

DOI: 10.5846/stxb201905100956

陶泽兴, 葛全胜, 徐韵佳, 王焕炯. 西安和宝鸡木本植物花期物候变化及温度敏感度对比. 生态学报, 2020, 40(11): 3666-3676.

Tao Z X, Ge Q S, Xu Y J, Wang H J. Comparison of changes in flowering phenology of woody plants and temperature sensitivity between Xi'an and Baoji. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3666-3676.

西安和宝鸡木本植物花期物候变化及温度敏感度对比

陶泽兴¹, 葛全胜¹, 徐韵佳^{1,2}, 王焕炯^{1,*}

¹ 中国科学院地理科学与资源研究所地表格局与模拟重点实验室, 北京 100101

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 植物物候是指示生态系统对气候变化响应的重要证据。已有研究多基于代表性站点的物候观测数据研究物候特征及其对气候变化的响应规律。同一气候区内, 不同站点的物候变化及对温度变化响应的敏感度是否一致仍需深入探讨。本文选择同属于暖温带湿润区汾渭平原气候区的西安和宝鸡为研究区, 利用“中国物候观测网”在两个站点 21 个共有物种的开花始期和开花末期数据, 比较了 1987—2016 年两站点各植物花期物候变化特征及其对温度变化响应的敏感度差异。结果表明, 西安和宝鸡各物种的开花始期和开花末期均以提前趋势为主。大部分物种开花始期在西安的提前趋势(平均趋势 -0.57 d/a)明显强于在宝鸡的提前趋势(平均趋势 -0.29 d/a), 但开花末期趋势差异不显著。除紫薇和迎春的敏感度差异较大外, 其他物种开花始期和开花末期的温度敏感度在两站点间非常接近, 无显著差异。由此可见, 在同一气候区的不同站点, 因增温幅度不同, 植物的始花期变化存在较大差异, 不能用单站点的物候变化反映整个气候区的物候变化。但同一植物在单站点的温度敏感度可以较好的反映同一气候区其他站点的植物物候-气候关系。本文研究结果可为利用有限站点的物候观测数据分析区域物候变化及对气候变化的响应提供科学依据。

关键词: 物候变化; 开花始期; 开花末期; 温度敏感度; 西安; 宝鸡

Comparison of changes in flowering phenology of woody plants and temperature sensitivity between Xi'an and Baoji

TAO Zexing¹, GE Quansheng¹, XU Yunjia^{1,2}, WANG Huanjiong^{1,*}

¹ Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Plant phenology is an important indicator of ecosystem response to climate change. Most of the previous studies used the phenological observation data from the representative sites to investigate the phenological characteristics and its responses to climate change. Whether the phenological changes and their sensitivity to temperature are consistent among different sites of the same climatic region needs further exploration. This study selects Xi'an and Baoji, which are distributed at the Fen-Wei Plains climatic region with a humid and temperate climate, as the study area. Using the data of the first flowering date (FFD) and end of flowering date (EFD) of 21 woody plants in Xi'an and Baoji from China Phenological Observation Network, the interannual change and temperature sensitivity of flowering phenology were compared at different sites during 1987—2016. The results showed that the FFD and EFD of most species advanced in Xi'an and Baoji over the past 30 years. For most species, the trend of FFD in Xi'an (mean: -0.57 days/year) was significantly stronger

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0606103); 国家自然科学基金项目 (41771056, 41901014); 中科院地理资源所可桢杰出青年学者计划 (2018RC101)

收稿日期: 2019-05-10; 网络出版日期: 2020-03-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghj@igsnrr.ac.cn

than that in Baoji (mean: -0.29 days/year), but there was little difference in the trend of EFD between the two sites. Except for *Lagerstroemia indica* and *Jasminum nudiflorum*, the temperature sensitivity of the FFD and EFD for other species presented no significant difference between the two sites. Thus, the phenological changes at a single site cannot reflect the phenological changes in the whole climatic region, because the changes in FFD always showed significant discrepancies among different sites due to divergent changes in temperature. However, the temperature sensitivity of FFD and EFD calculated at a single site could well reflect the plant phenology-climate relationship at other sites in the same climatic region. Our study could provide a scientific basis for the analysis of regional phenological changes and responses to climate change using phenological observation data from the limited sites.

Key Words: phenological change; first flowering date; end of flowering date; temperature sensitivity; Xi'an; Baoji

植物物候指植物随气候的季节性变化而发生的周期性生长发育事件^[1]。由于这些生长发育事件的发生时间容易受气候变化影响,因此植物物候是全球变化敏感的指示器^[2]。其年际变化能够反映气候变化对生态系统的影响^[3-4]。植物的叶物候影响光合作用的起始和结束,从而改变生态系统生产力^[5]。植物的花期物候变化还可以造成植物开花时间与传粉者活动时间的不匹配,从而影响生物多样性^[6-7]。除对气候变化响应外,植物物候变化通过改变地表物理特性(影响地表粗糙度、反照率)和生物地球化学循环(水、碳、氮循环)的方式,对气候系统产生反馈作用^[1]。因此研究植物物候变化及对气候变化的响应具有重要意义。

长时间地面物候观测资料表明,北半球温带地区的木本植物在近几十年发生了显著变化^[2,8-10]。例如,基于地面物候观测资料的荟萃分析结果表明,中国地区的春、夏季物候期在 1960 到 2011 年平均提前趋势为 2.75 d/10a^[11]。欧洲 6 种植物的始花期在 1970 年到 2010 年间以 $2-9$ d/10a 的速率提前^[12]。北美地区木本植物的春季物候也出现了类似的变化^[8]。此外,物候变化在不同地区或温度带的差异得到广泛关注。例如在我国,温带地区木本植物春季物候的提前趋势明显强于亚热带地区^[13]。除区域尺度物候变化研究外,小尺度的物候变化研究主要在单站点进行^[14-15],这是因为物候地面观测多基于有限数量的站点开展。单站点的物候变化是否能够反映整个气候区的变化还有待深入研究。

已有研究表明,相比于其他环境因子,温度对木本植物的物候变化起主导作用^[16-17]。因此,观测到的春季物候期提前趋势与全球的增温趋势显著相关。在衡量植物物候对气温变化响应的方向和程度时,常用到的指标是温度敏感度,即温度每升高 1°C ,植物物候期变化的天数^[18]。温度敏感度存在较大的种间差异。例如,在欧洲,英国 385 种植物的始花期观测记录表明,花期前一个月气温每升高 1°C ,花期平均提前 1.7 到 6.0 d^[19]。美国马萨诸塞州 20 种植物开花始期对开花前两个月温度的响应敏感度在 -6.2 d/ $^{\circ}\text{C}$ 到 -3.2 天/ $^{\circ}\text{C}$ 之间^[20]。温度敏感度在不同区域也有明显差异。例如,美国的紫丁香(*Syringaoblata*)和什锦丁香(*Syringachinensis*)始花期的温度敏感度在低纬度地区更高^[21]。该研究表明,对于同一物种而言,在单站点计算的温度敏感度难以推广到不同气候区的其他站点。但迄今为止,尚未有研究验证了同一气候区的不同站点间植物春季物候期对温度响应敏感度的一致性。

根据中国气候区划^[22],西安和宝鸡均位于暖温带湿润区的汾渭平原,气候类型一致,且在中国物候观测网均有丰富的历史观测数据,是研究同一气候区不同站点间物候变化及对温度的响应是否一致的理想研究区。本文以 1987—2016 年西安和宝鸡站的开花始期和开花末期观测数据为基础,利用回归分析法计算了两个站点 21 种共有植物的花期物候变化趋势,比较了各物种花期物候对温度变化响应的敏感度差异。本文研究目标是探究单站点的物候变化及对温度变化响应在同一气候区内是否具有可推广性。

1 数据与方法

1.1 研究站点概况

本文选择西安(34.21°N , 108.97°E)和宝鸡(34.37°N , 107.10°E)两个站点为代表,比较植物花期物候变化

及其对温度响应敏感度的差异(图1)。之所以选择这两个站点,是因为它们属于同一气候区,且都是中国物候网(<http://www.cpon.ac.cn/>)长期开展物候观测的站点,数据连续性好,共有物种多。两站点纬度相近,直线距离约 170 km,但由于西安气象站所处的海拔(398 m)低于宝鸡(590 m),因此其多年均温(14.09°C)平均比宝鸡(11.97°C)高 2.12°C (图1)。从降水量来看。两站点的降水都主要集中在 7—9 月,这三个月的降水量约占全年总降水量的一半,但西安的年降水量(536.70 mm)比宝鸡(645.90 mm)少 109.2 mm。

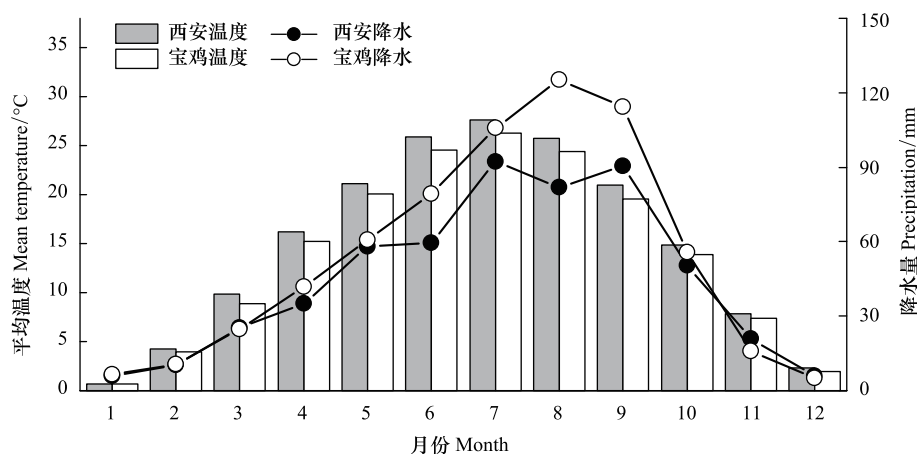


图1 1987—2016年两个站点的逐月温度与降水平均值

Fig.1 The mean monthly temperature and precipitation at two sites during 1987—2016

1.2 物候与气象数据

本研究各物种的开花始期(first flowering date, FFD)和开花末期(end of flowering date, EFD)数据来自于“中国物候观测网”。开展物候观测的地点分别为西安植物园和宝鸡植物园。为进行温度敏感度计算和分析,首先需要对物候记录进行筛选,保证所选物种在两个站点相同年份有对应的开花始期和开花末期观测记录,以消除由于物候观测年份不同导致的误差。另外,各物种在 1987—2016 年间的物候观测年数需大于 10 年,以便于温度敏感度的计算。综上,筛选后的木本植物共计 21 种,包括 8 种乔木,12 种灌木和 1 种藤本植物(表1)。其中,大部分植物在 1997—2002 年和 2009—2010 年两时段无物候观测记录(图2)。

观测站点的逐日平均气温数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”。但该数据集中西安站的气温数据仅覆盖 1951—2008 年,而西安气象站迁站后的泾河站气温观测数据从 2006 年一直延续至今。因此,本文用西安和泾河站重叠观测时段(2006—2008 年)的气温数据计算两个站点每日的平均气温差异,将泾河站 2006 年至今的气温数据均一化到西安,得到 1951 年至今西安站的完整气温序列,用于后续的敏感度分析^[23]。同理,数据集中宝鸡站的气温数据仅覆盖 1951—2008 年,本文利用最近的风翔站(2005 至今)的气温数据进行均一化,得到 1951 年至今宝鸡站的完整气温序列。西安气象站与西安植物园的距离为 11.0 km,海拔仅相差 38.5 m;而宝鸡气象站与宝鸡植物园的距离为 3.3 km,海拔基本相同。因此,本文所采用的气象数据能够代表物候观测点的实际气候状况。

1.3 研究方法

为研究西安和宝鸡站所有植物物候期年际变化的整体态势,将各物种的开花始期或开花末期与年份进行线性回归分析,回归方程的斜率即为物候期年际变化趋势。其次,本研究对比了两站点同种植物的开花始期和开花末期变化趋势的异同,并使用 t -检验检测两站点的物候变化趋势均值是否有显著差异。

为计算花期对温度响应的敏感度(S_T),首先需要确定温度对花期影响最为显著的时段。对每个物种的开花始期时间序列,计算所有记录年份的平均开花始期和平均开花末期,以多年平均开花始期前 1 d, 2 d...到 180 d 划分 180 个时段,分别计算每一时段平均温度与开花始期时间序列的相关系数^[24]。相关系数绝对值最

大的时段即为该物种对温度变化响应的最优区间。对于各物种的开花末期,最优区间的起点与开花始期相同,终点为多年平均开花末期。

表 1 研究涉及的物种信息
Table 1 Summary of the species investigated in this study

编号 Number	物种 Species	生活型 Life form	平均开花始期 Mean FFD (DOY)	记录数量 Number of records
1	迎春 <i>Jasmin umnudiflorum</i>	灌木	52	17
2	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	乔木	66	10
3	山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	乔木	69	19
4	毛樱桃 <i>Cerasus tomentosa</i>	灌木	77	10
5	连翘 <i>Forsythia suspensa</i>	灌木	77	19
6	贴梗海棠 <i>Chaenomeles speciosa</i>	灌木	81	10
7	紫叶李 <i>Prunuscerasifera</i> f. atropurpurea	灌木	81	10
8	白丁香 <i>Syringa oblata</i> var. alba	灌木	88	10
9	木瓜 <i>Chaenomeles sinensis</i>	灌木	91	11
10	色木槭 <i>Acer mono</i>	乔木	94	14
11	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	灌木	94	11
12	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	灌木	94	19
13	紫藤 <i>Wisteria sinensis</i>	藤本	102	14
14	胡桃 <i>Juglans regia</i>	乔木	103	10
15	牡丹 <i>Paeonia suffruticosa</i>	灌木	111	11
16	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	乔木	112	11
17	七叶树 <i>Aesculus chinensis</i>	乔木	117	10
18	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	乔木	117	18
19	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	乔木	136	12
20	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	灌木	170	12
21	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	灌木	190	10

FFD:开花始期 First flowering date;DOY:序日 Day of year

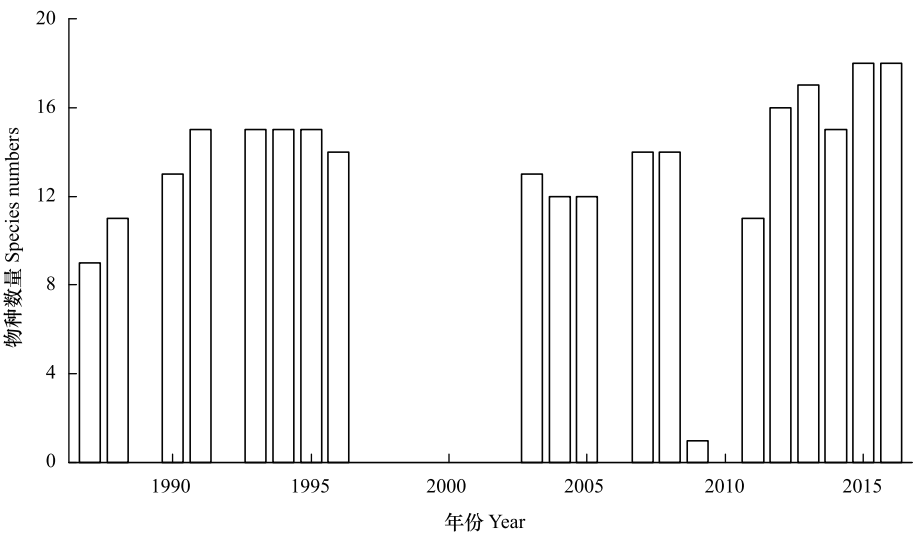


图 2 1987—2016 年西安和宝鸡逐年开花始期和开花末期记录数量
Fig.2 The number of records for first flowering date and end of flowering date at each site during 1987—2016

植物物候在时间上对温度的响应敏感度(S_{T_i})用物候期时间序列与最优区间平均温度时间序列的回归方程斜率来表征:

$$Phe = S_n \times T_{op} + a + \varepsilon \quad (1)$$

其中, Phe 表示开花始期或开花末期, T_{op} 表示最优区间的平均气温, a 为截距, ε 为误差项。

2 结果与分析

2.1 两站点温度变化趋势对比

去除物候观测数据缺失的 1997—2002 年和 2009—2010 年两个时段后, 1987—2016 年西安和宝鸡各月温度均呈升高趋势(图 3)。就西安站而言, 除了 1 月和 9 月外, 其余各月的升温趋势都显著。3 月的温度升高趋势最大, 达 $0.21^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。宝鸡 3 月、4 月和 6 月平均温度的升高趋势显著, 但升温速率明显低于西安。宝鸡温度变化最大的月份也是 3 月, 升温趋势达到 $0.14^{\circ}\text{C}/\text{年}$, 其余月份增温趋势均不超过 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。

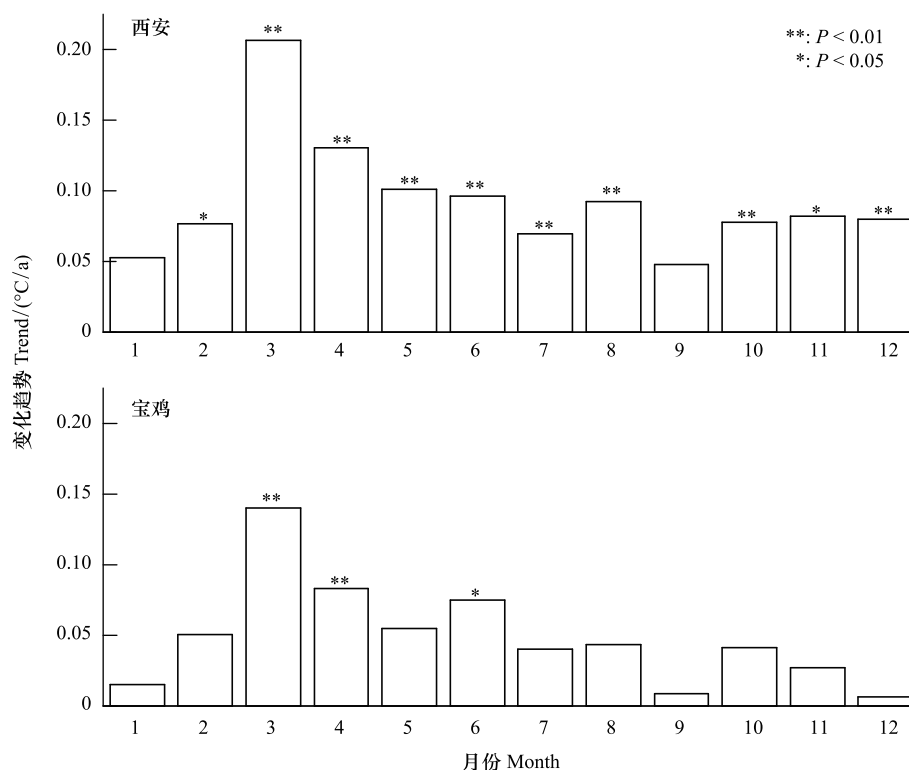


图 3 1987—2016 年西安和宝鸡逐月温度变化趋势

Fig.3 The temporal trend of monthly temperature at Xi'an and Baoji during 1987—2016

2.2 花期变化趋势对比

总体而言, 西安和宝鸡各物种开花始期的变化均以提前为主(图 4), 平均变化趋势分别为 -0.57 d/a 和 -0.29 d/a , 两者存在显著差异(t -检验)。其中, 西安所有物种的开花始期均呈提前趋势, 提前趋势显著的物种占比 66.67% ($P < 0.05$)。紫薇的提前趋势最大, 达到 -1.56 d/a 。宝鸡开花始期提前的物种占总物种数的 85.7%, 显著提前的比例为 42.86% ($P < 0.05$), 但这些物种提前趋势均小于 0.80 d/a 。就开花末期而言, 西安和宝鸡各物种的平均变化趋势分别为 -0.37 d/a 和 -0.26 d/a , 两者差异不显著(t -检验)。在西安和宝鸡, 开花末期提前的物种分别占总物种数的 90.48% 和 66.67%, 显著提前的比例分别为 47.62% 和 57.14% ($P < 0.05$)。

对比西安和宝鸡各物种花期的变化趋势可以看出(图 5), 除两个物种(胡桃和毛白杨)外, 其余物种开花始期在西安的提前趋势要明显大于在宝鸡的提前趋势。其中, 紫薇开花始期在西安的提前趋势(-1.56 d/a)是其在宝鸡提前趋势(-0.39 d/a)的约 4 倍。就开花末期而言, 不同物种在两站点的趋势均分布在 1:1 线附近, 且显著相关。约有一半物种的开花末期在西安的提前趋势大于其在宝鸡的提前趋势(分布在 1:1 线的左

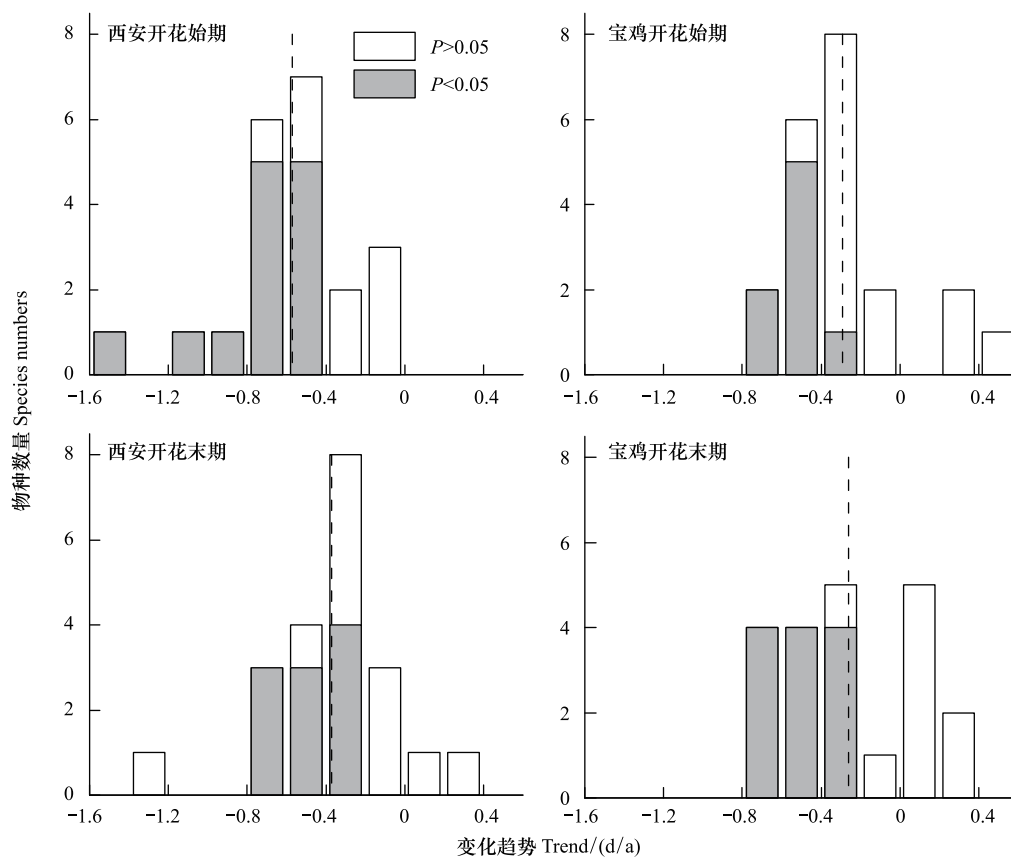


图 4 1987—2016 年各物种开花始期和开花末期变化趋势的频率分布

Fig.4 The frequency distribution of interannual trend (1987—2016) in the first flowering date and end of flowering date

虚线表示变化趋势的平均值

上方), 这些物种大多数为花期较晚的物种。相反, 花期较早的植物开花末期的提前趋势在宝鸡更明显 (分布在 1:1 线的右下方)。

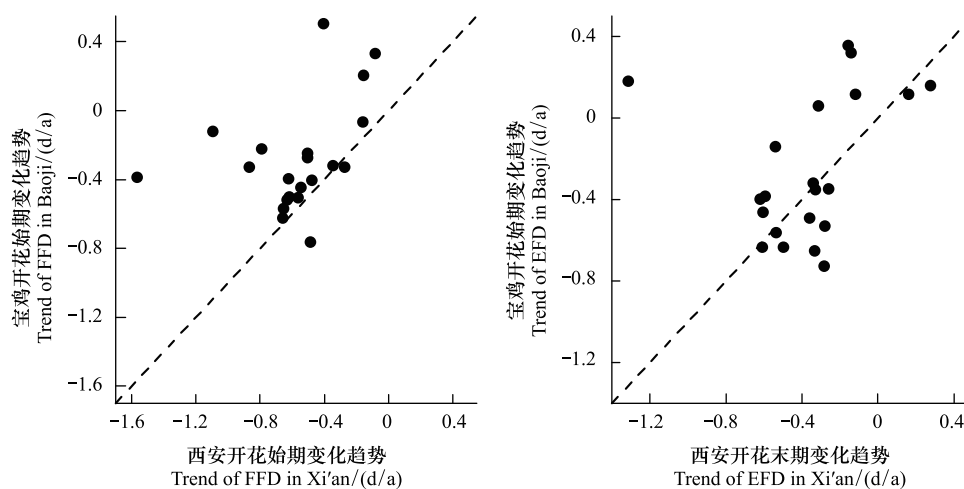


图 5 各物种在西安和宝鸡开花始期和开花末期的变化趋势对比

Fig.5 The comparison of temporal trend in the first flowering date and end of flowering date in Xi'an and Baoji

FFD; 开花始期 First flowering date; EFD; 开花末期 End of flowering date

从西安和宝鸡开花始期和开花末期年际变化的相关系数上看(图6),大部分物种开花始期和开花末期的年际变化在两个站点间具有一致性,平均相关系数分别达到0.82和0.67。除木瓜外,其余物种的开花始期在西安和宝鸡的年际变化都显著相关($P < 0.05$)。对于大部分物种(76.19%),开花末期的年际变化在两个站点间也显著相关。所有物种逐年平均的开花始期在两个站点均呈现显著的提前趋势,在西安每年提前1.08 d,在宝鸡每年提前0.88 d。两个站点最晚的平均开花始期都出现在1988年,分别为5月3日(序日:124)和5月6日(DOY:126)。最早的平均开花始期都出现在2007年,均为3月18日(序日:78)。最早和最晚的平均开花始期相差约一个半月。所有物种开花末期的均值在西安和宝鸡的变化趋势较为接近,分别为 -0.99 d/a和 -1.00 d/a($P < 0.01$)。开花末期的年际变化和开花始期呈现较好的同步性,两个站点最晚和最早的平均开花

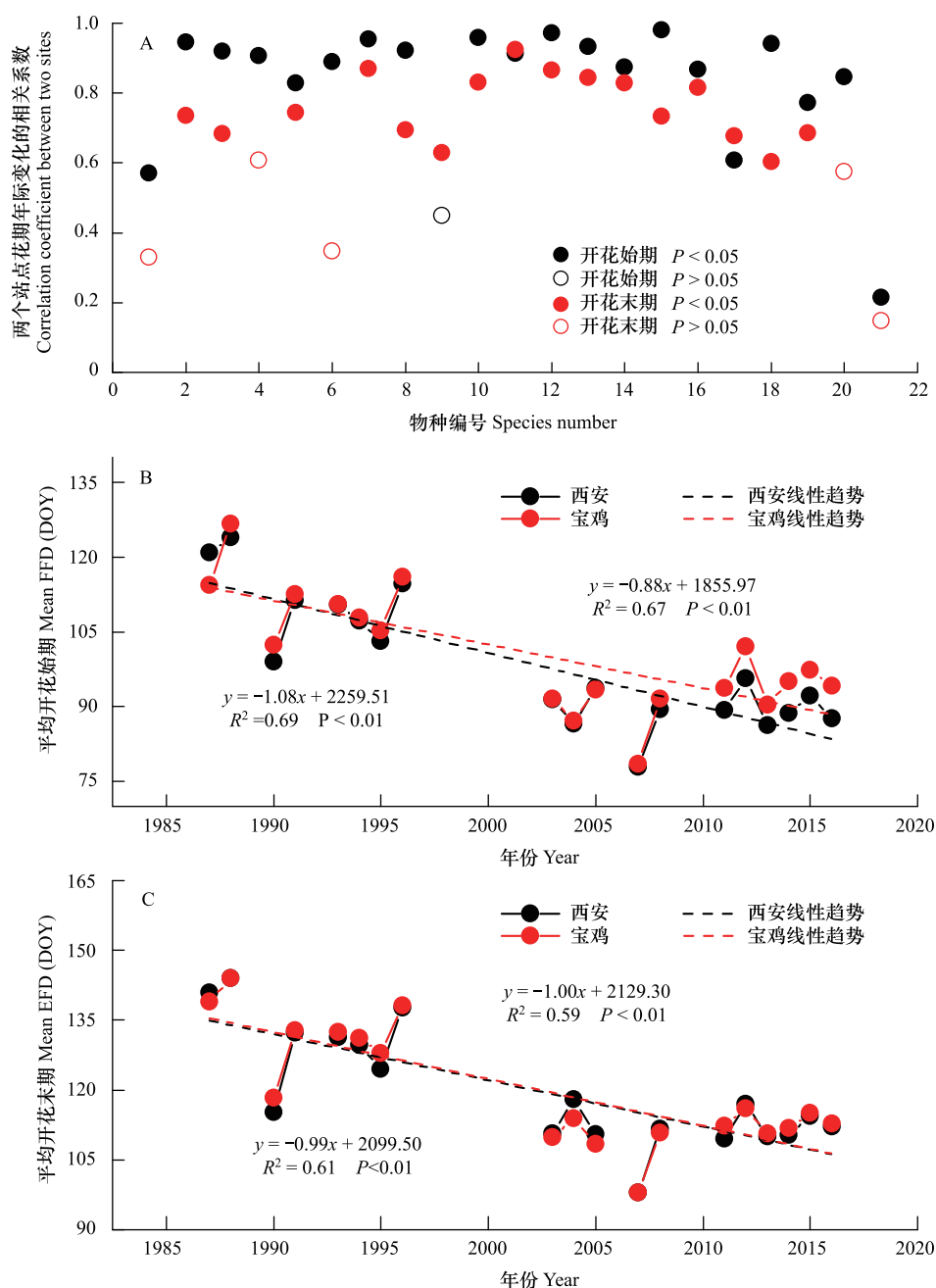


图6 西安和宝鸡各物种花期年际变化的相关系数及所有物种开花始期和开花末期均值的逐年变化

Fig.6 Correlation coefficients between the flowering phenophases of Xi'an and Baoji and interannual changes in the mean first flowering date and end of flowering date of all species

末期均同样出现在 1988 年和 2007 年。最晚的平均开花末期(5 月 23 日)和最早的平均开花末期(4 月 7 日)也相差近一个半月。

2.3 植物对气温变化响应的最优区间对比

从植物响应气温变化的最优区间长度来看(图 7),在西安,各物种开花始期与之前 54 d 的平均气温最相关,在宝鸡主要受之前 43 d 的平均气温影响。在宝鸡,开花始期最优区间长度在物种间的差异相对西安较大,最长和最短的最优区间长度相差达 91 d。开花末期响应气温变化的最优区间长度均值在西安和宝鸡分别为 76 d 和 62 d。通过各物种多年平均物候期和最优区间长度的线性相关分析可以看出,开花越晚的物种,开花始期对气温响应的最优区间长度越长,且这一关系在西安显著($P < 0.05$,图 7)。开花末期也表现出相同的规律,即开花结束越晚的物种,开花末期对气温响应的最优区间长度越长。开花末期每晚 1 d,最优区间长度在西安和宝鸡分别长 0.52 d($P < 0.01$)和 0.29 d($P < 0.05$)。

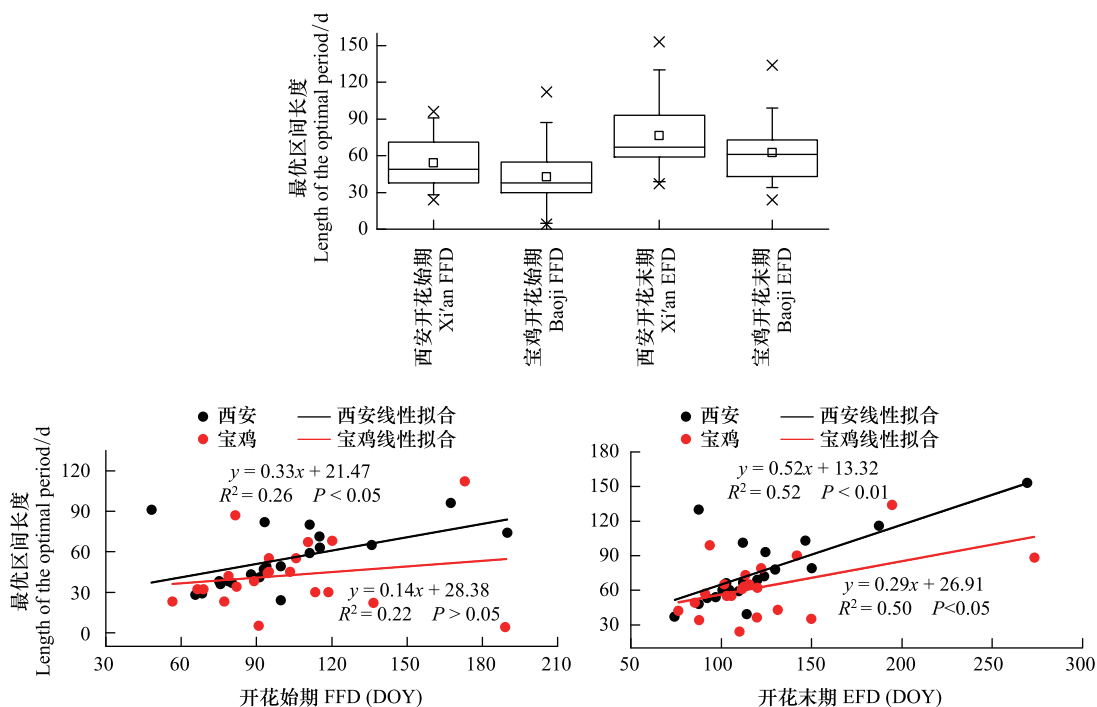


图 7 各物种最优区间长度及其与平均物候期(1987—2016)的关系

Fig.7 Length of the optimal period and its relationship with mean phenophases during 1987—2016 for each species

箱图的上下端分别表示四分位数,竖线的两端分别表示最大值和最小值,箱内方形和横线分别表示平均值和中位数

2.4 植物开花物候对温度的响应敏感度

从各物种花期物候对温度的响应程度来看(图 8),西安和宝鸡所有物种开花始期对温度响应的敏感度均为负值,即温度升高,开花始期提前。开花始期的温度敏感度在西安均显著,在宝鸡只有 2 个物种不显著。在西安,紫薇和迎春始花期的温度敏感度分别为 -12.01 d/°C 和 -12.47 d/°C,明显大于宝鸡(-2.24 和 -4.05 d/°C)。除这两个物种外,其余 19 种物种开花始期对温度的响应敏感度在两个站点较为相近,均在 -2 d/°C 到 -6 d/°C 之间,且平均值无显著差异(t 检验)。19 种植物在两个站点间敏感度的平均绝对差异为 0.73 d/°C。

就开花末期而言,除宝鸡的紫薇外,其他物种在两站点的开花末期温度敏感度均为负值。开花末期的温度敏感度均值在西安和宝鸡分别为 -3.36 d/°C 和 -3.30 d/°C(差异不显著),平均绝对差异为 1.31 d/°C。开花末期温度敏感度在 -5 d/°C 到 -2 d/°C 之间的物种数最多,分别达到总数量的 90.48% 和 85.71%。

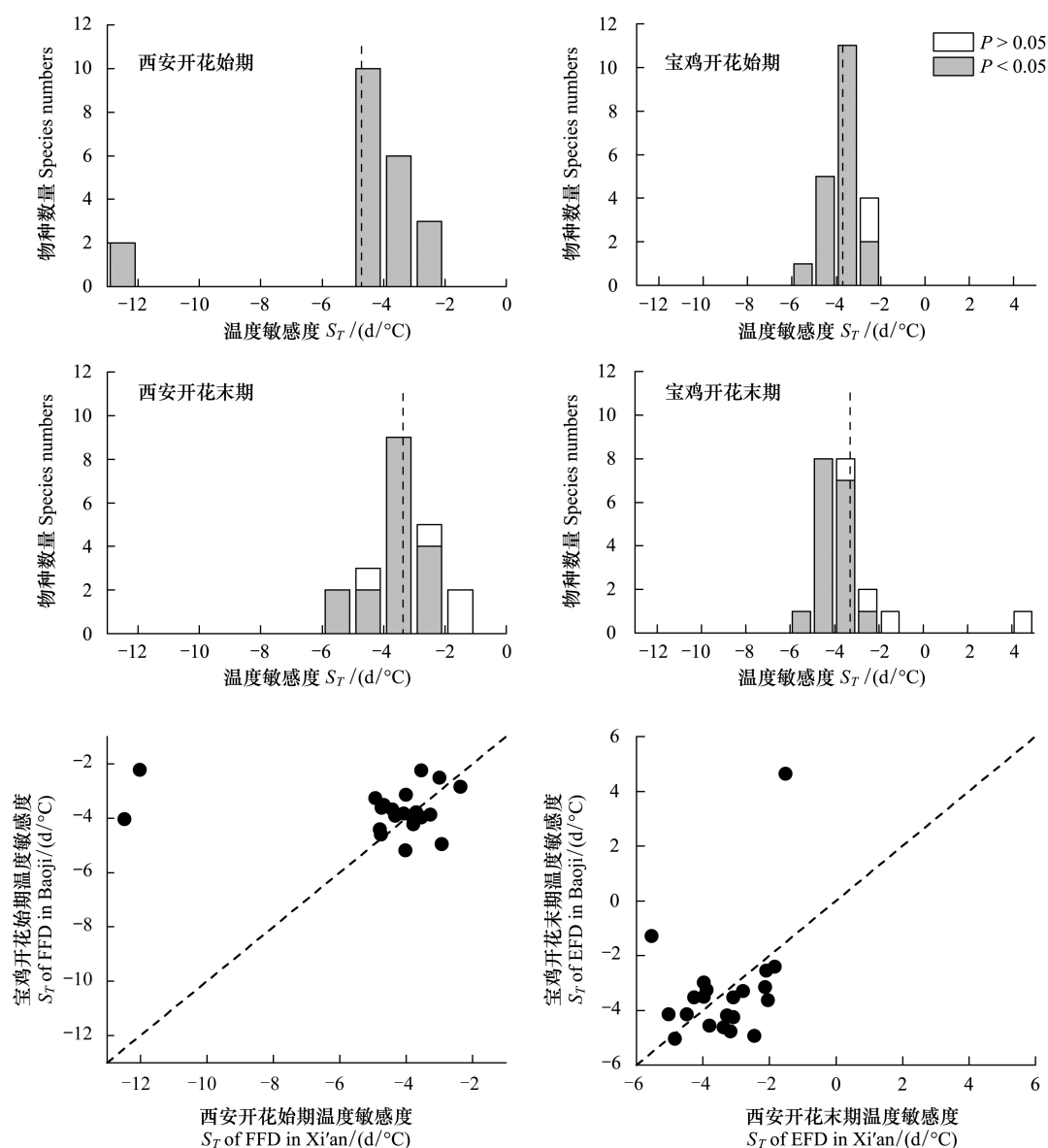


图 8 西安和宝鸡各物种开花始期和开花末期对气温响应的敏感度对比

Fig.8 The comparison of temperature sensitivity (S_T) of first flowering date and end of flowering date for different species between Xi'an and Baoji

前两行图中的虚线表示平均值;第三行图中的虚线表示 1:1 线

3 讨论

本文发现 1987 到 2016 年大部分物种的开花始期和开花末期均呈提前趋势,其中西安和宝鸡各物种开花始期的平均变化趋势分别为 -0.57 d/a 和 -0.29 d/a。之前的研究表明,1963—2007 年西安 34 种木本植物开花始期的平均变化趋势为 -0.20 d/a^[25],小于本文结果,可能与物种和研究时段选择的差异有关。各物种开花始期在西安的提前趋势约为宝鸡的两倍,这表明即使在同一气候区,植物的物候变化仍可能存在较大差异。因此,单站点的物候变化并不能够反映整个气候区的物候变化。在本研究中,不同站点春季温度变化差异是造成物候变化差异的最主要原因。例如,西安 3 月的增温趋势为 $0.21^{\circ}\text{C}/\text{年}$,而宝鸡 3 月的增温速率仅为 $0.14^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 。

本文计算的西安和宝鸡大部分物种开花始期对温度的响应敏感度在 $-5\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 到 $-2\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 之间。除紫薇和迎春外,其余物种开花始期的平均温度敏感度在两个站点分别为 $-3.93\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.77\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 。这与前人在温带地区的研究结果相近。例如,Dai 等^[10]研究发现西安 42 种植物开花始期的温度敏感度均值为 $-4.34\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 。但和亚热带地区的研究相比,本文两个站点开花始期的敏感度相对较小。例如,贵阳 1980—2014 年 60 种木本植物开花始期的平均温度敏感度达到 $-5.75\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ ^[26]。西安和宝鸡所有物种开花末期的平均温度敏感度分别为 $-3.36\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.30\text{ d}/^{\circ}\text{C}$,这与 1978—2014 年牡丹江 40 种植物开花末期的温度敏感度(春季开花植物 $-3.30\text{ d}/^{\circ}\text{C}$,夏季开花植物 $-3.50\text{ d}/^{\circ}\text{C}$)非常接近^[24]。

木本植物开花始期和开花末期对温度响应的敏感度在两个站点间无显著差异,表明在研究植物物候对气候变化的响应时,可以将单站点的温度敏感度推广到同一气候区其他站点使用。例如,当某站点无相关植物物候数据时,可用相邻站点对应植物的温度敏感度进行物候变化趋势的推演。根据中国气候区划方案^[22],可将 44 个气候区(除青藏高原外)分别设置物候观测站点,以最小的人力成本获得全国大部分地区植物对气候变化的响应规律。

此外,本研究还发现,两个站点开花始期的温度敏感度均大于开花末期(图 8),说明更早的物候期可能比更晚的物候期对温度变化的响应更强^[27-28]。这也在一定程度上解释了两站点开花始期的提前趋势比开花末期更加明显的规律(图 6)。另外,开花始期的温度敏感度高于开花末期也会造成花期持续时间延长,例如西安 38 种植物的花期长度在 1963—2014 年以 $0.42\text{ d}/10\text{a}$ 的速率延长^[29]。

4 结论

本文基于中国物候观测网的物候观测数据,利用回归分析方法计算了 1987—2016 年位于同一气候区的西安和宝鸡 21 种共有木本植物的物候变化趋势及其对温度的响应敏感度,比较了站点间物候变化及对温度变化响应的异同。主要结论如下:

(1) 西安和宝鸡各物种的开花始期和开花末期均以提前趋势为主。西安和宝鸡开花始期的平均变化趋势分别为 $-0.57\text{ d}/\text{a}$ 和 $-0.29\text{ d}/\text{a}$,开花末期的平均变化趋势分别为 $-0.37\text{ d}/\text{a}$ 和 $-0.26\text{ d}/\text{a}$ 。除胡桃和毛白杨外,其余物种开花始期在西安的提前趋势要明显大于在宝鸡的提前趋势,而开花末期在两站点的提前趋势相近。因此,在同一气候区的不同站点,植物特定物候期的变化趋势差异较大,单站点的物候变化不能代表整个气候区的物候变化。

(2) 各物种平均而言,开花始期在西安和宝鸡分别受之前 54 d 和 43 d 的均温影响,开花末期分别受之前 76 d 和 62 d 的均温影响。除紫薇和迎春外,同一物种在两个站点的温度敏感度差异较小。在西安和宝鸡,各物种开花始期的平均温度敏感度分别为 $-3.93\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.77\text{ d}/^{\circ}\text{C}$,开花末期的温度敏感度分别为 $-3.36\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.30\text{ d}/^{\circ}\text{C}$ 。两站点所有物种的温度敏感度均值无显著差异。因此,单站点的温度敏感度可以较好的反映同一气候区内其他站点的植物物候-气候关系。

参考文献(References):

- [1] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [2] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, Koch E, Aasa A, Ahas R, Alm-Kübler K, Bissolli P, Braslavsky O, Briede A, Chmielewski F M, Crepinsek Z, Curnel Y, Dahl A, Defila C, Donnelly A, Filella Y, Jatczak K, Mäe F, Mestre A, Nordli Ø, Peñuelas J, Pirinen P, Remišová V, Scheffinger H, Striz M, Susnik A, Van Vliet A J H, Wielgolaski F E, Zach S, Züst A. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [3] Güsewell S, Furrer R, Gehrig R, Pietragalla B. Changes in temperature sensitivity of spring phenology with recent climate warming in Switzerland are related to shifts of the pre-season. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5189-5202.
- [4] Lapenis A, Henry H, Vuille M, Mower J. Climatic factors controlling plant sensitivity to warming. *Climatic Change*, 2014, 122(4): 723-734.
- [5] Xia J Y, Niu S L, Ciais P, Janssens I A, Chen J Q, Ammann C, Arain A, Blanken P D, Cescatti A, Bonal D, Buchmann N, Curtis P S, Chen

- S P, Dong J W, Flanagan L B, Frankenberg C, Georgiadis T, Gough C M, Hui D F, Kiely G, Li J W, Lund M, Magliulo V, Marcolla B, Merbold L, Montagnani L, Moors E J, Olesen J E, Piao S L, Raschi A, Rouspard O, Suyker A E, Urbaniak M, Vaccari F P, Varlagin A, Vesala T, Wilkinson M, Weng E S, Wohlfahrt G, Yan L M, Luo Y Q. Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(9): 2788-2793.
- [6] Donnelly A, Caffarra A, O'Neill B F. A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(6): 805-817.
- [7] Renner S S, Zohner C M. Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2018, 49: 165-182.
- [8] 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: 2239.
- [9] Park H, Jeong S J, Ho C H, Park C E, Kim J. Slowdown of spring green-up advancements in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 191-202.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Templ B, Templ M, Filzmoser P, Lehoczy A, Bakšienė E, Fleck S, Gregow H, Hodzic S, Kalvane G, Kubin E, Palm V, Romanovskaja D, Vučetić V, Žust A, Czúcz B, Team NP. Phenological patterns of flowering across biogeographical regions of Europe. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(7): 1347-1358.
- [13] Dai J H, Wang H J, Ge Q S. Characteristics of spring phenological changes in china over the past 50 years. *Advances in Meteorology*, 2014, 2014: 843568.
- [14] 邓晨晖, 白红英, 翟丹平, 高山, 黄晓月, 孟清, 贺映娜. 气候变化背景下 1964—2015 年秦岭植物物候变化. *生态学报*, 2017, 37(23): 7882-7893.
- [15] 刁松峰, 姜景民, 伊焕, 岳华峰, 董汝湘, 孙洪刚, 邵文豪. 浙江低山地区多用途植物无患子的开花物候特征. *生态学报*, 2016, 36(19): 6226-6234.
- [16] Amano T, Smithers R J, Sparks T H, Sutherland W J. A 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2010, 277(1693): 2451-2457.
- [17] Flynn D F B, Wolkovich E M. Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1353-1362.
- [18] Wang H J, Dai J H, Rutishauser T, Gonsamo A, Wu C Y, Ge Q S. Trends and variability in temperature sensitivity of lilac flowering phenology. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2018, 123(3): 807-817.
- [19] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296(5573): 1689-1691.
- [20] 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.
- [21] Wang H J, Ge Q S, Dai J H, Tao Z X. Geographical pattern in first bloom variability and its relation to temperature sensitivity in the USA and China. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(8): 961-969.
- [22] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.
- [23] 郑景云, 卞娟娟. 类型变更的相邻气象观测站的日气温资料整合. *地理研究*, 2012, 31(4): 579-588.
- [24] 徐韵佳, 仲舒颖, 戴君虎, 陶泽兴, 王焕炯. 1978—2014 年牡丹江地区植物花期变化及模型模拟. *地理研究*, 2017, 36(4): 779-789.
- [25] 白洁, 葛全胜, 戴君虎, 王英. 西安木本植物物候与气候要素的关系. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1274-1282.
- [26] 黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯. 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1015-1024.
- [27] Menzel A. Plant phenological anomalies in germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 243-263.
- [28] 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.
- [29] 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*, 2017, 63(5): 579-590.