

DOI: 10.5846/stxb201909241996

谭静, 陈正洪, 肖玫. 武汉大学樱花花期长度特征及预报方法. 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. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 38-47.

武汉大学樱花花期长度特征及预报方法

谭 静¹, 陈正洪^{1,*}, 肖 玫²

¹ 湖北省气象服务中心, 武汉 430205

² 武汉大学资源与环境学院, 武汉 430072

摘要: 武汉大学樱花是武汉的一张“城市名片”, 开展樱花花期长度的预报工作, 可为旅游部门管理工作和游客安排出行时间提供合理的参考。根据 1979—2018 年 40 年武汉大学樱园日本樱花树始花期和落花期的观测资料及同期气象资料的研究分析表明: (1) 樱花的始花期和落花期在 20 世纪 80—90 年代期间有明显的提前; 从 20 世纪 90 年代末开始至今, 始花期与落花期变化趋势不明显, 但变率较大, 与全球气候变化停滞期相吻合; 40 年间花期长度变率很大, 整体无明显的增多或减少的趋势。 (2) 平均始花期为 3 月 14—15 日, 落花期 3 月 31 日—4 月 1 日, 平均花期长度为 18d。 (3) 花期长度与当年始花期日序数、开花期间平均气温、开花期间最高平均气温、最低平均气温和温度日较差平均值均呈负相关, 与开花期间总降水量呈正相关。与开花期内平均极大风速值、平均降水量和日照时数等无明显相关性。 (4) 用 1979—2015 年共 37 年资料建立了樱花花期长度的单因子拟合、多因子回归及主成分分析模型, 用 2016—2018 年 3 年资料进行检验, 对武汉大学樱花花期长度进行了预报, 取得了较好的试验效果。其中主成分回归模型、降水单因子拟合模型和多因子樱花花期长度回归模型预报效果最好, 平均绝对误差在 1.5d 左右, 后期将会把预报模型运用到实际的樱花花期预报工作中。

关键词: 樱花; 花期长度; 花期长度预报

Characteristics and forecast of flowering duration of Cherry Blossoms in Wuhan University

TAN Jing¹, CHEN Zhenghong^{1,*}, XIAO Mei²

¹ Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205, China

² College of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Japanese cherry blossoms of Wuhan University is a city card of Wuhan. It can provide a reasonable reference for the management of tourism department and the arrangement of travel time for tourists to carry out the prediction of the length of cherry blossom period. A 40-year-old (1979—2018) dataset of flowering dates of Japanese cherry blossoms at Wuhan University Campus associated with the meteorological data was used for developing a method of forecasting the flowering duration of cherry blossoms. (1) The first-flowering and falling flowering date of cherry blossoms were obviously advanced in the 1980s—1990s. Since the end of 1990s, the trend of initial flowering and falling flower period is not obvious, but the rate of variation is large, which coincides with the stagnation period of global climate change. In the past 40 years, the change rate of florescence length was very large, but there was no obvious trend of increase or decrease. (2) The average first-flowering date was March 14—15, the falling flowering date was March 31 to April 1, and the average flowering period was 18 days. (3) The length of flowering period was negatively correlated with the first-flowering date, and negatively correlated with the average temperature, the highest average and the lowest average temperature during flowering period. It's

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0606102)

收稿日期: 2019-09-24; 网络出版日期: 2020-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenzh64@126.com

also negatively correlated with the average daily temperature difference, and positively correlated with the total precipitation during florescence. There was no significant correlation with the average maximum wind speed, average precipitation and sunshine hours during flowering period. (4) Single factor fitting, multi-factor regression and principal component analysis model of cherry blossom period length were established based on the data from 1979 to 2015, which were tested by the data from 2016 to 2018. These models were used to predict the length of cherry blossom period in Wuhan University and good experimental results were obtained. Among them, principal component regression model, precipitation single factor fitting model, and multi-factor cherry blossom period length regression model are the best, with an average absolute error of about 1.5 days. In the future, the prediction model will be applied to the actual cherry blossom period prediction.

Key Words: cherry blossoms; flowering duration; flowering duration prediction

近年来,随着人民生活水平的不断提高,赏花游受到人们的喜爱,准确的预测观赏植物的花期长度对旅游业有很大的实用价值。武汉大学樱花是武汉的一张“城市名片”,每到樱花盛开时节,众多国内外游客慕名前来赏花。可每年花期早晚不一,时长时短,为游客和校方提供准确的花期预报信息,有十分重要的意义。

许多研究发现,北半球温带地区,受气候变化影响,植物春季物候期(例如现蕾期、始花期、萌芽期、展叶始期等)在近几十年来普遍提前^[1-4]。例如,Miller 等的研究发现^[5],近年来美国东北部地区草本和木本植物的始花期显著提前,温度每升高 1℃,提前 3—8d。在中国,近 50 年东北和华北地区木本植物的始花期分别以 -1.55d/10a 和 -2.22d/10a 的速度提前^[6]。近 10 年来西安地区 42 种植物的展叶期和始花期相比于 1963—1996 年分别平均提前了 5.54d 和 10.20d^[7]。这些物候变化对生态系统结构和功能产生了明显的影响,例如霜冻风险变化^[8-9]、花期与传粉者活动时间的不匹配^[10-11]、物种分布变化^[12]、发育期变化^[13-14]等。

根据物候学理论,前期气候条件对植物开花早晚有重要影响^[15],而开花期内的光、温、水等,则对花期长度有直接影响,其中气温是影响中国木本植物物候的主要因子^[16-22]。武汉大学生物学院肖翊华教授等人自 1947 年起至今进行了连续 72 年樱花花期的观测,从未中断,是一份难得的长序列物候气候变化材料。目前,对于武汉大学樱花始花期的预报已经取得较大进展,2008 年陈正洪等^[23]用武汉大学樱园日本樱花 62 年连续的花期资料研究了樱花始花期、落花期、持续天数气候变化特征,建立了始花期预报模型,发现始花期与冬季及 2 月平均气温密切相关,其中基于 2 月平均气温的非线性模型对异常早花有较好的模拟效果。2017 年舒斯等^[24]在此基础上,引入活动积温的概念,用其作为预报因子改进了始花期预报方程,有效的提高了预报准确率。时培建等^[25]发现冬季低温的升高会延迟开花时间,而早春气温的升高会直接导致开花时间的提前,两者对樱花初花期有相反的影响。

但目前现有研究多以不同植物种的始花期为研究对象,较少关注整个花期长度的变化。有个别研究开始注意到花期长度的变化,例如,英国根西岛 232 种植物的花期长度随气候变暖显著缩短^[26],而在其他区域则得到相反的结论。例如,对日本东京 97 个樱花品种的研究表明大部分植物花期长度呈延长态势^[27]。因此,在气候变化背景下花期长度将如何变化还有待深入研究。而对于武汉大学花期长度的研究,2008 年陈正洪等^[23]发现武汉大学樱花花期天数经历了缓升-急升的变化,转折点在 20 世纪 80 年代中后期。但对樱花花期长度的预报等,并未展开详细研究。

本文在此研究基础上,新累计了 2009 至 2018 年的花期资料,对武汉大学樱花花期长度的预报方法开展研究,建立花期长度预报方程,为后期顺利开展花期长度预报工作打下基础。另外,通过对樱花花期长度的预报,可为公众合理安排出游时间提供指导,也方便旅游部门和校方更高效的开展管理工作。

1 数据来源与研究方法

1.1 资料

本文使用 1979—2018 年共 40 年武汉大学樱园日本樱花树始花期和落花期的观测资料。该校的樱花以

日本樱花(即小日樱花)为主,另有早樱花、垂枝樱花、晚樱花等 6 种,观测固定于日本樱花(即小日樱花,拉丁学名 *Prunus serrulata*)。从武汉大学老斋舍(现樱园)1939 年栽植的 28 棵日本樱花树开始,1957、1985 年曾补栽一部分,20 世纪 90 年代后不断进行过补充、更新。

始花期标准为每株树有 3—5 朵花开放,落花期标准为每株树花落 70%—80%。气象资料为武汉市国家基准站(东经 114°3′北纬 30°36′,海拔高度 23.6m)同期观测的气温、日照时数等日值资料。

1.2 方法

将始花期和落花期转换为日序数(day of the year, DOY),从而得到 40 年完整始花期和落花期日序数,及逐年樱花花期长度。其中前 37 年用于建立预报模型,后 3 年资料用于预测效果的独立样本检验。

本文首先计算花期长度与始花期时间、开花期间平均(最高、最低)气温、温度日较差、平均风速、降水量及日照时数的相关系数,选取合适的预报因子,然后运用单因子拟合、多因子回归分析及主成分分析三种方法,用 1979—2015 年共 37 年资料建立樱花花期预报方程,2016—2018 年 3 年资料用于预测效果的独立样本检验。

2 武汉大学樱花花期变化特征

2.1 始花期和落花期的基本特征与变化趋势分析

40a 平均结果表明,武汉大学日本樱花平均始花期的日序数是 73.4,对应日期是平年的 3 月 14—15 日,闰年的 3 月 13—14 日。其中开花最早为 2 月 26 日(2004 年),最晚为 3 月 31 日(1980 年)。此外 3 月 5 日前开花的还有 3 月 2 日(1989 年、2007 年)和 3 月 3 日(2016 年)。

平均落花期的日序数是 90.4,对应日期是平年的 3 月 31 日—4 月 1 日,闰年的 3 月 30—31 日。其中落花最早为 3 月 17 日(2004 年),最晚为 4 月 16 日(1996 年)。此外 4 月 10 日后落花的还有 4 月 15 日(1980 年)和 4 月 10 日(1998 年、1999 年)。

图 1 为 1979 年至 2018 年期间始花期和落花期日序数逐年变化,可以发现,武汉大学日本樱花的始花期和落花期日序数在 1979 年至 2018 年间呈提前趋势,但变化的趋势不太明显,且变率较大。

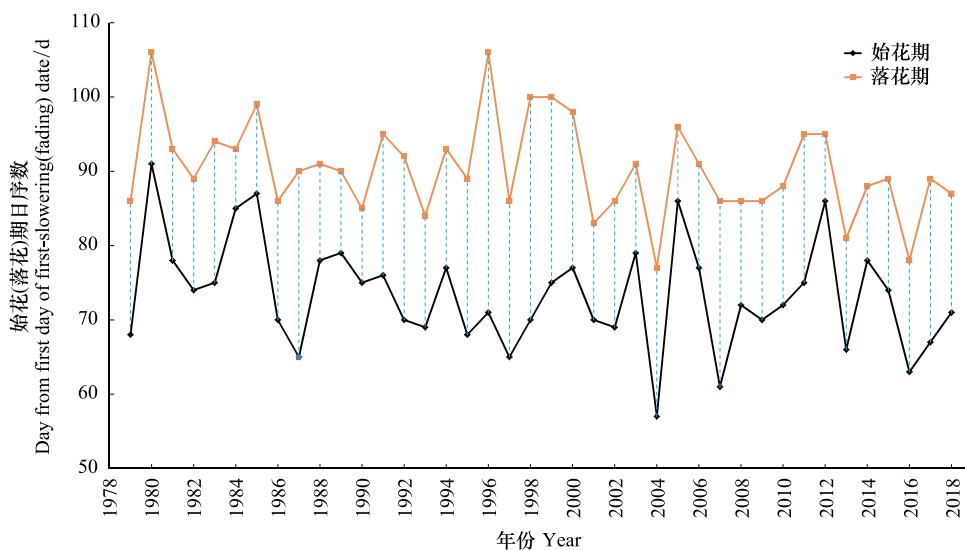


图 1 武汉大学樱花始花期和落花期日序数逐年变化与线性拟合图(1979—2018)

Fig.1 The yearly change of DOY of the first-flowering and falling flowering date for Japanese cherry blossoms of Wuhan University and its linear fitting (1979—2018)

IPCC 第五次评估报告明确指出^[28-29]: 1998—2012 年以来,全球地表温度的线性增暖趋势较之前的 30—

60 年显著减缓,说明气候变暖自 20 世纪 90 年代中后期以来进入了一个停滞期。因此我们以 90 年代中期的 1995 年为界限,分段进行趋势分析,以了解全球气候变暖与樱花花期长度间是否存在相同规律。

始花期和落花期每 10a 基本特征见表 1,可见平均始花期在 20 世纪 90 年代较 80 年代提前了 5—6d,平均落花期提前了约 1d 左右。始花期和落花期的趋势检验见表 2,可看出始花期在 1979—1995 年间提前趋势较明显,而进入 20 世纪 90 年代末后,落花期略有提前,但趋势不显著,始花期的变化趋势较为稳定,这与表 1 结果基本一致。均方差大小可以表示始花期和落花期的稳定性程度,从表 1 结果可知,从 20 世纪 90 年代末开始至今,始花期变率较大,多数年始花期与平均日期可相差 6—8d,落花期的变率较始花期略小,但与平均日期也相差 5—6d。

研究结果表明,樱花始花期和落花期的停滞期与全球气候变暖的停滞期高度吻合,说明全球气候变暖对樱花花期有较明显的影响。

表 1 武汉大学樱花始花期与落花期基本特征的逐年代差异与变化(1979—2018 年)

Table 1 The yearly difference and change of basic properties of first-flowering and falling-flowering date for Japanese Cherry Blossoms in Wuhan University(1979—2018)

年间 Period	1979—1988	1989—1998	1999—2008	2009—2018
最早的始花期(月-日) The earliest first-flowering date(m-d)	3—6	3—2	3—2	3—3
最早的落花期(月-日) The earliest falling-flowering date(m-d)	3—27	3—25	3—17	3—18
最晚的始花期(月-日) The latest first-flowering date(m-d)	3—31	3—18	3—27	3—26
最晚的落花期(月-日) The latest falling-flowering date(m-d)	4—15	4—10	4—10	4—5
平均始花期日序数/d The average DOY of first-flowering date	77.1	72	72.3	72.2
平均落花期日序数/d The average DOY of falling-flowering date	92.7	92	89.4	87.6
平均始花期(月-日) The average first-flowering date(m-d)	3—18±1	3—12—13	3—13±1	3—13±1
平均落花期(月-日) The average falling-flowering date(m-d)	4—2±1	4—1—2	3—30±1	3—28±1
始花期日序数均方差/d Deviation of DOY of first-flowering date(d)	8.1	4.3	8.1	6.3
落花期日序数均方差/d Deviation of DOY of falling-flowering date(d)	5.8	6.6	6.8	5

表 2 武汉大学樱花始花期与落花期趋势变化检验(1979—2018 年)

Table 2 Trend change test of first-flowering and falling-flowering date for Japanese Cherry Blossoms in Wuhan University(1979—2018)

年间 Period	1979—1995		1996—2018		1979—2018	
	R ² 值	斜率	R ² 值	斜率	R ² 值	斜率
始花期日序数 The DOY of first-flowering date	0.39	−0.79	0.00007	0.0089	0.08	−0.18
落花期日序数 The DOY of falling-flowering date	0.23	−0.55	0.19	−0.47	0.1	−0.18

2.2 花期长度的基本特征与变化趋势分析

40a 平均结果表明,武汉大学日本樱花的平均花期长度为 18d。最短是 9d(1984 年),此外花期长度不足 12d 还有 10d(2012 年)和 11d(1990 年、2005 年、2014 年)。最长是 36d(1996 年),此外花期长度超过 25d 的还有 31d(1998 年)和 26d(1987 年、1999 年、2007 年)。

图 2 为 1979—2018 年花期长度逐年变化与线性拟合结果。40a 间,花期天数变率很大,但整体无明显的

增多或减少趋势。

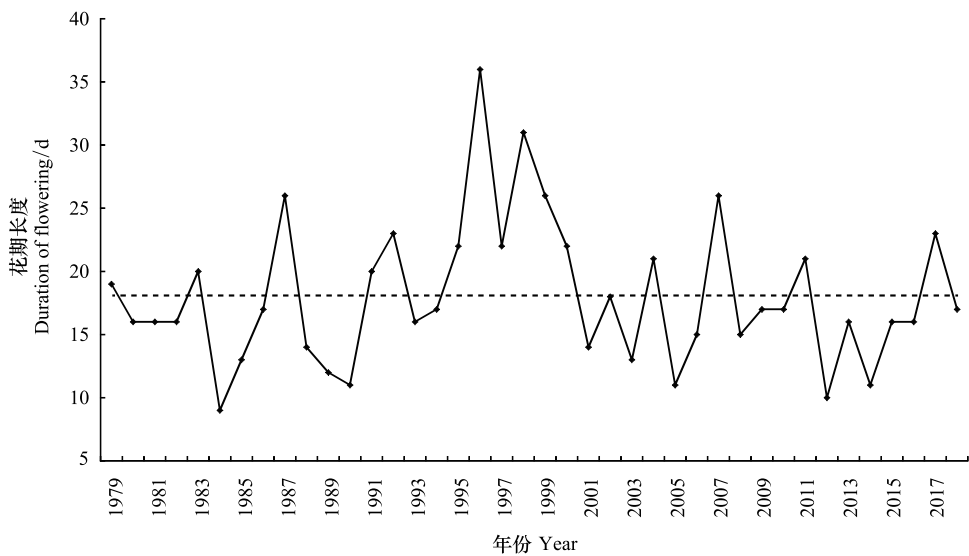


图 2 武汉大学樱花花期长度逐年变化与线性拟合图(1979—2018)

Fig.2 The yearly change of flowering duration of Cherry Blossoms in Wuhan University and its linear fitting (1979—2018)

花期长度每 10a 基本特征见表 3,可见平均花期在 20 世纪 80 年代末至 90 年代有明显的增加,相比较其他年代,平均花期增长了 3—5d。

表 3 武汉大学樱花花期长度基本特征的逐年代差异与变化(1979—2018 年)

年间 Period	最短花期/d The shortest duration of flowering	最长花期/d The longest duration of flowering	平均花期天数/d The average duration of flowering	花期天数均方差/d Deviation of duration of flowering
1979—1988	9	26	16.6	4.3
1989—1998	11	36	21	7.4
1999—2008	11	26	18.1	5.1
2009—2018	10	23	16.4	3.7

均方差大小可以表示花期的稳定性程度,转折点同样出现在 20 世纪 80 年代末至 90 年代,此 10 年间多数年花期与平均花期相差 7—8d,最早与最晚也相差了 25d,这 10 年间武汉大学樱花的花期长度是十分不稳定的。近 20a 里,花期天数的均方差呈明显下降的趋势,其中近 10 年均方差仅 3.7d,即多数年与平均花期相差 3—4d,说明近 10 年武汉大学樱花每年的花期长度还是较稳定的。

3 武汉大学樱花花期长度预报因子选取

为了建立樱花花期长度预报方程,对樱花花期长度与始花期日序数、气温(最高最低气温、温度日较差)、风速、降水量、日照时数等气象要素的相关性进行了分析,找出关键影响因子。

樱花花期长度与始花期日序数呈负相关,即开花时间越早,花期越长;与开花期间平均气温、开花期间最高平均气温、最低平均气温和温度日较差平均值呈负相关,说明在开花期内,平均气温和平均最高气温值越高,平均温度日较差值越大,花期越短;开花期内平均最低气温值越低,花期则越长,即在樱花开花期间,高温有缩短花期的效果,而低温的“保鲜”效果则有利于延长花期。花期长度与开花期内降水总量呈正相关,说明降水越多,花期越长。与开花期内平均极大风速值、平均降水量和日照时数等无明显相关性。

表 4 武汉大学樱花花期长度与各气象要素相关系数(1979—2018)

Table 4 Correlation coefficient between meteorological factors and flowering duration of Cherry Blossoms in Wuhan University

要素 Elements	相关系数 Correlation coefficient
始花期日序数 X_1 The DOY of first-flowering date/d	-0.521 **
开花期内平均极大风速值 Average maximum wind speed during flowering/(m/s)	-0.064
开花期内平均降水量 Average precipitation during flowering/mm	0.069
开花期内降水总量 X_2 Total precipitation during flowering/mm	0.539 **
开花期内平均日照时数 Average sunshine hours during flowering/h	-0.2
开花期间平均气温 X_3 Average temperature during flowering/°C	-0.419 **
开花期间最高气温平均值 X_4 Mean maximum temperature during flowering/°C	-0.458 **
开花期间最低气温平均值 X_5 Mean minimum temperature during flowering/°C	-0.352 **
开花期间温度日较差平均值 X_6 Mean diurnal temperature range during flowering/°C	-0.384 **

* * 表示通过 0.005 的显著性检验

4 樱花花期长度预报方程的建立及结果分析

4.1 拟合分析

4.1.1 单因子拟合

为了分析各不同气象要素对樱花花期长度的影响,分别以 1979—2015 年共 37 年的始花期日序数(X_1)、总降水量(X_2)、开花期间平均气温(X_3)、开花期间最高气温平均值(X_4)、开花期间最低气温平均值(X_5)和开花期间温度日较差平均值(X_6)为预报因子,建立了 6 个樱花花期长度单因子拟合方程,结果如下:

$$Y = 50.453 - 0.439X_1 \quad (R^2 = 0.296, \text{sig} < 0.001) \quad (1)$$

$$Y = 13.8 + 0.066X_2 \quad (R^2 = 0.28, \text{sig} < 0.001) \quad (2)$$

$$Y = 30.105 - 0.956X_3 \quad (R^2 = 0.177, \text{sig} < 0.001) \quad (3)$$

$$Y = 32.649 - 0.845X_4 \quad (R^2 = 0.209, \text{sig} < 0.001) \quad (4)$$

$$Y = 26.821 - 0.978X_5 \quad (R^2 = 0.13, \text{sig} < 0.001) \quad (5)$$

$$Y = 28.77 - 1.299X_6 \quad (R^2 = 0.148, \text{sig} < 0.001) \quad (6)$$

以 2016—2018 年的 X_1 — X_6 为预报因子预报樱花花期长度,并与实际观测结果对比(表 5)。

表 5 武汉大学樱花花期长度预报与检验(2016—2018)

Table 5 Prediction and Test of flowering duration of Cherry Blossom in Wuhan University

年份 Year	2016	2017	2018	平均绝对误差 Mean absolute difference	R^2
实测值 Measured value	16	23	17		
式(1)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (1)	6.8	-1.96	2.28	3.68	0.296
式(2)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (2)	1.3	-2	1.2	1.5	0.28
式(3)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (3)	3.14	-4.1	0.03	2.42	0.177
式(4)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (4)	2.26	-3.96	-1.35	2.52	0.209

续表

年份 Year	2016	2017	2018	平均绝对误差 Mean absolute difference	R^2
式(5)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (5)	3.97	-4.12	0.97	3.02	0.13
式(6)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (6)	-0.23	-4.61	-2.6	2.48	0.148

4.1.2 综合考虑气温为预报因子

综合考虑温度对樱花花期长度的影响,利用上述四个温度相关的因子 X_3 — X_6 建立了多因子花期长度预报方程:

$$Y = 33.128 + 0.121X_3 + 64.196X_4 - 65.026X_5 - 65.305X_6 \quad (R^2 = 0.21, \text{sig} < 0.001) \quad (7)$$

2016—2018 年温度值预报樱花花期长度,并与实际观测结果对比(表 6)。

表 6 武汉大学樱花花期长度预报与检验(综合考虑气温为预报因子)(2016—2018)

Table 6 Prediction and Test of flowering duration of Cherry Blossom in Wuhan University (take temperature as forecast factor comprehensively) (2016—2018)

年份 Year	2016	2017	2018	平均绝对误差 Mean absolute difference
实测值 Measured value	16	23	17	
预测值 Predictive value	18.24	18.3	15.65	
式(7)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (7)	2.24	-4.7	-1.35	2.76

4.2 多因子回归分析

综合考虑始花期日序数(X_1)、降水量(X_2)、温度(X_3 — X_6)等因素的影响,建立多因子花期长度预报方程:

$$Y = 42.932 - 0.295X_1 + 0.042X_2 + 0.532X_3 - 74.774X_4 + 73.94X_5 + 74.183X_6 \quad (R^2 = 0.455, \text{sig} < 0.001) \quad (8)$$

用 2016—2018 年观测值预报樱花花期长度,并与实际观测结果对比(表 7)。

表 7 武汉大学樱花花期长度预报与检验(多因子回归)(2016—2018)

Table 7 Prediction and Test of flowering duration of Cherry Blossom in Wuhan University (multiple factor regression) (2016—2018)

年份 Year	2016	2017	2018	平均绝对误差 Mean absolute difference
实测值 Measured value	16	23	17	
预测值 Predictive value	20.18	23.23	17.26	
式(8)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (8)	4.18	0.23	0.26	1.56

4.3 主成分分析

在进行多元统计分析时,有可能由于各气象要素之间的多重共线性引起较大误差,因此考虑使用主成分分析方法减少变量个数,同时消除多重共线性。主成分分析是对变量共性的一种提取,用降维分析技术来解释原变量的协方差结构。因此选用了主成分分析的方法来进行预报模型的建立,与线性模拟结果进行对

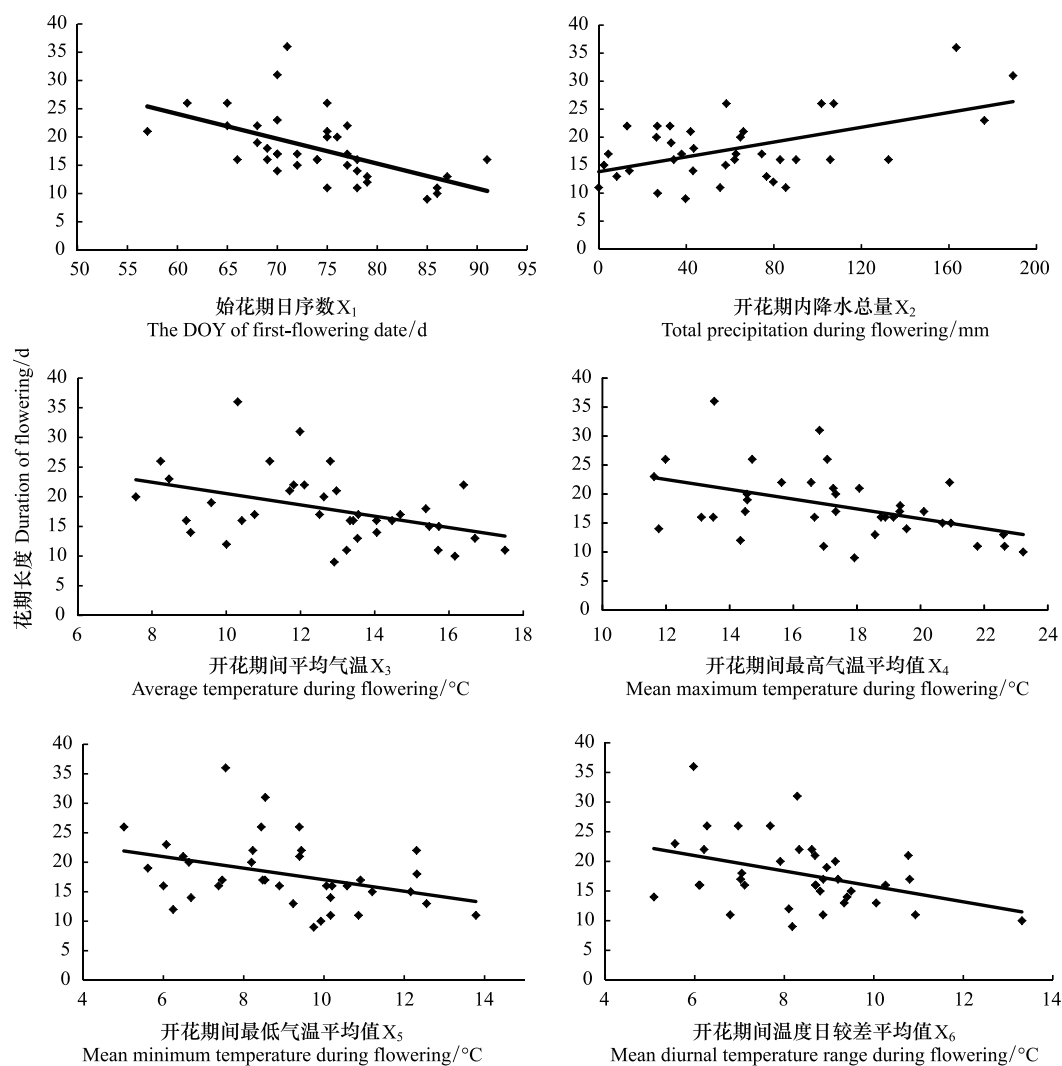


图3 始花期日序数(X_1)、降水量(X_2)、温度(X_3 – X_6)与花期长度的离散图

Fig.3 Discrete plot of the daily ordinal number (X_1), precipitation (X_2), temperature (X_3 – X_6) and length of anthesis

比,以达到更准确预报樱花花期长度的目的。主成分分析结果中成分1和成分2的特征值大于1,合计能解释77.215%的方差,所以提取了成分1和2作为主成分。

将1979—2015年始花期日序数(X_1)、降水量(X_2)、温度(X_3 – X_6)6个因子进行主成分回归,建立了预报方程。

$$Y = 23.141 - 0.058X_1 + 0.062X_2 - 0.106X_3 - 0.108X_4 - 0.095X_5 - 0.08X_6 \quad (R^2 = 0.37, \text{sig} < 0.001) \quad (9)$$

用2016—2018年观测值预报樱花花期长度,并与实际观测结果对比(表8)。

由上述结果可知,3种模型均可对樱花花期长度进行有效预报,综合比较上述各模型预报结果,除始花期单因子拟合模型外,各模型预报的平均绝对误差都在3d以内,整体预报效果较好。

所有模型中,预报效果最好的为主成分回归模型、降水单因子拟合模型和多因子樱花花期长度回归模型,三者的平均绝对误差为1.49、1.5和1.56,说明上述3种模型对樱花花期长度有较准确的预报效果。

5 讨论

本文研究了武汉大学日本樱花始花期和落花期及花期长度的变化规律,并分析了各气象要素与花期长度之间的关系。发现花期长度与始花期、温度和降水都有一定的关系,其中温度是对花期长度影响最大的非生

物因素。樱花花期长度与始花期日序数呈负相关,即开花时间越早,花期长度越长。这是由于在大多数情况下,在同样升温的情形下,始花期比落花期提前更多,从而使得花期长度更长。造成这一现象的原因是更早的物候期比晚的物候期对温度变化的响应更敏感^[30-33]。而各温度因子皆与花期长度呈负相关,说明开花期内,平均气温和平均最高气温值越高,平均温度日较差值越大,花期越短;开花期内平均最低气温值越低,花期则越长。即在樱花开花期间,高温有缩短花期的效果,而低温的“保鲜”效果则有利于延长花期。除温度外,降水也对花期长度有显著影响,两者呈正相关,说明开花期内降水越多,花期越长,这可能也是由于降水导致的降温对花期有一定的延长效果。其实在花期内,当出现大风、强降水、降雪等恶劣天气时,会加大植物维持花朵开放的成本,从而使植物减少花的寿命或者花期持续的时间^[34]。

表 8 武汉大学樱花花期长度预报与检验(主成分分析)(2016—2018)

年份 Year	2016	2017	2018	平均绝对误差 Mean absolute difference
实测值 Measured value	16	23	17	
预测值 Predictive value	18.26	21.6	17.82	
式(9)预报结果与实测结果之差 The difference between the predicted result and the measured result of formula (9)	2.26	-1.4	0.82	1.49

气候变化也对樱花花期有直接影响,IPCC 第五次评估报告明确指出^[28-29],气候变暖自 20 世纪 90 年代中后期以来进入了一个停滞期。而分析结果表明,樱花始花期和落花期的停滞期与全球气候变暖的停滞期高度吻合,说明全球气候变暖对樱花花期有较明显的影响。

总体来说,由于樱花始花期和花期长度受气象因素影响较大,且影响较复杂,在花期不同阶段会有不同影响,因此,还需要通过深入分析开花期间恶劣天气条件的影响,提高模型预报准确率。

开展樱花花期长度的预报工作,对旅游部门合理筹备安排樱花节、游客合理安排观赏时间都具有较大参考价值,后期会将预报模型运用到实际旅游气象服务工作中,更好的开展旅游气象服务工作。

6 结论

本文根据 1979—2018 年连续 40 年对武汉大学樱园日本樱花始花期和落花期的记录资料及同期气象资料,对樱花花期变化规律及各气象要素与花期长度的关系进行了分析,建立了樱花花期长度预报模型。主要结论有:

- (1)武汉大学日本樱花的始花期与落花期在 20 世纪 80—90 年代期间有明显的提前,从 20 世纪 90 年代末开始至今,始花期与落花期变化趋势不明显,与全球气候变化停滞期相吻合。但变率较大,多数年始花期与平均日期可相差 6—8d,落花期的变率较始花期略小,但于平均日期也相差 5—6d。40 年间花期长度变率很大,整体无明显的增多或减少的趋势。
- (2)武汉大学日本樱花的平均始花期为 3 月 14—15 日(闰年 3 月 13—14 日),落花期为 3 月 31 日—4 月 1 日(闰年 3 月 30—31 日),平均花期长度为 18d。
- (3)通过分析樱花花期长度与各气象要素和始花期的关系,发现花期长度与当年始花期日序数呈负相关,与开花期间平均气温、开花期间最高平均气温、最低平均气温和温度日较差平均值呈负相关,与开花期间总降水量呈正相关。与开花期内平均极大风速值、平均降水量和日照时数等无明显相关性。
- (4)利用 1979—2015 年共 37 年观测资料,建立了单因子拟合、多因子回归分析和主成分分析模型,对武汉大学樱花花期长度进行了预报,用 2016—2018 年 3 年资料用于预测效果的独立样本检验。通过对模型的检验,取得了较好的试验效果,具有一定的参考和应用价值。其中主成分回归模型、降水单因子拟合模型和多因子樱花花期长度回归模型预报效果最好,平均绝对误差在 1.5d 左右。

参考文献 (References):

- [1] Bolmgren K, Vanhoenacker D, Miller-Rushing A J. One man, 73 years, and 25 species. Evaluating phenological responses using a lifelong study of first flowering dates. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(3): 367-375.
- [2] Gonsamo A, Chen J M, Wu C Y. Citizen science: linking the recent rapid advances of plant flowering in Canada with climate variability. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2239.
- [3] Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, Dai J H. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [4] Szabó B, Vincze E, Czúcz B. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(9): 1347-1356.
- [5] Miller-Rushing A J, Primack R B. Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: a community perspective. *Ecology*, 2008, 89(2): 332-341.
- [6] Dai J H, Wang H J, Ge Q S. The decreasing spring frost risks during the flowering period for woody plants in temperate area of eastern China over past 50 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 641-652.
- [7] Dai J H, Wang H J, Ge Q S. Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xi'an, China. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(5): 749-758.
- [8] 戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近 50 年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. *地理学报*, 2013, 68(5): 593-601.
- [9] Menzel A, Helm R, Zang C. Patterns of late spring frost leaf damage and recovery in a European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in south-eastern Germany based on repeated digital photographs. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 10.
- [10] Delucia E H, Nabity P D, Zavala J A, Berenbaum M R. Climate change: resetting plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 1677-1685.
- [11] Burkle L A, Marlin J C, Knight T M. Plant-pollinator interactions over 120 years: loss of species, co-occurrence, and function. *Science*, 2013, 339(6127): 1611-1615.
- [12] Chuine I. Why does phenology drive species distribution? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3149-3160.
- [13] 刘普幸, 杨泉. 敦煌绿洲 1955 年至 2010 年胡杨年生长季对气候变化的响应. *资源科学*, 2012, 34(3): 566-571.
- [14] 张洪芬, 韩涛, 黄斌. 甘肃黄土高原春季气温变化对物候的影响. *资源科学*, 2007, 29(6): 10-15.
- [15] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973.
- [16] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(5): 402-410.
- [17] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对我国刺槐、紫丁香始花期的影响. *北京林业大学学报*, 2004, 26(6): 94-97.
- [18] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [19] 柳晶, 郑有飞, 赵国强, 陈怀亮. 郑州植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2007, 27(4): 1471-1479.
- [20] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 张金鑫, 祝成瑶, 刘雪峰, 刘利民. 森林低温霜冻灾害干扰研究综述. *生态学报*, 2013, 33(12): 3563-3574.
- [21] Wang H J, Zhong S Y, Tao Z X, Dai J H, Ge Q S. Changes in flowering phenology of woody plants from 1963 to 2014 in North China. *International Journal of Biometeorology*, 2019, 63(5): 579-590.
- [22] 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. *地理学报*, 2017, 72(1): 53-63.
- [23] 陈正洪, 肖玫, 陈璇. 樱花花期变化特征及其与冬季气温变化的关系. *生态学报*, 2008, 28(11): 5209-5217.
- [24] 舒斯, 肖玫, 陈正洪. 樱花始花期预报方法. *生态学报*, 2018, 38(2): 405-411.
- [25] Shi P J, Chen Z H, Reddy G V P, Hui C, Huang J G, Xiao M. Timing of cherry tree blooming: contrasting effects of rising winter low temperatures and early spring temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240-241: 78-89.
- [26] Bock A, Sparks T H, Estrella N, Jee N, Casebow A, Schunk C, Leuchner M, Menzel A. Changes in first flowering dates and flowering duration of 232 plant species on the island of Guernsey. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3508-3519.
- [27] Miller-Rushing A J, Katsuki T, Primack R B, Ishii Y, Lee S D, Higuchi H. Impact of global warming on a group of related species and their hybrids: Cherry tree (*Rosaceae*) flowering at Mt. Takao, Japan. *American Journal of Botany*, 2007, 94(9): 1470-1478.
- [28] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [29] 杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 车存伟, 邱雪, 马转转. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应. *地理学报*, 2018, 73(9): 1748-1764.
- [30] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296(5573): 1689-1691.
- [31] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 243-263.
- [32] Bai J, Ge Q S, Dai J H. The response of first flowering dates to abrupt climate change in Beijing. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 564-572.
- [33] Miller-Rushing A J, Inouye D W, Primack R B. How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *Journal of Ecology*, 2008, 96(6): 1289-1296.
- [34] 张志强, 李庆军. 花寿命的进化生态学意义. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 598-606.