Soc Lond Ser B Biol Sci, 2010, 365(1555): 3101–3112. DOI: 10.1098/rstb.2010.0145.
- [19] KORNER C, BASLER D. Phenology under global warming[J]. Science, 2010, 327(5972): 1461–1462. DOI: 10.1126/science.1186473.
- [20] 仲舒颖, 葛全胜, 郑景云, 等. 近30年北京自然历的主要物候期、物候季节变化及归因[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1217–1225. ZHONG S Y, GE Q S, ZHENG J Y, et al. Changes of main phenophases of natural calendar and phenological seasons in Beijing for the last 30 years [J]. Chin J Plant Ecol, 2012, 36(12): 1217–1225. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2012.01217.
- [21] GUO L, DAI J H, RANJITKAR S, et al. Chilling and heat requirements for flowering in temperate fruit trees [J]. Int J Biometeorol, 2014, 58(6): 1195–1206. DOI: 10.1007/s00484-013-0714-3.
- [22] 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]. Agric For Meteorol, 2015, 201: 1–7. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.10.016.
- [23] HARRINGTON C A, GOULD P. Tradeoffs between chilling and forcing in satisfying dormancy requirements for Pacific Northwest tree species [J]. Front Plant Sci, 2015, 6: 120. DOI: 10.3389/fpls.2015.00120.
- [24] HARRINGTON C A, GOULD P J, STCLAIR J B. Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir [J]. For Ecol Manag, 2010, 259(4): 798–808. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.06.018.
- [25] LINKOSALO T, HANNAK L, PERTTI H. A comparison of phenological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations [J]. Tree Physiology, 2008(28): 1873–1882.