

贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度

黄文婕^{1,2,3}, 葛全胜¹, 戴君虎¹, 王焕炯^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 赤峰学院生命科学学院, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要:植物物候期的温度敏感度反映了植物是怎样及在何种程度上响应气候变化, 研究不同物种物候期的温度敏感度有利于鉴别易受气候变化影响的物种。现有关于始花期的温度敏感度研究主要集中在温带地区, 在亚热带地区研究仍较少。本文以位于亚热带的贵阳为研究区, 利用1980-2014年60种典型木本植物的始花期观测资料, 分析了该地区植物始花期变化趋势及对气温变化的敏感度, 评估了样本量大小对敏感度估计稳定性的影响。结果表明: ①研究时段内贵阳发生了明显的气候变化, 年平均气温显著升高, 其中春、秋季的增温比夏、冬季显著。②绝大多数植物(88.3%)的始花期在研究时段内呈提前趋势, 其中显著提前的占物种总数的21.7% ($P < 0.05$); 60种植物始花期总体的提前趋势为2.89 d/10 a。③绝大多数(88.3%)植物始花期的年际变化与最优时段内平均气温呈显著负相关 ($P < 0.05$), 所有植物始花期的总体敏感度为-5.75 d/°C。④样本量大小对温度敏感度估计的稳定性有显著影响, 15年长序列能将敏感度估计结果的波动范围以99%的概率控制在2 d/°C之内。

关键词: 气候变化; 物候; 木本植物; 始花期; 温度敏感度; 贵阳

1 引言

1880年以来, 全球陆地和海洋表面温度升高了0.85°C, 且在未来可能持续升高(IPCC, 2013)。剧烈的气候变化对陆地生态系统结构和功能产生了显著影响(Walther et al, 2002)。作为气候变化对生态系统影响的主要证据之一, 物候期在不同区域、物种或种群间的变化受到广泛关注(Rosenzweig et al, 2007; 范德芹等, 2016)。基于地面物候观测数据的研究表明, 在欧洲(Menzel et al, 2006)、亚洲(Ho et al, 2006; Doi, 2012; Ge et al, 2015; 陶泽兴等, 2017)和北美洲大多数地区(Wolfe et al, 2005; Gonsamo et al, 2013), 主要木本植物的春季物候期(例如展叶始期、始花期等)出现了以提前为主的变化趋势。基于遥感数据提取的植被生长季开始期也提前(刘玲玲等, 2012)。这些观测到的物候变化与环境因子密切相关。北半球温带地区的春季物候期提前主

要由气温升高引起(Rosenzweig et al, 2008; Polgar et al, 2011)。光周期对春季物候的影响仍存在争议(Chuine et al, 2010; Körner et al, 2010; Way et al, 2015)。降水对物候变化的影响在热带生态系统更为明显(Cleland et al, 2007)。

虽然观测到的春季物候变化以提前为主, 但提前程度存在明显的种间差异。例如, 匈牙利4种植物始花期显著提前, 其平均趋势在1.9~4.4 d/10a之间(Szabó et al, 2016)。北京1963-2007年48种木本植物始花期的提前趋势在0.19~5.31 d/10a之间(Bai et al, 2011)。加拿大19种植物的始花期在2001-2012年间的变化速率在-22~2 d/10 a之间(Gonsamo et al, 2013)。在同样的气候变化背景下, 造成种间物候变化差异的主要原因是不同植物物候期对温度响应的敏感度不同。例如, 西安42种植物的始花期温度敏感度在-11.44~-2.84 d/°C之间(Dai et al, 2013)。这种温度敏感度的差异甚至改变了年内物

收稿日期: 2017-01; 修订日期: 2017-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601047, 41401071, 41427805)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41601047, No.41401071, No.41427805]。

作者简介: 黄文婕(1984-), 女, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 博士生, 主要从事植被地理和物候学研究, E-mail: hwj5242@163.com。

通讯作者: 王焕炯(1987-), 男, 山西榆次人, 副研究员, 主要从事气候变化影响研究, E-mail: wanghj@igsrr.ac.cn。

引用格式: 黄文婕, 葛全胜, 戴君虎, 等. 2017. 贵阳木本植物始花期对温度变化的敏感度[J]. 地理科学进展, 36(8): 1015-1024. [Huang W J, Ge Q S, Dai J H, et al. 2017. Sensitivity of first flowering dates to temperature change for typical woody plants in Guiyang City, China[J]. Progress in Geography, 36(8): 1015-1024.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.08.010

候期次序(仲舒颖等, 2012)。对美国马萨诸塞州(Massachusetts)康科德(Concord)附近森林的物候长期观测表明,始花期温度敏感度较弱的物种在过去150年间种群密度显著降低(Willis et al, 2008)。该结果意味着物候期的温度敏感度与植物对气候变化的适应能力有关。因此,研究不同物种物候期的温度敏感度有利于鉴别易受气候变化影响的植物种,从而为未来气候变化背景下的生态系统管理提供依据。

目前为止,关于始花期的温度敏感度研究主要集中在温带地区,例如中国华北地区(Bai et al, 2011; Dai et al, 2013)、日本及韩国(Ho et al, 2006; Miller-Rushing et al, 2007)、欧洲西北部(Fitter et al, 2002; Bolmgren et al, 2013; Bock et al, 2014; Wang et al, 2014)和美国东北部地区(Ellwood et al, 2013)等。而在亚热带湿润气候下植物始花期的温度敏感度研究较少。之前一项研究利用刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、什锦丁香(*Syringa chinensis*)和欧丁香(*Syringa vulgaris*)始花期资料,发现始花期对温度响应的敏感度在纬度较低的亚热带地区比温带地区更强(Wang, Dai et al, 2015)。但这一结论仍需利用其他种的数据加以验证。

有鉴于此,本文以位于亚热带的贵阳为研究区,采用1980-2014年60种木本植物的始花期资料,适用滑动相关法计算了影响各植物始花期的最优时段,并用回归分析法计算了物候变化趋势及对气温响应的敏感度。本文重点关注3个科学问题:①过去30多年来贵阳植物始花期随时间的变化趋势是提前还是推迟;②始花期对温度响应的敏感度变化范围;③样本量大小对敏感度估计结果的影响。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部地区,境内海拔高度在1100 m左右,地貌以山地、丘陵为主。物候观测点位于贵州大学花溪南校区,所处地理位置为北纬26°25'44",东经106°40'09",属亚热带湿润温和型气候。在物候观测时段内(1980-2014)年,年平均气温为14.1℃,全年最冷月是1月,平均气温3.6℃,而最热月为7月,平均气温22.5℃(图1)。年平均降水量为1076.5 mm,其中5-8月降水量较多,占全年降水

量的63%(图1)。贵阳的地带性植被为中亚热带湿润性常绿阔叶林,但城区原生植被已完全被破坏,现以园林植物为主(安静等, 2014)。

2.2 物候与气温数据

本文所用的物候资料来自于“中国物候观测网”贵阳站,共包括1980-2014年60种木本植物的始花期资料(物种名称及数量见图2、表1)。根据中国物候观测网观测标准,始花期定义为在选定同种的几株树木上,看见一半以上的树有一朵或同时有几朵花的花瓣开始完全开放的日期(宛敏渭等, 1979)。在整个研究时段内,1992年和1996-2002年没有进行物候观测(图2)。为保证有足够样本量获得准确的趋势估计结果,所选植物种需满足以下条件:①1980-2014年间至少有15年观测记录;②1980-1995年和2003-2014年间各至少有5年观测记录。据此从所观测的126种植物中选定了60种木本植物(表1)。另外,物候观测不连续导致每年所观测的物种数目不同,在38~60种之间(图2)。

本文所用的贵阳站1980-2014年日平均气温资

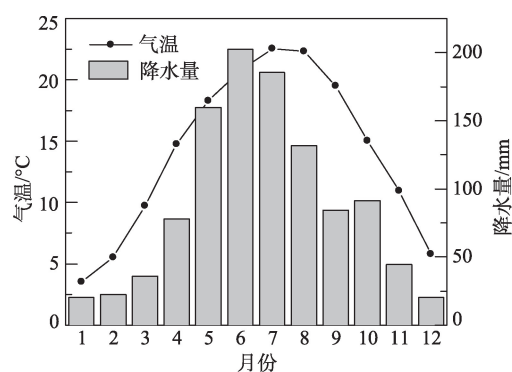


图1 1980-2014年贵阳市气候概况

Fig.1 Climate conditions in Guiyang City, 1980-2014

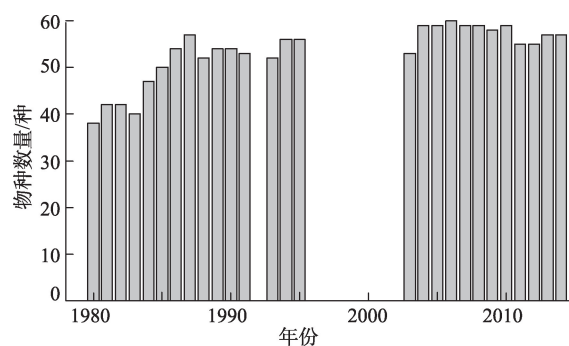


图2 1980-2014年贵阳逐年观测的物种数量

Fig.2 The number of species observed for each year in Guiyang City, 1980-2014

表1 本文所采用的物种基本情况
Tab.1 Plant species investigated in this study

学名	拉丁名	科	观测年数	平均始花期
侧柏	<i>Platycladusorientalis</i>	Cupressaceae	25	2-16
大叶早樱	<i>Cerasus subhirtella</i>	Rosaceae	27	2-19
金钟花	<i>Forsythia viridissima</i>	Oleaceae	26	2-19
毛叶木瓜	<i>Chaenomeles cathayensis</i>	Rosaceae	26	2-21
榆树	<i>Ulmuspumila</i>	Ulmaceae	28	2-21
澳洲合欢	<i>Acacia decurrens</i>	Leguminosae	23	2-22
杏	<i>Armeniaca vulgaris</i>	Rosaceae	28	2-28
贴梗海棠	<i>Chaenomelesspeciosa</i>	Rosaceae	27	2-28
窄叶蚊母树	<i>Distylium dunnianum</i>	Hamamelidaceae	25	2-29
响叶杨	<i>Populus adenopoda</i>	Salicaceae	23	3-2
垂柳	<i>Salix babylonica</i>	Salicaceae	26	3-3
李	<i>Prunus salicina</i>	Rosaceae	23	3-7
滇杨	<i>Populus yunnanensis</i>	Salicaceae	20	3-8
西府海棠	<i>Malusmicromalus</i>	Rosaceae	21	3-9
沙梨	<i>Pyruspyrifolia</i>	Rosaceae	24	3-11
紫玉兰	<i>Magnolia liliflora</i>	Magnoliaceae	22	3-12
紫荆	<i>Cercischinensis</i>	Leguminosae	33	3-12
木瓜	<i>Chaenomeles sinensis</i>	Rosaceae	26	3-14
枫杨	<i>Pterocarya stenoptera</i>	Juglandaceae	27	3-15
野花椒	<i>Zanthoxylumsimulans</i>	Rutaceae	24	3-16
白花泡桐	<i>Paulowniafortunei</i>	Scrophulariaceae	27	3-20
河柳	<i>Salix chaenomeloides</i>	Salicaceae	25	3-20
白蜡	<i>Fraxinuschinensis</i>	Oleaceae	24	3-21
二球悬铃木	<i>Platanusacerifolia</i>	Platanaceae	25	3-25
麻栎	<i>Quercus acutissima</i>	Fagaceae	24	3-27
东京樱花	<i>Cerasus yedoensis</i>	Rosaceae	27	3-28
马尾松	<i>Pinus massoniana</i>	Pinaceae	27	3-28
紫藤	<i>Wisteria sinensis</i>	Leguminosae	22	4-3
香叶树	<i>Lindera communis</i>	Lauraceae	24	4-4
构树	<i>Broussonetia papyifera</i>	Moraceae	25	4-4
云实	<i>Caesalpinia decapetala</i>	Leguminosae	27	4-9
小叶女贞	<i>Ligustrum quihoui</i>	Oleaceae	24	4-10
刺槐	<i>Robiniapseudoacacia</i>	Leguminosae	34	4-14
猴樟	<i>Cinnamomum bodinieri</i>	Lauraceae	23	4-14
楸树	<i>Catalpa bungei</i>	Bignoniaceae	25	4-15
香樟	<i>Cinnamomumcamphora</i>	Lauraceae	22	4-15
火棘	<i>Pyracantha fortuneana</i>	Rosaceae	25	4-15
楝树	<i>Meliaazedarach</i>	Meliaceae	23	4-20
皂荚	<i>Gleditsia sinensis</i>	Leguminosae	25	4-22
石榴	<i>Punicagranatum</i>	Punicaceae	28	5-4
梓树	<i>Catalpa ovata</i>	Bignoniaceae	28	5-15
线叶冬青	<i>Ilex fargesii var. angustifolia</i>	Aquifoliaceae	23	5-18
枣树	<i>Ziziphusjuzuba</i>	Rhamnaceae	26	5-20
小楝木	<i>Swida paucinervis</i>	Cornaceae	26	5-21
夹竹桃	<i>Nerium indicum</i>	Apocynaceae	25	5-22

续表 1

学名	拉丁名	科	观测年数	平均始花期
华瓜木	<i>Alangium chinense</i>	Alangiaceae	21	5-27
木槿	<i>Hibiscus syriacus</i>	Malvaceae	17	6-7
女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	Oleaceae	28	6-13
六月雪	<i>Serissa japonica</i>	Rubiaceae	21	6-18
乌柏	<i>Sapium sebiferum</i>	Euphorbiaceae	24	6-19
梧桐	<i>Firmiana simplex</i>	Sterculiaceae	33	6-23
海州常山	<i>Clerodendrum trichotomum</i>	Verbenaceae	25	7-1
紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>	Lythraceae	27	7-12
槐树	<i>Sophora japonica</i>	Leguminosae	18	7-14
旱莲木	<i>Camptotheca acuminata</i>	Nyssaceae	26	7-17
白簕	<i>Acanthopanax trifoliatum</i>	Araliaceae	16	8-2
木犀	<i>Osmanthus fragrans</i>	Oleaceae	25	9-3
木芙蓉	<i>Hibiscus mutabilis</i>	Malvaceae	29	9-6
油茶	<i>Camellia oleifera</i>	Theaceae	20	9-16
枇杷	<i>Eriobotrya japonica</i>	Rosaceae	16	11-3

料下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。主要采用的数据产品为“中国近 50 年均一化历史气温数据集”(覆盖时段 1951-2004 年)和“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”(覆盖时段 1951 年至今)。对比这 2 个数据集发现,两者 2000-2004 年的气温资料完全一致,而之前不一致。这是因为贵阳站于 2000 年 1 月 1 日迁址,由市区(新华路)迁至郊区(扶风东路),导致原始气温资料存在不均一性(Li et al, 2004)。因此,本文所用的 1980-2004 年气温资料取自前一数据集,而 2005-2014 年气温资料取自后一数据集,这样便形成了均一化的气温数据。

2.3 研究方法

为研究贵阳气候与物候变化情况,首先利用月平均气温与年份的线性回归分析,计算了贵阳 1980-2014 年各月与全年的气温变化趋势。其次,利用不同植物始花期与年份的线性回归分析,计算了不同物种始花期变化趋势。再次,对每个物种的始花期序列减去多年平均值,转换成距平序列,求出每年所有花期距平的中值,得到逐年花期距平中值序列,作为所有植物花期总体变化的代表。此外,为探讨时段选择对物候变化趋势的影响,本文计算了 1980-2014 年间所有 10 年及更长时段的始花期距平中值序列变化趋势。

为研究始花期对气温响应的敏感度,首先需要确定影响始花期的最优时段。相关研究表明,始花期通常与前一段时间内的气温显著相关(Bolmgren

et al, 2013; Dai et al, 2013; Wang, Ge et al, 2015; 徐韵佳等, 2017)。以多年平均的始花期(EP)为结束日,以 15 天为步长,分别计算每个[EP-15×i, EP]时段(i=1,2,...,16)平均气温与始花期的相关系数。选择相关系数绝对值最大的那一时段,作为影响始花期的最优时段。其次,对每种植物的始花期与最优时段气温进行回归分析:

$$FFD=b \times TEM+a+e \tag{1}$$

式中:其中 FFD 代表始花期序列;TEM 代表最优时段的平均气温;a 为截距;e 为误差项;b 为回归系数,作为衡量始花期温度敏感度的指标。对每个物种,利用所有年份的数据和式(1)估计了始花期的温度敏感度。另外,将每个物种的最优时段平均气温序列减去多年平均值,转换成距平序列,计算每年所有气温距平的中值,得到逐年气温距平中值序列,作为所有植物气温变化的代表。

为研究样本量大小对敏感度估计结果的影响,选择始花期距平中值序列和气温距平中值序列,首先利用式(1)计算了总体的温度敏感度(b_{all})。其次,利用随机数生成算法(通过 Matlab 软件实现),生成不同样本量的始花期与对应温度序列。例如,对于 5 年的样本量,从所有年份的资料中随机选取 5 个年份,得到相应的温度和始花期数据,并计算敏感度。重复选取 1000 次,可得到一组 5 年样本量下的敏感度估计结果。以此类推,本文对不同样本量进行了敏感度模拟,并比较了不同样本量所得敏感度

的标准差以及落在 $b_{all} \pm 1$ 区间内的概率。由于始花期距平序列的总样本量(即观测年数)为27年,且太小的样本量不能满足回归分析的要求,太大的样本量不能实现足够的选取次数,故本文将样本量选取范围定为5~22年。

3 结果与分析

3.1 气温变化趋势

1980-2014年,贵阳发生了显著的气候变化。年平均气温在波动中以 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的趋势显著升高($P<0.05$,图3b)。具体到月份,2-11月的气温呈升高趋势(图3a),其中2-5月和7-9月的气温升高趋势达到显著水平($P<0.05$),尤以2月气温的增幅最大,达到 $1.02^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。只有12月和1月的气温出现了下降趋势,但均不显著。

3.2 花期格局及在不同时段内的变化

60种植物的平均始花期在2月16日(侧柏)-11月3日(枇杷)之间。其中2月开花的植物有9种(15%);3月开花的植物数量最多,达18种(30%);4月开花的植物有12种(20%)。这3个月开花的植物占总植物数量的65%,而其余月份开花的植物数量相对较少(表1)。贵阳植物的始花期有非常强的年际变异,平均标准差为10.87 d(图4a)。年际变异最小的植物为女贞(标准差4.28 d),而最大的为窄叶蚊

母树(标准差17.29 d)。总体而言,始花期年际变化的标准差与平均始花期呈负相关关系($R=-0.41$, $P<0.05$),表明开花越早的植物,其始花期的年际变化更强。

从图4b可以发现,贵阳植物的始花期以提前趋势为主。60种植物中,有53种植物(88.3%)的始花期在1980-2014年间提前,其中显著提前的有13种($P<0.05$)。只有7种植物的始花期呈不显著的推迟趋势。始花期提前趋势最强的物种是木槿($-10.27\text{ d}/10\text{ a}$),最弱的为刺槐,趋势仅为 $-0.27\text{ d}/10\text{ a}$ 。大多数物种的提前趋势在 $-4\sim-2\text{ d}/10\text{ a}$ 之间。

从60种植物始花期距平中值序列来看(图4c),在1995年前,花期距平以偏晚为主(平均距平为3.53 d),仅在1987年出现了极端偏早的始花期(距平 -14.48 d)。在2003-2014年,花期距平以偏早为主,12年间有8年的始花期距平为负值,平均距平为 -3.15 d 。这种先偏晚后偏早的阶段性变化特征,导致始花期在1980-2014年整个时段内呈 $2.89\text{ d}/10\text{ a}$

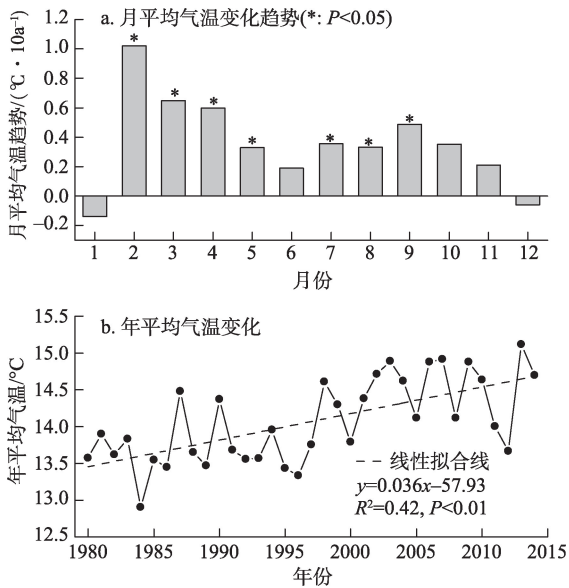


图3 1980-2014年贵阳气温变化

Fig.3 Temperature change in Guiyang City, 1980-2014

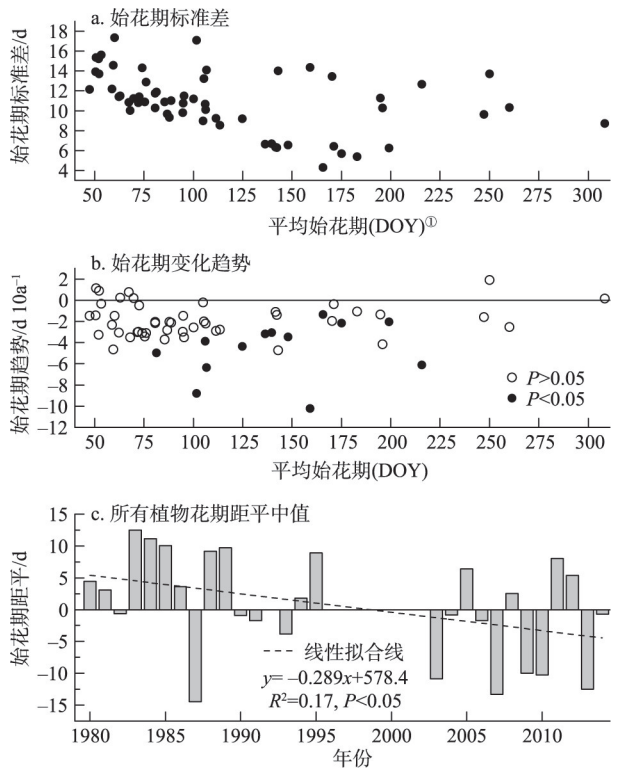


图4 1980-2014年贵阳60种木本植物始花期标准差和变化趋势

Fig.4 Temporal trends and standard deviation of first flowering dates for 60 woody plants in Guiyang City, 1980-2014

①DOY(day of the year):即序日。

的提前趋势。图5显示了不同时段始花期距平中值的变化。绝大多数长度大于10年的时段始花期都呈提前态势。只有开始于1980-1983年、结束于2009-2014年的时段,始花期提前趋势显著($P < 0.05$);始花期开始于1996-2003年、结束于2012-2014年的时段,呈不显著推迟趋势。考虑到1996-2002年无观测数据,因此始花期的微弱推迟主要发生在2003年以后。

3.3 花期与温度的关系

图6a显示了影响各植物始花期的最优时段长度。所有物种最优时段长度平均值为83.5 d,大多数物种(66.7%)的最优时段长度在45~90 d之间。总体而言,开花晚的物种,最优时段的长度倾向于更长。例如夏季开花(平均始花期8月2日)的白籐,其最优时段长度(165 d)在大多数情况下长于其他开花早的物种(图6a)。有2个种明显不符合这一规律:平均始花期在9月6日的木芙蓉,最优时段长度仅为15 d;平均始花期为11月3日的枇杷,最优时段长度仅为30 d。这可能与两种植物始花期同温度的相关关系不显著有关(图6b)。

图6b是根据最优时段气温计算得到的各植物始花期温度敏感度。60种植物中,仅有7种植物(11.7%)的始花期对最优时段的气温响应不显著。这些植物的始花期相对偏晚,均发生在夏季和秋季。而其余53种植物的始花期(88.3%)对气温的响应显著($P < 0.05$)。其中响应最强的是木槿(-12.76 d/°C);响应最弱的是海州常山,只有 -2.73 d/°C。从温度敏感度的频率分布来看,大多数植物(75%)始花期的温度敏感度在 $-8 \sim -4$ d/°C之间。通过所有植

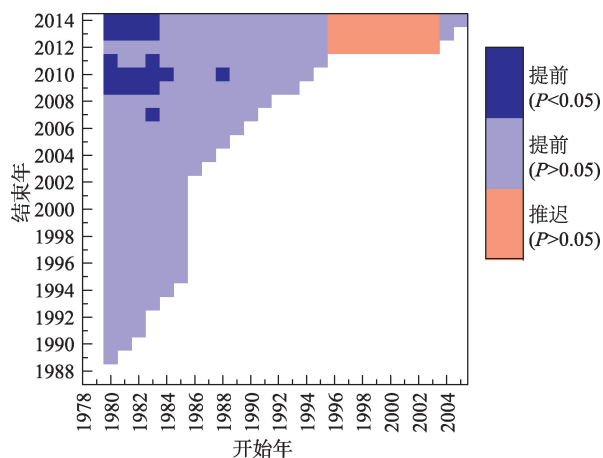


图5 所有植物花期距平的中值序列在不同时段的变化趋势
Fig.5 Temporal trends of median anomaly of first flowering date for all plant species during different time periods

物始花期距平中值与最优时段气温距平中值的回归分析,可以发现贵阳60种植物整体的始花期与气温显著相关($R = -0.95$, $P < 0.05$)。总体的温度敏感度(b_{all})为 -5.75 d/°C,亦即意味着气温每升高1°C,贵阳花期平均提前5.75 d(图6c)。

3.4 不同样本量对敏感度估计的影响

随机抽样结果显示,当样本量只有5年时,抽样1000次得到温度敏感度的标准差为1.08 d/°C,在 $b_{all} \pm 1$ 区间内的概率是70.5%(图7)。随着样本量的增加,标准差逐渐减小,在 $b_{all} \pm 1$ 区间内的概率逐渐增加。当样本量到15年时,多次抽样的标准差降低到0.33 d/°C,99%的估计值能落在 $b_{all} \pm 1$ 区间内。该结果表明,样本量大小对敏感度估计结果的稳定性影响很大。

4 讨论

本文研究发现,贵阳大多数植物的始花期在1980-2014年呈提前趋势。而之前的研究采用较短的时间序列,发现1978-2007年贵阳始花期呈提前趋势(白洁等, 2009)。这表明近7年相对平稳的气温变化并未影响物候的整体提前趋势(图3b)。通过

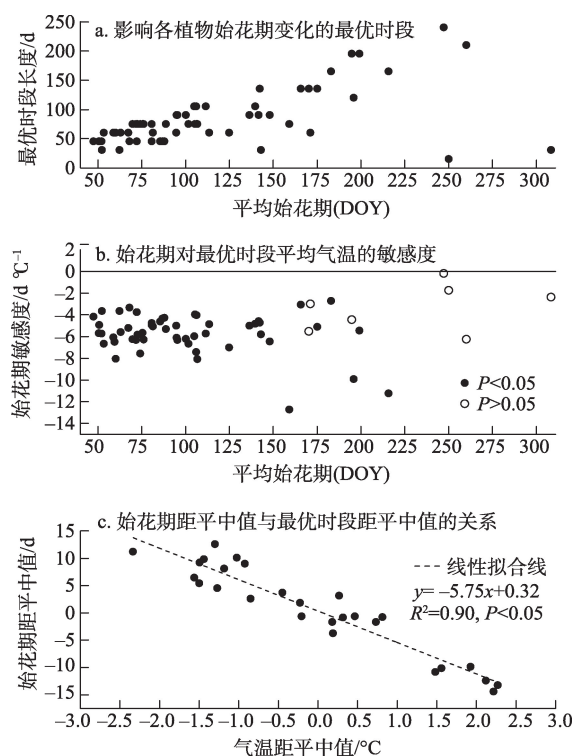


图6 贵阳60种植物始花期对气温响应的敏感度
Fig.6 Temperature sensitivity of first flowering dates for 60 plant species in Guiyang City

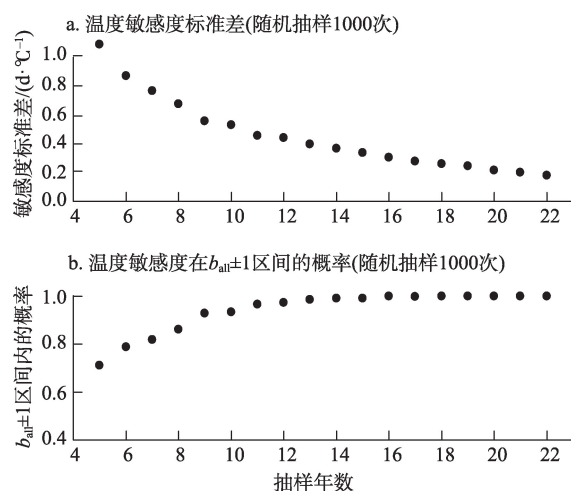


图7 随机抽样年数对温度敏感度估计结果的影响

Fig.7 Impact of sample size on estimates of temperature sensitivity

60种植物始花期距平中值序列,发现贵阳始花期的整体提前趋势为2.89 d/10a。该结果与荟萃分析得到的中国春夏季物候平均变化趋势(-2.75 d/10a)极为接近(Ge et al, 2015)。另外,研究时段对物候变化趋势估计结果的影响很大。只有开始于1980-1983年,结束于2009-2014年时段的植物始花期,才有显著的提前趋势。如果时间序列的时段为2003-2014年,甚至会得到始花期推迟的结果(图5)。通过对长时间历史物候序列的滑动趋势分析,同样发现历史上每30年的物候变化趋势不同(Rutishauser et al, 2008; Ge et al, 2014),这是由于气候存在明显的年际和年代际变化,不同时段的气候变化可能存在明显差异。因此,当集成分析多项研究的物候变化趋势而得出全国或全球尺度的物候变化趋势时,必须考虑研究间时段选择的不同,否则得到的结果可能差别很大(Ge et al, 2015)。

其次,本文发现绝大多数植物的始花期与温度显著相关,所有物种始花期的平均敏感度达-5.75 d/°C。这一数值大于温带地区得到的结论。例如,西安42种植物始花期的平均温度敏感度为-4.34 d/°C(Dai et al, 2013);北京春季开花植物的始花期温度敏感度为-2.7 d/°C(Bai et al, 2011);欧洲21个国家春夏季物候期的平均温度敏感度为-2.5 d/°C(Menzel et al, 2006)。由此,进一步验证了低纬度地区比高纬度地区温度敏感度高的事实(Dai et al, 2014; Wang, Dai et al, 2015)。温度敏感度不仅可反映物候期怎样及在何种程度上响应气候变化,还与

植物对气候变化的适应能力有关。物候对气候变化响应不敏感的物种,其生长可能会受到限制,因为有可能错过与共生生物的相互作用(例如依赖虫媒传粉的植物与昆虫)或者生长季相对变短(相对于物候期提前面临更多的竞争者)(Cleland et al, 2012)。观测到的证据表明,过去150年间,物候不响应气候变化的物种在群落中的丰度显著降低(Willis et al, 2008)。外来种始花期的温度敏感度比本地种更高,因而促进了群落尺度的物种入侵(Willis et al, 2010)。Cleland等(2012)综合了24项研究中57个物种的信息,发现对气候变暖响应敏感的物种在生物量、覆盖比例和花数量方面有所增加。这些研究表明,始花期的温度敏感度与植被应对全球变暖的能力有关。因此,敏感度估计结果可为未来气候变化情景下的生态系统管理提供依据。例如,在植树造林或园林绿化中,可优先选择敏感度大的物种以更好地适应未来气候变化。此外,鉴于始花期对温度变化的响应极其敏感,未来气候变化将对贵阳周边地区花卉旅游的最佳时间产生影响。本文涉及的梨、樱花等都是贵阳及周边流行的赏花树种,旅游管理者需根据花期对物候变化的响应选择合理的时间开展花卉旅游活动(例如贵定音寨梨花节、清镇市簸箕农场樱花节等)。

温度敏感度与物种对未来气候变化的适应能力相关,因此需要准确地获得各物种温度敏感度的大小,以便进行物种间的对比。估计温度敏感度有2种方法,包括长期物候观测和控制实验(Wolkovich et al, 2012)。本文采用第一种方法,即利用长时间物候与气象观测数据,估计了贵阳60种木本植物始花期的温度敏感度。研究发现该方法的敏感度估计结果对时间序列的长度较为敏感。只有超过15年的资料才能使温度敏感度的估计值变化范围以99%的概率控制在2d/°C之内。因此在未来对温度敏感度估计时,应尽可能选择更长的时间序列以得到更稳定的敏感度估计结果。另一种敏感度估计方法为通过实验将植物控制在不同的环境温度下,以物候期差异与温度差异的比值确定温度敏感度。2种方法对同一物种同一物候期的敏感度估计结果存在显著差异(Wolkovich et al, 2012),造成这一差异的原因很可能与长期物候观测资料中存在多种环境因子的复杂相互作用有关,但有待今后进一步研究。

5 结论

本文揭示了1980-2014年贵阳60种植物的始花期变化及对气温响应的敏感度,并评估了样本量大小对敏感度估计结果的影响,得到以下几个主要结论:

(1) 贵阳的年平均气温自1980年以来显著升高,其中对年平均气温增加贡献最大的是2-5月和7-9月的气温升高。

(2) 贵阳60种植物的平均始花期在2月16日—11月3日之间。其中2-4月开花的植物最多(65%)。1980年以来,始花期发生了明显变化,53种植物(88.3%)的始花期在提前,其中显著提前的有13种($P < 0.05$)。60种植物始花期1980-2014年总体提前趋势为2.89 d/10 a,但2003-2014年始花期略有推迟。

(3) 绝大多数植物(88.3%)始花期的年际变化与最优时段内平均气温显著负相关。大多数植物(75%)始花期温度敏感度在 $-8 \sim -4$ d/°C之间。所有植物总体的敏感度为 -5.75 d/°C,这意味着最优时段气温每升高1°C,始花期平均提前5.75 d。

(4) 样本量大小对温度敏感度估计的稳定性有显著影响。如果要对比2个物种始花期敏感度的差异,需要足够长的时间序列以获得稳定的敏感度估计。15年以上的序列能将敏感度估计结果的波动范围以99%的概率控制在2 d/°C之内。

参考文献(References)

安静, 张宗田, 刘荣辉, 等. 2014. 贵阳市园林植物种类初步调查[J]. 山地农业生物学报, 33(4): 59-62. [An J, Zhang Z T, Liu R H, et al. 2014. Preliminary investigation on landscape greening plants in Guiyang City[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 33(4): 59-62.]

白洁, 葛全胜, 戴君虎. 2009. 贵阳木本植物物候对气候变化的响应[J]. 地理研究, 28(6): 1606-1614. [Bai J, Ge Q S, Dai J H. 2009. Response of woody plant phenophases to climate change for recent 30 years in Guiyang[J]. Geographical Research, 28(6): 1606-1614.]

范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 2016. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. 地理科学进展, 35(3): 304-319. [Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q, et al. 2016. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data[J]. Progress in Geography, 35(3): 304-319.]

刘玲玲, 刘良云, 胡勇. 2012. 1982-2006年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析[J]. 地理科学进展, 31(11): 1433-1442. [Liu L L, Liu L Y, Hu Y. 2012. Assessment and intercomparison of satellite-derived Start-of-Season (SOS) measures in Eurasia for 1982-2006[J]. Progress in Geography, 31(11): 1433-1442.]

陶泽兴, 仲舒颖, 葛全胜, 等. 2017. 1963-2012年中国主要木本植物花期长度时空变化[J]. 地理学报, 72(1): 53-63. [Tao Z X, Zhong S Y, Ge Q S, et al. 2017. Spatiotemporal variations in flowering duration of woody plants in China from 1963 to 2012[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 53-63.]

宛敏渭, 刘秀珍. 1979. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社: 51. [Wan M W, Liu X Z. 1979. Zhongguo wuhou guance fangfa[M]. Beijing, China: Science Press: 51.]

徐韵佳, 仲舒颖, 戴君虎, 等. 2017. 1978-2014年牡丹江地区植物花期变化及模型模拟[J]. 地理研究, 36(4): 779-789. [Xu Y J, Zhong S Y, Dai J H, et al. 2017. Changes in flowering phenology of plants and their model simulation in Mudanjiang, China[J]. Geographical Research, 36(4): 779-789.]

仲舒颖, 葛全胜, 郑景云, 等. 2012. 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, 36(12): 1217-1225. [Zhong S Y, Ge Q S, Zheng J Y, et al. 2012. Changes of main phenophases of natural calendar and phenological seasons in Beijing for the last 30 years [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 36(12): 1217-1225.]

Bai J, Ge Q S, Dai J H. 2011. The response of first flowering dates to abrupt climate change in Beijing[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28(3): 564-572.

Bock A, Sparks T H, Estrella N, et al. 2014. Changes in first flowering dates and flowering duration of 232 plant species on the island of Guernsey[J]. Global Change Biology, 20(11): 3508-3519.

Bolmgren K, Vanhoenacker D, Miller-Rushing A J. 2013. One man, 73 years, and 25 species. Evaluating phenological responses using a lifelong study of first flowering dates[J]. International Journal of Biometeorology, 57(3): 367-375.

Chuine I, Morin X, Bugmann H. 2010. Warming, photoperiods, and tree phenology[J]. Science, 329: 277-278.

Cleland E E, Allen J M, Crimmins T M, et al. 2012. Phenological tracking enables positive species responses to climate change[J]. Ecology, 93(8): 1765-1771.

Cleland E E, Chuine I, Menzel A, et al. 2007. Shifting plant

- phenology in response to global change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7): 357-365.
- Dai J H, Wang H J, Ge Q S. 2013. Multiple phenological responses to climate change among 42 plant species in Xi'an, China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 57(5): 749-758.
- Dai J H, Wang H J, Ge Q S. 2014. The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 58(4): 521-528.
- Doi H. 2012. Response of the *Morus bombycis* growing season to temperature and its latitudinal pattern in Japan[J]. *International Journal of Biometeorology*, 56(5): 895-902.
- Ellwood E R, Temple S A, Primack R B, et al. 2013. Record-breaking early flowering in the eastern United States[J]. *PLoS One*, 8(1): e53788.
- Fitter A H, Fitter R S R. 2002. Rapid changes in flowering time in British plants[J]. *Science*, 296: 1689-1691.
- Ge Q S, Wang H J, Rutishauser T, et al. 2015. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 21(1): 265-274.
- Ge Q S, Wang H J, Zheng J Y, et al. 2014. A 170 year spring phenology index of plants in Eastern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(3): 301-311.
- Gonsamo A, Chen J M, Wu C Y. 2013. Citizen Science: Linking the recent rapid advances of plant flowering in Canada with climate variability[J]. *Scientific Reports*, 3: 2239.
- Ho C H, Lee E J, Lee I, et al. 2006. Earlier spring in Seoul, Korea[J]. *International Journal of Climatology*, 26(14): 2117-2127.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. *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, UK: Cambridge University Press: 3-29.
- Körner C, Basler D. 2010. Phenology under global warming [J]. *Science*, 327: 1461-1462.
- Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(2): 260-268.
- Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern[J]. *Global Change Biology*, 12(10): 1969-1976.
- Miller-Rushing A J, Katsuki T, Primack R B, et al. 2007. Impact of global warming on a group of related species and their hybrids: Cherry tree (*Rosaceae*) flowering at Mt. Takao, Japan[J]. *American Journal of Botany*, 94(9): 1470-1478.
- Polgar C A, Primack R B. 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: From trees to ecosystems[J]. *New Phytologist*, 191(4): 926-941.
- Rosenzweig C, Casassa G, Karoly D J, et al. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems[M]//Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 79-131.
- Rosenzweig C, Karoly D, Vicarelli M, et al. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change[J]. *Nature*, 453: 353-357.
- Rutishauser T, Luterbacher J, Defila C, et al. 2008. Swiss spring plant phenology 2007: Extremes, a multi-century perspective, and changes in temperature sensitivity[J]. *Geophysical Research Letters*, 35(5): L05703.
- Szabó B, Vincze E, Czucz B. 2016. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary[J]. *International Journal of Biometeorology*, 60(9): 1347-1356.
- Walther G R, Post E, Convey P, et al. 2002. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 416: 389-395.
- Wang H J, Dai J H, Zheng J Y, et al. 2015. Temperature sensitivity of plant phenology in temperate and subtropical regions of China from 1850-2009[J]. *International Journal of Climatology*, 35(6): 913-922.
- Wang H J, Ge Q S, Dai J H, et al. 2015. Geographical pattern in first bloom variability and its relation to temperature sensitivity in the USA and China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 59(8): 961-969.
- Wang T, Ottlé C, Peng S S, et al. 2014. The influence of local spring temperature variance on temperature sensitivity of spring phenology[J]. *Global Change Biology*, 20(5): 1473-1480.
- Way D A, Montgomery R A. 2015. Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world[J]. *Plant, Cell & Environment*, 38(9): 1725-1736.
- Willis C G, Ruhfel B, Primack R B, et al. 2008. Phylogenetic patterns of species loss in Thoreau's woods are driven by climate change[J]. *Proceedings of the National Academy*

- of Sciences of the United States of America, 105(44): 17029-17033.
- Willis C G, Ruhfel B R, Primack R B, et al. 2010. Favorable climate change response explains non-native species' success in Thoreau's woods[J]. PLoS One, 5(1): e8878.
- Wolfe D W, Schwartz M D, Lakso A N, et al. 2005. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA[J]. International Journal of Biometeorology, 49(5): 303-309.
- Wolkovich E M, Cook B I, Allen J M, et al. 2012. Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change[J]. Nature, 485: 494-497.

Sensitivity of first flowering dates to temperature change for typical woody plants in Guiyang City, China

HUANG Wenjie^{1,2,3}, GE Quansheng¹, DAI Junhu¹, WANG Huanjiong^{1*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

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

3. College of Life Sciences, Chifeng University, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Temperature sensitivity of phenophases can reflect how and to what degree plants could tract climate change, and is related to the ability of plants to adapt to climate change. Investigating the temperature sensitivity of phenophases of different plant species could help us to identify species that are sensitive to climate change. To date, the studies about temperature sensitivity of first flowering date (FFD) mainly focused on the temperate area, and fewer studies focused on the subtropical area. We selected Guiyang City, located in subtropical China, as the study area, and analyzed the temporal changes in FFD of plants and their temperature sensitivities based on phenological observation data of 60 typical woody plants from 1980 to 2014. In addition, we evaluated the impact of the length of time series on the stability of the estimates of temperature sensitivity. The results show that: (1) Guiyang City experienced notable climate change with significantly increased annual mean temperature during the study period. The warming of spring and autumn was stronger than summer and winter. (2) FFD of 53 species (88.3%) advanced during the study period with 13 species (21.7%) significantly advancing ($P < 0.05$). Most trends of FFD were between -4 and -2 d/decade. The overall advancing trend for FFD of 60 species was 2.89 d/decade. (3) FFD was significantly and negatively correlated with mean temperature during the optimum period for most species (88.3%). Most temperature sensitivities of FFD ranged from -8 to -4 d/°C. The overall temperature sensitivity for FFD of all species was -5.75 d/°C. (4) Sample size clearly affected stability of the estimates of temperature sensitivity. The time series of 15 years could make the difference of estimates less than 2 d/°C with a probability of 99%. Thus, time series should be as long as possible to be used in estimating the temperature sensitivity of flowering phenology with a stability that is sufficient for interspecific comparisons.

Key words: climate change; phenology; woody plants; first flowering date; temperature sensitivity; Guiyang City