

孙明,徐敏,高苹,等,2021. 气象条件对悬铃木始花期的影响分析及预报模型构建——以江苏兴化为例[J]. 气象,47(7):862-871. Sun M,Xu M,Gao P,et al,2021. Analysis of meteorological affecting factors and construction of prediction model for first-flowing date of platanus acerifolia: a case study based on the situation in Xinghua, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon,47(7):862-871(in Chinese).

气象条件对悬铃木始花期的影响分析及预报模型构建 ——以江苏兴化为例^{*}

孙 明¹ 徐 敏² 高 苹² 艾文文¹ 张志薇³

1 江苏省气象服务中心,南京 210008

2 江苏省气候中心,南京 210008

3 江苏省气象科学研究所,南京 210009

提 要: 春季二球悬铃木(以下简称悬铃木)新生花粉和宿存球果脱落产生的果毛,既危害人体健康也为城市清洁带来压力,开展始花期预报有利于易敏人群提前做好防护准备,并可为园林部门适时喷洒植物生长抑制剂提供理论依据。以江苏兴化悬铃木始花期研究对象,选取 1990—2020 年的物候观测数据和同期气象观测资料,分析其年际变化趋势,筛选影响始花期的关键气象因子,采用通径分析法进一步明确各关键气象因子对始花期的定量影响,并建立多元回归预报模型;同时统计分析始花期有效积温阈值,基于春季积温模型进行预报,并对比较检验两种模型的预报效果。结果表明:在气候变暖背景下兴化悬铃木始花期呈提前趋势,每 10 年提前约 2 d;光照、风速和降水对开花早晚影响较小,但 2 月下旬雨水充沛、空气湿润则有利于开花提前;温度是影响开花早晚的最重要指标,冬季日最高气温对始花期的影响程度高于日最低气温,平均地表温度的影响程度略高于平均气温,但到了 3 月气温回暖后则反之;冬季平均地表温度、冬季平均气温以及 3 月中旬日最低气温 $<10^{\circ}\text{C}$ 的天数在直接、间接效应方面均对始花期具有最大的影响力,在此基础上建立的逐步回归预报模型拟合准确率达 89.3%,具有较高的可靠性和业务应用价值。

关键词: 二球悬铃木,始花期,通径分析,气象因子

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.009

Analysis of Meteorological Affecting Factors and Construction of Prediction Model for First-Flowing Date of Platanus Acerifolia: A Case Study Based on the Situation in Xinghua, Jiangsu Province

SUN Ming¹ XU Min² GAO Ping² AI Wenwen¹ ZHANG Zhiwei³

1 Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008

2 Climate Centre of Jiangsu Province, Nanjing 210008

3 Jiangsu Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009

Abstract: In April, the pollen and flying fruit hair from *Platanus acerifolia* endanger human health and bring pressure to city cleaning. The prediction of the first-flowering date (FFD) is conducive to the protection of allergy groups, and can provide theoretical basis for the timely spraying of plant growth inhibitor by the garden department. Taking the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua, Jiangsu Province as the research

^{*} 江苏省气象局科研面上项目(KM201906、KM202009)和国家重点研发计划(2019YFD1002201)共同资助

2020 年 12 月 28 日收稿; 2021 年 5 月 25 日收修定稿

第一作者:孙明,主要从事专业气象服务研究. E-mail:369401602@qq.com

通讯作者:徐敏,主要从事农业气象关键技术研究. E-mail:amin0506@163.com

object, this paper analyzes the annual variation trend from 1990 to 2020 and selects the leading meteorological factors which are significantly related to the FFD by using the observation data and synchronous meteorological date. Moreover, the effect of the leading meteorological factors is quantitatively specified by path analysis and the regression prediction model is constructed. In addition, the effective accumulated temperature threshold is statistically analyzed, and the prediction is made based on the SW accumulative temperature model. Finally, the prediction effects of the two models are evaluated. The results show that under the background of climate warming, the FFD shows a tendency of advancing year by year, about 2 days every 10 years. Light, wind speed and precipitation have little impact on the FFD, but in late February, plenty of rain and moist air are conducive to early flowering. Temperature is the main impact factor. The impact of daily maximum temperature on the FFD is higher than that of daily minimum temperature, and the impact of average surface temperature is higher than that of average temperature. However, the situation is opposite when temperature begins to warm up from March. The average winter surface temperature, the average winter air temperature and the number of days in mid-March with daily minimum air temperature $<10^{\circ}\text{C}$ all have the significant impact on the FFD directly or indirectly. The fitting result of the regression prediction model which is established based on these factors is 89.3%. Therefore, this prediction model has high reliability and operational application value.

Key words: *Platanus acerifolia*, first-flowering date, path analysis, meteorological factor

引言

二球悬铃木(*Platanus acerifolia*, 俗称法国梧桐)作为世界著名行道树,自20世纪初起,被上海、南京、杭州、青岛、武汉、郑州、西安等城市大量引种。以南京为例,据园林局统计主城区现存大约29400棵二球悬铃木(以下简称悬铃木)。悬铃木球果当年会宿存枝头,次年4—5月脱落开裂并产生大量果毛,据统计一个球果产生的果毛可超过200万~500万根,一株十多年生、胸径为10 cm的未经修剪的悬铃木,每年可结200~400个球果(乔士义和庞品珍,1985)。此时也正值花期,大量新生花粉以及果毛从树上飘落下来危害人体健康也为城市清洁工作带来压力。悬铃木花粉中已被鉴定出的致敏原蛋白有三种,它们可以通过粒径为 $0.1\sim1.0\mu\text{m}$ 的花粉微颗粒形式被释放出来,进入人体诱发炎症(沈家慧等,2017),李明震等(1998)在武汉地区进行一年的花粉样本采集以及对136例花粉症患者皮试后初步判明悬铃木是武汉地区春季最主要致敏花粉,是花粉症的主要病因。悬铃木果毛中部直径为 $33\mu\text{m}$,尖端和尾部更细,小于人体表皮毛孔平均直径,很容易进入毛孔诱发皮肤瘙痒等不适,同时果毛硬脆易断裂,不慎落入眼中或吸入肺中能引发角膜炎、哮喘、咳嗽等疾病(曹剑波等,2008)。

屈李辉(2013)研究发现悬铃木雌花无论是否完成授粉都会继续发育成球果,且球果也都会产生果毛。为解决悬铃木果毛污染问题,国内外学者做了各种探索和尝试,主要包括无果品系选育、修剪嫁接控果、化学药剂处理和基因工程改良等方法,其中化学药剂处理对时间的要求比较严格。因此,开展气象条件对开花开始时间(始花期)的影响分析进而开展始花期预报,可为园林部门合理安排喷洒植物生长抑制剂,为花粉过敏人群及医疗机构提前做好预防和治疗准备以及为环卫部门做好道路清洁管理提供理论依据,具有较高实用价值。

木本植物花期与气象条件间的关系及花期预测已有相关研究,刘流和甘一忠(2006)研究发现桂林桃花迟早年与1月下旬到2月下旬气温指标和上年冬季降水量显著相关,毛明策等(2005)和郭睿(2016)均指出入春后 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温与树木花期具有极显著相关性,傅玮东等(2011)探讨了日平均气温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日对杏树开花期的影响,刘璐等(2020)发现在影响中国北方主产地苹果始花期的关键气候因子中平均气温和平均地温为主导因子,El Yaacoubi et al(2019)建立了地中海地区苹果开花的温度变化验证模型,李德等(2020)基于随机森林算法开展砀山酥梨始花期预报。但目前针对悬铃木的研究报道较少,Mimet et al(2009)基于对法国樱花和悬铃木的花期物候观测发现热岛效应导致城市内植物花期

提前,且花期与前 15 d 的平均最低气温密切相关。吕爱丽等(2020)发现临汾常见木本植物中悬铃木对气温变化响应最为敏感,在气候变暖背景下,其春季物候期提前,秋季物候期推迟。在借鉴相关研究成果的基础上,以江苏省兴化市悬铃木的始花期为研究对象,统计分析其年际变化趋势,筛选影响始花期的关键气象因子,采用通径分析法进一步明确各关键气象因子对始花期的影响程度,并建立逐步回归预报模型。同时统计分析始花期有效积温阈值,基于春季积温(spring warming, SW)模型进行预报,并对比检验两种模型的预报效果。

1 资料和方法

1.1 资料来源

兴化站是江苏地区悬铃木连续物候观测记录最长的站点,选取其 1990—2020 年共 31 a 的观测数据(其中 1990—2017 年的数据用于建立预报模型,2018—2020 年的数据用于试报检验)作为本文悬铃木物候资料。悬铃木物候观测地段位于兴化市城区人民公园内(32°56'N、119°50'E),树高约为 7 m,胸径约为 45 cm,物候观测按《农业气象观测规范》(国家气象局,1993)中有关规定执行,其中,自规范 1994 年执行起新增了芽膨大期的观测。

气象观测资料来源于兴化气象观测站 1989 年 12 月至 2020 年 4 月的逐日气象资料,要素包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、相对湿度和平均地表温度(0 cm)等。

1.2 资料处理与分析方法

1.2.1 影响始花期的气象因子初筛

刘震等(2002;2006)的试验研究表明悬铃木具有浅冬休眠特性,其冬芽休眠解除的低温范围较大,5 与 12℃具有同样效果。汤珧华等(2019)通过物候观察发现悬铃木休眠芽在 10℃开始萌动,15~25℃时花芽分化。可见 5℃和 10℃是悬铃木关键生育期温度界限。选择年内 5 d 滑动平均气温超过 0、5 和 10℃的初日,以及逐月(上年 12 月至当年 3 月)、逐旬(当年 1 月上旬至 4 月中旬)内各气象因子与始花期进行相关性分析,通过皮尔逊系数的大小和显著性水平检验初步筛选出对始花期影响较大的气象因子。

采用儒略日(Julian days)换算方法,将悬铃木生长发育日期转化为日序数,即每年的 1 月 1 日记为 1,1 月 2 日记为 2,以此类推。

1.2.2 主要气象影响因子通径分析

通径分析是在多元回归基础上将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数的一种统计方法。直接通径和间接通径系数分别表示某一变量对因变量的直接影响力,以及通过其他变量对因变量的间接影响力,通径系数绝对值的大小可以反映出各个自变量在回归方程中的重要作用。通径分析方法已在农业、环境等领域有成熟的应用研究(张佩等,2020;信志红等,2019;黄世成等,2012),其基本模型为:

$$\begin{cases} r_1 = p_1 + r_{12}p_2 + r_{13}p_3 + \cdots + r_{1k}p_k \\ r_2 = r_{21}p_1 + p_2 + r_{23}p_3 + \cdots + r_{2k}p_k \\ r_3 = r_{31}p_1 + r_{32}p_2 + p_3 + \cdots + r_{3k}p_k \\ \vdots \\ r_k = r_{k1}p_1 + r_{k2}p_2 + r_{k3}p_3 + \cdots + p_k \end{cases} \quad (1)$$

设有 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k$, 即 k 个自变量, 式中: r_i 为自变量 x_i 与因变量 y 之间的相关系数; p_i 为自变量 x_i 的直接通径系数; r_{ij} 为任意两个自变量 x_i 与 x_j 之间的相关系数; $r_{ij}p_j$ 为自变量 x_i 通过自变量 x_j 对因变量 y 产生的间接作用, 而 $r_{ik}p_k (i \neq k)$ 之和即为自变量 x_i 的间接通径系数。

实际上影响始花期的各气象因子并不是彼此独立的, 可在对筛选出的气象因子进行正态检验后利用 SPSS 软件进行通径分析, 反映它们的综合作用效果, 进而优化多元回归预报模型参数。

1.2.3 春季积温物候预测模型

植物在生长发育过程中不仅要求一定的温度水平, 而且还需要一定的热量总和(即积温), 积温常分为活动积温和有效积温两种, 同一品种植物在不同地区不同年份所需的积温差异较大, 但有效积温较为稳定, 因此利用有效积温做花期预测具有更好指示意义。

基于积温理论发展出的 SW 模型是最简单也被最广泛应用的物候模型(于裴洋等, 2020; 张爱英等, 2015), 其原理如下:

$$\sum_{t=t_0}^y R_t(x_t) \geq F^* \quad (2)$$

$$R_t(x_t) = \begin{cases} 0 & x_t < T_b \\ x_t - T_b & x_t \geq T_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: y 为预测的物候期(日序), x_t 为第 t 天的日平均气温; t_0 为积温开始累计的时间; $R_t(x_t)$ 是高于某一界限值的有效温度; T_b 是界限温度; F^* 指完成发育所需的积温阈值。

目前多数花期预报研究是将0、3、5和10℃(柏秦凤等,2020;张志薇等,2019;赵洪杰等,2019;李晓川等,2012;张惠霞,2013)作为积温统计的界限温度。

为确定悬铃木始花期积温统计的界限温度(T_b)、积温阈值(F^*)和预报统计初日(t_0),分别计算从起算日(上年12月1日至当年3月31日)至始花期, $\geq 5^\circ\text{C}$ (解除休眠的温度), $\geq 6^\circ\text{C}$, \dots , $\geq 10^\circ\text{C}$ 的有效积温的方差。方差最小所对应的温度和起算日则被认为是悬铃木始花期的界限温度和预报统计初日,此时有效积温的平均值即为始花期积温阈值。

2 结果与分析

2.1 悬铃木春季物候特征及变化趋势

悬铃木在秋季短日照诱导下,逐渐进入冬芽(混合芽)休眠期,11月进入深睡眠状态,经过冬季低温解除休眠,春季气温回暖后冬芽开始萌动生长(孟海红,2019;张思思,2016;杨海青,2003)。木本植物的展叶物候(芽开放、展叶始期、展叶盛期)与花期物候(显蕾、开花始期、开花盛期、开花末期)密切相关(刘

聪,2018),1990—2020年兴化悬铃木的芽膨大期基本集中在3月中上旬,一至两周后叶芽开放,4月中旬开始开花(图1),开花早晚与叶芽开放时间密切相关(相关系数为0.748, $P<0.05$)。始花期最早出现在3月30日(2002年),最迟出现在4月22日(1991年)和4月21日(2000年,闰年),最早和最迟日期相差23 d,平均始花期为4月15日。从年际变化来看,2000年之前始花期波动较小,2000年以后波动较大,尤其2002—2006年始花期明显提前。从总体演变特征来看,悬铃木始花期呈现提前趋势,气候倾向率为 $-1.988\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,即每10 a约提前2 d。

通过对历年兴化悬铃木始花期当天的日平均气温统计分析,发现除了2018年为 9.7°C ,其他年份均超过 10°C ,均值达到 15°C ,但当天日平均气温与始花期之间没有通过显著性水平检验。

将5 d滑动平均气温超过0、5和 10°C 的初日分别与始花期进行相关分析,发现:虽然悬铃木解除冬芽休眠的低温范围较广,但稳定通过 10°C 的初日(即气象学定义的入春日)与始花期具有更好的正相关性,相关系数为0.553($P<0.05$),即兴化地区当年入春日越早,悬铃木开花日期则相应提前。

2.2 影响悬铃木始花期的气象因子筛选结果

2.2.1 花前气象因子相关性分析

由表1和表2可以看出,温度是影响开花早晚

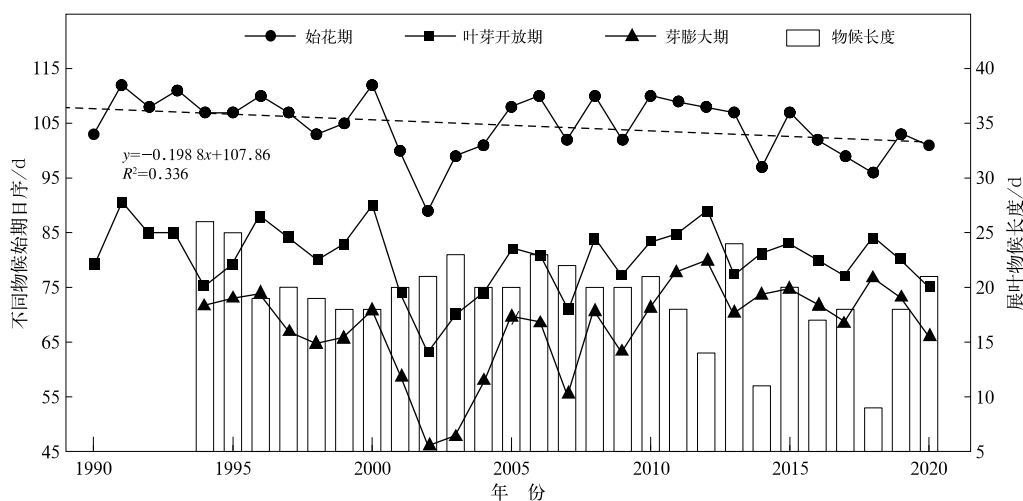


图1 1990—2020年兴化悬铃木春季物候时间变化曲线

Fig. 1 Variation curves for the spring phenology of *Platanus acerifolia* in Xinghua, Jiangsu Province from 1990 to 2020

的最主要因子,与始花期呈负相关性,3月中旬(正值芽膨大期)以后越临近开花日期相关程度越高,可见冬季的低温决定了冬芽解除休眠程度,次年3月中旬后的温度决定了混合芽从萌发到开花的速度;冬季平均最高气温对始花期的影响程度高于平均最低气温,平均地表温度的影响程度略高于平均气温,但到了3月回暖后则反之。降水量和平均相对湿度仅在2月下旬与始花期有非常显著的负相关性,说明开花前40~50 d是关键时期,若雨水充沛、空气湿润则有利于开花提前。日照时长与始花期的相关性未通过0.1的显著性水平检验,说明悬铃木虽然

是喜光植物,但光照对开花早晚影响不明显。

兴化地处江苏省中部(32°40′~33°13′N、119°43′~120°16′E),属亚热带湿润性季风气候区,雨水充沛,日照充足,四季分明,1990—2020年的31年间,年平均气温由15.5℃上升至16.1℃,冬季平均气温由3.6℃上升至5.7℃,最冷月(1月)的平均气温由1.7℃上升至4.5℃,由此可见,兴化逐渐趋暖的气候条件促使悬铃木春季物候期提前,这与一些学者在其他木本植物花期上的研究结果一致(蔡榕硕和付迪,2018;Szabó et al,2016;Dai et al,2013)。

表 1 1990—2017 年冬季和当年逐月各气象因子与兴化悬铃木始花期的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the meteorological factors and the first-flowing date (FFD) of *Platanus acerifolia* at winter scale and month scale in Xinghua from 1990 to 2017

气象因子	冬季(12月至次年2月)	1月	2月	3月
平均气温	-0.623**	-0.484**	-0.564**	-0.565**
平均最高气温	-0.566**	-0.547*	-0.534**	-0.416*
平均最低气温	-0.509**	-0.344	-0.532**	-0.618**
平均地表温度	-0.641**	-0.465*	-0.590**	-0.392*
累计降水量	-0.132	0.055	0.008	0.064
累计降水日数	-0.217	0.142	0.105	0.011
平均相对湿度	-0.265	-0.026	-0.299	-0.134
总日照时数	0.144	-0.206	0.057	0.133

注: *、** 分别表示通过 0.1 和 0.05 显著性水平检验,下同。

Note: *, ** mean that the change trend passes the significance test at levels of 0.1 and 0.05 respectively, the same below.

表 2 1990—2017 年当年逐旬各气象因子与兴化悬铃木始花期的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between the meteorological factors and the FFD of *Platanus acerifolia* at ten-day scale in Xinghua from 1990 to 2017

气象因子	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{41}	T_{42}
平均气温	-0.318	-0.375*	-0.162	-0.389*	-0.419*	-0.352	-0.132	-0.502**	-0.386*	-0.517*	-0.570**
平均最高气温	-0.418*	-0.431*	-0.225	-0.362	-0.476*	-0.180	0.017	-0.424*	-0.305	-0.435	-0.451*
平均最低气温	-0.231	-0.260	-0.046	-0.296	-0.283	-0.485**	-0.143	-0.589**	-0.428*	-0.506*	-0.611**
地表温度	-0.271	-0.408*	-0.184	-0.393*	-0.504**	-0.310	-0.050	-0.519**	-0.256	-0.337	-0.327
降水总量	-0.152	0.258	-0.104	0.077	0.256	-0.609**	-0.056	-0.027	0.190	0.053	-0.183
降水日数	-0.077	0.067	0.101	0.026	0.144	-0.439*	-0.119	0.077	0.070	0.020	-0.173
平均相对湿度	-0.007	-0.189	0.102	-0.202	0.010	-0.582**	-0.045	-0.048	-0.199	-0.212	-0.160
日照时数	-0.155	-0.014	-0.178	-0.004	-0.267	0.399*	-0.001	0.021	0.034	0.118	0.071
日最低气温<5℃天数	0.152	0.283	0.004	0.095	0.072	0.346	0.106	0.458*	0.256	0.275	0.349
日最低气温<10℃天数	—	—	—	—	—	—	-0.018	0.681**	0.519**	0.391*	0.476**

注: T_{ij} 为时间,其中 i 代表月份, j 代表旬,1、2、3 分别代表上、中、下旬,如 T_{23} 表示 2 月下旬。

Note: T_{ij} is time, letter “ i ” indicates month, letter “ j ” indicates the dekad, and 1 means the 1st dekad, 2 means the 2nd dekad, 3 means the 3rd dekad, for example, “ T_{23} ” means in late February.

2.2.2 通径分析各关键气象因子对始花期的影响程度

考虑预报时效性和预报因子宜使用实况值以降低采用预报值所产生的误差,故去除 4 月中旬的气象因子,从上述结果中按相关系数大小共选择 8 个与始花期有极显著相关性(通过 0.05 显著性水平检

验)的气象因子:3月中旬日最低气温<10℃的天数(X_1)、冬季平均地表温度(X_2)、冬季平均气温(X_3)、2月下旬平均湿度(X_4)、入春日(X_5)、2月平均地表温度(X_6)、3月平均最低气温(X_7)、2月下旬降水总量(X_8)进行通径分析,研究它们对始花期的相对重要性,从而建立始花期预报方程。从表3可

表 3 1990—2017 年兴化悬铃木始花期主要气象因子的简单统计

Table 3 Simple statistics of main factors and the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua from 1990 to 2017

统计量	始花期	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
平均值	104.54 d	9.43 d	4.611℃	3.831℃	73.25%	88.860d	5.886℃	5.043℃	9.768 mm
标准差	5.58 d	0.959 d	0.682℃	0.734℃	7.011%	8.653d	1.304℃	0.972℃	9.098 mm
方差	31.138	0.921	0.465	0.539	49.157	74.868	1.701	0.944	82.765
偏度	-0.935	-2.084	0.660	0.540	0.028	-0.033	0.549	0.587	0.889
峰度	0.732	4.976	-0.547	-0.662	-0.609	0.784	0.059	0.173	-0.143

以看出,供分析的各数据偏度较小,说明近似满足正态分布要求,可以进行回归和通径分析。

从表 4 可以看出,这 8 个关键气象因子在直接效应方面, X_2 对始花期的负影响最大,冬季落叶树木根上部分休眠,但根系没有完全休眠,张慧(2017)指出地温的升高会导致土壤中物理、生物过程的加速,进而影响植物生长,王连荣等(2004)对休眠期蟠桃的根系做不同温度处理后发现提高地温会增加花芽生长素含量,使芽休眠期内部生理代谢旺盛,利于提前解除休眠;其次是 X_3 对始花期的正影响,这是由于冬芽必需经过一定时期的低温(冷温需求量)才

能解除休眠并萌发,在有效低温范围内冬季气温偏高会导致打破休眠的冷量积累不足,最终影响开花,这与张福春(1983)的结论一致,但由于地温和气温的密切相关性,最终冬季平均气温通过地温对始花期较强的负影响作用而呈现出与始花期的负相关性;再其次是 X_1 对始花期的正作用,3 月中旬最低气温大部分都在 10℃ 以下,如果此时气温回暖比较快则会引起展叶物候的提前并最终导致开花提前。总体而言, X_1 、 X_2 、 X_3 在直接、间接效应方面对始花期都有较大的影响力。

结合各因子对多元回归方程可靠程度 R^2 的贡

表 4 1990—2017 年兴化悬铃木始花期与主要气象因子的相关和通径系数

Table 4 Correlation and path coefficient between the factors and the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua from 1990 to 2017

气象因子	相关系数	直接通径	间接通径							
			通过 X_1	通过 X_2	通过 X_3	通过 X_4	通过 X_5	通过 X_6	通过 X_7	通过 X_8
X_1	0.681	0.342		0.226	-0.143	0.095	0.092	0.060	-0.077	0.086
X_2	-0.649	-0.693	-0.111		0.394	-0.052	-0.072	-0.119	0.046	-0.041
X_3	-0.623	0.411	-0.119	-0.664		-0.061	-0.060	-0.124	0.048	-0.054
X_4	-0.582	-0.291	-0.111	-0.124	0.086		-0.065	-0.043	0.042	-0.076
X_5	0.553	0.306	0.103	0.162	-0.081	0.061		0.025	-0.066	0.041
X_6	-0.590	-0.159	-0.129	-0.518	0.322	-0.079	-0.049		0.051	-0.028
X_7	-0.618	0.117	-0.224	-0.270	0.170	-0.104	-0.171	-0.069		-0.066
X_8	-0.609	-0.145	-0.203	-0.198	0.153	-0.153	-0.087	-0.031	0.053	

献率可以看出,除了 X_6 、 X_7 、 X_8 ,其他因子的贡献率均较高,因此,选取冬季平均地表温度、冬季平均气温、3 月中旬日最低气温 $<10^{\circ}\text{C}$ 的天数、2 月下旬平均相对湿度、入春日 5 个因子作为构建始花期预报模型的预报因子。

2.3 悬铃木始花期预测模型与效果检验

2.3.1 SW 模型

由于历年悬铃木开花最早出现在 3 月 30 日,考虑至少提前 10 d 开展始花期预报有实际应用价值,因此在确定悬铃木始花期的界限温度、预报统计初日和积温阈值的统计计算方法中将起算日由上年 12 月 1 日至当年 3 月 31 日调整为上年 12 月 1 日至当年 3 月 20 日。从图 2 可以看出,当界限温度为 10℃,

起算日为 3 月 14 日时,各年份始花期的有效积温的方差最小,数据最为稳定,此时对应的有效积温均值为 $73.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。因此将 10℃ 作为界限温度、3 月 14 日作为预报统计初日, $73.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 作为积温阈值,即每年从 3 月 14 日开始将日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温开始累加,累计达到或超过 $73.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 时停止累加,将当天作为预报的始花期。

SW 物候模型预测结果显示:2018 年、2019 年和 2020 年的始花期预报值比实测始花日期分别提前了 4、5 和 1 d,可见采用积温预报模型具有较大的不确定性,这与肖静等(2010)的研究结论一致,用于开展花期预报效果不理想。

2.3.2 逐步回归模型

基于通径分析结果,建立悬铃木始花期预报模

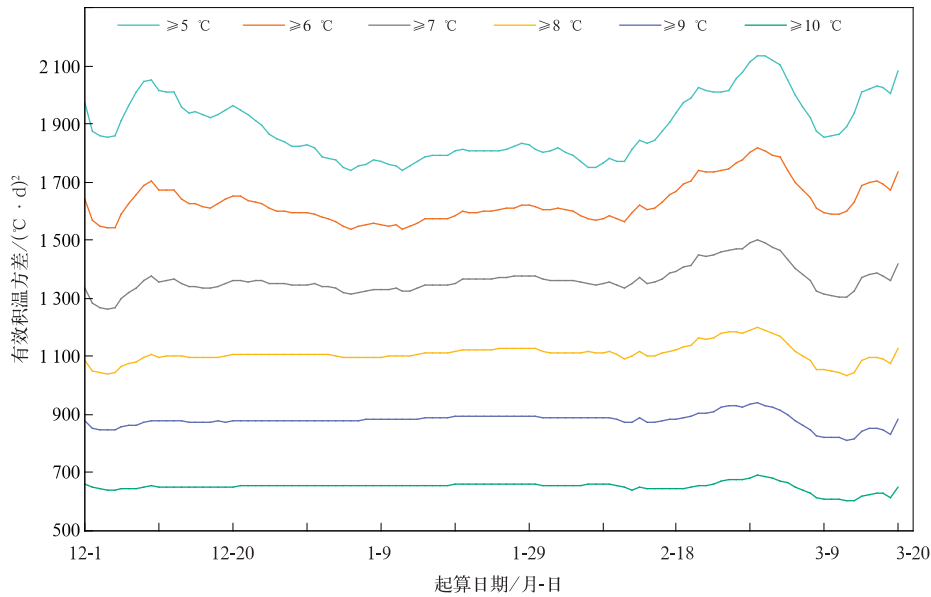


图 2 1990—2017 年不同界限温度和起算日的兴化悬铃木始花期有效积温方差

Fig. 2 Variance of effective accumulated temperature for the FFD of *Platanus acerifolia* at different boundary temperatures and starting dates in Xinghua from 1990 to 2017

型的回归预报方程:

$$y = 107.309 + 2.013X_1 - 4.766X_2 + 1.483X_3 - 0.26X_4 + 0.166X_5 \quad (4)$$

式中: y 为始花期日序, X_1 为 3 月中旬日最低气温 $< 10^\circ\text{C}$ 的天数, X_2 为冬季平均地表温度, X_3 为冬季平均气温, X_4 为 2 月下旬平均湿度, X_5 为入春日。对模型进行检验发现, 方程决定系数 $R^2 = 0.827$, $F = 26.864$, $P < 0.01$, 说明这五个因子可以解释悬铃木始花期变化的 82.7%, 且在显著性水平检验中达到极显著水平, 可用于开展始花期预报。将模型进行回代, 预报方程对始花期的拟合情况如图 3 所示, 以 ± 2 d 为准, 误差 2 d 以内的有 25 a, 拟合准确率为 89.3%。

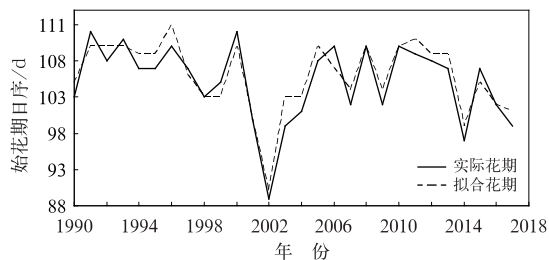


图 3 1990—2018 年兴化悬铃木始花期
回归预报模型拟合结果

Fig. 3 Fitting result of regression prediction model for the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua from 1990 to 2018

为进一步验证该模型的准确性, 将 2018—2020 年的数据进行试报检验。从图 4 可见, 2019 年和 2020 年预报基本准确, 但在 2018 年出现了较大偏差, 这主要是由于构建预报模型时出于预报时效性考虑, 选择 4 月之前的气象要素作为主要因子, 临近始花期若出现持续晴好天气导致大幅升温或遇强冷空气出现骤然降温等较为极端的天气情况, 则会大幅提前或推迟始花期, 对这些极端情况, 由于样本有限, 该模型的预报结果还存在一定不确定性, 因此在实际应用中, 需要结合预报的始花期前几天天气趋势, 进行综合预判。

从图 5 可以看出, 相较其他两个年份, 2018 年开

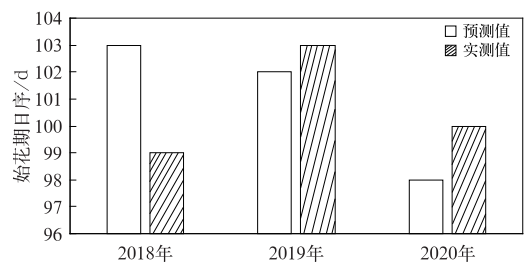


图 4 2018—2020 年兴化悬铃木始花期
模型预报值及其误差

Fig. 4 Forecasting results of multiple prediction model and its errors for the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua from 2018 to 2020

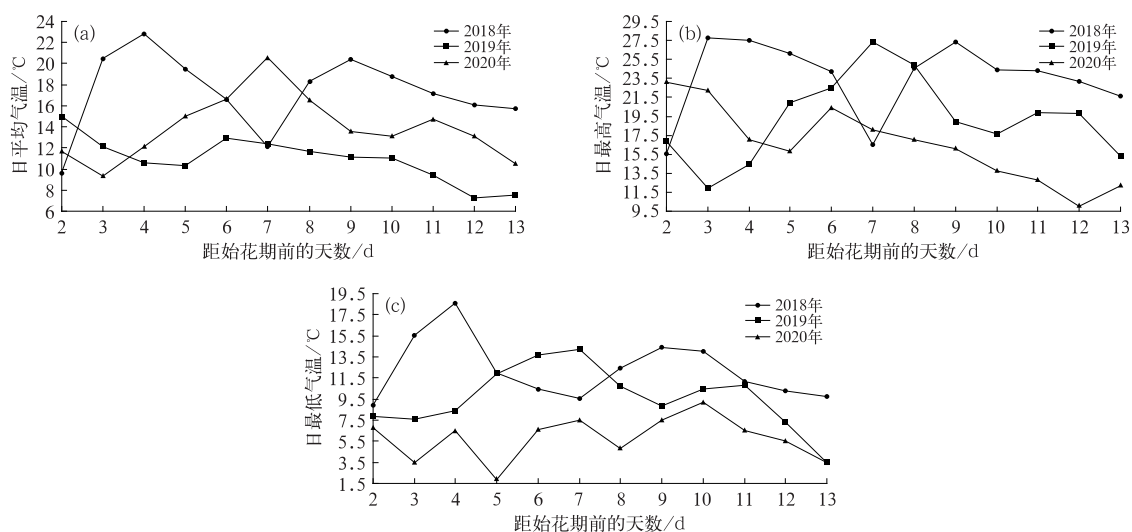


图5 2018—2020年兴化距离悬铃木始花期前13 d逐日气温变化曲线

(a)日平均气温,(b)日最高气温,(c)日最低气温

Fig. 5 Variation curves for daily temperature 13 days before the FFD of *Platanus acerifolia* in Xinghua from 2018 to 2020

(a) daily average temperature, (b) daily maximum temperature, (c) daily minimum temperature

花前13 d左右是持续晴好天气,升温幅度较大,日最低气温几乎都超过了10℃,日最高气温均超过20℃,其中4月1—3日(始花期为4月6日)的日最高气温均达到27℃,正是开花前5 d左右持续的较高气温导致了2018年开花提前。

3 结论与讨论

(1)兴化悬铃木一般在4月中旬开始开花,最早出现在3月30日(2002年),最迟出现在4月22日(1991年)和4月21日(2000年,闰年),31 a的平均始花期为4月15日。2000年以前始花期波动不大,2000年以后波动较大并呈现提前的趋势,气候倾向率为 $-1.988 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

(2)虽然悬铃木是喜光植物,但日照时数对其始花期影响并不明显。总体而言始花期对降水总量和平均相对湿度的反应也不敏感,但2月中旬,即开花前40~50 d是关键时期,若雨水充沛、空气湿润则有利于开花提前。

(3)温度是影响开花早晚的最重要指标,就江苏地区而言,12月至次年2月的冬季低温决定了花芽萌发的快慢并最终影响开花时间,3月花芽萌发期内特别是中旬以后气温越高则开花越早,但开花当日气温高低对始花期并没有显著影响;冬季日最高气温对始花期的影响程度高于日最低气温,平均地

表温度的影响程度略高于平均气温,但到了3月气温回暖后则反之。

(4)影响兴化悬铃木始花期的主要气象因子中,冬季平均地表温度、冬季平均气温以及3月中旬日最低气温 $<10^\circ\text{C}$ 的天数在直接、间接效应方面均对始花期具有最大的影响力。

积温预报模型具有较大的不确定性,而本文建立的多元回归预报模型拟合准确率为89.3%,能较好地预测悬铃木始花期,但由于模型预测因子均为开花前期气象因子,因此在实际应用时要结合预报的始花期前几天气象条件变化,对模型预测结果进行相应修订。另外本文仅对兴化悬铃木始花期做了研究,春季漫天飞舞的果毛也让人不堪其扰,后续将通过物候观测数据的长时间累积,开展果毛飘飞与气象条件之间的定量化研究。

参考文献

- 柏秦凤,霍治国,王景红,等,2020.中国富士系苹果主产区花期模拟与分布[J].中国农业气象,41(7):423-435. Bai Q F, Huo Z G, Wang J H, et al, 2020. Simulation and distribution of flower stage in main production areas of Fuji apple in China[J]. Chin J Agrometeorol, 41(7): 423-435 (in Chinese).
- 蔡榕硕,付迪,2018.全球变暖背景下中国东部气候变迁及其对物候的影响[J].大气科学,42(4):729-740. Cai R S, Fu D, 2018. The pace of climate change and its impacts on phenology in eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 729-740 (in Chinese).

- 曹剑波,秦利鸿,吴华,等,2008. 悬铃木成熟球果及果毛的形态学观察[J]. 华中农业大学学报,27(2):313-316. Cao J B, Qin L H, Wu H, et al, 2008. Observations on matured fruit and fruit hairs of *Platanus acerifolia* [J]. J Huazhong Agric Univ, 27(2):313-316 (in Chinese).
- 傅玮东,杨秋莲,李兰,2011. 莎车日平均气温 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日的变化特征以及对杏树开花期的影响[J]. 中国农业气象,32(S1):104-107. Fu W D, Yang Q L, Li L, 2011. Change of the first day on daily average temperature $\geq 5^{\circ}\text{C}$ in Shache and its impact on the blossom of apricot [J]. Chin J Agrometeor, 32(S1):104-107 (in Chinese).
- 郭睿,2016. 杨凌地区桃树花期预测模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学. Guo R, 2016. The research on Yangling peach florescence prediction model [D]. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese).
- 国家气象局,1993. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 1993. Agrometeorological Observation Specification [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 黄世成,徐春阳,周嘉陵,2012. 城市和森林空气负离子浓度与气象环境关系的通径分析[J]. 气象,38(11):1417-1422. Huang S C, Xu C Y, Zhou J L, 2012. Path analysis on negative air ion concentration and the meteorological environment in urban and forest zones [J]. Meteor Mon, 38(11):1417-1422 (in Chinese).
- 李德,陈文涛,乐章燕,等,2020. 基于随机森林算法和气象因子的砀山酥梨始花期预报[J]. 农业工程学报,36(12):143-151. Li D, Chen W T, Le Z Y, et al, 2020. Forecast method for the first flowering date of Dangshansu pear based on random forest algorithm and meteorological factors [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 36(12):143-151 (in Chinese).
- 李明震,肖砚芳,夏腊英,等,1998. 武汉地区悬铃木属花粉调查及致敏性研究[J]. 中国公共卫生,14(6):342-343. Li M Z, Xiao Y F, Xia L Y, et al, 1998. Research on pollen sensitization of *Platanus* in Wuhan Area [J]. Chin J Public Health, 14(6):342-343 (in Chinese).
- 李晓川,陶辉,张仕明,等,2012. 气候变化对库尔勒香梨始花期的影响及其预测模型[J]. 中国农业气象,33(1):119-123. Li X C, Tao H, Zhang S M, et al, 2012. The impact and prediction of climate change on first-flowering date of Korla fragrant pear [J]. Chin J Agrometeor, 33(1):119-123 (in Chinese).
- 刘聪,2018. 木本园林植物物候与花枝性状特征研究[D]. 重庆:西南大学. Liu C, 2018. Study on the plant phenology and the functional trait of flowering twigs of woody garden plants [D]. Chongqing: Southwest University (in Chinese).
- 刘流,甘一忠,2006. 桃花迟早年型的冬季气候特点及花期预测[J]. 气象,32(1):113-116. Liu L, Gan Y Z, 2006. Winter climatic characteristics and peach florescence [J]. Meteor Mon, 32(1):113-116 (in Chinese).
- 刘璐,王景红,傅玮东,等,2020. 中国北方主产地苹果始花期与气候要素的关系[J]. 中国农业气象,41(1):51-60. Liu L, Wang J H, Fu W D, et al, 2020. Relationship between apple's first flower and climate factors in the main producing areas of the northern China [J]. Chin J Agrometeor, 41(1):51-60 (in Chinese).
- 刘震,蒋建平,杨海青,等,2002. 悬铃木开花结实生物生态学特性研究 I 花芽分化分布规律[J]. 河南农业大学学报,36(1):50-53. Liu Z, Jiang J P, Yang H Q, et al, 2002. Study on bio-ecological characteristics of *Platanus acerifolia* in blooming and bearing I flower buds' development and distribution on crown and sprig [J]. J Henan Agric Univ, 36(1):50-53 (in Chinese).
- 刘震,王国霞,蒋建平,2006. 二球悬铃木冬芽休眠的温度特性[J]. 生态学报,26(9):2870-2876. Liu Z, Wang G X, Jiang J P, 2006. Temperature characteristics of winter buds' dormancy in *Platanus acerifolia* [J]. Acta Ecol Sin, 26(9):2870-2876 (in Chinese).
- 吕爱丽,霍治国,杨建莹,2020. 晋南地区不同海拔高度典型木本植物物候特征及其对气候变化的响应[J]. 中国农业气象,41(2):65-75. Lv A L, Huo Z G, Yang J Y, 2020. Phenological characteristics of representative woody plants at different altitude sites in Jinnan Region and their response to climate change [J]. Chin J Agrometeor, 41(2):65-75 (in Chinese).
- 毛明策,刘敏茹,姜创业,等,2005. 苹果初花期与温度的关系研究[J]. 中国农业气象,26(2):123-124, 128. Mao M C, Liu M R, Jiang C Y, et al, 2005. A study on relationship between air temperature and early blooming time of *malus* [J]. Chin J Agrometeor, 26(2):123-124, 128 (in Chinese).
- 孟海红,2019. 悬铃木 CO-Like 同源基因与成花及休眠调控的相关性研究[D]. 武汉:华中农业大学. Meng H H, 2019. Correlation analysis of Co-Like homologous genes and flowering and dormancy in *Platanus acerifolia* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese).
- 乔士义,庞品珍,1985. 悬铃木 *Platanus acerifolia* 落毛问题的研究 I. 开花结实形态发育的初步视察[J]. 南京林学院学报,28(3):45-50. Qiao S Y, Pang P Z, 1985. Studies on the hair falling of *Platanus acerifolia* I. A preliminary observation on its flowering and fruitification development [J]. J Nanjing Forestry Univ (Natur Sci Edit), 28(3):45-50 (in Chinese).
- 屈李辉,2013. 悬铃木开花生物学与生长规律研究[D]. 武汉:华中农业大学. Qu L H, 2013. The research of flowering biology and growth law of *Platanus acerifolia* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese).
- 沈家慧,李瑞沙,赵慧,等,2017. 悬铃木花粉微颗粒(SPPs)释放的快速有效观察[J]. 中国细胞生物学学报,39(9):1207-1210. Shen J H, Li R S, Zhao H, et al, 2017. Rapid and effective observation of subpollen particles (SPPs) released from *Platanus pollen* [J]. Chin J Cell Biol, 39(9):1207-1210 (in Chinese).
- 汤珧华,严巍,施凯峰,2019. 上海地区二球悬铃木物候与花芽分化的观察[J]. 上海建设科技(6):64-66. Tang Y H, Yan W, Shi K F, 2019. Observation on phenology and flower bud differentiation of *Platanus acerifolia* in Shanghai [J]. Shanghai Construction Sci Technol (6):64-66 (in Chinese).
- 王连荣,陈海江,徐继忠,等,2004. 地温对设施桃花芽若干生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报,27(1):58-60. Wang L R, Chen

- H J, Xu J Z, et al, 2004. Effect of soil temperature on several physiological indices of floral buds under protected cultivation of flat peach[J]. J Agric Univ Hebei, 27(1): 58-60(in Chinese).
- 肖静, 李楠, 姜会飞, 2010. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. 气象研究与应用, 32(2): 64-67. Xiao J, Li N, Jiang H F, 2010. Calculation and stability of accumulated temperatures in the growing season of winter wheat[J]. J Meteor Res Appl, 32(2): 64-67(in Chinese).
- 信志红, 郭建平, 谭凯炎, 等, 2019. 气象因子对半冬性小麦灌浆速度的影响效应研究[J]. 气象, 45(12): 1736-1746. Xin Z H, Guo J P, Tan K Y, et al, 2019. Effect of meteorological factors on grain filling rate of semi-winter wheat[J]. Meteor Mon, 45(12): 1736-1746(in Chinese).
- 杨海青, 2003. 悬铃木开花结实生理生态学特性研究[D]. 郑州: 河南农业大学. Yang H Q, 2003. Eco-physiological Studies on characteristics of blooming and bearing in *Platanus acerifolia* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University(in Chinese).
- 于裴洋, 同小娟, 李俊, 等, 2020. 中国东部暖温带刺槐物候模型比较[J]. 中国农业气象, 41(10): 609-621. Yu P Y, Tong X J, Li J, et al, 2020. Comparison of Phenological Models of *Robinia pseudoacacia* (L.) in the warm-temperate region of Eastern China[J]. Chin J Agrometeor, 41(10): 609-621(in Chinese).
- 张爱英, 张建华, 高迎新, 等, 2015. SW 物候模型在北京樱花始花期预测中的应用[J]. 气象科技, 43(2): 309-313. Zhang A Y, Zhang J H, Gao Y X, et al, 2015. Prediction of first flowering date of *Prunus discoidea* in Beijing Yuyuantan Park using phenological model[J]. Meteor Sci Technol, 43(2): 309-313(in Chinese).
- 张福春, 1983. 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, 2(2): 55-64. Zhang F C, 1983. Statistic analysis on the phenophase of trees in spring of Beijing[J]. Geogr Res, 2(2): 55-64(in Chinese).
- 张慧, 2017. 地温变化过程及其机理研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所. Zhang H, 2017. The research of the characteristic and mechanism of soil temperature change in China[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- 张惠霞, 2013. 桃树始花期与气象因子的相关分析及预报模型[J]. 安徽农业科学, 41(10): 4513-4515. Zhang H X, 2013. Correlation analysis and forecasting model of peach tree early flowering season and meteorological factors[J]. J Anhui Agri Sci, 41(10): 4513-4515(in Chinese).
- 张佩, 高苹, 钱忠海, 等, 2020. 油菜花期物候主要限制因子分析及预报模型的构建[J]. 气象, 46(2): 234-244. Zhang P, Gao P, Qian Z H, et al, 2020. Analysis on limiting factors and construction of prediction model of oilseed rape flowering phenology[J]. Meteor Mon, 46(2): 234-244(in Chinese).
- 张思思, 2016. 二球悬铃木成花调控基因功能与进化分析[D]. 武汉: 华中农业大学. Zhang S S, 2016. Functional and evolutionary analysis of flowering regulatory genes in *Platanus acerifolia* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University(in Chinese).
- 张志薇, 高苹, 王宏斌, 等, 2019. 油菜花最佳观赏期变化及其对温度因子的响应[J]. 气象, 45(5): 667-675. Zhang Z W, Gao P, Wang H B, et al, 2019. Impact of temperature factors on full-bloom stage of rape petal[J]. Meteor Mon, 45(5): 667-675(in Chinese).
- 赵洪杰, 闫景东, 陈广瑞, 等, 2019. 积温对比法在鸭梨始花期预报中的应用[J]. 气象科技, 47(5): 872-878. Zhao H J, Yan J D, Chen G R, et al, 2019. First flowering date prediction of Yali pear by using accumulated temperature contrast method[J]. Meteor Sci Technol, 47(5): 872-878(in Chinese).
- Dai J H, Wang H J, Ge Q S, 2013. The decreasing spring frost risks during the flowering period for woody plants in temperate area of eastern China over past 50 years[J]. J Geogr Sci, 23(4): 641-652.
- El Yaacoubi A, Oukabli A, Hafidi M, et al, 2019. Validated model for apple flowering prediction in the Mediterranean Area in response to temperature variation[J]. Sci Horticulturae, 249: 59-64.
- Mimet A, Pellissier V, Quénot H, et al, 2009. Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus* [J]. Int J Biometeorol, 53(3): 287-298.
- Szabó B, Vincze E, Czúcz B, 2016. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary[J]. Int J Biometeorol, 60(9): 1347-1356.