

# 1963-2012年中国主要木本植物花期长度时空变化

陶泽兴<sup>1,2,3</sup>, 仲舒颖<sup>1</sup>, 葛全胜<sup>1</sup>, 戴君虎<sup>1</sup>, 徐韵佳<sup>1,2</sup>, 王焕炯<sup>1</sup>

(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. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 花期物候变化研究对赏花活动安排、园林景观布置和致敏花粉防治等具有重要意义。现有研究对始花期与盛花期的变化趋势已有较为深刻的认识, 但很少有研究辨识了花期长度的时空变化。本文基于“中国物候观测网”观测数据, 统计了1963-2012年中国42个站点23种广布木本植物的花期长度变化趋势, 分析了花期长度变化的时空格局、种间差异和变化形式。主要结论为: 所有的259条花期长度时间序列中, 61.39%的序列呈延长趋势, 其中显著延长的占21.24% ( $P < 0.05$ )。灌木花期的延长趋势比乔木更加显著。东北地区南部、华中和华东地区的多数站点花期长度主要呈缩短趋势。在东北地区北部、华北、西南和华南地区, 大多数物种的花期长度呈延长趋势。花期长度变化趋势在20°N~22°N间最大(0.94 d/a)。西部地区(87°E~112°E)的花期长度变化趋势(平均0.28 d/a)高于东部地区(平均0.05 d/a)。花期长度的总体变化可分为3个阶段: 1963-1980年(偏短)、1981-1997年(与多年平均值接近)和2001-2012年(偏长), 但不同物种的花期长度变化存在显著差异。在花期长度延长的序列中, 43.39%是因开花始期提前程度大于开花末期; 在花期长度缩短的序列中, 62.00%是因开花始期提前程度小于开花末期。

**关键词:** 物候; 花期长度; 始花期; 时空变化; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201701005

## 1 引言

植物达到一定年龄和体积时就获得了开花能力, 进而可通过自主途径或适宜的环境条件诱导而开花<sup>[1]</sup>。植物的始花期、盛花期、末花期和花期长度的年际变化及影响因素是花期物候研究的主要内容<sup>[2]</sup>。花期变化影响植物的繁殖和进化, 进而影响植物群落中的种间竞争和共生关系以及生态系统稳定性<sup>[3-4]</sup>。此外, 花期物候研究对人类生活和健康有重要意义。很多植物的花在发育过程中, 具有较高的观赏特性, 因此近几十年来以赏花为主题的旅游活动在世界各地日益增多<sup>[5]</sup>。花期物候研究可为相应旅游活动的开展提供理论基础<sup>[6]</sup>。在园林布景方面, 研究植物花的物候相变化可实现不同植物景观配置优化, 提升园林的美学和观赏价值<sup>[7]</sup>。对产生致敏花粉的树木开展花期预报, 能够有效的预防和控制花粉过敏症<sup>[8]</sup>。

迄今为止, 大量研究揭示了全球各地植物始花期的变化趋势。在加拿大, 19种植物

收稿日期: 2016-07-29; 修订日期: 2016-11-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41401071, 41601047); 国家重大科研仪器研制项目(41427805); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090301) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41401071, No.41601047; National Major Scientific Instruments Development Project, No.41427805; Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA05090301]

**作者简介:** 陶泽兴(1989-), 男, 湖北十堰人, 博士生, 主要从事植被地理和物候学研究。E-mail: colwhoo@163.com

**通讯作者:** 王焕炯(1987-), 男, 山西榆次人, 副研究员, 主要从事物候学研究。E-mail: wanghj@igsrr.ac.cn

中有 18 种的始花期在 2001-2012 年呈提前态势, 只有一种植物微弱推迟<sup>[9]</sup>。在美国东北部地区的 72 个站点中, 有 89% 的站点丁香 (*Syringa chinensis*) 始花期在 1965-2001 年呈提前趋势<sup>[10]</sup>。欧洲地区, 78% 的展叶始期和始花期序列在 1971-2000 年间提前<sup>[11]</sup>。在中国也发现了相似的结果<sup>[12-13]</sup>。这些研究表明, 虽然近几十年来植物始花期在各地区间的变化趋势不同, 但变早仍是北半球始花期变化的主要特征。相对而言, 关于花期长度变化趋势的研究仍较少, 只有少量研究在个别区域开展了工作。例如, Dunne 等<sup>[14]</sup>通过实验方法发现, 美国科罗拉多州的亚高山草甸受融雪提前和增温的影响, 早花植物的花期长度显著延长; Črepinšek 等<sup>[15]</sup>发现, 在斯洛文尼亚东北部地区, 1994-2007 年期间大多数品种的榛树 (*Corylus avellana*) 花期长度比气候相对较冷的 1969-1979 年期间更短; 在中国的西双版纳地区, Zhao 等<sup>[16]</sup>研究了多种热带植物的花期长度变化, 发现在 1973-1999 年间不同植物的花期长度变化存在显著的差异。除此之外, 大尺度的花期长度变化尚未见报道。

基于“中国物候观测网”观测数据, 本文系统研究了 1963-2012 年中国 42 个站点 23 种木本植物的花期长度变化趋势, 分析了花期长度变化的时空格局、种间差异及主要形式。研究结果可为理解气候变化背景下的花期长度变化提供依据, 同时可为植物观赏旅游活动的开展和园林景观布置等提供理论基础。

## 2 数据与方法

### 2.1 物候与气象数据

本文选用的物候数据来源于“中国物候观测网”(China Phenological Observation Network, <http://www.cpon.ac.cn/>), 时间段为 1963-2012 年。该网络的观测在 1969-1972 年和 1997-2002 年两个时段有所中断, 以致各站点所记录的物候数据存在不同程度的缺失<sup>[17]</sup>。因此, 在分析物候变化趋势前, 首先需对物候数据进行筛选, 以获得时间序列最为完整的资料。筛选标准如下:

(1) 所选的植物种应尽可能分布在更多的站点, 以便于分析花期变化的时空格局。因此, 本文将分布站点数量少于 8 个的物种剔除;

(2) 计算物候变化的趋势要求物候期序列有一定的时间长度, 否则计算出的趋势不具有代表性。在以往物候变化研究中, 通常以 15 年作为标准<sup>[11, 18]</sup>。因此, 本文将观测年数少于 15 年的开花始期和开花末期时间序列剔除。

经过以上筛选过程, 最终满足条件的有 23 个物种 (表 1), 分布在 42 个站点 (图 4), 其中含 17 种乔木、5 种灌木、1 种藤本植物。因藤本植物只有 1 种, 只在总体趋势中进行分析, 而不进行生活型间的对比。综合所有站点和物种, 开花始期和开花末期时间序列分别各有 259 条。在这些序列中, 67.57% 的序列起始年分布在 1963-1970 年之间, 序列的结束年主要分布在 1995-1996 年和 2010-2012 年, 分别占所有序列的 30.89% 和 48.65% (图 1a)。序列长度的变化范围为 15~47 年, 平均长度为 24.43 年 (图 1b)。

### 2.2 研究方法

植物的花期长度是指一株植物从第一朵花开放到最后一朵花开毕延续的时间<sup>[19]</sup>, 即植物从开花始期到开花末期所经过的时间。用公式表示为:

$$FD = EFD - FFD \quad (1)$$

式中:  $FD$ 、 $FFD$  和  $EFD$  分别表示花期长度、开花始期和开花末期。

首先利用式 (1) 计算各站点所有植物逐年的花期长度; 其次, 以年份为自变量, 花期长度为因变量进行线性回归分析, 所得回归系数即为花期长度的变化趋势 ( $d/a$ )。

表 1 研究采用的物种概况  
Tab. 1 Summary of plant species investigated in this study

编号	物种名	拉丁名	生活型	分布站点数	平均开花始期
1	玉兰	<i>Magnolia denudata</i>	乔木	10	72
2	桃	<i>Amygdalus persica</i>	乔木	15	84
3	榆树	<i>Ulmus pumila</i>	乔木	15	84
4	垂柳	<i>Salix babylonica</i>	乔木	15	86
5	加拿大杨	<i>Populus canadensis</i>	乔木	9	90
6	泡桐	<i>Paulownia fortunei</i>	乔木	11	96
7	构树	<i>Broussonetia papyifera</i>	乔木	11	99
8	杏	<i>Armeniaca vulgaris</i>	乔木	10	105
9	旱柳	<i>Salix matsudana</i>	乔木	8	111
10	二球悬铃木	<i>Platanus acerifolia</i>	乔木	8	112
11	楝	<i>Melia azedarach</i>	乔木	15	116
12	刺槐	<i>Robinia pseudoacacia</i>	乔木	18	121
13	合欢	<i>Albizia julibrissin</i>	乔木	10	154
14	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	乔木	10	161
15	梧桐	<i>Firmiana simples</i>	乔木	11	166
16	枣	<i>Ziziphus jujuba</i>	乔木	10	177
17	槐树	<i>Sophora japonica</i>	乔木	8	196
18	紫荆	<i>Cercis chinensis</i>	灌木	13	106
19	桑	<i>Morus alba</i>	灌木	9	109
20	紫丁香	<i>Syringa oblata</i>	灌木	13	112
21	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>	灌木	11	180
22	木槿	<i>Hibiscus syriacus</i>	灌木	9	183
23	紫藤	<i>Wisteria sinensis</i>	藤本	10	103

注: 平均开花始期指该植物在所有年份和站点的开花始期平均值, 以序日 (自 1 月 1 日起经过的日数) 表示。生活型是根据植物的形态、结构和生理尤其是外貌反映出的植物类型。

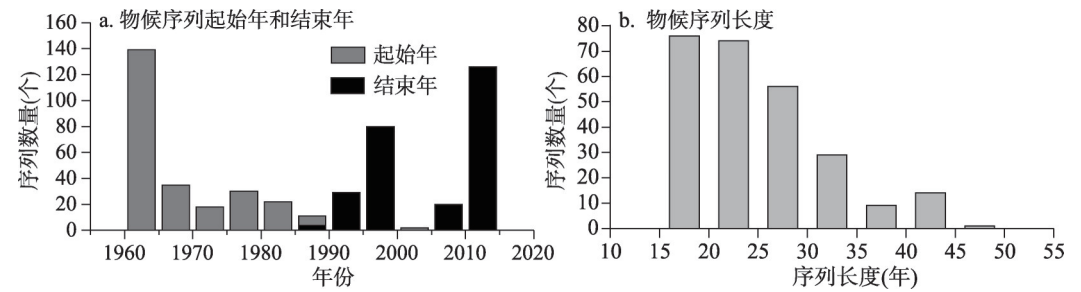


图 1 中国物候序列起始年和结束年及长度的频率分布  
Fig. 1 Frequency distribution of the start and end years as well as length of the phenological series

为分析花期长度变化的整体分布情况, 统计全部站点所有物种花期长度变化趋势的频率分布, 并按照乔木和灌木分别统计。为分析花期长度变化的空间格局, 按照变化的方向和强弱将各站点的物种分为 4 类进行讨论 ( $>0.15$ 、 $0\sim0.15$ 、 $-0.15\sim0$ 、 $<0.15$  d/a), 并利用 ArcMap 软件绘制变化趋势的空间分布图。其次, 以  $2^\circ$  为步长, 统计不同纬度和经度带上花期长度变化趋势的均值、最大值和最小值, 研究花期长度变化沿经纬度的分异规律。

为探讨不同时段间花期长度变化的特征及种间差异, 分别计算各物种在所有站点逐

年花期长度距平的均值，其中距平由花期时间序列减去多年均值计算。以上分析均采用 MATLAB R2010b 软件编程实现。

花期长度延长或缩短由开花始期和开花末期的提前或推迟共同决定。花期长度延长的可能形式有 3 种（图 2）：

① 开花始期和开花末期都提前，但开花始期的提前趋势更大；② 开花始期提前，开花末期推迟；③ 开花始期和开花末期都推迟，但开花末期的推迟趋势更大。相应地，花期长度缩短的可能形式也有 3 种（图 2）。据此，本文识别了每条花期长度序列的变化形式。为研究生活型与花期变化形式的关系，分乔木和灌木分别进行统计。考虑到年内开花较早的植物和开花较晚的植物控制花期变化的因素可能存在差别，进而导致两类植物花期长度的变化形式有所差别。因此，本文分早花植物与晚花植物比较了花期长度的变化形式差异。因物候季节的早晚受各地气候条件影响，所以早花与晚花植物的划分没有固定的标准，通常以年内开花时间的相对早晚划分<sup>[20-21]</sup>。根据这一原则，以所有物种平均开花始期的中值（5 月 1 日）为分界点，早于分界点的划分为早花植物，晚于分界点的划分为晚花植物。

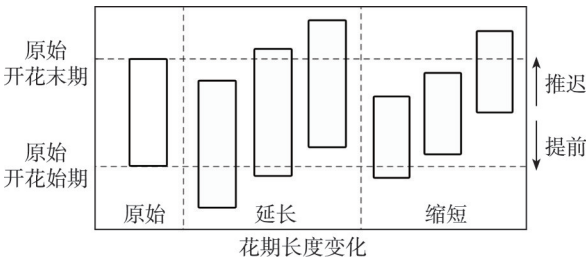


图 2 花期长度变化的可能形式

Fig. 2 The probable forms of changes in flowering duration

### 3 结果与分析

#### 3.1 花期长度整体变化趋势

从花期长度序列变化趋势的总体分布来看，花期长度延长的序列明显多于缩短的序列。259 条花期长度变化序列中，38.61% 的序列呈缩短趋势，其中显著缩短的占 9.65%（表 2，图 3）（ $P < 0.05$ ）；61.39% 的花期长度序列延长，其中显著延长的占 21.24%（ $P < 0.05$ ）。乔木和灌木相比，花期长度显著缩短的比例相差不大，但是乔木花期长度显著延长的比例只有 16.29%，低于灌木的 30.91%，这表明灌木花期的延长趋势比乔木更加显著（表 2）。

从变化幅度上来看，花期长度的变化趋势在  $-1.61 \text{ d/a}$ （南昌的紫薇）到  $1.89 \text{ d/a}$ （勐腊的紫薇）之间，其中 59.46% 的序列花期长度变化趋势绝对值小于  $0.10 \text{ d/a}$ ，88.03% 的序列变化趋势绝对值小于  $0.50 \text{ d/a}$ （图 3）。所有序列花期长度变化趋势均值为  $0.10 \text{ d/a}$ ，表明平均每年花期长度延长  $0.10 \text{ d}$ 。乔木的花期长度平均变化趋势为  $0.09 \text{ d/a}$ ，低于灌木

表 2 花期长度变化趋势总体分布

Tab. 2 Summary of trends in flowering duration

花期长度变化	全部植物		乔木		灌木	
	序列数(个)	百分比(%)	序列数(个)	百分比(%)	序列数(个)	百分比(%)
缩短(总计)	100	38.61	81	41.54	19	38.18
缩短(显著)	25	9.65	20	10.26	6	10.91
缩短(不显著)	75	28.96	61	31.28	15	27.27
延长(总计)	159	61.39	114	58.46	34	61.82
延长(显著)	55	21.24	33	16.92	17	30.91
延长(不显著)	104	40.15	81	41.54	17	30.91

注：按照全部序列、乔木和灌木分别统计；显著指趋势达到了  $P < 0.05$  的显著性水平。

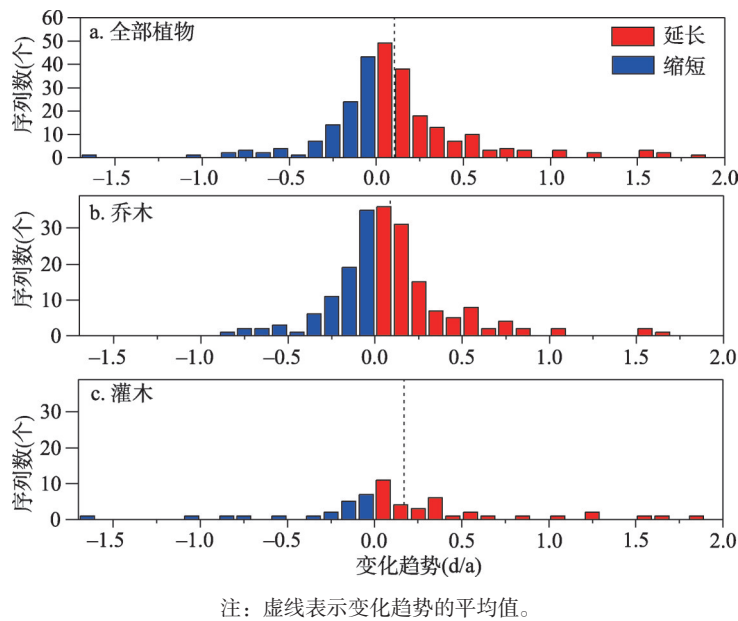
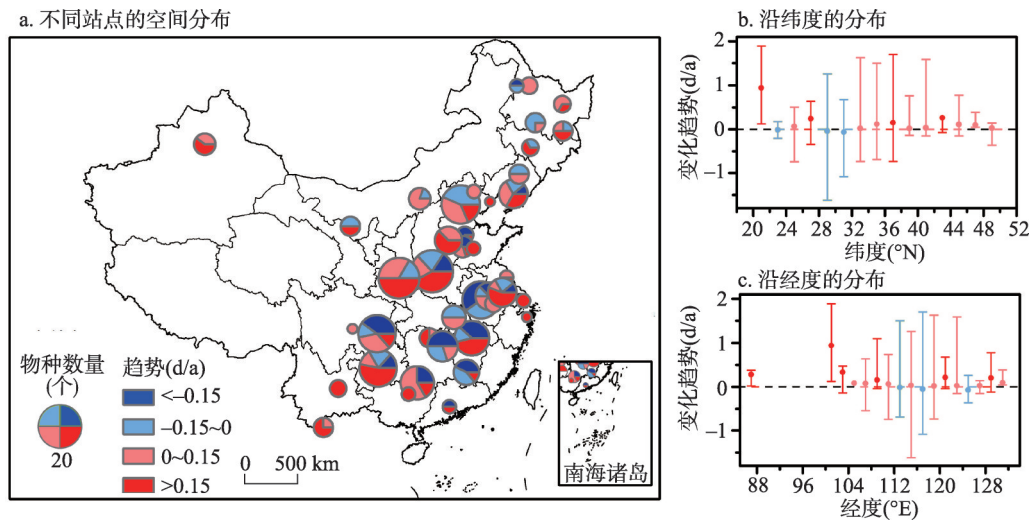


图3 中国主要木本植物花期长度变化趋势的频率分布  
Fig. 3 Frequency distributions of trends in flowering duration of main woody plants in China

(0.17 d/a)。

**3.2 花期长度变化的空间格局**

从花期长度变化的空间格局看 (图 4a)，全部 42 个站点中仅有 9 个站点 (21.43%) 花期长度缩短的物种数量占到一半以上，主要包括东北地区的哈尔滨、嫩江，华中地区的长沙和华东地区的合肥、赣县、南昌、扬州等。有一半及以上物种花期长度延长的站点共计 33 个 (78.57%)，其中，有 16 个站点全部物种的花期长度均呈延长趋势，这些站



注：圆点表示平均值，竖线上下限分别表示最大和最小值。红线表示变化趋势的均值大于 0；  
蓝线表示变化趋势的均值小于 0。

图4 中国花期长度变化趋势的空间格局  
Fig. 4 The spatial patterns of trends in flowering duration in China



点主要分布在东北地区北部、华北地区、西南和华南地区南部。

就纬向变化而言(图4b), 中高纬度地区( $32^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ )花期长度主要呈延长趋势, 变化范围为 $0.02\sim 0.26\text{ d/a}$ ; 低纬度地区( $23^{\circ}\text{N}$ 和 $30^{\circ}\text{N}$ 附近)花期长度缩短, 但趋势较弱, 仅为 $-0.07\sim -0.02\text{ d/a}$ ; 在 $20^{\circ}\text{N}$ 左右, 花期长度变化趋势最大, 平均每年延长 $0.94\text{ d}$ 。

就经向变化而言(图4c), 西部地区( $87^{\circ}\text{E}\sim 112^{\circ}\text{E}$ )各经度区间的花期长度变化趋势( $0.07\sim 0.94\text{ d/a}$ , 平均 $0.28\text{ d/a}$ )要高于东部地区( $-0.07\sim 0.22\text{ d/a}$ , 平均 $0.05\text{ d/a}$ )。在 $113^{\circ}\text{E}$ 、 $117^{\circ}\text{E}$ 和 $125^{\circ}\text{E}$ 附近花期长度缩短, 但是平均变化趋势较弱( $-0.07\sim -0.01\text{ d/a}$ )。

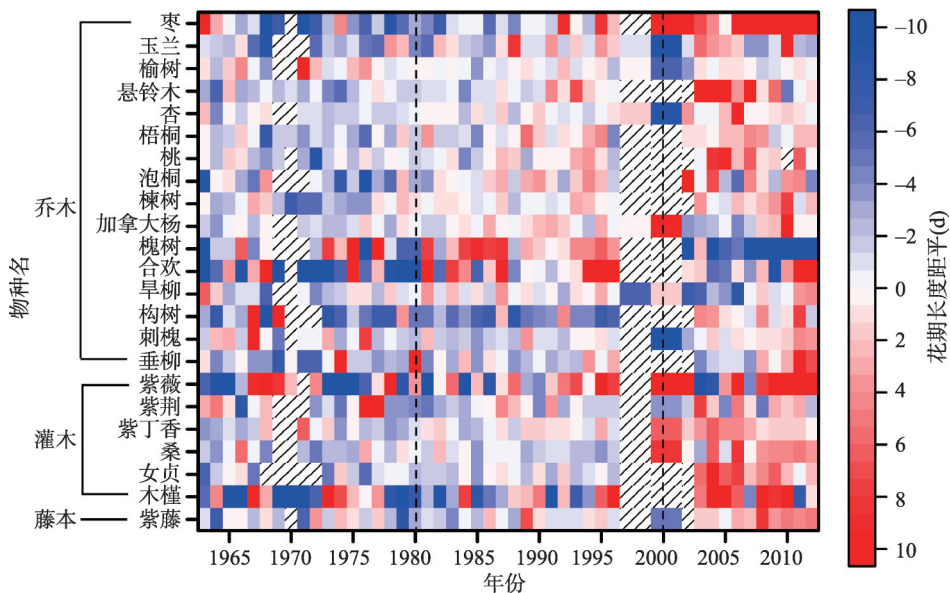
### 3.3 花期长度的年际变化

花期长度变化可分为3个明显的阶段(图5)。1963-1980年, 花期长度距平为负值的年份较多, 平均值为 $-1.49\text{ d}$ ; 1981-1997年, 花期长度距平在整个时段内都较小, 平均值仅为 $-0.01\text{ d}$ ; 2001-2012年, 花期长度距平均值为 $2.48\text{ d}$ , 表明花期长度延长主要发生在这一阶段。

花期长度距平变化也存在一定的种间差异(图5)。例如, 合欢、构树、紫薇和木槿在前两个阶段1963-1980年、1981-1997年的平均花期长度距平分别为 $-5.10\text{ d}$ 、 $-0.20\text{ d}$ , 变化幅度大于其他物种的均值(分别为 $-1.02\text{ d}$ 和 $0.03\text{ d}$ )。值得注意的是, 槐树的花期长度距平变化与其他物种有明显差别。在上述3个阶段, 槐树的花期长度距平分别为 $1.30\text{ d}$ 、 $3.90\text{ d}$ 和 $-11.20\text{ d}$ 。这表明槐树花期长度在前两个时段较长, 在近十几年缩短, 且变幅远大于其他物种。

### 3.4 花期长度变化的形式

在花期长度延长的序列中, 开花始期提前程度大于开花末期提前程度的有69个(表3), 占所有序列的26.64%, 占花期延长序列的43.39%。此外, 开花始期提前、开花末期推迟的序列占所有序列的19.31%, 占花期延长序列的31.45%。这两类形式共占所有序列约一半的比例(45.95%)。在花期长度缩短的序列中, 开花始期提前程度小于开花末期提



注: 斜线区表示无观测数据; 虚线划分了3个不同变化阶段。

图5 1963-2012年中国各植物花期长度距平序列

Fig. 5 The anomalies of flowering duration for different plant species from 1963 to 2012

前程度的有62个, 占所有序列的23.94%, 占花期缩短序列的62.00%。相比之下, 开花始期缩短的其余两种形式占缩短序列的比例较小, 分别仅为21.00%和17.00%。

就乔木而言, 25.13%的序列开花始期提前程度大于开花末期(表3), 是花期长度延长的最主要形式。其次, 开花始期推迟程度小于开花末期是花期长度延长的次要形式(17.44%)。灌木中50.91%的序列开花始期和开花末期都呈现提前的趋势。开花始期提前程度大于和小于开花末期提前程度的植物分别占29.09%和21.82%。同时, 灌木中有27.27%的序列花期延长的形式是开花始期提前, 开花末期推迟, 这一比例明显高于乔木(19.31%)。

早花和晚花植物花期长度变化的主要形式也存在一定的差别(表4)。早花植物花期长度延长的主要形式是开花始期提前程度大于开花末期提前程度, 这一类占所有序列总数的29.38%; 而晚花植物花期长度延长的主要形式(33.85%)是开花始期提前, 开花末期推迟。但早花和晚花植物花期长度缩短的主要形式均为开花始期的提前程度小于开花末期的提前程度。

表3 不同生活型植物花期长度变化形式  
Tab. 3 The forms of change in flowering duration for different life forms

花期变化类型	变化形式	全部植物		乔木		灌木	
		序列数(个)	百分比(%)	序列数(个)	百分比(%)	序列数(个)	百分比(%)
延长	FFD提前>EFD提前	69	26.64	49	25.13	16	29.09
	FFD提前, EFD推迟	50	19.31	34	17.44	15	27.27
	FFD推迟<EFD推迟	40	15.44	33	16.92	5	9.09
缩短	FFD提前<EFD提前	62	23.94	49	25.13	12	21.82
	FFD推迟, EFD提前	21	8.11	16	8.21	4	7.27
	FFD推迟>EFD推迟	17	6.56	14	7.18	3	5.45

表4 早花与晚花植物的花期长度变化形式  
Tab. 4 The forms of change in flowering duration for early and late flowering species

花期变化类型	变化形式	早花		晚花	
		序列数(个)	百分比(%)	序列数(个)	百分比(%)
延长	FFD提前>EFD提前	57	29.38	12	18.46
	FFD提前, EFD推迟	28	14.43	22	33.85
	FFD推迟<EFD推迟	36	18.56	5	6.15
缩短	FFD提前<EFD提前	44	22.68	18	27.69
	FFD推迟, EFD提前	15	7.73	6	9.23
	FFD推迟>EFD推迟	14	7.22	3	4.62

4 讨论

本文系统分析了1963-2012年中国42个站点259条木本植物花期长度序列的变化趋势。其中, 61.39%的花期长度序列呈延长趋势, 38.61%的花期长度序列呈缩短趋势。和本文的结果相一致, Ziello等<sup>[22]</sup>也发现, 1971-2000年欧洲地区29种植物的花期长度总体上呈现延长的趋势。但也有研究得到相反的结论, 例如Bock等<sup>[20]</sup>发现英吉利海峡的根西岛(Guernsey Island)85%的物种花期长度在1985-2011年呈缩短态势, 并且缩短平均趋

势达 $-1.0\text{ d/a}$ , 这与中国花期长度的平均变化趋势( $0.10\text{ d/a}$ )有较大差异。这种差异一方面是因研究时段的不同导致的, 另一方面可能与研究的植物种不同有关。本文研究的物种主要是中国常见的园林木本植物, 而Bock等<sup>[20]</sup>研究的物种既包括木本植物, 还包括草本、地下芽植物等。不同植物对环境变化的响应机制必然存在差异, 从而导致花期变化趋势的不同。另外, 不同研究区的气候类型也存在明显差别。中国大部分地区属大陆性季风气候, 而根西岛属海洋性气候。在不同气候类型下, 植物物候对气候的适应策略可能有所差异。在海洋性气候或地中海气候下, 某些植物可能会随气候变暖加快花器官发育的进程, 从而使花期缩短, 降低植物在雨季中对花的维持成本<sup>[23]</sup>。在其他气候类型下, 植物可能随气候变暖延长其花期, 这虽然会牺牲掉一部分自身资源, 但有利于提高生殖的成功率<sup>[24]</sup>。总之, 植物会根据自身的遗传特性和所处的气候类型, 在降低花期资源消耗和提高生殖成功率两者间权衡, 从而使得花期长度变化具有多样性。

总体而言, 影响花期长度变化的因素包括非生物因素和生物因素两类。在众多非生物因素中, 温度对花期长度影响最大, 温度增加可能会导致花期延长。例如, Miller-Rushing等<sup>[25]</sup>发现温暖年份的樱花花期长度更长, 平均温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 花期长度延长 $0.5\text{ d}$ 。还有研究发现实验条件下的增温可延长一年蓬(*Erigeron annuus*)花期的持续时间<sup>[26]</sup>。这是因为在大多数情况下, 更早的物候期(例如始花期)比晚的物候期(例如末花期)对温度变化的响应更加敏感<sup>[27-30]</sup>。换言之, 在同样升温情景下, 始花期会比末花期提前更多, 从而造成花期长度延长。近50年来, 中国大部分地区气温呈增加趋势<sup>[31]</sup>, 这在一定程度上解释了花期长度总体延长的特征。除温度外, 有研究表明某些植物花期长度的变化还与降水和湿度显著相关<sup>[16, 24]</sup>。降水增多可能会加大植物维持花朵开放的成本, 从而使植物减少花寿命或花期持续时间<sup>[32]</sup>。除温度、降水外, 光周期、日照强度、霜冻灾害等<sup>[33-34]</sup>也是导致花期长度变化的可能因子。

虽然本文发现中国植物花期长度总体上呈延长趋势, 但仍有9.65%的花期长度序列呈显著缩短的态势。这表明仅用温度等非生物因素来解释中国过去50年的花期长度变化仍有较大的局限性。生物因素, 包括传粉者和种间竞争关系<sup>[35]</sup>等对花期长度的影响同样重要。本文选择的23种植物中除垂柳、旱柳、加拿大杨、二球悬铃木和榆树外, 其余18种植物都是虫媒植物。这类植物花期的变化既受昆虫数量的影响, 也受花期和昆虫活动对应时间的影响<sup>[35]</sup>。因不同植物间存在对传粉者这种有限资源的竞争关系, 为吸引更多的传粉者以及提高传粉效率, 植物在长期适应过程中可能改变其开花时间或延长其花期长度<sup>[36]</sup>。由于缺乏对传粉者的观测数据, 尚无法对生物因素进行定量化的评估, 有待于未来进一步研究。总之, 生物和非生物因素对物候变化的相对主导作用随区域和物种不同而变化<sup>[37]</sup>。因此, 如何量化评估各因素对花期长度的影响是未来物候学研究的一个重要方向。

## 5 结论

本文定量研究了中国主要木本植物过去50年花期长度的变化趋势, 重点分析了花期长度变化的空间格局、时间和种间差异, 探讨了花期长度变化的主要形式。主要结论有:

(1) 在所有花期长度序列中, 大多数序列(61.39%)呈延长趋势, 其中显著延长的占21.24% ( $P < 0.05$ )。灌木花期的延长趋势比乔木更加显著。

(2) 花期长度变化存在明显的区域差异。在东北南部、华中和华东等地区花期长度



缩短的物种数量更多;在东北地区北部、华北地区、西南地区和华南地区南部,大多数物种的花期长度呈延长趋势。大多数纬度带上,花期长度平均变化趋势呈延长态势,其中在 20°N 左右最大(0.94 d/a);经度地带方面,西部(112°E 以西)各经度区间内的花期长度变化趋势高于东部。

(3) 花期长度的年际变化可分成明显的 3 个阶段:1963-1980 年较短,1981-1997 年与多年平均值接近,2001-2012 年显著延长。但个别物种花期长度变化的阶段与其他物种存在明显差异。

(4) 花期长度延长的主要形式是开花始期提前程度大于开花末期提前程度,这类序列占有花期长度延长序列的 43.39%。花期长度缩短的主要形式是开花始期提前程度小于开花末期提前程度,占有花期缩短序列的 62.00%。

### 参考文献(References)

- [1] Taiz L, Zeiger E. Plant Physiology. 4th ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2006.
- [2] Zhang Zengxin, Huang Yuhua, Wang Yanxin, et al. Investigation and application of flowering phenology of garden plants in Nanjing. *Guizhou Agriculture Sciences*, 2014, 42(12): 195-198. [张增信, 黄钰瀚, 王言鑫, 等. 南京市园林植物的花期物候调查及应用. *贵州农业科学*, 2014, 42(12): 195-198.]
- [3] Matthews E R, Mazer S J. Historical changes in flowering phenology are governed by temperature x precipitation interactions in a widespread perennial herb in western North America. *New Phytologist*, 2016, 210(1): 157-167.
- [4] Zhang Baocheng, Bai Yanfen. Flowering phenology response to climate change. *Northern Horticulture*, 2015(22): 190-194. [张宝成, 白艳芬. 花期物候对气候变化的响应进展. *北方园艺*, 2015(22): 190-194.]
- [5] Ma Li, Fang Xiuqi. Effects of global warming on seasonal tourism for the last 20 years in Beijing: A case study on the Peach Flower Stanza of Beijing Botanical Garden. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 313-319. [马丽, 方修琦. 近 20 年气候变暖对北京时令旅游的影响: 以北京市植物园桃花节为例. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 313-319.]
- [6] Tao Zexing, Ge Quansheng, Wang Huanjiong, et al. Phenological basis of determining tourism seasons for ornamental plants in central and eastern China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 85-96. [陶泽兴, 葛全胜, 王焕炯, 等. 中国中东部植被景观观赏季划分的物候学基础. *地理学报*, 2015, 70(1): 85-96.]
- [7] Li Shujuan, Liu Yali. Ornamental characteristics and phenograms of plant leaf color in the main seasons in Xi'an. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(2): 42-47. [李淑娟, 刘雅莉. 西安主要季色叶植物观赏特征及物候图谱研究初报. *西北林学院学报*, 2013, 28(2): 42-47.]
- [8] Zhang Mingqing, Yang Guodong, Fan Zhentao, et al. Forecasting the first flower dates of allergic pollen trees in Beijing. *Journal of Environment and Health*, 2008, 25(3): 262-263. [张明庆, 杨国栋, 范振涛, 等. 北京地区主要致敏花粉树木花期的预报. *环境与健康杂志*, 2008, 25(3): 262-263.]
- [9] Gonsamo A, Chen J M, Wu C. Citizen Science: Linking the recent rapid advances of plant flowering in Canada with climate variability. *Scientific Reports*, 2013, 3(2239): 1-5.
- [10] Wolfe D W, Schwartz M D, Lakso A N, et al. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in northeastern USA. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49(5): 303-309.
- [11] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1969-1976.
- [12] Ge Q, Wang H, Rutishauser T, et al. Phenological response to climate change in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [13] Dai Junhu, Wang Huanjiong, Ge Quansheng. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 593-601. [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.]
- [14] Dunne J A, Harte J, Taylor K J. Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1): 69-86.
- [15] Crepinsek Z, Stampar F, Kajfez-Bogataj L, et al. The response of *Corylus avellana* L. phenology to rising temperature in north-eastern Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(4): 681-694.
- [16] Zhao J, Zhang Y, Song F, et al. Phenological response of tropical plants to regional climate change in Xishuangbanna,

- south-western China. *Journal of Tropical Ecology*, 2013, 29(2): 161-172.
- [17] Ge Q, Wang H, Zheng J, et al. A 170 year spring phenology index of plants in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(3): 301-310.
- [18] Wang H, Ge Q, Dai J, et al. 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.
- [19] Zheng Xiangru, Wang Li. *Botany*. Beijing: China Agricultural University Press, 2001. [郑湘如, 王丽. 植物学. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.]
- [20] Bock A, Sparks T H, Estrella N, et al. 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.
- [21] Ho C H, Lee E J, Lee I, et al. Earlier spring in Seoul, Korea. *International Journal of Climatology*, 2006, 26(14): 2117-2127.
- [22] Ziello C, Boeck A, Estrella N, et al. First flowering of wind-pollinated species with the greatest phenological advances in Europe. *Ecography*, 2012, 35(11): 1017-1023.
- [23] Arroyo M, Armesto J J, Villagran C. Plant phenological patterns in the high Andean Cordillera of central Chile. *Journal of Ecology*, 1981, 69(1): 205-223.
- [24] Vega Y, Marques I. Both biotic and abiotic factors influence floral longevity in three species of *Epidendrum* (Orchidaceae). *Plant Species Biology*, 2015, 30(3): 184-192.
- [25] Miller-Rushing A J, Katsuki T, Primack R B, et al. 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.
- [26] Zhang Sisi, Xiao Yi'an, Deng Hongping, et al. Effects of short-term warming on flowering phenology and reproductive allocation of *Erigeron annuus*. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, 38(1): 53-59. [张斯斯, 肖宜安, 邓洪平, 等. 短期增温对入侵植物一年蓬开花物候与繁殖分配的影响. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 53-59.]
- [27] Fitter A H, Fitter R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296(5573): 1689-1691.
- [28] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 243-263.
- [29] Bai J, Ge Q, Dai J. The response of first flowering dates to abrupt climate change in Beijing. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(3): 564-572.
- [30] 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.
- [31] IPCC. Summary for Policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 3-29.
- [32] Zhang Zhiqiang, Li Qingjun. Review of evolutionary ecology of floral longevity. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3): 598-606. [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.]
- [33] Hafdahl C E, Craig T P. Flowering phenology in *Solidago altissima*: Adaptive strategies against temporal variation in temperature. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 122-127.
- [34] Way D A, Montgomery R A. Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant Cell and Environment*, 2015, 38(9SI): 1725-1736.
- [35] Pau S, Wolkovich E M, Cook B I, et al. Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3633-3643.
- [36] He Ping. *Conservation Biology of the Rare & Endangered Plants*. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2005. [何平. 珍稀濒危植物保护生物学. 重庆: 西南师范大学出版社, 2005.]
- [37] Wolkovich E M, Cook B I, Davies T J. Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: Building predictions across space, time and species diversity. *New Phytologist*, 2014, 201(4): 1156-1162.

## Spatiotemporal variations in flowering duration of woody plants in China from 1963 to 2012

TAO Zexing<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Shuying<sup>1</sup>, GE Quansheng<sup>1</sup>, DAI Junhu<sup>1</sup>,  
XU Yunjia<sup>1,2</sup>, WANG Huanjiong<sup>1</sup>

(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 Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Flowering phenology is of great importance for flower tourism planning, landscape arrangement, and pollen allergy forecast. Previous studies mainly focused on the changes in the first flowering date of plants, but rarely examined the spatiotemporal changes in flowering duration. In this study, we systematically analyzed the changes in flowering durations for 23 woody plants at 42 sites from China Phenological Observation Network (CPON) during 1963-2012. Through investigations on the spatiotemporal patterns, interspecific difference, and the forms of change in flowering durations, the following conclusions are drawn. (1) Out of all the 259- time series, flowering durations have lengthened in 159- time series (61.39%), where 21.24% have lengthened significantly. The extending trends for shrub species are found to be more significant than those for tree species. (2) Most flowering durations in the south of Northeast China, East China, and Central China exhibited trends of shortening, but those in the north of Northeast China, North China, parts of Southwest China, and South China exhibited extending trends. The strongest trend (0.94 d/a) occurred at around 20°N. The mean trend of flowering duration (0.28 d/a) in western China (87°E-112°E) was larger than that in eastern China (0.05 d/a). (3) The overall changes in flowering duration could be identified into three stages: 1963-1980 (shorter), 1981-1997 (close to multi-year average) and 2001-2012 (longer), although evident difference existed among species. (4) As for the time series with extending flowering duration, 43.39% were induced by a much earlier first flowering date than the end of flowering date. For the time series with shortening flowering duration, 62% were caused by a more advanced trend at the end of flowering date than at the first flowering date.

**Keywords:** phenology; flowering duration; first flowering date; spatiotemporal variations; China