

DOI: 10.5846/stxb201302200283

王静, 常青, 柳冬良. 早春草本植物开花物候期对城市化进程的响应——以北京市为例. 生态学报, 2014, 34(22): 6701-6710.

Wang J, Chang Q, Liu D L. The flowering phenophase response of early spring herb to the urbanization process in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6701-6710.

早春草本植物开花物候期对城市化进程的响应 ——以北京市为例

王 静¹, 常 青^{1,*}, 柳冬良²

(1. 中国农业大学, 观赏园艺与园林系, 北京 100193; 2. 北京市气象局, 北京 100089)

摘要:植物物候对城市化的响应是全球变化与城市生态环境效应研究的重要内容。2012 年 3 月到 6 月, 结合气象观测数据, 对北京市西北向城市化梯度上 7 种早春草本植物开花物候期进行观测与研究, 发现温度因子和早春草本植物开花物候期均随城市化梯度发生变化, 即越靠近城市中心区, 温度和积温累计值越高; 早春草本植物开花物候期出现时间越早, 平均提前 2—4 d; 但开花期持续时间与开花速率并不随城市化梯度发生明显变化。此外, 研究发现北京市 7 种早春草本植物开花期对 5℃ 积温变化响应最为敏感; 开花期提前时间梯度变化显著性与生活型密切相关, 多年生草本植物对城市化梯度变化的响应比一年生或一二年生草本植物明显。未来城市植物物候期研究中, 应更关注城市化进程中土地利用/覆被变化与热岛效应对城市气候及植物生理生态特征的累积影响特征, 以期进一步揭示植物物候期对城市化及气候变化的响应规律。

关键词:城市化梯度; 早春草本植物; 开花物候期; 响应; 热岛效应

The flowering phenophase response of early spring herb to the urbanization process in Beijing

WANG Jing¹, CHANG Qing^{1,*}, LIU Dongliang²

1 Department of Ornamental Horticulture and Landscape Architecture, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China

Abstract: The response of vegetation phenology to urbanization and climate changes is one hotspot in the field of urban ecological effect research. Climate changes is expected to alter seasonal biological phenomena such as vegetation growth and animal migration, so vegetation phenology is regarded as a useful indicator to track climate changes. Recent years, many related studies have focused on the long-term response of arbor phenology to regional climate changes. Our research focused on the impact of urban climate change on early spring herbs flowering phenophase with spatial variation. Based on the observation of the flowering times of 7 kinds of early spring herbs from May to June in 2012 along the northwest urbanization gradient in Beijing, this paper analyzed the flowering phenophase change characteristics and mechanism of early spring herbs in the urbanization gradient. The results showed that early spring herbs flowering times were affected by the urbanization process, like woody plants. The average flowering time of the herbs within the 5th Ring Road was 2.3 to 3.6 days earlier than common cases out of them. But the flowering duration and rate of 7 kinds of early spring herbs did not distinctly change with the urbanization gradient, with the exception of the longer flowering duration and faster flowering rate of the herbs between 3th and 4th Ring Road, which might be explained by the new center of the urban heat island caused by the high speed of city construction in this area. The advanced time of the flowering phenophase time changed with the

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41001112); 中国农业大学本科生 URP 项目

收稿日期:2013-02-20; **网络出版日期:**2014-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changqing@cau.edu.cn

urbanization gradient, that is, the closer to the city center, the earlier of flowering time. Especially the flowering end time was much clearer than the flowering starting and flourishing time. Moreover, the advanced time of the flowering phenophase time of the early spring herbs had a close relationship with life forms of the herbs, which means, perennial herbs were more sensitive to the urbanization gradient than the annual herbs regarding flowering phenophase. It was induced that spring herb flowering phenology has remarkable response to the accumulated impact of urbanization process and the resulting urban heat island. Based on the temperature data from Automatic Weather Stations along the northwest gradient in Beijing, the correlation between the average advanced flowering time and the mean temperature (MT) and accumulated temperature (AT) was examined. It was found that both the Pearson coefficient of MT and AT were no less than 0.85, but the coefficient of AT is larger than that of MT, and the Pearson coefficient of the correlation between AT of 5°C and the advanced flowering time was the highest and the value of Two-tailed test was the lowest. It was tested that where was closer to the city center, both MT and AT became higher that lead to the flowering time occurred earlier, however, more dominantly affected by AT, especially AT of 5°C. The results contribute to the conclusion that urban heat island during the urbanization process has distinct cumulative effects on the phenophase of herbs. It is suggested that future studies should give more emphasis on the cumulative effects of urban heat island on urban climate change and vegetation phenology.

Key Words: urbanization gradient; early spring herb; flowering phenophase; response; urban heat island

城市化^[1]和全球气候变化^[2-3]是 20 世纪以来人类发展的两大特征。以热岛效应为主要特征的城市气候变化对全球环境演变、生物群落以及人类健康具有重要影响^[3-5]。生物物候变化作为指示气候等环境变化的综合指标,不但能直观指示长期气温及自然季节变化,而且能表现动植物对自然环境变化的响应和适应特征^[1, 3, 6-7]。在这种背景下,植物物候对全球变暖及城市化的响应成为全球变化研究关注的热点^[3-4, 7-8]与城市生态环境效应研究的重要内容。

国内外早期对植物物候变化的研究,主要集中在长期区域气候变化与植物物候变化的响应方面。自 1960 年,全球早春生物物候出现和春季开始时间均随全球变暖逐渐提前^[3]。Badeck 等指出,春季平均气温升高可加速植物生长发育,归一化植被指数显示春季植物返青期随全球变暖趋势提前^[9]。Menzel 研究发现,1950 年以来,欧美地区植物开花和展叶日期每十年提前 1.2—3.8 d^[10]。国内方面,1983—2002 年,内蒙古草原地区羊草物候期随年均温升高显著提前^[11]。近 30 年来北京颐和园地区春季、夏季开始日期提前,冬季开始日期推后都与前一阶段气温变化有关^[12]。白洁等发现,自 1978 年,贵阳市木本植物春季物候期均呈提前趋势,而秋季物候期呈推迟趋势;春季物候期与当月和上月均温相关关系最显著;其中,2 月均温,2、3 月日照时数是影

响春季物候期的关键指标^[8]。1980—2004 年,河西走廊东部多数木本植物春季物候期提前、秋季物候期推迟,而一年生草本植物春、夏季物候期均提前、秋季物候期推后不显著;一年生草本植物春季物候期提前检验信度高于木本植物,秋季物候期推迟检验信度低于木本植物,揭示了木本植物和一年生草本植物物候期对气候变化的敏感性与差异性^[13]。

近年,随着城市化进程加快,国内外有关植物物候对城市化响应的研究日益增加。黄银晓等对比北京市 1982—1985 年间 9 种乔木、灌木物候期发现,生长季节城市化程度高的工业区月均温比游览区高 0.5—4 °C,生长期比游览区提前 10—15 d 开始,晚 15—17 d 结束^[14]。1900—1999 年 AVHRR 影像数据显示,美国东部阔叶林植物在市区植被生长周期比郊区长约 7.6 d^[15]。2001 年中分辨率遥感影像 MODIS 数据显示北美中高纬度地区城市内植被返青期比郊区提前 4—9 d,休眠期推迟 2—16 d^[16];在华盛顿—费城—纽约一带城乡梯度上,市区植物返青期比郊区提前 7 d,休眠期推迟 8 d^[17]。Ziska 等 2003 年分析美国马里兰州城乡梯度上豚草生长期差异发现,同一时间内从农村到市中心,温度和二氧化碳浓度都呈递增趋势,相应的豚草生长、开花和衰亡期提前、地上生物量和花粉量增加,而且越接近市中心开花时间提前越早^[18]。陈朱 2010 年通过对上海市 5 种乔木物候期观测研究发现,城区内乔木物候

期比郊区最多提前 35 d;城市景观格局特征对城区植物物候期具重要影响^[19]。

综上,目前有关植物物候对气候变化与城市化响应的研究,方法常通过遥感信息模型进行综合表征或采用乔木物候期观测数据,对于草本植物物候期变化响应研究较少;内容集中在物候期变化时间的时空异质性,偶见关注植物种类对气候变化及城市化响应差异的研究,但有研究表明一年生草本植物春季物候期提前检验信度高于木本植物^[13]。鉴于此,本文选择早春草本植物为研究对象,结合温度数据,研究其春季开花物候在北京城市化梯度上的变化特征,分析不同种类早春草本植物开花物候期对城市化进程响应的差别性,进而探讨早春草本植物对城市化进程的响应机制,对丰富城市化生态环境效应研究、揭示城市化及气候变化对局地物候的影响研究具有重要参考价值。

1 研究区概况

北京市位于华北平原与太行山、燕山山脉交汇处,华北平原西北边缘区,地理坐标为北纬 39°28′ 至 41°05′,东经 115°25′ 至 117°30′。属典型的暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,春季干燥风沙盛行,夏季炎热多雨,秋季晴朗凉爽,冬季寒冷干燥。多年平均气温 12.8 ℃,多年平均降水量 528 mm。

北京作为中国的首都,是一个综合性特大城市。改革开放以来,经历了经济和人口高速增长时期,1978—2011 年 GDP 从 108.8 亿元增加到 16251.9 亿元,人口从 871.5 万增加到 2018.6 万^[20]。同时,

北京出现了以大规模土地利用/覆盖变化为主要特征的城市化进程^[21],这不仅使城市建成区面积从 346 km²(1981 年)增加到 1231.3 km²(2011 年)^[20],而且影响城市气候。1975—1997 年,北京城镇用地重心呈现向西北方向扩展的趋势^[21];同期城市热岛也由中心区不断向外围扩张,西北向上的海淀地区热岛强度增加近 0.6 ℃^[22]。北京城市化进程及其对城市气候的影响,在空间上具有明显梯度变化特征^[22-23]。

2 研究方法

2.1 样地的选择与设置

城市用地类型、空间布局^[19,24]与植被覆盖度等用地特征^[25-26]对地表温度具显著影响,从而影响植物物候。为减少这些因素引起局地地表温度骤变,本研究选择面积较大、植被覆盖度较高的城市绿地作为早春草本植物物候期观测对象。根据北京城市化及热岛效应发展特征^[21-22],沿西北条带从中心区到五环外选择 7 个绿地作为典型样地采样区(表 1)。然后,采用固定样地和随机样地结合方式按照以下两个原则:(1)外围 50 m×50 m 范围内硬质铺装和植物覆盖面积相当,在水面较大的绿地,样地选择距离水面 50 m 以上;(2)具类似的群落结构、光照、土壤水分、土壤质地等环境条件和相当的人工管理措施,尽量排除其他环境因素对植物生长发育的影响。共选取样地 37 个。在每块样地上,根据其大小,设置 3—10 个样方(1 m×1 m),共 176 个,进行早春草本植物种类调查及物候期观测。

表 1 样地及其主要特征
Table 1 Main features of the green space

绿地名称 Name	位置 Position	面积 Area /hm ²	水面面积 Water surface area/hm ²	样地数 Number of samples(<i>n</i>)	样方与水面 平均距离 Average distance between sample and water/m	样方总数 Total of samples(<i>n</i>)
北海公园	中心区	65.9	39	5	50	38
景山公园	中心区	24.7	—	3	—	18
陶然亭公园	二环附近	53.1	17	5	50	24
人定湖公园	三环附近	8.6	1	6	60	12
北京大学校内绿地	四环附近	37.1	4	9	50	38
树村郊野公园	五环外	37.25	无	6	无	24
上地公园	五环外	1.7	0.3	3	20	22

2.2 代表性早春草本植物筛选

2012 年 3 月,对选取的 37 个样地内 176 个样方进行早春草本植物种类调查。对每个样方,估计早春草本植物总盖度、测量群落最大高度,记录每个物种种名并估计其株数、出现频度和盖度。

通过公式 1^[27] 计算每种早春草本植物的重要值,按表 2 划分其重要性级别,并据此筛选代表性早

春草本植物,进行后期物候期观测。

$$V_i = \frac{S_i}{\sum_1^n S_i} + \frac{F_i}{\sum_1^n F_i} + \frac{C_i}{\sum_1^n C_i} \tag{1}$$

式中, V_i 为 i 早春草本植物的重要值, n 为调查样地内早春草本植物种类总数, S_i 、 F_i 、 C_i 分别为 i 早春草本植物在调查样地内的株数、出现频度和盖度。

表 2 早春草本植物重要性分级
Table 2 Importance grade of early spring herb

分级准则 Grading rule	重要性级别 Importance of grading		
	高级 Senior	中级 Intermediate	低级 Low
重要值大小 Importance value	≥0.01	0.001—0.01	≤0.001

2.3 物候期观测及相关指标计算方法

城市化引发的热岛效应不仅使局地地表温度升高,而且影响程度因季节而异,其中,夏秋两季最强,冬季最弱,春季较为平稳^[28]。鉴于此,本研究选择在 2012 年 3—6 月间,采用隔天观察法对选定样地内的早春草本植物的开花物候期进行调查,用盖度估测法划分开花物候期并按 Julian 日换算法记录^[29]。在观测过程中,对记录的数据及时审查和校正。若某样方与同一样地内其他样方记录的数据相差过大,则认为此数据不准确,采用临近样方数据进行校正,以保证数据的准确性。

为表征春季早春草本植物开花物候期的变化特征,本研究以五环外两个绿地中植物平均开花期为对照值,按公式 2—4 计算各绿地内早春草本植物开花物候期的变化时间、持续时间和开花速率。

$$\Delta f_i = \bar{f} - f_i \tag{2}$$

式中, Δf_i 是绿地 i 内早春草本植物开花物候期变化时间, $\Delta f_i > 0$ 表示开花期提前, $\Delta f_i < 0$ 表示推后; $\bar{f}$ 是早春草本植物开花物候期出现时间对照值, f_i 是绿地 i 内早春草本植物开花物候期出现时间。

$$F_i = f_{ei} - f_{si} \tag{3}$$

式中, F_i 是绿地 i 内早春草本植物开花物候期持续时间, f_{ei} 是绿地 i 内早春草本植物开花末期出现时间, f_{si} 是开花始期出现时间。

$$V_i = (p_{mi} - 10\%) / (f_{mi} - f_{si}) \tag{4}$$

式中, V_i 为绿地 i 内早春草本植物的开花速率, p_{mi} 为早春草本植物开花盛期开花数量百分比, f_{mi} 是绿地 i 内早春草本植物开花盛期出现时间, f_{si} 同上。

2.4 温度数据来源及预处理

采用 2012 年 2—5 月北京市西北向上 10 个气象站日均温数据,分别计算每个站点植物各开花物候期对应时期的活动积温(0.5、10 度)与前 1 个月、2 个月的平均温度。然后基于 Surfer 软件平台计算获取 7 个典型绿地对应的活动积温与月均温数据。

3 结果分析

3.1 早春草本植物种类调查与筛选

在选取的 7 个绿地中,经调查统计,草本植物的种类涉及 37 科、96 属、116 种,主要分布在菊科、唇形科等。根据重要值,选取 7 种早春草本植物作为代表性种类(表 3)。其中,紫花地丁(*Viola philippina*)、附地菜(*Trigonotis peduncularis*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、斑种草(*Bothriospermum chinense*)、抱茎苦苣菜(*Lxeris sonchifolia*)、荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)6 种植物的重要值>0.01,二月兰(诸葛菜 *Orychophragmus violaceus*)重要值虽居中,但在样地中出现频度较高。此结果与赵娟娟等^[30]、孟雪松等^[27]对北京市区草本植物种类调查研究结果一致。

3.2 早春草本植物开花物候期出现时间变化特征

与对照值相比,五环内各绿地早春草本植物开花物候期均出现提前于五环外的趋势(表 4)。为揭示早春草本植物开花物候期在城市化梯度上的变化特征,本文以 7 种早春草本植物开花物候期的平均提前时间为纵坐标、以 7 个绿地的空间位置为横坐标进行线性回归分析。

表 3 北京市 7 种代表性早春草本植物的主要特征

Table 3 Main features of the 7 early spring herb of Beijing

名称 Name	生长类型 Growth type	科 Family	属 Genus	花期 Florescence	花色 Color	重要性级别 Importance grade
紫花地丁 <i>Viola phillipina</i>	多年生	堇菜科	堇菜属	4—5 月	紫色	高级别
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	多年生	菊科	蒲公英属	3—8 月	黄色	高级别
抱茎苦苣菜 <i>Lxeris sonchifolia</i>	多年生	菊科	抱茎苦苣菜属	4—5 月	黄色	高级别
斑种草 <i>Bothriospermum chinense</i>	一、二年生	紫草科	斑种草属	4—6 月	淡蓝色	高级别
芥菜 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	一、二年生	十字花科	芥菜属	4—6 月	白色小花	高级别
附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	一年生	紫草科	附地菜属	5—6 月	白色/蓝色	高级别
二月兰 <i>Orychophragmus violaceus</i>	一、二年生	十字花科	诸葛菜属	4—5 月	蓝紫色	中级别

表 4 调查绿地内 7 种早春草本植物的平均开花物候期

Table 4 Average flowering time of the 7 early spring herb in samples

开花物候期 Flowering phenophase	调查样地 Sample							对照值
	北海公园	景山公园	陶然亭公园	人定湖公园	北京大学校内绿地	树村郊野公园	上地公园	
始期 Flowering starting (Fs)	99	99	99	101	101	103	103	103
盛期 Flowering flourishing (Ff)	107	107	108	107	108	111	110	111.5
末期 Flowering end (Fe)	127	128	128	129	129	133	133	133

图 1 显示,北京市中心区到五环外,早春草本植物开花物候期提前时间与城市化梯度具明显线性相关关系,相关系数(R^2)均大于 0.7。其中,开花末期随城市化梯度变化趋势最为明显(斜率=-1.07),随后是开花始期(斜率=-0.76)、开花盛期(斜率=

-0.69),五环内比五环外分别平均提前 4 d 以上、4 d 左右和 3 d 左右。可见,受城市化及其内人类活动影响,城市中心区早春草本植物开花物候期出现时间明显比外围郊区提前;而且,越靠近中心区,开花物候期出现时间越早,呈显著梯度变化特征。

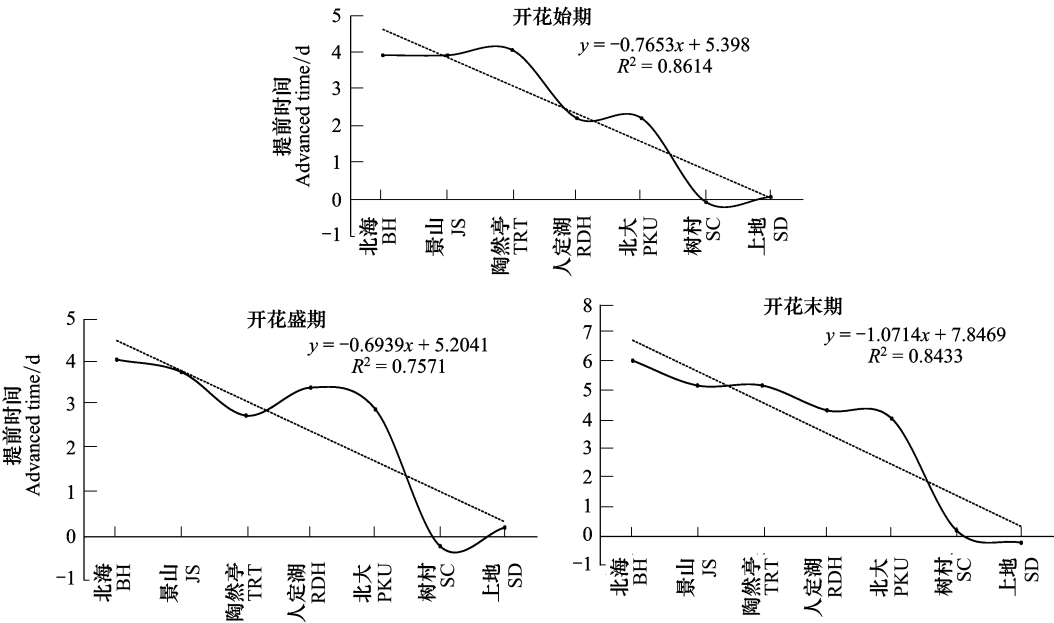


图 1 早春草本植物开花期平均提前时间在城市化梯度上的变化趋势

Fig.1 The change of average advanced time of the flowering phenological in the urbanization gradient

BH 为北海公园;JS 为景山公园;TRT 为陶然亭公园;RDH 为人定湖公园;PKU 北京大学校园绿地;SC 为树村郊野公园;SD 为上地公园

3.3 早春草本植物开花物候期持续时间和开花速率变化特征

经计算,各绿地中 7 种早春草本植物开花物候期持续时间和开花速率平均值如图 2 所示。在 7 个绿地中,早春草本植物开花物候期平均持续时间在 28—31 d 范围内上下浮动,平均值为 29.1 d(图 2)。其中,五环外绿地中早春草本植物开花期持续时间最长,北海公园和三、四环附近绿地中早春草本植物开花期持续时间较短;各绿地内早春草本植物平均开花速率在 0.04—0.06 之间,平均值为 0.05。可见,早春草本植物开花期持续时间长短和平均开花速率在城市化梯度上没有明显变化趋势。

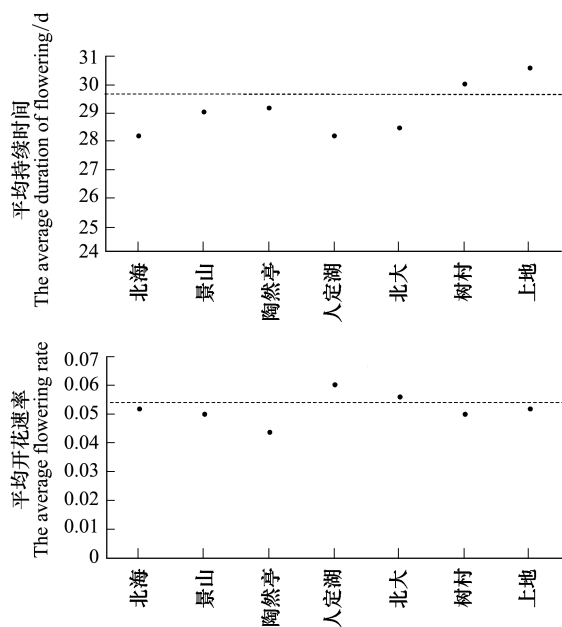


图 2 早春草本植物开花物候期平均持续时间和平均开花速率在绿化梯度上的变化趋势

Fig.2 The change of the average duration of flowering and the average flowering rate in the urbanization gradient

以上分析表明,北京市早春草本植物开花期持续时间和开花速率随城市化梯度变化的趋势并不显著。那么,不同种类早春草本植物开花物候期变化时间的响应是否异同呢?

3.4 不同早春草本植物开花物候期对城市化梯度的响应差异

本文分别以每种植物在城市化梯度上开花物候期平均提前时间为纵坐标,以 7 个绿地空间位置为横坐标进行线性回归分析,并将二者的线性回归相关系数(R^2)从大到小排序。图 3 显示,从北京市中心区到五环外城市化梯度上,紫花地丁、蒲公英、抱

茎苦苣菜 3 种植物开花物候期平均提前时间随城市化梯度变化的趋势明显,线性回归斜率均在 -1.5 以下, R^2 均大于 0.65,抱茎苦苣菜开花期平均提前最多,五环内比五环外提前 5—10 d 左右;斜率为 -2.18;其次为紫花地丁和蒲公英,平均提前时间分别为 7 d 和 5 d 左右,其中蒲公英开花期平均提前时间随城市化梯度变化的线性趋势最明显, R^2 为 0.96。与前三者相比,斑种草开花期平均提前时间随城市化梯度变化的趋势明显减弱,平均提前 2 d 左右, R^2 仅为 0.45,斜率为 -0.76。而其他 3 种植物(二月兰、荠菜、附地菜)的开花期提前时间并不随城市化梯度显著变化, R^2 均小于 0.1;其中,二月兰和荠菜最不明显,斜率仅为 0.01 和 0.06, R^2 小于 0.01,开花期平均提前时间在梯度上基本保持上下波动。

为进一步分析这一响应机制,本文对 7 种早春草本植物开花物候期与城市化梯度的变化斜率进行聚类分析,发现 7 种早春草本植物基本按生活型划分为两类(图 4)。3 种多年生草本植物(紫花地丁、蒲公英和抱茎苦苣菜)为一类,它们的开花物候期变化从五环外到中心区逐渐提前趋势最显著。其他四种草本植物分为一类,开花物候期变化不具明显的梯度变化特征,其中,二月兰与荠菜为十字花科一二年生植物,斑种草和附地菜属紫草科,斑种草属一二年生植物,附地菜属一年生植物。说明城市化对于早春草本植物物候期的影响因植物生活型而异。可能由于多年生草本植物在冬季多以地下茎或根进入休眠状态,容易受到城市热岛效应的累积影响,越靠近热岛中心区,其物候期出现越早;而其他草本植物往往在 1—2a 内发芽、开花、结果、然后死亡,其生长发育受限于前一年局地温度的变化,因此随城市化梯度上热岛影响不显著。这一研究结果与 Ziska 等^[18]、白洁等^[8]的研究结果一致,进一步证明植物物候期变化主要受到周围环境积温变化影响^[7]。

4 城市化进程中早春草本植物开花物候期与温度的关系

4.1 与积温关系的讨论

北京市春季植物物候出现时间受春季温度变化的影响,且与生长季节积温相关^[31]。为进一步揭示积温对早春草本植物开花物候期的影响机制,本文在 7 个典型绿地中随机抽取 3 个绿地(北海公园、陶然亭公园、北京大学校园绿地),利用 SPSS 软件分析

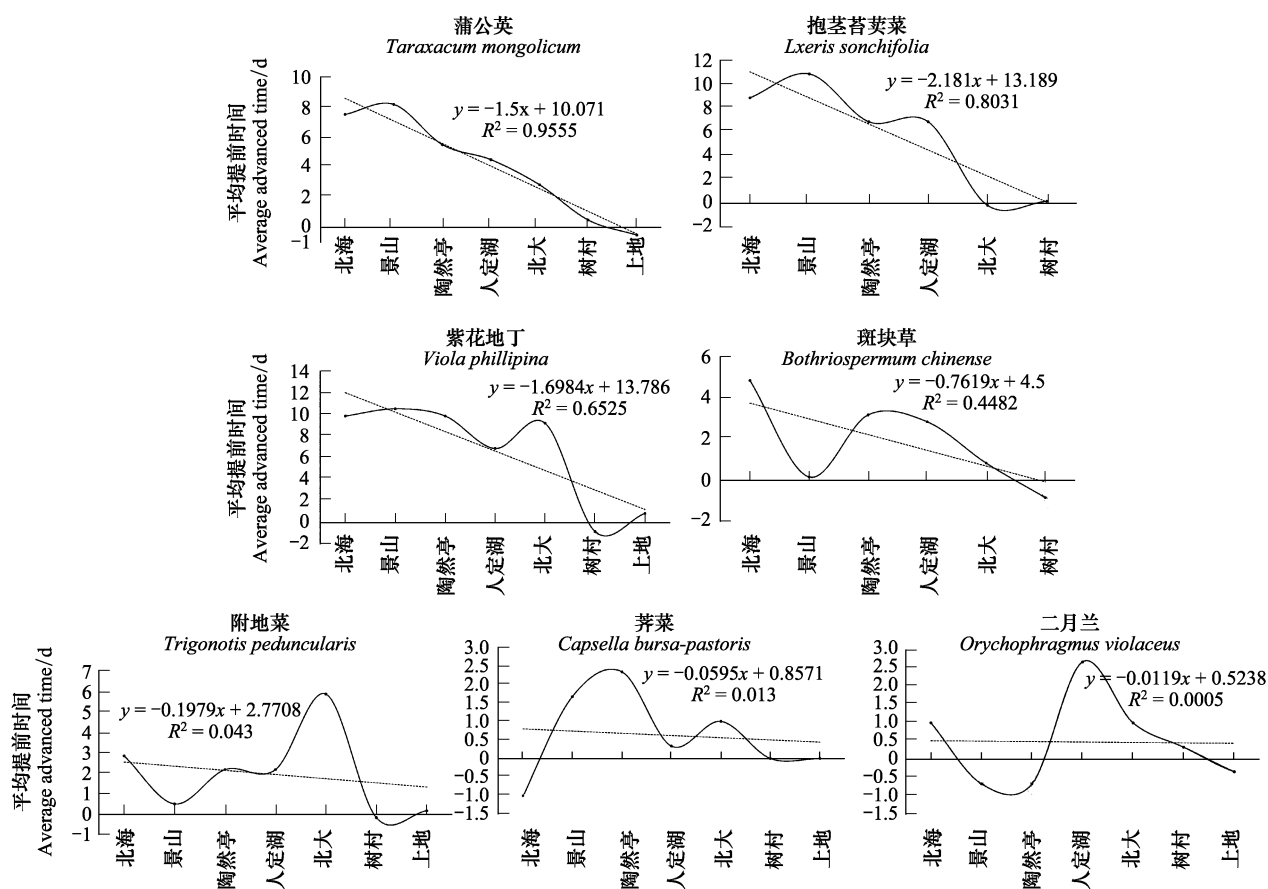


图3 不同早春草本植物开花物候期平均提前时间在城市化梯度上的变化趋势

Fig.3 The change of average advanced time of the flowering phenological of difference early spring herb in the urbanization gradient

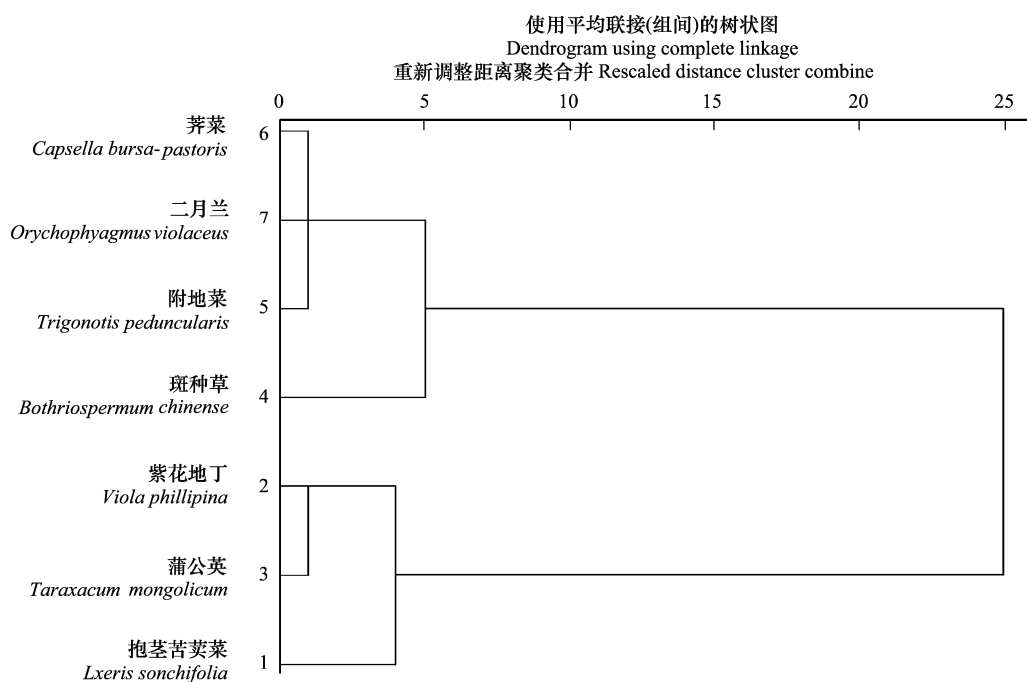


图4 早春草本植物开花物候期变化响应特征的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of the change of flowering phenological of early spring herb

7 种早春草本植物开花物候期与对应时期积温(0、5、10℃)的相关关系(表 5)。分析显示,各绿地中 7 种早春草本植物的开花物候期与 0、5、10℃ 积温均显著相关;并从积温与植物物候期相关系数为 0 的假设检验成立概率平均值 $\bar{T}$ 可以看出,5℃ 积温(3 块

公园分别为 0.017、0.017、0.018)明显低于 0℃ 积温(0.018、0.030、0.019)与 10℃ 积温(0.018、0.019、0.019)。可见,北京城市化进程中早春草本植物开花物候期受 5℃ 积温的影响最为显著。

表 5 3 块绿地中不同植物与积温的相关关系

Table 5 The relationship between different early spring herb and accumulated temperature(AC)

植物名称 Name		北海公园			陶然亭公园			北京大学校园绿地		
		0 ℃ 积温	5 ℃ 积温	10 ℃ 积温	0 ℃ 积温	5 ℃ 积温	10 ℃ 积温	0 ℃ 积温	5 ℃ 积温	10 ℃ 积温
紫花地丁	<i>P</i>	0.998 *	0.999 *	0.998 *	0.998 *	0.998 *	0.997 *	0.999 *	0.999 *	0.999 *
	<i>T</i>	0.035	0.034	0.035	0.038	0.040	0.049	0.031	0.029	0.032
蒲公英	<i>P</i>	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	0.999 *	0.999 *	0.999 *
	<i>T</i>	0.004	0.004	0.006	0.007	0.002	0.002	0.028	0.024	0.026
二月兰	<i>P</i>	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *
	<i>T</i>	0.014	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.016	0.015	0.015
荠菜	<i>P</i>	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 **
	<i>T</i>	0.004	0.002	0.002	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007
斑种草	<i>P</i>	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1.000 *	1.000 *	1.000 *	1.000 **	1.000 **	1.000 **
	<i>T</i>	0.006	0.006	0.006	0.016	0.015	0.016	0.007	0.006	0.006
附地菜	<i>P</i>	0.999 *	0.999 *	0.999 *	0.999 *	0.999 *	0.999 *	1.000 *	1.000 *	1.000 *
	<i>T</i>	0.022	0.021	0.022	0.024	0.024	0.024	0.012	0.011	0.011
抱茎苦苣菜	<i>P</i>	0.998 *	0.998 *	0.998 *	0.987	1.000 *	0.999 *	0.998 *	0.998 *	0.998 *
	<i>T</i>	0.040	0.040	0.040	0.104	0.019	0.021	0.036	0.035	0.037
	$\bar{T}$	0.018	0.017	0.018	0.030	0.017	0.019	0.019	0.018	0.019

* $P<0.05$, ** $P<0.01$; *P*: 皮尔逊相关系数; *T*: 双尾 T 检验值; $\bar{T}$: *T* 检验平均值; *P*: Pearson; *T*: the value of Two-tailed; $\bar{T}$: the average value of *T*

4.2 与城市化梯度上温度因子关系的讨论

为进一步了解城市化梯度上早春草本植物开花物候期与温度因子的关系,本研究选取影响早春草本植物开花物候期最显著的 5℃ 积温与各开花物候期前 1 个月、2 个月平均温度,利用 SPSS 软件分析它们在城市化梯度上的变化趋势和与开花物候期提前时间的相关关系。分析显示(表 6)5℃ 积温与各开花物候期前 1 个月、2 个月平均温度在城市化梯度上均呈现从中心区到五环外依次降低的趋势,与城市化梯度的相关系数都在 0.60 以上,而与各开花物候期提前时间的相关系数都在 0.85 以上,其中开花始期提前时间与 5℃ 积温的相关性最强,相关系数为 0.859,并且通过 $P<0.001$ 的显著性检验;各开花物候期提前时间与各时期前 2 月均温的关系更为显著,相关系数都在 0.90 以上并且都通过 $P<0.01$ 的显著性检验。这说明北京早春草本植物开花物候期

与温度因子随城市化梯度变化特征明显,并且显著相关;越靠近市中心,温度与积温累计值越高,开花物候期出现时间越早。

5 结论与讨论

本文围绕城市化进程中早春草本植物开花物候期的变化响应展开研究。通过对北京市西北向城市化梯度上早春草本植物春季开花期的调查以及相关温度数据的分析研究表明:

(1)2012 年 4—6 月,北京市五环外到中心区城市化梯度上,早春草本植物各开花物候期提前时间与对应时期温度因子变化均呈梯度变化特征,并显著相关;即越靠近中心区,温度越高,开花物候期出现越早,其中开花末期最为明显。说明城市化进程不仅影响木本植物物候期^[15],而且对于草本植物物候期也有重要影响。土地利用/覆被在梯度上不仅

直接影响城市热岛效应从中心区到外围郊区的空间变化,而且间接改变早春草本植物开花物候期。因此,未来研究有必要从城市热岛中心空间分布特征

分析入手,进一步揭示土地利用/覆被及热岛效应发展对早春草本植物物候期的影响机制。

表 6 城市化梯上温度因子变化特征与同开花物候期提前时间的相关关系

Table 6 The relationship between temperature factor and average advanced time of the flowering phenological in the urbanization gradient

温度因子 Temperature factor	开花物候期 Flowering phenophase	斜率 Slope	梯度相关系数 R^2	物候期相关系数 P
前 1 月平均温度 Mean temperature over one month	始期 Fs	-0.11	0.73	0.887 **
	盛期 Ff	-0.11	0.78	0.893 **
	末期 Fe	-0.15	0.83	0.870 *
前 2 月平均温度 Mean temperature over two month	始期 Fs	-0.15	0.71	0.909 **
	末期 Ff	-0.13	0.76	0.905 **
	盛期 Fe	-0.13	0.81	0.903 **
5℃ 积温 Accumulated temperature of 5 degrees	始期 Fs	-5.20	0.61	0.859 **, *
	盛期 Ff	-6.41	0.68	0.911 **
	末期 Fe	-9.59	0.75	0.859 *

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

(2)早春草本植物开花物候期提前时间梯度变化的显著性与生活型密切相关,多年生草本植物对城市化梯度的响应比一年生或一二年生草本植物明显,而且对周围环境中积温变化的响应显著^[7],与 5℃ 积温相关性最强。因此未来城市植物物候期研究中,应更关注城市热岛效应对城市气候的累积影响规律等。

(3)北京市 7 种早春草本植物开花期持续时间与开花速率并不随城市化梯度发生明显变化,但在三环、四环附近开花期平均持续时间明显比其他区域短促,开花速率加快。这可能与近年来此区域内高密度的城市建设形成新城市热岛中心有关。未来研究将进一步结合城市土地利用格局、城市热岛分布以及植物生理生态特征,探讨早春草本植物物候期变化的影响机制,拓展和丰富城市生态环境效应研究。

致谢:感谢邱瑶、诸子翔、谢翠、姚慧燕、张菁、张永杰等同学参加调研。

References:

[1] Platt R H, Rowntree R A. The ecological city: introduction and overview // Platt R H, Rowntree R A, Muick P C, eds. The Ecological City: Preserving and Restoring Urban Biodiversity. Cambrid: University of Massachusetts Press, 1994: 1-20.
[2] Thomas R K, Kevin E T. Modern global climate change. Science,

2003, 302(5651): 1719-1723.
[3] Walther G R, Post E, Conven P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Guldberg O H, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. Nature, 2002, 416(6879): 389-395.
[4] Zhao Z C. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years. Meteorological Monthly, 1991, 17(4): 14-16.
[5] Xie M M, Wang Y L, Fu M C. An overview and perspective about causative factors of surface urban Heat Island Effects. Progress in Geography, 2011, 30(1): 35-41.
[6] Li R P, Zhou G S, Zhang H L. Research advances in plant phenology. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 541-544.
[7] Peñuelas J, Filella I. Phenology: responses to a warming world. Science, 2001, 294(5543): 793-795.
[8] Bai J, Ge Q S, Dai J H. Response of woody plant phenophases to climate change for recent 30 years in Guiyang. Geographical Research, 2009, 28(6): 1606-1614.
[9] Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S. Responses of spring phenology to climate change. New Phytologist, 2004, 162(2): 295-309.
[10] Menzel A. Phenology: its importance to the global change community. Climatic Change, 2002, 54(4): 379-385.
[11] Chen X Q, Li L. Relationships between Leymus chinensis phenology and meteorological factors in Inner Mongolia grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5280-5290.
[12] Zhong S Y, Ge Q S, Zheng J Y, Dai J H, Wang H J. Changes of main phenophases of natural calendar and phenological seasons in Beijing for the last 30 years. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(12): 1217-1225.
[13] Jiang J F, Wang H L, Wei Y G, Ding W K. Response of different type plants' phenology to climate change in East of Hexi Corridor. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(4): 543-549.

- [14] Huang Y X, Lin S H, Han R Z, Yao Y Q. The effect of urbanization on growth and development of plants. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1988, 12(4): 256-263.
- [15] White M A, Nemani R R, Thornton P E, Running S W. Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the Eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems*, 2002, 5(3): 260-277.
- [16] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1133-1145.
- [17] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Schneider A. The footprint of urban climates on vegetation phenology. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): 1-4.
- [18] Ziska L H, Gebhard D E, Frenz D A, Faulkner S, Singer B D, Straka J G. Cities as harbingers of climate change: Common ragweed, urbanization, and public health. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2003, 111(2): 290-295.
- [19] Chen Z. Effects of Urbanization on Phenology of Spring-Flowering Plants [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [20] Yu X Q. BEIJING STATISTICAL YEARBOOK. Beijing: Chian Statistics Press, 2012.
- [21] He C Y, Shi P J, Chen J, Zhou Y Y. A study on land use/cover change in Beijing area. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 679-687.
- [22] Ji C P, Liu W D, Xuan C Y. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77.
- [23] Qiu J X, Wang X K, Lu F, Ouyang Z Y, Zheng H. The spatial pattern of landscape fragmentation and its relations with urbanization and socio-economic developments: a case study of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [24] Chen Z, Chen D M, Zhu D G, Cao L, Shen X H, Li J X. Effects of park size and plant community structure on urban park air temperature. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2590-2596.
- [25] Li Y M, Zhang J H, Gu R Z. Research on the relationship between urban greening and the effect of Urban Heat Island. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, 2003, 20(1): 72-75.
- [26] Zhang X F, Wang Y L, Wu J S, Li W F, Li Z G. Study on land surface temperature vegetation cover relationship in urban region: a case in Shenzhen City. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 367-377.
- [27] Meng X S, Cui G F, Ouyang Z Y. Species composition and their protection of plants resources in the built area of Beijing. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2004, 19(1): 11-16.
- [28] Chu Z Y, Ren G Y. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4): 534-540.
- [29] Shen Z. Application of phenology in ecological monitoring. *Arid Environmental*, 1991, 5(1): 50-52.
- [30] Zhao J J, Ouyang Z Y, Zheng H, Xu W H, Wang X K. Species composition and spatial structure of plants in urban parks of Beijing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 298-306.
- [31] Chen X Q, Zhang F C. Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Agricultural Meteorology*, 2001, 22(1): 1-5.
- 参考文献:**
- [4] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, 17(4): 14-16.
- [5] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 35-41.
- [6] 李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 541-544.
- [8] 白洁, 葛全胜, 戴君虎. 贵阳木本植物物候对气候变化的响应. *地理研究*, 2009, 28(6): 1606-1614.
- [11] 陈效述, 李惊. 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系. *生态学报*, 2009, 29(10): 5280-5290.
- [12] 仲舒颖, 葛全胜, 郑景云, 戴君虎, 王焕炯. 近 30 年北京自然历史的主要物候期、物候季节变化及归因. *植物生态学报*, 2012, 36(12): 1217-1225.
- [13] 蒋菊芳, 王鹤龄, 魏育国, 丁文魁. 河西走廊东部不同类型植物物候对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2011, 32(4): 543-549.
- [14] 黄银晓, 林舜华, 韩荣庄, 姚依群. 城市化对植物生长发育的影响. *植物生态学与地植物学学报*, 1988, 12(4): 256-263.
- [19] 陈朱. 城市化对春季开花植物物候的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [20] 于秀琴. 北京市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [21] 何春阳, 史培军, 陈晋, 周宇宇. 北京地区土地利用/覆盖变化研究. *地理研究*, 2001, 20(6): 679-687.
- [22] 季崇平, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.
- [23] 仇江啸, 王效科, 逯非, 欧阳志云, 郑华. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例. *生态学报*, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [24] 陈朱, 陈方敏, 朱飞鸽, 曹璐, 沈兴华, 李俊祥. 面积与植物群落结构对城市公园气温的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2590-2596.
- [25] 李延明, 张济和, 古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. *中国园林*, 2003, 20(1): 72-75.
- [26] 张小飞, 王仰麟, 吴建生, 李卫锋, 李正国. 城市地域地表温度—植被覆盖定量关系分析——以深圳市为例. *地理研究*, 2006, 25(3): 367-377.
- [27] 孟雪松, 崔国发, 欧阳志云. 北京城区常见野生草本植物资源种类构成及其保护利用对策. *河北林果研究*, 2004, 29(1): 11-16.
- [28] 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. *气象学报*, 2005, 63(4): 534-540.
- [29] 沈志. 物候学在生态监测中的应用. *干旱环境监测*, 1991, 5(1): 50-52.
- [30] 赵娟娟, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 王效科. 北京城区公园的植物种类构成及空间结构. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 298-306.
- [31] 陈效述, 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. *中国农业气象*, 2001, 21(1): 1-5.