

北京园林树木物候的年代际变化 ——多物候阶段的树种响应

Interdecadal Variation of Tree Phenology in Beijing: The Species-Specific Response for Diverse Phenophases

邢小艺^{1,2} 董 丽^{2*} 范舒欣² 张梦园² 郝培尧² 李 坤^{2,3}
XING Xiaoyi^{1,2} DONG Li^{2*} FAN Shuxin² ZHANG Mengyuan² HAO Peiyao² LI Kun^{2,3}

(1. 华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070; 2. 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 3. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300)

(1. College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 430070; 2. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, China, 100083; 3. College of Landscape Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang, China, 311300)

文章编号: 1000-0283(2023)08-0021-11

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 08. 0021. 003

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2023-04-28

修回日期: 2023-06-12

摘 要

近30年来加剧的气候变化已经显著改变了北温带森林的树木物候, 并对城市植被生态与景观产生长远影响。尽管此前已有研究揭示北京地带性植被生长季与花叶物候的整体变化趋势和气候响应特征, 物候响应的种间差异及各物候阶段的响应敏感性仍有待进一步探究。聚焦1980s-2010s北京植物园45种园林树木物候的年代际变化, 旨在揭示不同树种、各物候阶段的物候响应特征和响应敏感性差异。结果表明, 与30年前相比, 各树种始花期、盛花期和末花期分别平均提前10.2日、7.5日、2.4日($p<0.05$), 开花持续期延长, 每日同步开花树种增多; 各树种展叶始期平均提前7.8日($p<0.05$), 秋色盛期及落叶末期分别平均延后7日、7.8日($p<0.05$), 导致生长季及叶幕期显著延长($p<0.05$)。以物候变化量绝对值衡量特定物候阶段的响应敏感性, 发现与其他物候阶段相比, 始花期的响应敏感性最为突出且种间一致性较强, 而叶衰老物候在响应方向及程度上的种间差异最为显著, 开花、展叶物候的响应差异导致8个树种的花叶时序发生颠倒。以始花期、末花期、展叶始期及落叶末期的响应敏感性标准化均值衡量各树种的综合物候敏感性并作树种聚类分析, 发现玉兰、紫丁香、华北珍珠梅、元宝枫、黄刺玫等树种呈高物候敏感性, 文冠果、毛泡桐、桑、碧桃、楸等树种呈低物候敏感性, 且大部分树种各物候阶段的敏感性特征并不均衡, 需予以持续关注和进一步探究。面对持续变暖、极端性增强的气候变化趋势, 研究结果可从树种层面为提高北京城市植被景观与生态的气候适应性提供一定参考。

关键词

树木物候; 年代际变化; 种间差异; 物候阶段; 响应敏感性

Abstract

Climate change has significantly shifted tree phenology in the Northern Hemisphere and brought cascading impacts on the ecology and landscape of urban vegetation. Though extensive research has revealed the general trend of phenological variation and response pattern of Beijing's regional vegetation, the interspecific difference in the phenophase-specific phenological response still needs further exploration. This research explored the interdecadal phenological variation of 45 woody species in Beijing Botanical Garden between the 1980s and 2010s, to reveal the phenological response characteristics and response sensitivity of various species for diverse phenophases. Based on the species-average value, compared with thirty years ago, flower phenophases - first flowering date (FFD), peak flowering date (PFD), and end of flowering date (EFD) advance by 10.2 days, 7.5 days, and 2.4 days respectively ($p<0.05$), which caused extension of flower duration and increase in daily frequency of simultaneous blooming species. As to leaf phenophases, first leaf unfolding (FLU) advanced by 7.8 days ($p<0.05$), peak leaf colouration (PLC) and end of leaf fall (ELF) delayed by 7 days and 7.8 days, respectively ($p<0.05$), leading to the extension of the growing season and canopy duration ($p<0.05$). The response sensitivity for a certain phenophase was evaluated with the absolute phenological

邢小艺

1993年生/女/山东济南人/博士/讲师/研究方向为园林植物应用与园林生态

董 丽

1965年生/女/山西运城人/博士/教授/研究方向为园林植物应用与园林生态

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: dongli@bjfu.edu.cn

基金项目:

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“武汉园林树木的气候敏感性评估”(编号: 2662022YLQD002)

variation (APV) value. Compared with other phenophases, FFD showed the most prominent phenological sensitivity and higher interspecific consistency in the response, while a much larger interspecific diversity in phenological sensitivity existed in leaf senescence, and the divergent phenological variation between FFD and FLU caused a reversal of leaf-flower sequence for eight species. For species clustering analysis, the comprehensive phenological sensitivity was measured with the average APV of four non-linear phenophases (FFD, EFD, FLU, ELF). The species with high-level comprehensive phenological sensitivity included *Yulania denudata*, *Syringa oblata*, *Sorbaria kirilowii*, *Acer truncatum*, *Rosa xanthina*, etc.; the species with low-level phenological sensitivity involved *Xanthoceras sorbifolium*, *Paulownia tomentosa*, *Morus alba*, *Prunus persica* ‘Duplex’, *Catalpa bungei*, etc. Most species performed unbalanced phenological sensitivity among different phenophases. Confronted with the challenges of changing climate with irreversible warming trends and increasing extremity, the research results could provide a reference for species selection to improve climate adaptation of Beijing’s urban vegetation.

Keywords

tree phenology; interdecadal variation; interspecific difference; phenophases; response sensitivity.

数10年来, 全球植被的生长发育节律受到以变暖为典型特征的气候变化的突出影响^[1-2], 大量研究揭示了气候变化影响下北温带森林树木物候的显著变化, 如展叶物候提前^[3-7], 开花物候提前^[8-12], 秋季叶衰老物候延后^[13-17], 生长季延长^[18-21]等。这些研究亦表明物候对气候变化的响应特征呈突出的地域性和种间差异, 且不同物候阶段的气候响应机制不同。

北京地区的树木物候观测历史悠久。我国现代物候学奠基人竺可桢先生于1950-1962年首次对北海公园的物候期进行了长期观测记录, 1963年中国物候观测网北京观测站定于颐和园, 中科院地理研究所开始对其中10余种植物、动物及气象物候进行持续监测^[22]。此外, 首都师范大学杨国栋团队于1980年构建了北京物候观测网, 于1980-1987年间对北京植物园等16处观测站内近百种树木物候进行了系统观测, 物候数据汇集于《北京地区的物候日历及其应用》^[23], 这为探究北京园林树木物候的动态变化提供了详实的历史物候数据。基于上述数据库, 陈效逯等^[24]探究了1950-1995年间北京5种乡土树种的开花物候变化, 发现冬春季变暖导致春季花期显著提前, 1985年以来趋势尤为突出。仲舒颖等^[25]分析了1981-2010年北京物候季节的变迁, 发现

春夏季物候整体提前, 秋季物候整体延后。Tao等^[21]同样阐明了1963-2009年间北京展叶季和开花季提前、秋色季延后的变化规律。尽管上述研究揭示了气候变暖影响下北京物候变化的整体趋势, 但树种层面的物候研究仍较为欠缺, 不同树种及各物候阶段对气候变化的特定响应特征与响应敏感性差异尚不明晰, 且物候变化的年周期整体特征有待进一步探究。考虑到物候对气候变化的响应是衡量地带性植被与生态系统气候适应性的核心要素^[26], 从树种层面开展更进一步的城市物候研究对于提高城市植被气候韧性是十分有必要的。

本研究探究了1980s-2010s北京植物园45种常见落叶树种周年物候的年代际变化, 旨在揭示不同树种、各物候阶段的物候响应特征和响应敏感性差异。

1 研究地与研究方法

1.1 研究地

北京市位于华北平原东北缘, 地带性植被主要由温带落叶阔叶林构成, 受四季分明的暖温带大陆性季风气候影响, 呈现由发芽、开花、展叶、秋色、落叶等物候阶段构成的年周期季节性生长发育节律。研究地北京植物园(39° 59′ 34.04″ N, 116° 12′ 33.62″ E)

位于北京西北郊, 建成于1956年, 园内收集展示万余种植物(包括变种及品种), 且植物生长状况和养护条件良好。

1.2 研究对象

研究对象为1980s以来在北京园林绿化中广泛应用的乡土树种或归化种^[23,27-28], 据此选择45种落叶木本植物, 包括乔木32种、灌木12种及藤本1种(表1)。每一树种选择3~5株光照条件及生长发育状况良好的成龄植株作为物候观测样株。

1.3 数据采集与处理

1.3.1 物候数据采集

2010s的物候数据来自2016-2019年研究团队进行的实地物候观测。北京春季、秋季、初夏及初冬气温变化急剧、物候现象发生频繁, 以每1~2日为观测周期; 夏季及冬季气温趋于平稳、物候发生频率降低, 以每5日为观测周期。考虑到日间高温对生长季物候的驱动作用及夜间低温对叶衰老物候的诱导作用, 春夏季物候观测于午后14时进行、秋冬季物候观测于早晨8时进行。以《中国物候观测方法》^[29]为标准, 观测记录以下6个物候阶段: 始花期(FFD)、盛花期(PFD)、末花期(EFD)、展叶始期(FLU)、

秋色盛期 (PLC)、落叶末期 (ELF)，并计算以下物候持续期：开花持续期 (FLD，始花期至末花期)、生长季 (GSL，展叶始期至秋色盛期)、叶幕期 (CAD，展叶始期至落叶末期)。将物候期的日期数据转化为自然年日序 (DOY)，即自然年1月1日起的第n日，如1月31日为D31。

1980s的历史物候数据来自北京物候观测网1984-1987年的物候记录，收录于《北京地区的物候日历及其应用》^[23]，观测树种及物候阶段与2010s一致，但存在6个树种的盛花期数据缺失和10个树种的秋色盛期数据缺失 (表1)。

1.3.2 近地面气温数据采集

研究地1980s-2010s的近地面气温数据来自国家气象科学数据中心《中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)》北京观测站 (54511, 39° 48' N116° 28' E, 31.5 m) 1980-2020年的每日气温数据，包括日均温、日最高温、日最低温，据此计算年均温、春季均温 (2-4月)、夏季均温 (5-8月)、秋季均温 (9-11月) 及冬季均温 (12-翌年1月)，以分析气温年代际变化。

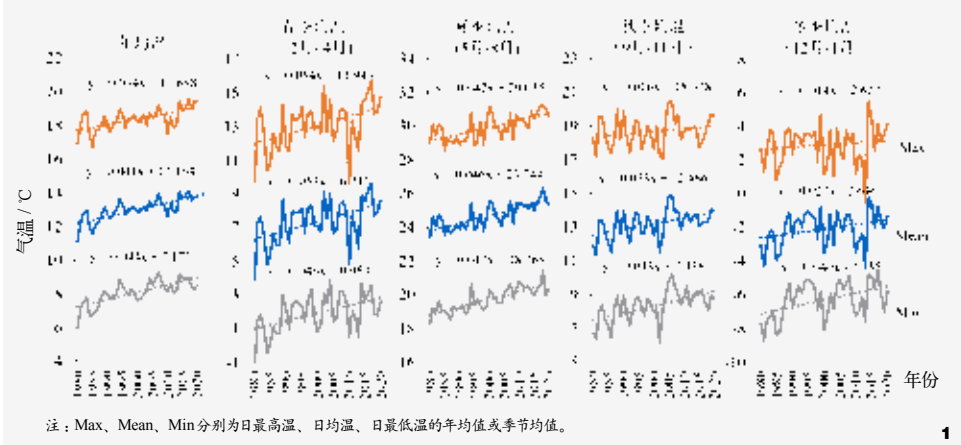


图1 1980-2010年北京年均温的变化趋势
Fig. 1 The change of annual air temperature in Beijing during 1980-2010

1.3.3 物候敏感性分析

以1980s-2010s物候变化量绝对值 (APV) 衡量某物候阶段的响应敏感性。选择APV值无显著共线性的4个物候阶段，即始花期、末花期、展叶始期、落叶末期进行树种的综合物候敏感性评价与聚类。考虑到各物候阶段的APV值呈不同数量级，将某一物候阶段各树种的APV值进行Zscore 标准化处理，取4个物候阶段APV值Zscore 标准化值的均值为各树种的综合物候敏感性值。据此将45个树种划分为高物候敏感性 (高于Q3, ≥75%)、低物

候敏感性 (低于Q1, ≤25%)、中高物候敏感性 (Q2-Q3, 50% ~ 75%)、中低物候敏感性 (Q1-Q2, 25% ~ 50%)。数据分析在SPSS 22.0中完成。

2 研究结果

1980-2020年，北京地区的年均温、春季均温、夏季均温、秋季均温和冬季均温均呈显著增加趋势 (图1)，年均变化率分别为0.041℃、0.053℃、0.046℃、0.033℃、0.027℃，表明1980s-2010s北京气候呈明显变暖趋势，以春季升温最为突出。

表1 物候观测树种
Tab. 1 Species for phenological observation

生活型 Life form	树种名 Species name
乔木	元宝枫 (<i>Acer truncatum</i>)、臭椿 [^] (<i>Ailanthus altissima</i>)、白桦 (<i>Betula platyphylla</i>)、楸 (<i>Catalpa bungei</i>)、黄金树 (<i>Catalpa speciosa</i>)、朴树* (<i>Celtis sinensis</i>)、蜡梅 [^] (<i>Chimonanthus praecox</i>)、柿* (<i>Diospyros kaki</i>)、白杜 (<i>Euonymus maackii</i>)、梧桐* (<i>Firmiana simplex</i>)、洋白蜡 (<i>Fraxinus pennsylvanica</i>)、银杏* (<i>Ginkgo biloba</i>)、胡桃 (<i>Juglans regia</i>)、栾 (<i>Koelreuteria paniculata</i>)、玉兰 (<i>Yulania denudata</i>)、西府海棠 [^] (<i>Malus × micromalus</i>)、桑 (<i>Morus alba</i>)、毛泡桐 [^] (<i>Paulownia tomentosa</i>)、二球悬铃木* (<i>Platanus acerifolia</i>)、加杨* (<i>Populus × canadensis</i>)、毛白杨 (<i>Populus tomentosa</i>)、紫叶李 [^] (<i>Prunus cerasifera</i> ‘Atropurpurea’)、山桃 [^] (<i>Prunus davidiana</i>)
灌木	碧桃 (<i>Prunus persica</i> ‘Duplex’)、杏 (<i>Prunus sibirica</i>)、刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>)、旱柳 (<i>Salix matsudana</i>)、槐 (<i>Styphnolobium japonicum</i>)、北京丁香 (<i>Syringa reticulata</i> subsp. <i>pekinensis</i>)、蒙椴 (<i>Tilia mongolica</i>)、榆 (<i>Ulmus pumila</i>)、文冠果 [^] (<i>Xanthoceras sorbifolium</i>)、贴梗海棠 [^] (<i>Chaenomeles speciosa</i>)、黄栌 (<i>Cotinus coggygria</i>)、连翘 (<i>Forsythia suspensa</i>)、木槿 (<i>Hibiscus syriacus</i>)、迎春 [^] (<i>Jasminum nudiflorum</i>)、紫薇 (<i>Lagerstroemia indica</i>)、金银木 (<i>Lonicera maackii</i>)、太平花 (<i>Philadelphus pekinensis</i>)、重瓣榆叶梅 (<i>Prunus triloba</i> ‘Multiplex’)、黄刺玫 [^] (<i>Rosa xanthina</i>)、华北珍珠梅 (<i>Sorbaria kirilowii</i>)、紫丁香 (<i>Syringa oblata</i>)
藤本	紫藤 (<i>Wisteria sinensis</i>)

注：[^]为秋色盛期数据缺失的树种；*为盛花期数据缺失的树种。

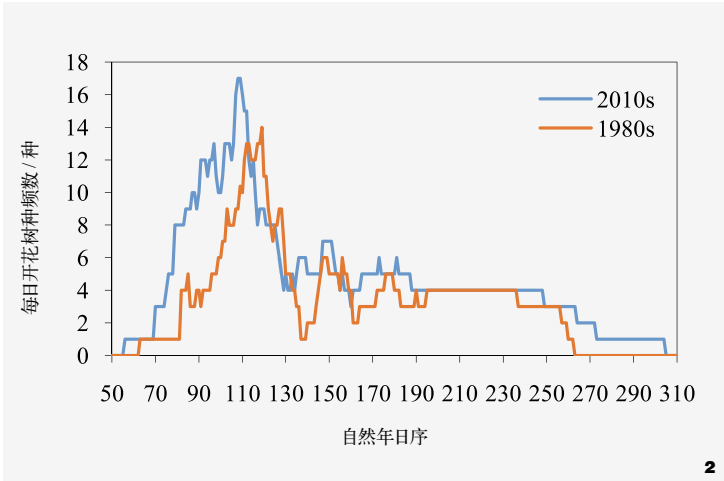
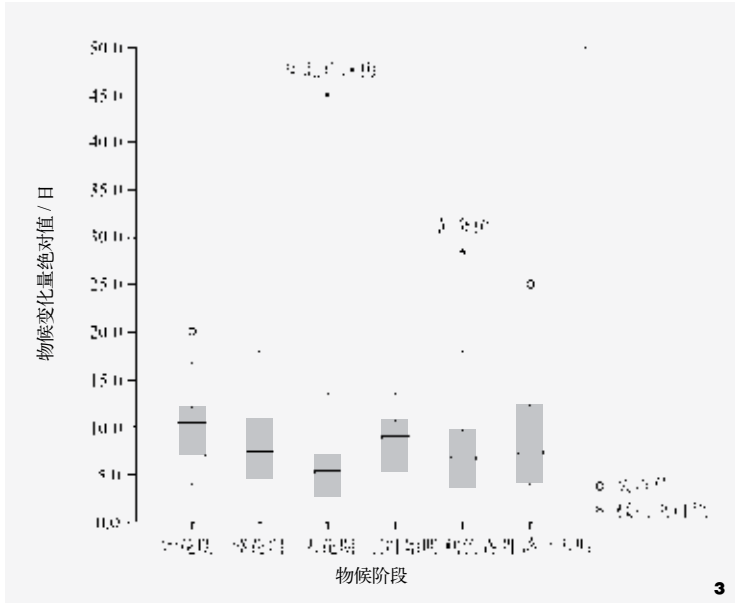


图2 1980s及2010s 每日常开花树种频数
Fig. 2 The frequency of daily blooming species in 1980s and 2010s

图3 各物候阶段的物候变化量绝对值
Fig. 3 The absolute value of phenological variation for various phenophases



2.1 各物候阶段的物候期年代际变化

2.1.1 开花物候的年代际变化

2010s与1980s相比, 45个观测树种的整
体开花物候显著提前 ($p<0.05$), 开花持续期
显著延长 ($p<0.05$)。各树种始花期呈4 ~ 20日
的不同程度提前, 平均提前 10.2 ± 3.4 日; 盛
花期变化量与始花期变化量呈显著正相关
($p<0.05$), 平均提前 7.5 ± 4.5 日, 除毛泡桐花
期稍延后, 其余树种的盛花期呈0 ~ 18日提
前。各树种末花期平均提前 2.4 ± 8.8 日, 其中
36个 (80%) 树种的末花期呈1 ~ 13.5日提前,
华北珍珠梅的末花期呈45日的极端延后, 其
余树种呈0.3 ~ 12日的末花期延后。由于始
花期提前程度显著大于末花期, 观测树种的
开花持续期平均延长了 7.8 ± 9.6 日, 其中40个
(88.9%) 树种的开花持续期延长0 ~ 26日及
54.5日 (华北珍珠梅), 其余树种的开花持续
期呈1 ~ 3.3日的略微缩短。开花物候数据详
见表2。

受开花物候变化影响, 1980s-2010s北京
全年的每日常开花树种频数显著增加 ($p<0.01$)。

如图2所示, 1980s的春季开花峰期从D81至
D137共持续57日, D119有14个树种同步开
花; 2010s的春季开花峰期从D69至D129共持
续61日, D108-D109有17个树种同步开花。与
1980s相比, 2010s开花峰期的起始期和结束
期均显著提前, 峰宽即开花峰期持续期延长,
峰度即每日常开花树种数最大值增加, 峰期内
每日常开花树种数平均增加2.9种, 表明近30
年来北京的春花观赏季整体提前、延长, 花
期同步性增强。此外, 夏秋季花期也明显延
长, 每日常开花树种整体增多, 表明气候变暖
影响下北京夏秋季开花景观的丰富性亦增强。

2.1.2 叶物候的年代际变化

2010s与1980s相比, 45个观测树种的
展叶物候整体上显著提前 ($p<0.05$), 叶衰
老物候显著延后 ($p<0.05$), 叶幕期及生长
季显著延长 ($p<0.05$)。各树种展叶始期平均
提前 7.8 ± 3.7 日, 除桑延后1.5日, 其余树种
的展叶始期呈0.3 ~ 13.5日提前。对于叶衰
老物候, 秋色盛期平均延后 7 ± 6.1 日, 其中

32个 (91.4%) 树种的秋色盛期延后0 ~ 18日
及28.5日 (黄金树), 其余树种的秋色盛期呈
1.5 ~ 2.5日的略微提前。各树种落叶末期的年
代际变化量与秋色盛期呈显著正相关, 平均
延后 7.8 ± 6.7 日, 其中41个 (91.1%) 树种的落
叶末期延后0 ~ 25日, 其余树种的落叶末期
呈3 ~ 4日的略微提前。受展叶物候整体提
前和叶衰老物候整体延后的影响, 各树种的
叶幕期和生长季分别延长1.5 ~ 33.8日 (平均
 15.6 ± 7.3 日)、4.1 ~ 37.5日 (平均 14.8 ± 6.8 日),
导致植被整体叶幕期由254.0日延长至270.5
日、整体生长季由231.0日延长至242.9日。叶
物候数据详见表3。

2.2 各物候阶段的响应敏感性差异

以物候期变化量绝对值 (APV) 衡量某物
候阶段对年代际气候变化的响应敏感性, 始
花期的APV值显著高于其他物候阶段, 末花期
的APV值显著低于其他物候阶段 ($p<0.05$), 而
盛花期、展叶始期、秋色盛期及落叶末期的
APV值为中间水平且彼此间无显著差异 (图3)。

表2 各树种开花物候的年代际变化
Tab. 2 The interdecadal variation of flower phenophases

生活型 Life form	树种名 Species name	开花物候期及年代际变化 Flower phenology & interdecadal variation											
		始花期/DOY First flowering date			盛花期/DOY Peak flowering date			末花期/DOY End flowering date			开花持续期/日 Flowering duration		
		1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ
乔木	元宝枫	107.0	87.0	-20.0	108.0	101.3	-6.8	121.0	114.5	-6.5	14.0	27.5	13.5
	臭椿	147.0	136.0	-11.0	150.0	143.3	-6.7	154.0	151.5	-2.5	7.0	15.5	8.5
	白桦	104.0	98.7	-5.3	121.0	103.0	-18.0	113.0	104.3	-8.7	9.0	5.7	-3.3
	楸	121.0	114.0	-7.0	123.0	112.9	-10.1	128.0	125.0	-3.0	7.0	11.0	4.0
	黄金树	146.0	134.5	-11.5	150.0	141.5	-8.5	156.0	151.0	-5.0	10.0	16.5	6.5
	朴树	99.0	95.0	-4.0	\	\	\	103.0	97.5	-5.5	4.0	2.5	-1.5
	蜡梅	63.0	56.0	-7.0	70.0	69.2	-0.8	85.0	90.7	5.7	22.0	34.7	12.7
	柿	139.0	130.0	-9.0	\	\	\	149.0	139.0	-10.0	10.0	9.0	-1.0
	白杜	144.0	133.0	-11.0	145.0	143.3	-1.8	158.0	153.7	-4.3	14.0	20.7	6.7
	梧桐	172.0	165.0	-7.0	\	\	\	190.0	187.0	-3.0	18.0	22.0	4.0
	洋白蜡	103.0	91.0	-12.0	106.0	94.3	-11.7	109.0	103.5	-5.5	6.0	12.5	6.5
	银杏	110.0	105.0	-5.0	\	\	\	119.0	112.0	-7.0	9.0	7.0	-2.0
	胡桃	112.0	101.5	-10.5	114.0	101.5	-12.5	123.0	109.5	-13.5	11.0	8.0	-3.0
	栾	156.0	146.5	-9.5	164.0	155.0	-9.0	179.0	173.2	-5.8	23.0	26.7	3.7
	玉兰	96.0	79.4	-16.6	100.0	87.6	-12.5	109.0	98.1	-10.9	13.0	18.7	5.7
	西府海棠	109.0	96.8	-12.3	111.0	104.5	-6.5	119.0	112.5	-6.5	10.0	15.8	5.8
	桑	110.0	102.0	-8.0	115.0	109.5	-5.5	121.0	115.7	-5.3	11.0	13.7	2.7
	泡桐	113.0	108.3	-4.8	118.0	119.5	1.5	136.0	133.7	-2.3	23.0	25.4	2.4
	二球悬铃木	111.0	106.0	-5.0	\	\	\	120.0	115.0	-5.0	9.0	9.0	0.0
	加杨	85.0	79.0	-6.0	\	\	\	94.0	91.5	-2.5	9.0	12.5	3.5
	毛白杨	82.0	75.0	-7.0	84.0	79.5	-4.5	90.0	87.7	-2.3	8.0	12.7	4.7
	紫叶李	103.0	90.0	-13.0	107.0	91.4	-15.6	115.0	104.8	-10.2	12.0	14.8	2.8
	山桃	89.0	76.1	-12.9	90.0	81.4	-8.6	97.0	93.4	-3.6	8.0	17.3	9.3
	碧桃	111.0	101.3	-9.7	113.0	111.4	-1.6	129.0	129.5	0.5	18.0	28.2	10.2
	山杏	95.00	84.25	-10.8	99.0	89.1	-9.9	101.00	97.0	-4.0	6.0	12.8	6.75
	刺槐	125.0	118.2	-6.8	128.0	123.4	-4.6	134.0	131.8	-2.2	9.0	13.7	4.7
	旱柳	98.0	87.7	-10.3	101.0	89.5	-11.5	105.0	96.7	-8.3	7.0	9.0	2.0
	华北珍珠梅	195.0	181.0	-14.0	208.0	211.0	-3.0	236.0	248.0	12.0	41.0	67.0	26.0
	北京丁香	145.0	134.7	-10.3	150.0	147.3	-2.7	160.0	159.0	-1.0	15.0	24.3	9.3
	蒙椴	164.0	155.5	-8.5	170.0	161.0	-9.0	182.0	181.0	-1.0	18.0	25.5	7.5
	榆树	82.0	70.3	-11.8	84.0	76.5	-7.5	85.0	87.3	2.3	3.0	17.0	14.0
	文冠果	116.0	107.0	-9.0	120.0	114.4	-5.6	129.0	127.0	-2.0	13.0	20.0	7.0
灌木	贴梗海棠	101.0	92.3	-8.8	105.0	101.5	-3.5	122.0	116.0	-6.0	21.0	23.8	2.8
	黄栌	117.0	106.0	-11.0	125.0	113.5	-11.5	128.0	120.3	-7.8	11.0	14.3	3.3
	连翘	92.0	79.4	-12.6	95.0	88.1	-6.9	118.0	113.0	-5.0	26.0	33.6	7.6
	木槿	176.0	161.0	-15.0	206.0	193.3	-12.8	262.0	272.3	10.3	86.0	111.3	25.3
	迎春	82.0	70.1	-11.9	90.0	82.0	-8.0	103.0	108.6	5.6	21.0	38.4	17.4
	紫薇	190.0	173.1	-16.9	206.0	191.2	-14.8	256.0	262.5	6.5	66.0	89.4	23.4
	金银木	127.0	114.9	-12.1	130.0	122.5	-7.5	138.0	133.1	-4.9	11.0	18.2	7.2
	太平花	140.0	133.3	-6.7	143.0	143.0	0.0	160.0	156.4	-3.6	20.0	23.1	3.1
	重瓣榆叶梅	102.0	90.5	-11.5	107.0	99.4	-7.6	112.0	112.3	0.3	10.0	21.8	11.8
	黄刺玫	119.0	107.4	-11.6	129.0	115.5	-13.5	132.0	127.5	-4.5	13.0	20.1	7.1
	华北珍珠梅	156.0	146.5	-9.5	163.0	156.7	-6.3	259.0	304.0	45.0	103.0	157.5	54.5
	紫丁香	106.0	92.5	-13.5	110.0	105.6	-4.4	119.0	112.0	-7.0	13.0	19.5	6.5
藤本	紫藤	119.0	106.9	-12.1	123.0	119.3	-3.7	136.0	125.6	-10.4	17.0	18.6	1.6

注：“\”指盛花期数据缺失。

表3 各树种叶物候的年代际变化
Tab. 3 The interdecadal variation of leaf phenophases

生活型 Life form	树种名 Species name	叶物候期及年代际变化 Leaf phenology and interdecadal variation														
		展叶始期/DOY First leafing unfolding			秋色盛期/DOY Peak of leaf coloration			落叶末期/DOY End of leaf fall			生长季/日 Growing season length			叶幕期/日 Canopy duration		
		1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ	1980s	2010s	Δ
乔木	元宝枫	109.0	100.2	-8.8	297.0	305.2	8.2	309.0	315.1	6.1	188.0	204.9	16.9	200.0	214.9	14.9
	臭椿	112.0	107.8	-4.3	\	\	\	293.0	303.5	10.5	\	\	\	181.0	195.8	14.8
	白桦	104.0	93.5	-10.5	279.0	288.5	9.5	285.0	297.3	12.3	175.0	195.0	20.0	181.0	203.8	22.8
	楸	105.0	101.7	-3.3	294.0	298.0	4.0	295.0	302.5	7.5	189.0	196.3	7.3	190.0	200.8	10.8
	黄金树	113.0	104.0	-9.0	264.0	292.5	28.5	288.0	302.0	14.0	151.0	188.5	37.5	175.0	198.0	23.0
	朴树	104.0	90.9	-13.1	306.0	307.0	1.0	317.0	321.0	4.0	202.0	216.1	14.1	213.0	230.1	17.0
	蜡梅	104.0	94.0	-10.0	\	\	\	339.0	349.5	10.5	\	\	\	235.0	255.5	20.5
	柿	106.0	100.5	-5.5	295.0	296.0	1.0	302.0	302.8	0.8	189.0	195.5	6.5	196.0	202.3	6.3
	白杜	100.0	87.5	-12.5	307.0	313.8	6.8	312.0	314.5	2.5	207.0	226.3	19.3	212.0	227.0	15.0
	梧桐	120.0	110.8	-9.3	306.0	309.7	3.7	312.0	319.5	7.5	186.0	198.9	12.9	192.0	208.8	16.8
	洋白蜡	101.0	95.0	-6.0	278.0	293.6	15.6	289.0	303.1	14.1	177.0	198.6	21.6	188.0	208.1	20.1
	银杏	104.0	94.8	-9.3	295.0	303.7	8.7	309.0	314.1	5.1	191.0	209.0	18.0	205.0	219.3	14.3
	胡桃	103.0	99.5	-3.5	302.0	313.0	11.0	304.0	320.5	16.5	199.0	213.5	14.5	201.0	221.0	20.0
	栎	103.0	99.8	-3.3	300.0	303.2	3.2	305.0	312.3	7.3	197.0	203.4	6.4	202.0	212.6	10.6
	玉兰	106.0	94.7	-11.3	303.0	303.0	0.0	309.0	313.8	4.8	197.0	208.3	11.3	203.0	219.0	16.0
	西府海棠	94.0	83.3	-10.7	\	\	\	327.0	324.0	-3.0	\	\	\	233.0	240.7	7.7
	桑	108.0	109.5	1.5	303.0	308.6	5.6	309.0	312.0	3.0	195.0	199.1	4.1	201.0	202.5	1.5
	泡桐	118.0	112.8	-5.2	\	\	\	311.0	319.0	8.0	\	\	\	193.0	206.2	13.2
	二球悬铃木	112.0	101.7	-10.3	301.0	309.7	8.7	323.0	346.5	23.5	189.0	208.0	19.0	211.0	244.8	33.8
	加杨	101.0	94.5	-6.5	299.0	308.8	9.8	309.0	322.3	13.3	198.0	214.3	16.3	208.0	227.8	19.8
	毛白杨	106.0	99.1	-6.9	312.0	317.5	5.5	321	327	6.0	206.0	218.4	12.4	215.0	227.9	12.9
	紫叶李	101.0	90.8	-10.2	\	\	\	324.0	327.5	3.5	\	\	\	223.0	236.7	13.7
	山桃	100.0	88.7	-11.3	\	\	\	311.0	322.3	11.3	\	\	\	211.0	233.6	22.6
	碧桃	105.0	104.7	-0.3	294.0	310.8	16.8	306.0	318.0	12.0	189.0	206.1	17.1	201.0	213.3	12.3
	山杏	110.0	96.5	-13.5	316.0	313.5	-2.5	320.0	317.0	-3.0	206.0	217.0	11.0	210.0	220.5	10.5
	刺槐	111.0	105.5	-5.5	297.0	303.5	6.5	311.0	320.3	9.3	186.0	198.0	12.0	200.0	214.8	14.8
	旱柳	92.0	80.9	-11.1	312.0	321.9	9.9	326.0	335.6	9.6	220.0	241.0	21.0	234.0	254.7	20.7
	华北珍珠梅	112.0	108.5	-3.5	316.0	319.0	3.0	324.0	329.1	5.1	204.0	210.5	6.5	212.0	220.6	8.6
	北京丁香	95.0	88.8	-6.2	302.0	306.5	4.5	308.0	313.5	5.5	207.0	217.7	10.7	213.0	224.7	11.7
	蒙椴	104.0	90.9	-13.1	282.0	292.9	10.9	288.0	300.3	12.3	178.0	202.0	24.0	184.0	209.3	25.3
	榆树	101.0	95.5	-5.5	310.0	317.3	7.3	321.0	325.5	4.5	209.0	221.8	12.8	220.0	230.0	10.0
	文冠果	115.0	110.5	-4.5	\	\	\	303.0	303.0	0.0	\	\	\	188.0	192.5	4.5
灌木	贴梗海棠	85.0	79.0	-6.0	\	\	\	308.0	333.0	25.0	\	\	\	223.0	254.0	31.0
	黄栌	105.0	94.0	-11.0	298.0	304.8	6.8	315.0	320.7	5.7	193.0	210.8	17.8	210.0	226.7	16.7
	连翘	105.0	94.6	-10.4	298.0	302.3	4.3	308.0	312.0	4.0	193.0	207.7	14.7	203.0	217.4	14.4
	木槿	114.0	103.7	-10.3	303.0	301.0	-2.0	311.0	307.0	-4.0	189.0	197.3	8.3	197.0	203.3	6.3
	迎春	103.0	90.5	-12.5	\	\	\	319.0	330.0	11.0	\	\	\	216.0	239.5	22.7
	紫薇	121.0	113.5	-7.5	290.0	297.0	7.0	303.0	303.0	0.0	169.0	183.5	14.5	182.0	189.5	7.5
	金银木	97.0	86.8	-10.3	301.0	319.0	18.0	321.0	321.5	0.5	204.0	232.3	28.3	224.0	234.8	10.8
	太平花	96.0	91.8	-4.3	300.0	304.0	4.0	308.0	324.5	16.5	204.0	212.3	8.3	212.0	232.8	20.8
	重瓣榆叶梅	105.0	95.4	-9.6	298.0	306.3	8.3	308.0	304.7	-3.3	193.0	210.9	17.9	203.0	209.3	6.3
	黄刺玫	97.0	86.0	-11.0	\	\	\	314.0	334.0	20.0	\	\	\	217.0	248.0	31.0
	华北珍珠梅	91.0	88.5	-2.5	309.0	320.0	11.0	318.0	321.5	3.5	218.0	231.5	13.5	227.0	233.0	6.0
	紫丁香	97.0	84.0	-13.0	303.0	301.5	-1.5	309.0	322.0	13.0	206.0	217.5	11.5	212.0	238.0	26.0
藤本 (1种)	紫藤	112.0	110.0	-2.0	309.0	312.3	3.3	314.0	330.0	16.0	197.0	202.3	5.3	202.0	220.0	18.0

注：“\” 指秋色盛期及生长季数据缺失。

这表明始花期对年代际气候变化响应最为敏感, 展叶物候与叶衰老物候的气候响应呈相反方向而敏感性相似。

始花期及展叶始期的响应敏感性差异导致树木展叶—开花的时间间隔甚至花叶时序 (flower-leaf sequence) 发生变化。根据1980s物候数据, 45个树种中14个为先花后叶树种、31个为先叶后花或花叶同放树种。2010s上述先花后叶树种中5个树种的始花期—展叶始期间隔缩短, 其中2个树种转变为先叶后花; 先叶后花树种中19个树种的始花期—展叶始期间隔缩短, 其中6个树种转变为先花后叶。

此外, 各物候阶段APV值的种间差异也有所不同。在去除极端值的情况下, 秋色盛期及落叶末期APV值的种间标准差 (SD) 分别为5.95、4.38, 明显高于始花期 (3.40)、末花期 (3.18) 及展叶始期 (3.59), 表明叶衰老物候响应敏感性的种间差异比开花及展叶物候更为突出。同时, 1980s与2010s物候数据的线性相关性分析表明, 始花期、盛花期及末花期的相关系数 (0.993、0.990、0.990) 明显高于展叶始期、秋色盛期及落叶末期 (0.906、0.826、0.828), 表明开花物候对气候变化响应特征的种间一致性更强。

2.3 树种物候敏感性评价与聚类

以始花期、末花期、展叶始期、落叶末期APV值Z-score标准化值的均值衡量各树种的整体物候敏感性, 将45个树种划分为高物候敏感性树种、中高物候敏感性树种、中低物候敏感性树种、低物候敏感性树种。高物候敏感性树种包括玉兰、紫丁香、华北珍珠梅、元宝枫、黄刺玫、木槿、胡桃、迎春、紫叶李、旱柳、贴梗海棠等, 低物候敏感性树种包括文冠果、毛泡桐、桑、碧桃、楸、毛白

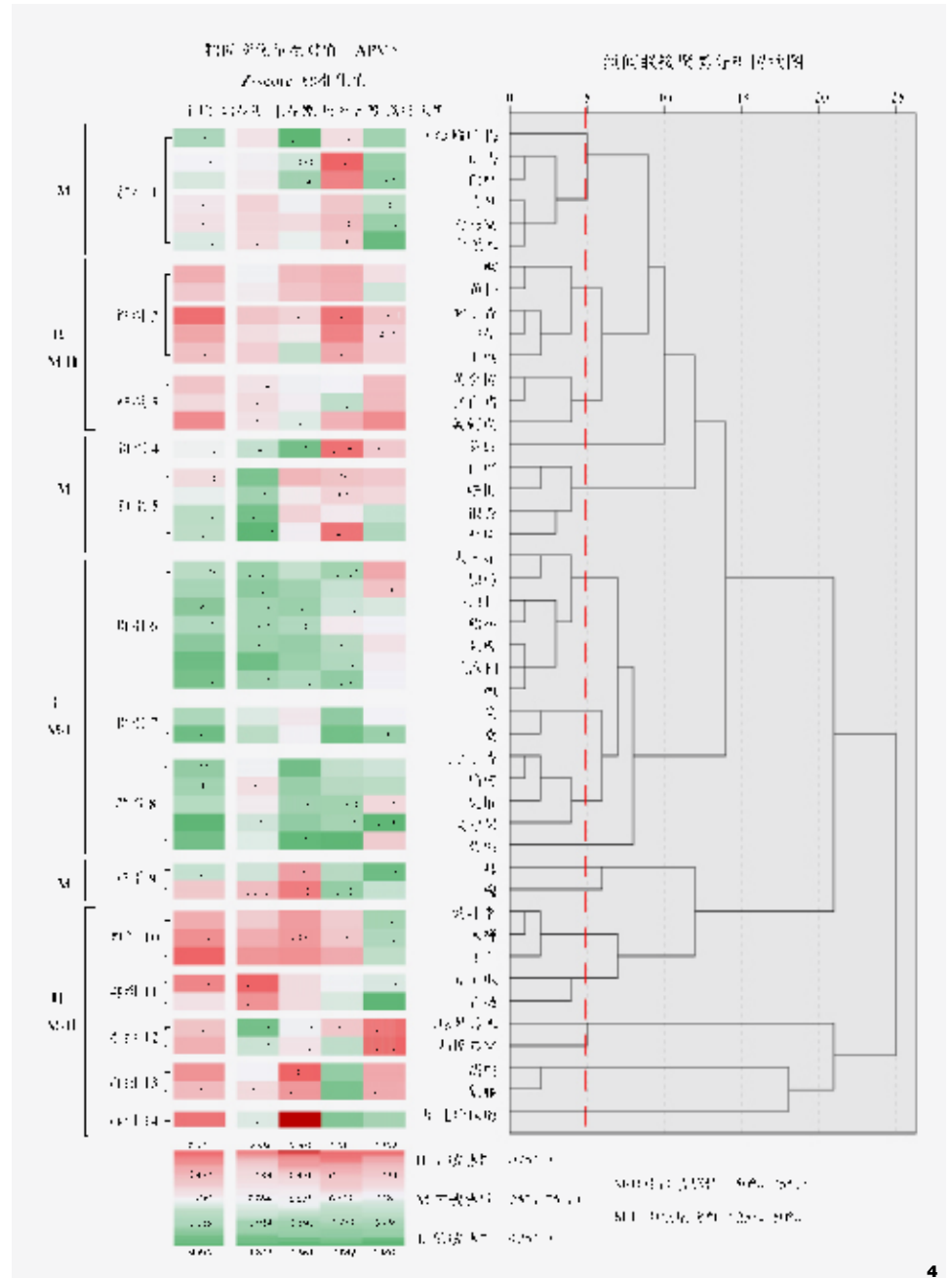


图4 基于物候敏感性的树种聚类
Fig. 4 The Hierarchical clustering of phenological sensitivity for different species

杨、刺槐、北京丁香、榆树、加杨、栎等。根据4个物候阶段的物候敏感性特征将各树种进行组间联接聚类, 划分为3类14个群组 (图4, 图5)。

(1) 类1: 高/中高敏感性树种。包括群组2, 展叶始期呈高敏性; 群组3, 末花期呈中低敏性、落叶末期呈高敏性; 群组10, 末花期呈高敏性、落叶末期呈中低敏性; 群

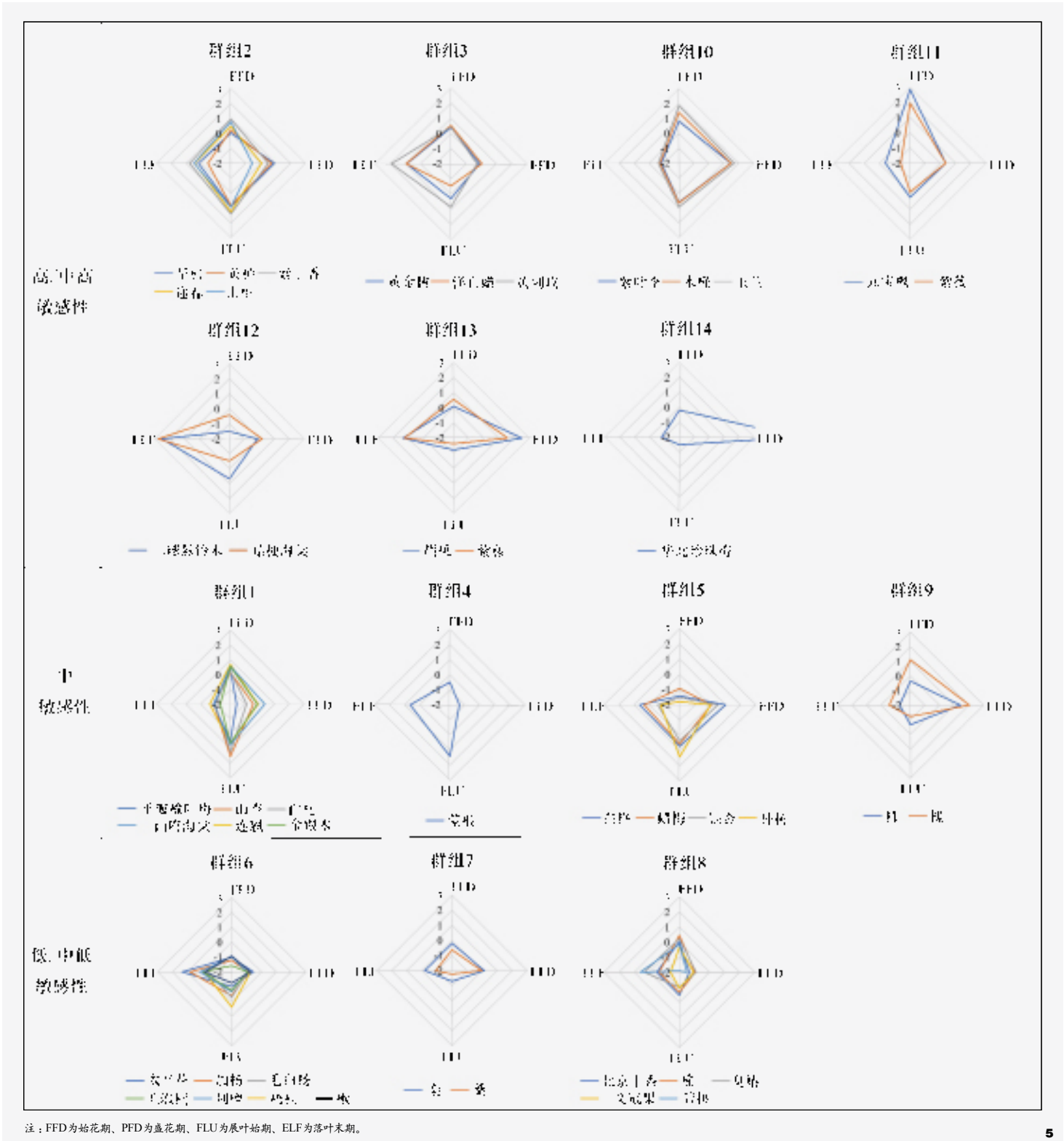


图5 各群组树种物候敏感性特征
Fig. 5 Characteristics of phenological sensitivity for the species in different clusters

组11, 始花期呈高敏性、落叶末期呈低敏性; 群组12, 始花期呈低敏性、落叶末期呈高敏性; 群组13, 末花期呈高敏性、展叶始期呈低敏性; 群组14, 末花期呈极高敏性、展叶始期呈低敏性。

(2) 类2: 中敏感性树种。包括群组1, 始花期及展叶始期呈中高至高敏性、落叶末期呈低敏性; 群组4, 展叶始期及落叶末期呈高敏性、末花期呈低敏性; 群组5, 末花期及展叶始期呈中高至高敏性、始花期呈低敏性; 群组9, 末花期呈较高敏性、展叶始期及落叶末期呈中低至低敏性。

(3) 类3: 低/中低敏感性树种。包括群组6, 始花期、末花期及展叶始期呈中低至低敏性; 群组7, 末花期呈中敏性、展叶始期呈低敏性; 群组8, 末花期及展叶始期呈低敏性。

群组2、3(高/中高敏感性)及群组6、7、8(低/中低敏感性)树种在不同物候阶段的响应敏感性较为均衡, 而大部分树种不同物候阶段的响应并不均衡, 一般表现为1~2个物候阶段的敏感性较为突出, 其中华北珍珠梅的不均衡性最为极端。

3 讨论

3.1 不同物候阶段的响应敏感性差异及其影响

本研究表明落叶树种的不同物候阶段对近30年气候变化的物候响应呈现明显差异。始花期与末花期的年代际变化量分别显著高于、显著低于其他物候阶段, 表明始花期对气候变化响应最为敏感, 而末花期对气候变化响应最不敏感。始花期处于树木开花进程的起始阶段, 已有前人研究表明其对气候变化尤其气温升高与波动的响应较开花中后期更为敏感^[9-10,30]。末花期呈低敏感性主要由于影响花凋落过程的环境因素较为复

杂, 尽管近30年来气候变暖是末花期整体提前的主要驱动因素, 大风、降雨、气温波动等多变的天气条件极大增加了末花期的不稳定性^[31]。本研究发现, 始花期比末花期更突出的提前趋势导致开花持续期显著延长, 与Ziello等^[10]、Li等^[32]、Weryszko-Chmielewska等^[33]结论一致; 但也有研究得出气候变化导致开花持续期缩短^[34-35]或无明显变化^[36], 这一分歧与始花期、末花期气候响应特征的种间差异有关^[37]。此外, 树种层面的开花物候变化导致北京整体开花季延长、种间同步性增强, 表明近30年气候变暖对丰富城市开花景观有一定积极作用, 与Zhang等^[36]、Ziello等^[10]发现一致。开花持续期延长的效应是综合且长期的, 其一方面有利于提高昆虫访花率和授粉率^[38], 对城市生态及生物多样性起到积极效应, 同时也会加剧花粉过敏症等与开花物候相关的公众健康问题^[39], 需要持续关注。

再者, 春季开花树种的展叶始期和始花期常前后相继或同步发生, 前人研究表明展叶始期对气候变化的响应敏感性往往小于始花期^[14,40-42], 本研究也得出一致结论, 而在对其他地域和树种的研究中, Du等^[43]及Buonaiuto、Wolkovich^[44]则得出相反结论, 体现了开花、展叶物候响应差异的复杂性。始花期及展叶期的响应敏感性差异导致展叶物候和开花物候的时间间隔甚至花叶时序发生改变, 这从适应性进化的角度会对树木生态适应性、生态系统的资源分配、结构与功能造成长期影响^[45]。

同时, 本研究还发现北京园林树木展叶始期及叶衰老期的年代际变化呈相反方向而变化量绝对值无显著差异, 表明近30年来树木生长季始期提前和末期延后对生长季延长的贡献程度相当, 与Dai等^[14]结论一致。而

Matsumoto等^[19]则发现生长季末期延后的贡献程度更突出, Defila和Clot^[46]、Chmielewski和Rötzer^[18]发现生长季始期提前的贡献程度更突出。由于展叶物候及叶衰老物候对气候变化的响应机制不同, 未来树木生长季变化的不确定性将进一步增加。

考虑到相继发生的物候阶段间存在较强的内在关联性, 所谓“牵一发而动全身”, 城市树木物候研究应从整体性出发进一步关注各物候阶段的相互作用及其物候响应对植株生长发育节律的复合影响。

3.2 物候敏感性的种间差异

本研究发现, 物候期的年代际变化程度即响应敏感性呈突出的种间差异, 玉兰、紫丁香及元宝枫等乡土树种的综合物候敏感性最为突出, 是城市气候变化的良好指示树种, 同时也面临更严峻的气候变化挑战, 应对其生长发育节律的动态变化给予持续关注; 与之相对, 文冠果、毛泡桐、桑等树种的物候变化趋势与程度不明显, 表明气候变化影响下其生长发育节律更稳定, 对于植物景观的稳定性有一定保障, 但另一方面也反映了其并未通过调整自身节律及时应对气候变化, 对植物景观的可持续性会是一个不确定性因素甚至成为潜在隐患, 因而也值得关注。

同一地域环境条件下, 不同树种的物候期呈一定顺序发生, 而物候响应的种间差异改变了物候发生时序, 进而影响了植物景观的季相特征^[47]。物候响应的种间差异亦会干扰物候同步性甚至打破特定种间关系^[48], 比如树种花期间隔的变化会影响其在吸引昆虫等方面的竞争及合作关系、干扰生态系统中植物与传粉者的互利互作^[49]。而对于叶衰老物候, 物候响应的种间差异反而对提高地域

性植被的气候韧性有一定积极作用。在本研究中, 北京叶衰老物候气候响应程度的种间差异尤为突出, 部分树种对气候变暖响应更敏感而呈显著延后, 而其他则呈“钝感”响应即变化不明显, 这一种间差异使得由多样树种构成的城市植被在实现整体生长季延长的同时也在一定程度上避免了大范围遭受冬季寒潮的风险^[50]。

4 结论

本研究阐明了北京45种园林树种周年物候的年代际变化特征, 揭示了不同树种、各物候阶段的响应敏感性差异。1980s-2010s北京开花物候及展叶物候呈显著提前, 秋色物候及落叶物候呈显著延后, 开花持续期及生长季、叶幕期长度呈显著延长。以物候期年代际变化量的绝对值(APV) 表征物候对气候变化的响应敏感性, 发现各物候阶段中始花期的响应敏感性最为突出且种间一致性较强, 而叶衰老物候响应敏感性的种间差异最为显著。基于始花期、末花期、展叶始期、落叶末期4个物候阶段的响应敏感性对45个树种的物候敏感性进行综合评价和聚类, 划分为高、中高、中低、低4个敏感性等级及其下14个特征群组。玉兰、紫丁香、华北珍珠梅、元宝枫、黄刺玫、木槿、胡桃、迎春、紫叶李、旱柳、贴梗海棠等树种呈高物候敏感性, 是城市气候变化的良好特征树种; 文冠果、毛泡桐、桑、碧桃、楸、毛白杨、刺槐、北京丁香、榆树、加杨、栾等树种呈低物候敏感性, 有利于维持植被季相景观的稳定性, 但同时其对气候变化的钝感响应也存在一定隐患。面对持续暖化且极端性增强的气候变化趋势, 研究结果可从树种层面为提高北京城市植被景观与生态的气候适应性提供一定借鉴与参考。

参考文献

[1] MENZEL A, YUAN Y, MATIU M, et al. Climate Change Fingerprints in Recent European Plant Phenology[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26: 2599-2612.

[2] IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[3] ZHU W, TIAN H, XU X, et al. Extension of the Growing Season due to Delayed Autumn over Mid and High Latitudes in North America During 1982-2006[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 21(2): 260-271.

[4] DAI J, WANG H, GE Q. Multiple Phenological Responses to Climate Change Among 42 Plant Species in Xi'an, China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 57(5): 749-758.

[5] FU Y S, CAMPIOLI M, VITASSE Y. Variation in Leaf Flushing Date Influences Autumnal Senescence and Next Year's Flushing Date in Two Temperate Tree Species[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(20): 7355-7360.

[6] JUKNYS R, KANAPICKASA, ŠVEIKAUSKAITĖ I, et al. Response of Deciduous Trees Spring Phenology to Recent and Projected Climate Change in Central Lithuania[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1589-1602.

[7] XU X, RILEY W J, KOVEN C D, et al. Heterogeneous Spring Phenology Shifts Affected by Climate: Supportive Evidence from Two Remotely Sensed Vegetation Indices[J]. *Environmental Research Communications*, 2019, 1: 91004.

[8] ABU-ASAB M S, PETERSON P M, SHETLER S G, et al. Earlier Plant Flowering in Spring as a Response to Global Warming in the Washington, DC, Area[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2001, 10(4): 597-612.

[9] MILLER-RUSHING A, KATSUKI T, PRIMACK R, et al. 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*, 2007, 94(9): 1470-1478.

[10] ZIELLO C, BÖCK A, ESTRELLA N, et al. First Flowering of Wind-Pollinated Species with the Greatest Phenological Advances in Europe[J]. *Ecography*, 2012, 35: 1017-1023.

[11] WANG H, ZHONG S, TAO Z, et al. Changes in

Flowering Phenology of Woody Plants from 1963 to 2014 in North China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 63(5): 579-590.

[12] ROSBAKH S, HARTIG F, SANDANOV D V, et al. Siberian Plants Shift Their Phenology in Response to Climate Change[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(18): 4435-4448.

[13] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology Shifts at Start vs. End of Growing Season in Temperate Vegetation over the Northern Hemisphere for the Period 1982-2008[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399.

[14] DAI J, WANG H, GE Q. The Spatial Pattern of Leaf Phenology and Its Response to Climate Change in China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 58(4): 521-528.

[15] JEONG S, MEDVIGY D. Macroscale Prediction of Autumn Leaf Coloration Throughout the Continental United States[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(11): 1245-1254.

[16] GILL A L, GALLINAT A S, SANDERS-DEMOTT R, et al. Changes in Autumn Senescence in Northern Hemisphere Deciduous Trees: A Meta-Analysis of Autumn Phenology Studies[J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(6): 875-888.

[17] LIU J, CHENG H, JIANG D, et al. Impact of Climate-Related Changes to the Timing of Autumn Foliage Colouration on Tourism in Japan[J]. *Tourism Management*, 2019, 70: 262-272.

[18] CHMIELEWSKI F M, RÖTZER T. Response of Tree Phenology to Climate Change Across Europe[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.

[19] MATSUMOTO K, OHTA T, IRASAWA M, et al. Climate Change and Extension of the Ginkgo Biloba L. Growing Season in Japan[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1634-1642.

[20] HØGDA K A, TØMMERVIK H, KARLSEN S R. Trends in the Start of the Growing Season in Fennoscandia 1982-2011[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4304-4318.

[21] TAO Z, GE Q, WANG H, et al. Phenological Basis of Determining Tourism Seasons for Ornamental Plants in Central and Eastern China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(11): 1343-1356.

[22] ZHENG J, GE Q, HAO Z. Impacts of Climate Warming on Plants Phenophases in China for the Last 40 Years[J]. *Science Bulletin*, 2002, 47(21): 1826-1831.

[23] 杨国栋, 陈效述. 北京地区的物候日历及其应用[M]. 北京: 首都师范大学出版社, 1995.

- [24] 陈效速, 张福春. 近50年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2001(01): 2-6.
- [25] 仲舒颖, 葛全胜, 郑景云. 近30年北京自然历的主要物候期、物候季节及归因[J]. 植物生态学报, 2012(36): 1217-1225.
- [26] YOUNG B E, BYERS E, HAMMERSON G, et al. Guidelines for Using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index. Release 3.02[R]. Arlington: NatureServe, 2016.
- [27] 贺士元, 邢其华, 尹祖棠, 等. 北京植物志[M]. 北京: 北京出版社, 1984.
- [28] 张天麟. 园林树木1600种[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [29] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [30] SPARKS T H, JAROSZEWICZ B, KRAWCZYK M, et al. Advancing Phenology in Europe's Last Lowland Primeval Forest: Non-Linear Temperature Response[J]. Climate Research, 2009, 39(3): 221-226.
- [31] VAN DOORN W G, VAN MEETEREN U. Flower Opening and Closure: A Review[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(389): 1801-1812.
- [32] LI D, BARVE N, BRENSKELLE L, et al. Climate, Urbanization, and Species Traits Interactively Drive Flowering Duration[J]. Global Change Biology, 2021, 27(4): 892-903.
- [33] WERYSZKO-CHMIELEWSKA E, PIOTROWSKA-WERYSZKO K, DĄBROWSKA A. Response of *Tilia* sp. L. to Climate Warming in Urban Conditions – Phenological and Aerobiological Studies[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 43: 126369.
- [34] BOCK A, SPARKS T H, ESTRELLA N, et al. Changes in First Flowerings and Flowering Duration of 232 Plant Species on the Island of Guernsey[J]. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3508-3519.
- [35] HÁJKOVÁ L, KOŽNAROVÁ V, MOŽNÝ M, et al. Influence of Climate Change on Flowering Season of Birch in the Czech Republic[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64: 791-801.
- [36] ZHANG H, YUAN W, LIU S, et al. Sensitivity of Flowering Phenology to Changing Temperature in China[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1658-1665.
- [37] LIU H, LU C, WANG S, et al. Climate Warming Extends Growing Season but Not Reproductive Phase of Terrestrial Plants[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(5): 950-960.
- [38] HEGLAND S J, NIELSEN A, LÁZARO A, et al. How Does Climate Warming Affect Plant – Pollinator Interactions?[J]. Ecology letters, 2009, 12(2): 184-195.
- [39] RUIZ-VALENZUELA L, AGUILERA F. Trends in Airborne Pollen and Pollen-Season-Related Features of Anemophilous Species in Jaen (South Spain): A 23-Year Perspective[J]. Atmospheric Environment, 2018, 180: 234-243.
- [40] 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[J]. International Journal of Biometeorology, 2005, 49(5): 303-309.
- [41] JOCHNER S, SPARKS T H, LAUBE J, MENZEL A. Can We Detect a Nonlinear Response to Temperature in European Plant Phenology?[J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(10): 1551-1561.
- [42] GENG X, FU Y H, PIAO S, et al. Higher Temperature Sensitivity of Flowering than Leaf-Out Alters the Time Between Phenophases Across Temperate Tree Species[J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(13): 901-911.
- [43] DU Y, CHEN J, WILLIS C G, et al. Phylogenetic Conservatism and Trait Correlates of Spring Phenological Responses to Climate Change in Northeast China[J]. Ecology and evolution, 2017, 7(17): 6747-6757.
- [44] BUONAIUTO D M, WOLKOVICH E M. Differences Between Flower and Leaf Phenological Responses to Environmental Variation Drive Shifts in Spring Phenological Sequences of Temperate Woody Plants[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(8): 2922–2933.
- [45] WANG S, WU Z, GONG Y, et al. Climate Warming Shifts the Time Interval Between Flowering and Leaf Unfolding Depending on the Warming Period[J]. Science China Life Sciences, 2022, 65(11): 2316-2324.
- [46] DEFILA C, CLOT B. Phytophenological Trends in Switzerland[J]. International Journal of Biometeorology, 2001, 45: 203-207.
- [47] 董丽, 邢小艺. 气候变化对城市植被的影响研究综述[J]. 风景园林, 2021, 28(11): 61-67.
- [48] MILLER-RUSHING A J, HØYE T T, INOUE D W, et al. The Effects of Phenological Mismatches on Demography. In Philosophical Transactions of the Royal Society of London[J]. Series B, Biological Sciences, 2010, 365(1555): 3177-3186.
- [49] TIUSANEN M, KANKAANPÄÄ T, SCHMIDT N M, et al. Heated Rivalries: Phenological Variation Modifies Competition for Pollinators Among Arctic Plants[J]. Global Change Biology, 2020, 26(11): 6313-6325.
- [50] LIU Q, PIAO S, JANSSENS I A, et al. Extension of the Growing Season Increases Vegetation Exposure to Frost[J]. Nature Communications, 2018, 9: 426.