

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.10088

王雪, 李震, 刘艳玲, 梁琼. 迁地保育植物花期物候对迁入地气候变化的响应[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(1): 88~96  
 Wang X, Li Z, Liu YL, Liang Q. Response of *ex-situ* conservation plant flowering phenology to climate change in Wuhan[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38(1): 88~96

# 迁地保育植物花期物候对迁入地气候变化的响应

王雪, 李震, 刘艳玲\*, 梁琼\*

(中国科学院武汉植物园, 武汉 430074)

**摘要:** 以中国科学院武汉植物园内栽培的长果秤锤树(*Sinojackia dolichocarpa* C. J. Qi)、山白树(*Sinowilsonia henryi* Hemsl.)、夏腊梅(*Sinocalycanthus chinensis* Cheng et S. Y. Chang)、紫茎(*Stewartia sinensis* Rehd. et Wils.)和绒毛皂莢(*Gleditsia vestita* Chun et How ex B. G. Li)5种迁地保育植物为对象, 通过2008—2016年观察记录的初花期物候及整个花期长度的数据, 研究花期的年际变化规律及其与迁入地武汉气候因子的相关性。结果显示: (1)从初花期来看, 长果秤锤树的初花期每年提前1.25 d, 紫茎的初花期每年推迟1.35 d, 绒毛皂莢的初花期每年推迟1.22 d。(2)从花期长度来看, 山白树的花期每年增加1.72 d, 夏腊梅的花期每年减少1.62 d, 紫茎的花期每年增加0.32 d。(3)从花期与气候因子的相关性来看, 年降水量、年平均相对湿度、>10℃有效积温、花前>10℃的有效积温是影响这5种植物初花期、花期长度的主要气候因子; 不同物种间影响花期的主要气候因子有所差异。

**关键词:** 迁地保护; 初花期; 花期长度; 气候变化

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)01-0088-09

## Response of *ex-situ* conservation plant flowering phenology to climate change in Wuhan

Wang Xue, Li Zhen, Liu Yan-Ling\*, Liang Qiong\*

(Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In the current study, we analyzed the flowering phenology of five *ex-situ* conserved plants, including *Sinojackia dolichocarpa* C. J. Qi, *Sinowilsonia henryi* Hemsl., *Sinocalycanthus chinensis* Cheng et S. Y. Chang, *Stewartia sinensis* Rehd. et Wils., and *Gleditsia vestita* Chun et How ex B. G. Li, in Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, using meteorological data and interannual variation from 2008 to 2016. Results showed that: (1) Flowering phenology of *Sinojackia dolichocarpa* occurred 1.25 d earlier per year; *Stewartia sinensis* flowering time was delayed by 1.35 d per year; and flowering phenology of *Gleditsia vestita* was delayed by 1.22 d per year. (2) Flowering length for *Sinowilsonia henryi* increased 1.72 d per year; flowering length for *Sinocalycanthus chinensis* decreased 1.62 d per year; and flowering length for *Stewartia sinensis* increased 0.32 d per year. (3) Pearson correlation coefficients were calculated to indicate the relationships among flower phenological periods and related meteorological factors. Results showed that annual precipitation, annual average

收稿日期: 2019-07-10, 退修日期: 2019-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31872136)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (31872136).

作者简介: 王雪(1985-), 女, 硕士, 工程师, 从事园林植物研究(E-mail: xuewang@wbgcas.cn)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: liuyanling@wbgcas.cn; qiongl@wbgcas.cn)。

relative humidity, effective accumulated temperature of more than 10 degrees, and effective accumulated temperature of more than 10 degrees before flowering were correlated with flower phenological, but the main meteorological factors differed from plant to plant.

**Key words:** *Ex-situ conservation; Initial flowering phenology; Flowering duration; Climate change*

迁地保护是物种保育的重要手段。气候是影响植物生长的重要环境因子<sup>[1, 2]</sup>。在植物迁地保育过程中, 迁地物种在迁入地经过多年露地驯化, 会对迁入地自然气候形成特定的生理、形态和行为适应机制<sup>[3, 4]</sup>, 即迁地物种对迁入地年际气候因子的波动响应与物种原产地长期适应所形成的固有习性发生互作, 从而形成或有差异或有规律的生态适应性<sup>[5, 6]</sup>, 其中有性繁殖是判断迁地保育是否成功的关键评价因子。

花期是植物生殖生长的重要阶段, 影响物种的种群数量及其在植物群落中的竞争关系<sup>[7]</sup>。花期物候包括始花期、盛花期和末花期, 是研究植物花期的主要内容, 对植物繁殖具有重要意义。植物花期物候取决于物种对花前积温的内在需求<sup>[8]</sup>。储吴樾等<sup>[9]</sup>对观赏海棠(*Malus* spp.)花期性状的研究发现, 海棠的初花期与有效积温显著相关, 气温升高、花期会提前。孟凡栋等<sup>[10]</sup>研究发现, 在大多数长期地面观测和增温控制实验中, 随着持续增温, 初花期会显著提前。Hart 等<sup>[11]</sup>研究发现, 秋季变暖会延迟下一年的初花期。除温度以外, 水分也是影响植物花期物候的重要因素。相对于温度, 水分是植物物候期提前的关键因素<sup>[12]</sup>。廖碧婷等<sup>[13]</sup>研究发现, 广州地区梅花(*Armeniaca mume* Sieb.)初花期持续天数与该花期物候前 10 ~ 20 d 的降水量呈显著正相关, 而盛花期持续天数与花期物候前 10 ~ 20 d 的降水量呈显著负相关。Craine 和 Galen 等<sup>[14, 15]</sup>认为植物初花期受水分影响较大, 可能与其在繁殖期消耗较多水分有关, 如干旱会缩短花蕾期、开花期。花期物候是植物生殖生长、延续生命、种群拓展的决定性因素。目前有关花期物候与气候因子关系的研究报道较多, 但针对迁地保育植物花期物候的研究较少。覃文更等<sup>[16]</sup>对单性木兰(*Kmeria septentrionalis* Dandy)开花物候与气象因子的相关性进行了研究, 这对单性木兰的就地和迁地保护具有重要意义。宋富强<sup>[17]</sup>对热带引种植物物候对气候变化的响应进行了论述,

指出气候因子是决定迁地植物和引种植物适应性的重要因子。因此, 深入探讨迁地保育植物物候, 尤其是花期物候对迁入地长期气候变化的响应, 对植物的迁地保育具有重要意义。

我们选取在迁入地中国科学院武汉植物园能够正常生长繁殖(即完成整个生活史)的长果秤锤树(*Sinojackia dolichocarpa* C. J. Qi)、山白树(*Sinowilsonia henryi* Hemsl.)、夏腊梅(*Sinocalycanthus chinensis* Cheng et S. Y. Chang)、紫茎(*Stewartia sinensis* Rehd. et Wils.)和绒毛皂莢(*Gleditsia vestita* Chun et How ex B. G. Li)5种迁地保护植物为对象, 研究其初花期及花期长度对迁入地气候因子的响应, 以期为植物的迁地保育提供科学依据。

## 1 研究区域概况

中国科学院武汉植物园位于武汉市东湖风景区, 地处 30°33'N、114°24'E, 海拔 19 ~ 35 m, 属亚热带湿润季风气候, 年均气温 16.3°C, 极端最低温 -18.3°C, 极端最高温 42.7°C, 年均降水量 1282 mm, 多集中在 4 ~ 7 月, 相对湿度 79%。日照总时数 1810 ~ 2100 h, 总辐射量为  $4.37 \times 10^6$  ~  $4.76 \times 10^6$  kJ/m<sup>2</sup>。土壤为湖滨沉积物上发育的中性黏土, pH 值 6.5。植物物候观察在迁入地中国科学院武汉植物园(以下简称武汉植物园)内进行。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

长果秤锤树、山白树、夏腊梅、紫茎和绒毛皂莢5种植物, 自迁入武汉植物园保育已 15 年以上, 期间均能正常开花结实。物候数据来自武汉植物园园艺中心, 记录时间为 2008 ~ 2016 年, 引种信息详见表 1。武汉地区 2007 ~ 2016 年 10 年间的气象数据, 包括温度、降水、湿度、日照时长的每日统计数据等, 均来自武汉市气象局。

表1 5种迁地保育植物的引种信息  
Table 1 Information of five ex-situ conservation plants

物种 Species	引种时间 Collection time	来源地点 Place of collection	经纬度 Latitude / Longitude	海拔 Altitude (m)	植被类型 Vegetation form	光照 Illumination	水分 Water
山白树 <i>Sinowilsonia henryi</i>	2004	陕西省凤县市(县)温江寺镇 (乡)瓦店子村	33°42'9.22"N, 106°31'43.9"E	1390	森林	中性	中性
紫茎 <i>Stewartia sinensis</i>	2004	湖北省宣恩县长潭河侗族乡后 河村七组,七姊妹山小七姊妹山	30°02'17.52"N, 109°43'30.36"E	1378	森林	中性	中性
长果秤锤树 <i>Sinojackia dolichocarpa</i>	2003	湖南省石门县壶瓶山自然保护区	29°59'05"N, 110°27'16"E	700	森林	阳性	干旱
夏腊梅 <i>Sinocalycanthus chinensis</i>	1986	浙江天台县龙溪乡岭里村	30°15'30"N, 119°35'51.23"E	1586	森林	中性	中性
绒毛皂莢 <i>Gleditsia vestita</i>	1985	湖南省长沙市	28°11'20"N, 112°56'40"E	950	森林	中性	中性

## 2.2 物候分析方法

为便于比较不同年份间的物候情况,我们将物候数据转化成物候累积天数,即从每年1月1日至物候发生时的天数。花期长期计算公式为:花期长度 = 末花期 - 初花期。各花期物候指标为:初花期(有5%的花开放);盛花期(有50%的花开放);末花期(还有5%的花未开放)。气候因子为:年降水量( $X_1$ )、年平均相对湿度( $X_2$ )、全年日照时数( $X_3$ )、年平均温度( $X_4$ )、>10℃积温( $X_5$ )、花前>10℃有效积温( $X_6$ )。其中,“花前>10℃有效积温”是指从1月1日起到初花日期之前日平均气温稳定在10℃以上的温度减去10℃后所得温度的总和。

运用拟线性回归方法分析不同年际间的气候变化及物候期变化情况。计算物候期与各气候因子的Pearson相关性,分别以6个气候因子为自变量,以5种迁地保育植物的初花期( $Y_1$ )、花期长度( $Y_2$ )为因变量进行逐步线性回归,舍去系数不显著的自变量,得到最佳回归方程。

所有数据运用SPSS 24和Excel 2016进行统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 武汉地区10年间的气候变化

从2007–2016年气象数据的变化趋势来看(图1),年平均温度没有显著变暖趋势,其中2007–2011年平均气温有小幅下降,2012–2016年平均气温小幅回升,10年间,年平均气温波动平稳(图1:A)。10年间,>10℃的积温呈下降趋

势,平均每年下降10.3℃(图1:B);年降水量呈上升趋势,平均每年增加56.2 mm(图1:C);年平均相对湿度有小幅上升,平均每年增加1.4%(图1:D);年日照时数总体较平稳,略有下降趋势,但2013年日照时数波动大,明显较其他年份高(图1:E)。

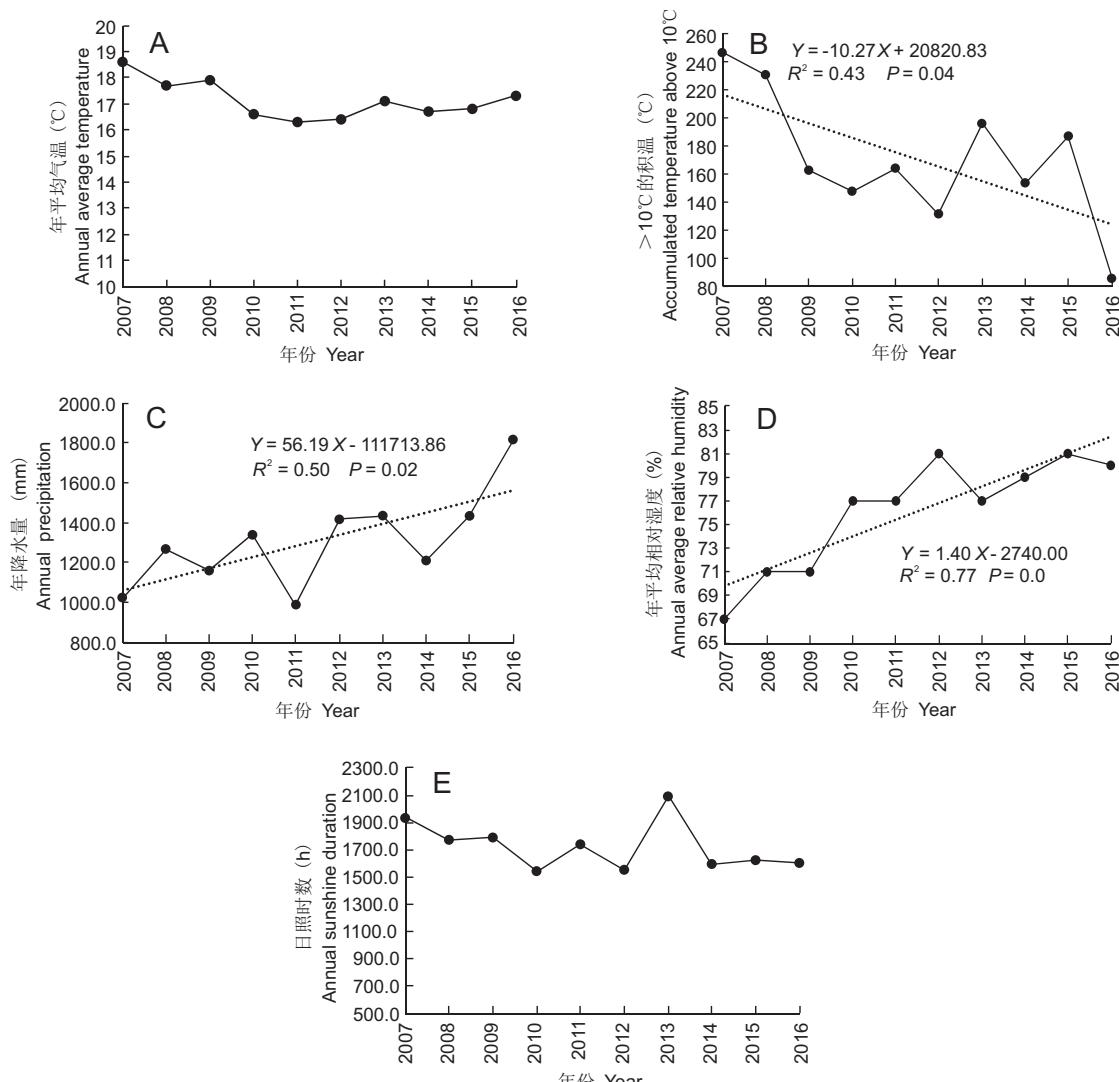
### 3.2 5种迁地保育植物花期物候对气候因子的响应

#### 3.2.1 5种迁地保育植物初花期物候的年际变化趋势

从5种迁地保育植物2008–2016年初花期物候的年际变化趋势来看(图2),紫茎初花期每年推迟1.35 d;长果秤锤树初花期每年提前1.25 d;绒毛皂莢初花期每年推迟1.22 d。夏腊梅初花期有小幅波动,集中分布108~120 d内( $P > 0.05$ )。山白树初花期在2008–2014年间较稳定,在91~95 d之间,但2015年的初花期显著上升到104 d,2016年显著下降到75 d( $P > 0.05$ )。

#### 3.2.2 5种迁地保育植物初花期物候对气候因子的响应

根据5种迁地保育植物初花期物候数据,计算其与6种气候因子的Pearson相关性。结果显示(表2),长果秤锤树、山白树的初花期与年降水量呈显著负相关、与>10℃积温呈显著正相关;紫茎初花期与年降水量呈极显著正相关、与年平均相对湿度呈显著正相关、与>10℃积温呈显著负相关;绒毛皂莢初花期与年降水量、年平均相对湿度呈显著正相关;夏腊梅初花期与6种气候因子的相关性不显著。



A: 年平均气温；B: >10°C积温；C: 年降水量；D: 年平均相对湿度；E: 年日照时数。

A: Annual average temperature; B: Accumulated temperature above 10°C; C: Annual precipitation; D: Annual average relative humidity; E: Annual sunshine duration.

图1 武汉地区2007–2016年气候变化趋势  
Fig. 1 Meteorological data of Wuhan during 2007–2016

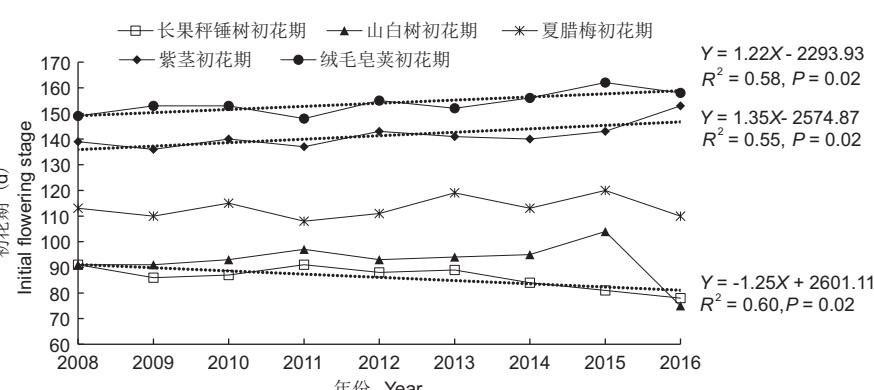


图2 5种迁地保育植物初花期的年际变化趋势

Fig. 2 Interannual variation trends in initial flowering stage of five *ex-situ* conservation plants

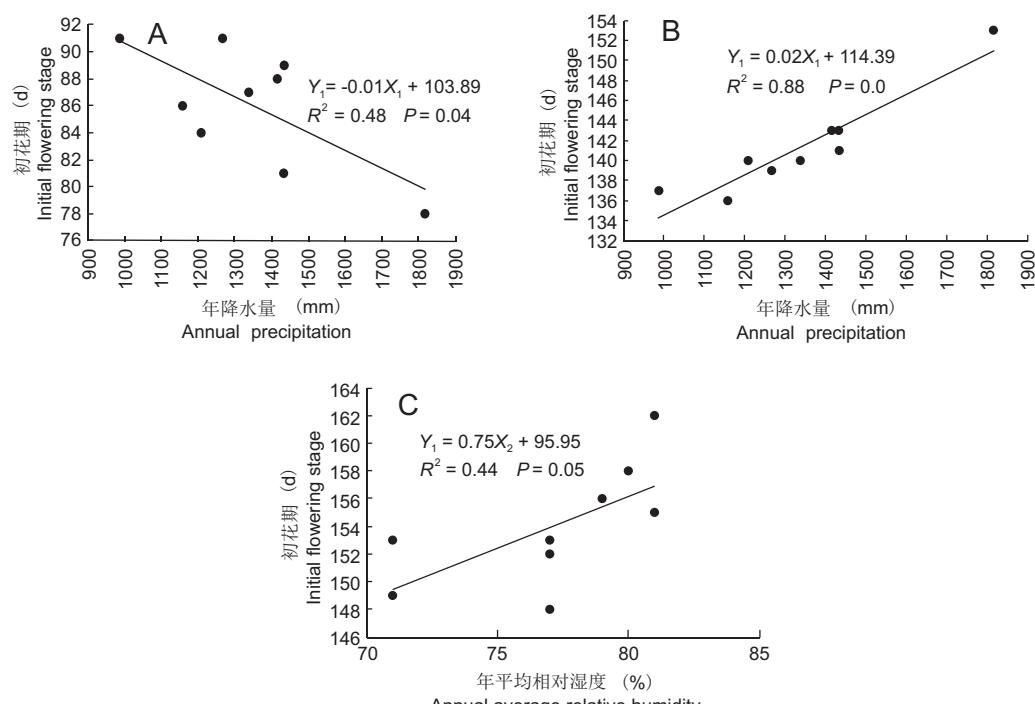
分别以6种气候因子为自变量,以迁地保育植物初花期为因变量,进行逐步回归分析。结果显示(图3),长果秤锤树初花期与年降水量呈线性负相关,年降水量每增加100 mm,初花期提前1.3 d(图3: A);紫茎初花期与年降水量呈线性正相关,>10℃积温对年降水量

年降水量每增加100 mm,初花期推迟2 d(图3: B);绒毛皂莢初花期与年平均相对湿度呈线性正相关,年平均相对湿度每增加10%,初花期推后7.5 d(图3: C)。山白树初花期与年降水量、>10℃积温呈非线性相关。紫茎初花期对年降水量

表2 5种迁地保育植物初花期与气候因子的相关性  
Table 2 Pearson correlation analysis of initial flowering stage phenology of five ex-situ conservation plants and meteorological factors

物种 Species	年降水量 Annual precipitation	年平均相对湿度 Annual average relative humidity	年日照时数 Annual sunshine duration	年平均气温 Annual average temperature	>10℃积温 Accumulated temperature above 10℃	花前>10℃有效积温 Effective accumulated temperature above 10℃ before flowering
长果秤锤树 <i>Sinojackia dolichocarpa</i>	-0.70*	-0.52	0.43	-0.10	0.61*	0.44
山白树 <i>Sinowilsonia henryi</i>	-0.61*	0.08	0.09	-0.41	0.61*	0.17
夏蜡梅 <i>Sinocalycanthus chinensis</i>	0.23	0.13	0.30	0.05	0.56	-0.01
紫茎 <i>Stewartia sinensis</i>	0.94**	0.60*	-0.31	-0.02	-0.64*	0.57
绒毛皂莢 <i>Gleditsia vestita</i>	0.61*	0.66*	-0.44	-0.08	-0.39	0.26

Notes: \*, P < 0.05; \*\*, P < 0.01.



A: 长果秤锤树(*Sinojackia dolichocarpa*)；B: 紫茎(*Stewartia sinensis*)；C: 绒毛皂莢(*Gleditsia vestita*)。

图3 3种迁地保育植物初花期与2种气候因子的相关性  
Fig. 3 Linear-regression analysis of initial flowering stage of three ex-situ conservation plants and two meteorological factors

的变化比长果秤锤树更敏感。

### 3.3 5种迁地保育植物花期长度与气候因子的关系

#### 3.3.1 5种迁地保育植物花期长度的年际变化趋势

对5种迁地保育植物的花期长度与各年份进行拟线性回归分析,结果显示(表3),山白树花期长度每年增加1.72 d;夏蜡梅花期长度每年减少1.62 d;紫茎花期长度每年增加0.32 d。长果秤锤树、绒毛皂荚花期长度在各年份间变化趋势不显著。2016年长果秤锤树花期长度降到最低为16 d。

#### 3.3.2 5种迁地保育植物花期长度与气候因子的关系

对5种迁地保育植物花期长度与6种气候因子的相关性分析结果显示(表4),年降水量、年平均相对湿度、>10℃积温、花前>10℃有效积温是影响花期长度的主要气候因子。长果秤锤树花期长度与>10℃积温呈显著正相关;山白树花期长度与年降水量、年平均相对湿度呈显著正相关,与>10℃积温呈显著负相关;夏蜡梅花期长度与年降水量呈

极显著负相关;紫茎的花期长度与年平均相对湿度呈显著正相关,与>10℃积温呈显著负相关;绒毛皂荚花期长度与花前>10℃有效积温呈极显著正相关。

分别以6种气候因子为自变量,以5种迁地保育植物花期长度为因变量,进行逐步回归分析,结果显示(图4),>10℃积温与长果秤锤树花期长度呈线性正相关,>10℃积温每增加10℃,长果秤锤树花期增加1.3 d(图4:A);山白树花期长度与年降水量呈线性正相关,年降水量每增加100 mm,花期增加1.7 d(图4:B);夏蜡梅花期长度与年降水量呈线性负相关,年降水量每增加100 mm,花期减少2.1 d(图4:C);紫茎花期长度与年平均相对湿度呈线性正相关,与>10℃积温呈线性负相关,年平均相对湿度每增加10%,花期增加2.3 d,而>10℃积温每增加10℃,花期减少0.2 d(图4:E,F);绒毛皂荚花期长度与花前>10℃有效积温呈线性正相关,花前>10℃有效积温每增加10℃,绒毛皂荚花期长度增加0.3 d(图4:D)。

表3 5种迁地保育植物花期长度年际变化拟线性回归

Table 3 Linear regression fitting of interannual variation in flowering length of five ex situ conservation plants

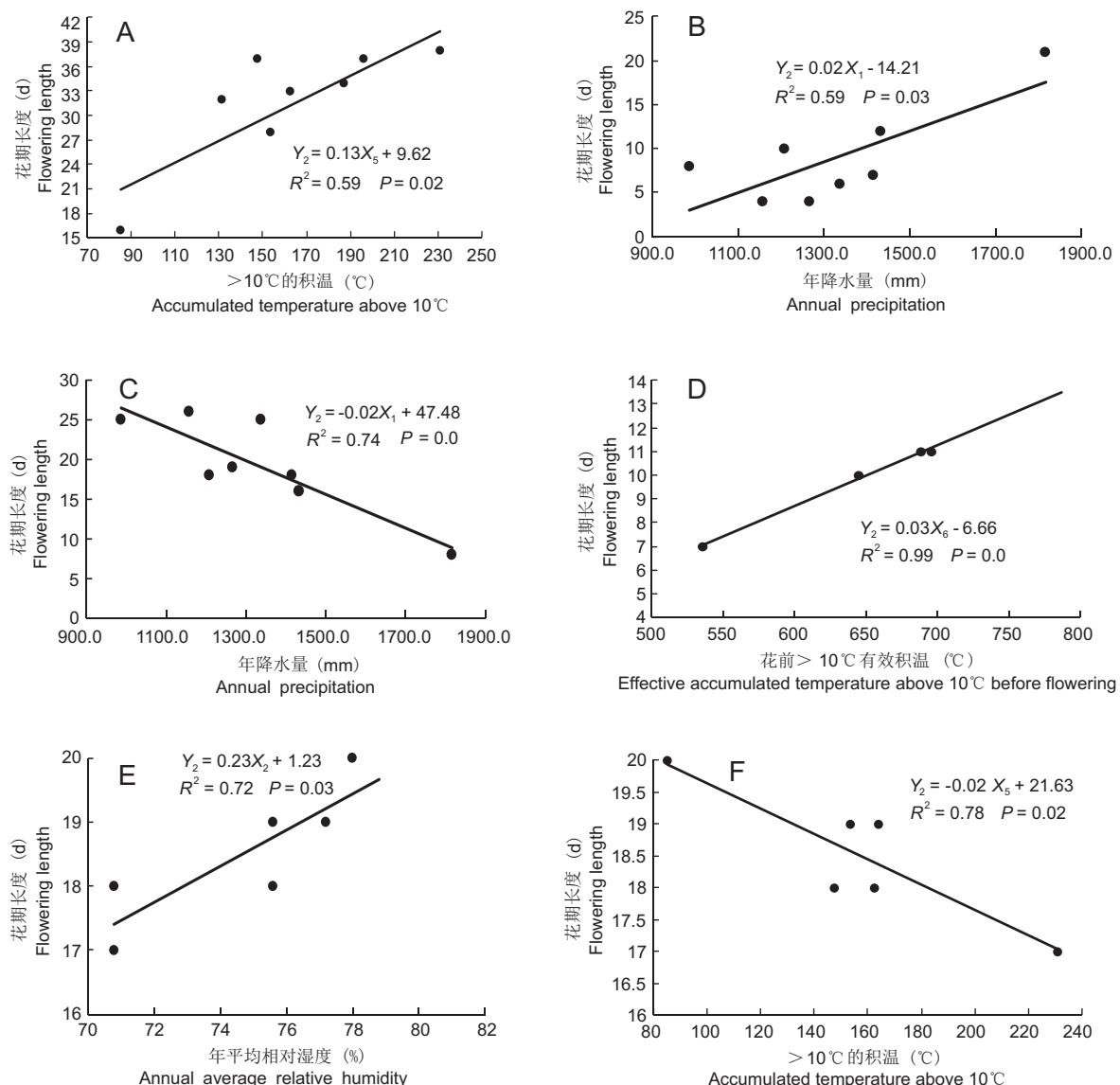
物种 Species	花期长度年际变化拟线性回归方程 Linear fitting results of flowering length	R <sup>2</sup>	差异显著性 P-value
长果秤锤树 <i>Sinojackia dolichocarpa</i>	-	-	> 0.05
山白树 <i>Sinowilsonia henryi</i>	$Y = 1.72X - 3442.37$	0.79	0.00
夏蜡梅 <i>Sinocalycanthus chinensis</i>	$Y = -1.62X - 3271.73$	0.59	0.01
紫茎 <i>Stewartia sinensis</i>	$Y = 0.32X - 618.89$	0.86	0.01
绒毛皂荚 <i>Gleditsia vestita</i>	-	-	> 0.05

表4 5种迁地保育植物花期长度与气候因子的相关性

Table 4 Pearson correlation analysis between flowering length of five ex-situ conservation plants and meteorological factors

物种 Species	年降水量 Annual precipitation	年平均相对湿度 Annual average relative humidity	年日照时数 Annual sunshine duration	年平均气温 Annual average temperature	>10℃积温 Accumulated temperature above 10℃	花前>10℃有效积温 Effective accumulated temperature above 10℃ before flowering
长果秤锤树 <i>Sinojackia dolichocarpa</i>	-0.35	-0.41	0.33	0.14	0.77 *	0.39
山白树 <i>Sinowilsonia henryi</i>	0.77 *	0.64 *	-0.41	-0.09	-0.67 *	-0.41
夏蜡梅 <i>Sinocalycanthus chinensis</i>	-0.86 **	-0.53	0.04	-0.09	0.34	0.21
紫茎 <i>Stewartia sinensis</i>	0.46	0.85 *	-0.46	-0.40	-0.88 *	0.10
绒毛皂荚 <i>Gleditsia vestita</i>	0.24	0.32	0.27	0.09	0.25	0.99 **

Notes: \*, P < 0.05; \*\*, P < 0.01.



A: 长果秤锤树(*Sinojackia dolichocarpa*)；B: 山白树(*Sinowilsonia henryi*)；C: 夏蜡梅(*Sinocalycanthus chinensis*)；D: 绒毛皂莢(*Gleditsia vestita*)；E, F: 紫茎(*Stewartia sinensis*)。

图4 5种迁地保育植物花期长度与4种气候因子的相关性

Fig. 4 Linear regression of flowering length of five *ex-situ* conservation plants and four meteorological factors

## 4 讨论

植物物候存在空间分布差异，不同气候区对植物物候的影响因素有所不同，李晓婷等<sup>[2]</sup>认为，在亚热带季风气候区，水分和温度的变化是影响植物物候的重要因素。本文结果与之基本一致，武汉地处亚热带季风气候区，通过对武汉植物园内5种迁地保育植物花期物候及6种气候因子的分析，发现温度和水分是影响5种迁地保育植物花期物候的重要因子，并以不同的表现形式影响植物花期。5

种迁地保育植物引种地和种源地分别属于不同的气候区，但被迁入武汉后主要受迁入地气候的影响，说明这5种迁地保育植物可以在一定程度上适应迁入地的气候，但植物的这种响应策略在引入地和种源地之间有什么不同，尚不知晓。

Craine等<sup>[14]</sup>认为植物初花期受水分影响较大，这可能与植物在繁殖期会消耗较多水分有关。我们对5种迁地保护植物初花期物候与6种气候因子的相关性分析发现，影响长果秤锤树、紫茎、绒毛皂莢初花期的重要气候因子是年降水量和年均相对湿

度, 说明相对于温度来说, 迁入地水分因子是影响以上3种保育植物初花期的重要气候因子, 但这种响应并不存在一致性。

植物花期的延长与缩短是由初花期和末花期共同决定, 花期长度及花期对气候因子变化的响应规律与物种初花期与末花期均有关系。水分和温度对本研究5种迁地保育植物花期长度均存在不同程度的影响, 但每种植物的影响因子及其响应方式并不相同。

陶泽兴等<sup>[18]</sup>研究显示, 在华中地区物候观测站点的木本植物花期呈缩短趋势, 但本研究5种迁地保育植物中, 只有夏蜡梅8年的物候数据显示花期有缩短趋势, 而山白树、紫茎花期则均有一定程度的延长。植物的花期物候在很大程度上是由其遗传因子决定的, 而花期长短在各年份间出现的差异是由气候因子的变化所引起的<sup>[19, 20]</sup>。陈莉等<sup>[21]</sup>研究认为, 花期物候长度对引入地气候年际波动有一定的耐受性。本研究对花期长度年际变化趋势的分析发现, 长果秤锤树、绒毛皂荚花期长度年际变化并不显著, 说明这2种植物的花期长度对气候因子变化也有一定的耐受性, 花期物候可能会随气候因子的改变而波动, 但不影响花期长度, 其自身的遗传稳定性在一定程度上为植物的异地繁殖提供了保障。

## 参考文献:

- [1] Wang H, Dai J, Rutishauser T, Gonsamo A, Wu C, Ge Q. Trends and variability in temperature sensitivity of lilac flowering phenology [J]. *J Geophys Res-Biogeo*, 2018, 123(3): 1–11.
- [2] 李晓婷, 陈骥, 郭伟. 不同气候类型下植物物候的影响因素综述[J]. 地球环境学报, 2018, 9(1): 16–27.  
Li XT, Chen J, Guo W. A review of the influence factors of plant phenology under different climate types [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(1): 16–27.
- [3] Lustenhouwer N, Wilschut RA, Williams JL, van der Putten WH, Levine JM. Rapid evolution of phenology during range expansion with recent climate change [J]. *Glob Chang Biol*, 2018, 24(2): 534–544.
- [4] 朱慧芬, 张长芹, 龚询. 植物引种驯化研究概述[J]. 广西植物, 2003, 23(1): 52–61.  
Zhu HF, Zhang CQ, Gong X. A summary on plant introduction and acclimatization research [J]. *Guizhou Botany*, 2003, 23(1): 52–60.
- [5] Razanajatovo M, Föhr C, Kleunen MV, Fischer M. Phenological shifts and flower visitation of 185 lowland and alpine species in a lowland botanical garden [J]. *Alpine Bot*, 2018, 28(1): 23–33.
- [6] 赵俊斌, 张一平, 宋富强, 许再富, 肖云来. 引种保护植物对西双版纳极端冷年的春季物候响应[J]. 植物学报, 2010, 45(3): 435–443.  
Zhao JB, Zhang YP, Song FQ, Xu ZF, Xiao YL. Spring phenology of introduced species in response to extreme chilliness in Xishuangbanna tropical botanical garden [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(4): 435–443.
- [7] Willis CG, Ruhfel B, Primack RB, Miller-Rushing AJ, Davis CC. Phylogenetic patterns of species loss in Thoreau's woods are driven by climate change [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2008, 105(44): 17029–17033.
- [8] Elisabeth B, Andreas H. Spring flowering response to climate change between 1936 and 2006 in Alberta, Canada [J]. *Bioscience*, 2011, 61: 514–524.
- [9] 储吴樾, 张往祥, 范俊俊. 观赏海棠花期性状与有效积温的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(2): 153–159.  
Chu WY, Zhang WX, Fan JJ. The relationship between flowering characteristics and the effective accumulated temperature in ornamental crabapple [J]. *Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2018, 47(2): 153–159.
- [10] 孟凡栋, 周阳, 崔树娟, 王奇, 斯确多吉, 汪诗平. 气候变化对高寒区域植物物候的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(4): 498–507.  
Meng FD, Zhou Y, Cui SJ, Wang Q, Si QDQ, Wang SP. Effects of climate changes on plant phenology at high-latitude and alpine regions [J]. *University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(4): 498–507.
- [11] Hart R, Salick J, Ranjikar S, Xu JC. Herbarium specimens show contrasting phenological responses to Himalayan climate [J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(29): 10615–10619.
- [12] Taeger S, Sparks T H, Menzel A. Effects of temperature and drought manipulations on seedlings of *Scots pine* provenances [J]. *Plant Biology* (Stuttgart, Germany), 2015, 17(2): 361–372.
- [13] 廖碧婷, 黄俊, 李少群, 谢智勇, 王四化, 林蝶, 成明. 广州地区梅花开花期与气象因子的关系[J]. 广东气象, 2018, 40(5): 62–64.  
Liao BT, Huang J, Li SQ, Xie ZY, Wang SH, Lin M, Chen M. Relationship between plum flowering phenology and meteorological factors in Guangzhou [J]. *Guangdong Meteorology*, 2018, 40(5): 62–64.
- [14] Craine JM, Wolkovich EM, Towne EG, Kembel SW. Flowering phenology as a functional trait in a tallgrass prairie [J]. *New Phytol*, 2012, 193(3): 673–682.

- [15] Galen C. Why do flowers vary? [J]. *BioScience*, 1999, 49(8): 631.
- [16] 翟文更, 翟国乐, 翟文渊, 黄承标, 韦爽姿, 韦国富. 单性木兰开花物候与气象因子的相关性分析[J]. 西部林业科学, 2012, 41(5): 100–103.  
Qin WG, Qin GL, Qin WY, Huang CB, Wei SZ, Wei GF. Correlation analysis of flowering phenology of *Kmeria septentrionalis* and meteorological factors[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2012, 41(5): 100–103.
- [17] 宋福强. 热带引种植物物候和生长量特征及对气候变化的响应[D]. 西双版纳: 中国科学院西双版纳植物园, 2007.
- [18] 陶泽兴, 仲舒颖, 葛全胜, 戴君虎, 徐韵佳, 王焕炯. 1963–2012年中国主要木本植物花期长度时空变化[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 53–63.  
Tao ZX, Zhong SY, Ge QS, Dai JH, Xu JY, Wang HJ. Spatiotemporal variations in flowering duration of woody plants in China from 1963 to 2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 53–63.
- [19] 肖宜安, 何平, 李晓红. 濒危植物长柄双花木开花物候与生殖特性[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 14–21.
- Xiao YA, He P, Li XH. The flowering phenology and reproductive features of the endangered plant *Disanthus cercidifolius* var. *longipes* H. T. Chang (Hamamelidaceae)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 14–21.
- [20] 张毅, 敖妍, 刘觉非, 赵磊磊, 张永明. 文冠果物候期对环境因子的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(5): 30–36.  
Zhang Y, Ao Y, Liu JF, Zhao LL, Zhang YM. Response of phenophase of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge to environmental factors[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, 43(5): 30–36.
- [21] 陈莉, 石雷, 崔洪霞, 张爱英, 张德山, 王玲, 夏菲. 荚蒾属植物花期物候及生长对引种地年际气候波动的响应[J]. 植物学报, 2012, 47(6): 645–653.  
Chen L, Shi L, Cui HX, Zhang AY, Zhang DS, Wang L, Xia F. The response of flowering phenology and growth of viburnum to interannual weather fluctuation in an introduction habitat[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(6): 645–653.

(责任编辑: 张平)