DOI: 10.20103/j.stxb.202305311153
庄铭皓,赵生寿,毕星,武彩燕,王萌,李俊祥.城市化对上海市城乡梯度上植物爆芽与展叶物候的影响.生态学报,2024,44(6):2396-2405.
Zhuang M H, Zhao S S, Bi X, Wu C Y, Wang M, Li J X.Impact of urbanization on bud burst and leaf unfolding phenology of plants along urban-rural gradient in Shanghai, China.Acta Ecologica Sinica,2024,44(6):2396-2405.

城市化对上海市城乡梯度上植物爆芽与展叶物候的影响

庄铭皓[1],赵生寿[2],毕 星[1],武彩燕[1],王 萌[1],李俊祥[1,*]
1 上海交通大学设计学院风景园林系,上海 200240
2 西宁市生态环境监测站,西宁 810000

摘要:城市化影响植物物候,春季物候,如爆芽和展叶是植物响应城市化的客观生物指示。然而在城乡梯度上植物物候如何变化,以及物候与城市化程度是否存在定量关系,尚不明确。利用上海市 2 条城乡梯度上的 6 种木本植物的春季物候观测数据,以及距市中心距离作为城市化程度的代理指标,研究植物的爆芽和展叶物候期在城乡梯度上的变化及其与城市化程度的关系。研究结果表明:6 种城市木本植物的爆芽和展叶物候期呈现随着距市中心距离的增加而延迟的趋势;城市化程度代理指标与爆芽和展叶物候期之间存在线性关系,城市化代理指标距市中心距离可以解释物候期延迟的 31.5%—96.7%;物候期延迟时间因物种和距离城市距离而异,爆芽期延迟时间为 3—15 d,展叶始期延长时间为 4—13 d,展叶盛期延长时间为 3—9 d。上述结果对理解城市化对植物物候的影响机制,评估城市化对城市生态系统的影响具有积极意义。

关键词:植物物候;爆芽期;展叶期;城市化;梯度分析

Impact of urbanization on bud burst and leaf unfolding phenology of plants along urban-rural gradient in Shanghai, China

ZHUANG Minghao[1], ZHAO Shengshou[2], BI Xing[1], WU Caiyan[1], WANG Meng[1], LI Junxiang[1,*]
1 *Department of Landscape Architecture, School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*
2 *Ecological and Environmental Monitoring Station of Xining City, Xining* 810000, *China*

Abstract: Urbanization influences plant phenology. The spring phenology, such as the bud burst and lead unfolding are key biological indicators of plant response to urbanization. However, how plant phenology changes along the urban-rural gradient and whether there is significantly quantitative relationship between phenology and urbanization degree in this transition zone remain unclear. In this study, we used the observed spring phenology data of six common urban woody plant species stand along two urban-rural transects from urban center to rural areas in Shanghai, and the distance to the city center as a proxy for urbanization degree. We investigated the variations of plant bud burst and leaf unfolding phenophases along the urban-rural gradients and their relationships with urbanization degree. The results showed that the bud burst and leaf unfolding phenophases of the six plant species were considerably delayed with the increasing of distance from the city center. There was a linear relationship between the urbanization degree and the phenophases of bud burst and leaf unfolding, respectively. The urbanization degree, i.e., the distance to the city center, could explain 31.5—96.7% of the variations in the phenophases delay. The delay time of the bud burst, the start of leaf unfolding, and the full leaf unfolding of the six plant species were ranged from 3—15 days, 4—13 days, and 3—9 days, respectively. These findings can provide insights for

基金项目:国家自然科学基金项目(31370482)
收稿日期:2023-05-31; **网络出版日期**:2023-12-22
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: junxiangli@sjtu.edu.cn

understanding the mechanisms of urban plant phenology and assessing the impacts of urbanization on urban ecosystem services.

Key Words: plant phenology; bud burst; leaf unfolding; urbanization; gradient analysis

物候是植物的内禀特性,它既是植物生命周期对环境变化的长期适应[1—2],也是陆地生态系统短期变化的个体响应[3—4]。因此,植物物候可用于研究多个尺度上生态系统对气候变化的响应,是研究全球气候变化和城市环境变化理想而客观的指标[5—7]。有研究报道近几十年全球平均气温上升导致了植被物候提前、物候期期延长[8—10],而植物物候期的变化会影响生态系统的碳循环和养分循环[11—13]。因此,植物物候研究是全球变化和城市气候变化的研究热点,受到广泛关注[14]。

全球变暖是导致全球尺度上植物物候提前的主要原因,而城市化程度则是局地尺度上物候变化的重要原因[15—16]。城市化塑造了景观和生态系统,在多个尺度上推动环境的变化[17—18],其中,城市用地扩张和景观格局变化是最直观的表现[19],而景观结构(如景观组分与空间配置、植被覆盖度等)直接影响城市热岛[20],并导致城市热岛的空间异质性,即城市热岛呈多岛状分布格局[21]。因此,城市中的植被物候受气候变化和城市化的双重影响,可能表现更大的变异性[22]。

城市化对植物物候产生显著影响,导致物候期提前、生长季延长等现象[23—25]。例如,北京的城市热岛效应使植物生长季起始期提前,生长季结束期延后,生长季延长[26]。由于城市内温度的升高,韩国 9 个城市 4 种树木的始花期提前了几天到几周,并且始花期提前时间与城市化程度成正比[27]。Zhou 等通过调查中国 32 个主要城市及周边农村地区的物候指标发现,与农村地区相比,城市地区的植被生长季的起始期大概提前 11.9 d,结束期延迟 5.4 d[28]。遥感分析结果表明,北美东部的城市气候对植被物候的影响随距市中心距离的增加呈指数衰减,城市地区植被的生长季比农村地区延长约 15 d[29]。尽管植物物候存在城乡差异,但是植物物候变化与城市化程度之间是否存在定量关联有待进一步研究[15, 30—31]。

梯度分析最早应用于植被分析,现已广泛用于研究城市化对景观格局和生态系统的影响[15, 19, 32—34]。城乡梯度的物候观测是定量物候对环境因子变化和城市化响应的重要手段[35]。城乡梯度上的物候变化研究多数采用遥感提取的物候信息,得出物候期变化与城市化程度存在相关性[16, 36—37],但仍需要地面实际植物物候观测结果予以验证。爆芽期和展叶期是植物对光、温度等环境因素变化响应最为敏感的物候阶段,期间植物的生理和形态特征发生显著变化,因此,是理解植物响应和应对环境变化适应策略的最佳物候指标[31, 38—39]。本文利用上海市中心城区向西和向南两个城乡梯度上 6 种木本植物的物候观测数据,分析植物爆芽和展叶物候期变化,探讨以下问题:(1)植物物候在城市化梯度上的变化特征;(2)植物物候期与城市化之间是否存在定量关系。研究结果可为评估城市化对生态系统的影响提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

上海市位于东经 120°52′—122°12′和北纬 30°40′—31°53′之间,东临东海,南部滨临杭州湾,西部内陆与江苏、浙江交界,面积 6340.5 km^2,地势平坦,平均海拔高度约 4 m。上海市属于北亚热带季风性气候,气候温暖湿润,日照充足,降水充沛,2013 年的年平均气温为 17.6℃,最冷月 1 月份的平均气温为 4.6℃,最热月 7 月份的平均气温 32℃,全年日照时数 1885.9 h,降水量 1173.4 mm。城市植被以人工植被为主,地带性植被为常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林。

近 40 年的快速城市化使上海成为我国城市化水平最高的城市之一,目前常住人口超过 2500 万人,是全球人口密度最高的城市之一。城市化导致城市面积迅速扩张,景观异质性增加,城市热岛效应增强[20, 40—42],对城市植被和农作物的物候产生了较大的影响[16, 43]。

1.2 城乡梯度设置及物候观测树种选则

本研究选择上海市常见的 6 种木本植物作为物候观测的对象,分别是垂柳(*Salix babylonica*)、红叶李(*Prunus cerasifera*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)以及悬铃木(*Platanus hispanica*)[44—45]。

物候野外观测于 2013 年 2—5 月进行。物候梯度观测设置原则为:从市中心地区(华东师范大学普陀校区为代表和观测起点,以下简称市中心测点)到远郊区,向西、南两个方向沿城市化梯度选取两条样带,每隔 3 km 设置一个观测点,且观测点选取时需同时满足以下要求:(1)各观测点周围平坦开阔、无明显阻挡;(2)尽量避免严重的人为干扰(如工厂、发电场等)。但在实地选点时,受到物种分布、建筑物遮挡、道路方向以及观测便捷性等因素的限制,实际样带设置和测点分布不能严格按照原则设置,即梯度方向并非正西和正南,样点间距也不完全为 3 km。最终,西向样带从市区至青浦区青龙村,有 8 个观测点,南向样带从市区至奉贤区龙潭村,有 10 个观测点,加上起点,共计 19 个观测点(图 1)。对这 19 个观测样点用 GPS 定位,建立地理信息数据库,用于后续的样点间直线距离的计算,作为城市化程度的代理指标[45]。各样点和观测物种信息见表 1。

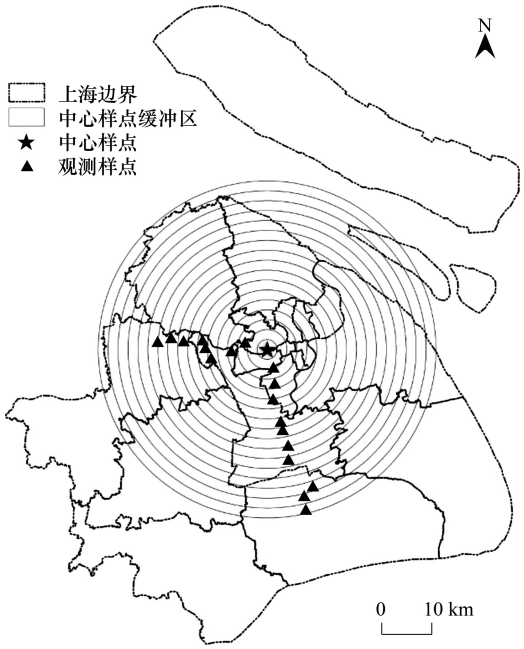

图 1 植物物候观测样点分布图(Buffer:中心样点 3km 间距的缓冲区)

Fig.1 Distribution of plant phenological observation sites. Buffers of 3 km spacing from the center sample

表 1 植物物候观测样点的分布信息

Table 1 Description of the plant phenology observation sites

方向 Direction	地名 Site name	编号 Site No.	距市中心距离/km Distance to urban center	观测植物物种 Observed plant species					
中心样点 Central point	华东师大中北校区	C0	0	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	构树	水杉
西方向	丰庄绿地	W1	4.3	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	构树	水杉
West direction	何家浪	W2	7.2	红叶李	银杏	垂柳	构树		
	洪泾港桥	W3	11.4	红叶李	垂柳				
	红卫河桥	W4	12.4	银杏	垂柳				
	盐仓浦桥	W5	13.1	悬铃木	垂柳	构树	水杉		
	华新公园	W6	16.9	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	水杉	
	卢蔡路	W7	19.4	红叶李	构树	水杉			
	青龙寺	W8	22.0	红叶李	银杏	构树	水杉		
南方向	九九园	S1	4.0	悬铃木	构树	水杉			
South direction	康健园	S2	7.1	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	构树	水杉
	梅陇三村	S3	10.4	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	构树	水杉
	马西浜桥	S4	15.1	红叶李	悬铃木	垂柳	构树	水杉	
	六磊塘桥	S5	16.8	银杏	垂柳	构树	水杉		
	吴泾科技园	S6	20.2	红叶李	银杏	垂柳	构树	水杉	
	华东师大闵行校区	S7	22.9	红叶李	悬铃木	银杏	垂柳	构树	水杉
	中华学院	S8	29.7	红叶李	银杏	垂柳	构树	水杉	
	中国外运	S9	30.4	红叶李	银杏	构树	水杉		
	航南公路	S10	33.3	红叶李	银杏	构树	水杉		

1.3　观测要求

观测植株的挑选主要参照《中国物候观测方法》[46],具体要求如下:所选植株均已成年,且开花结实 3 年以上,无病虫害、生长健壮、胸径大小相近;每个物种在每个观测样点选取 3—5 株作为目标植物;选定的植株尽量保持其自然生长,不宜施肥、修剪、移植等。对观测样点上的植物每日观测一次(大风、下雨等恶劣天气情况除外),为避免系统误差,对目标树种进行定人、定点、定位、定枝条观测。观测主要使用长焦单反数码相机拍摄,同时记录样点现场及周边的土地利用和建筑分布等状况[45]。

1.4　数据处理方法

通过数码相机记录的照片,判读样点上所有植株个体的物候期,并换算为儒略日(Julian day),以平均数代表该物种的物候期。物候期判读的标准,爆芽期:芽的幼叶露出、鳞片裂开、顶端出现新鲜颜色尖端或形成新的绿色叶芽;展叶始期:第一片叶子开始平展;展叶盛期:半数以上枝条的小叶完全展开。将样点上各物种物候期与距离中心城区样点的直线距离进行线性回归,探讨城市程度与植物物候期之间的定量关系。所有数据处理使用 SigmaPlot 12.5 软件。

2　结果

2.1　爆芽期在城-乡梯度上的变化及其与城市化程度的关系

在市区到农村的城市化梯度上,各物种爆芽期随着距市区距离增大而逐渐延迟。红叶李、构树、水杉、银杏和悬铃木的爆芽期与距市区距离存在显著的线性关系(图 2)。悬铃木爆芽期随城市化梯度变化趋势最为明显,距市区距离每增加 1 km 物候延迟 0.4 d($R^2=0.9667$, $P<0.0002$)。其次是银杏,距市区距离每增加 1 km 物候延迟 0.3 d($R^2=0.5398$, $P=0.0018$),响应最慢的是构树,距市区距离每增加 1 km 物候延迟 0.06 d($R^2=0.3704$, $P=0.0209$)。

各物种的爆芽期均存在市区比农村提前的趋势,但存在波动。市中心测点的红叶李的爆芽期比最远点航南公路(33.3 km)提前 4.2 d,比中国外运(30.4 km)提前 4.8 d。市中心测点的构树的爆芽期比中华学院(29.7 km)提前 2.5 d。市中心测点的水杉的爆芽期比航南公路提前 7.1 d。但是,与市中心测点相比,马西浜桥测点(15.1 km)红叶李的爆芽期为同一天,构树的爆芽期则早 0.3 d,这可能与该测点紧邻汽修厂及其他工厂有关。水杉的爆芽期从市中心测点至马西浜桥测点几乎没有差异,马西浜桥以外则明显延迟。银杏的爆芽期在吴泾科技园(20.2 km)比市中心测点提前 0.8 d。

2.2　展叶期在城-乡梯度上的变化及其与城市化程度的关系

展叶期分为展叶始期和展叶盛期两个物候期。展叶始期在城市化梯度上的格局与爆芽期相似,水杉、银杏和悬铃木的展叶始期与距市区距离之间存在显著的线性关系,基本呈现随着距市区距离的增大而延迟的趋势。距市区距离每增加 1 km,水杉物候延迟 0.2 d($R^2=0.6287$, $P=0.0002$, 图 3),悬铃木物候延迟 0.2 d($R^2=0.5855$, $P=0.0163$, 图 3),银杏物候延迟 0.1 d($R_2=0.3647$, $P=0.0491$, 图 3)。水杉的展叶始期对城市化梯度变化的响应最快(斜率为 0.2145),银杏次之(斜率为 0.1648)。水杉的展叶始期在丰庄绿地(4.3 km)和盐仓浦桥(13.1 km)分别比市中心测点提前了 0.7 d 和 0.3 d。红叶李和垂柳的展叶始期呈现随距市中心距离的增大而延迟的趋势,但与距市中心距离之间无显著线性关系(图 3),尤其在马西浜桥(15.1 km)、吴泾科技园(20.2 km)和华东师大闵行校区(22.9 km)三个测点明显较早。

展叶盛期在城市化梯度上随着距市区距离的增大呈现逐渐延迟的趋势。展叶盛期在城市化梯度的响应良好,红叶李、水杉、银杏、悬铃木和垂柳的展叶盛期与距市中心的距离呈显著线性关系,其中悬铃木展叶盛期的变化趋势最为明显,延迟 0.3 d/km($R^2=0.5242$, $P=0.0274$, 图 4)。垂柳展叶盛期推迟最不明显,为 0.1 d/km($R^2=0.4428$, $P=0.0094$, 图 4)。虽然各物种的展叶盛期均存在市区比农村提前的趋势,但存在波动。在距市中心 5—15 km 范围内,个别样点比市中心测点的展叶盛期提前。

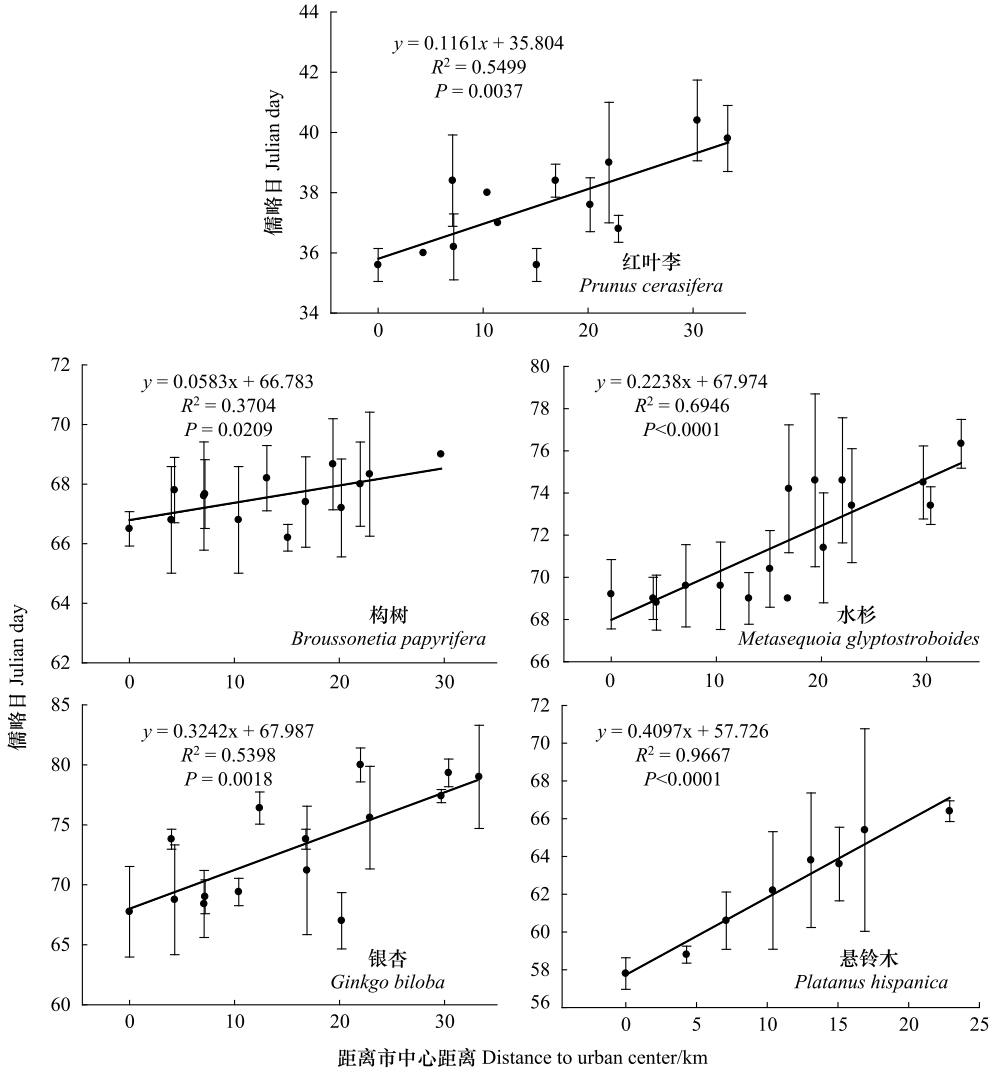

图 2 城-乡梯度上爆芽期的物候格局

Fig.2 Phenological patterns of bud burst along the urban-rural gradient

3 讨论

城市化影响植物的物候,但对物候期变化的解释程度因物种而异。植物爆芽和展叶物候期与城市化程度之间存在线性关系。多数局地或中等尺度上城市化对植物物候的影响研究,由于缺乏足够的物候观测点,会以城乡二元划分法来对比分析城市化对植物物候的影响[47—49]。这种划分方法方便对比植物物候的城乡差异,但无法展示植物物候在城市化梯度上的变化格局及其细节,以及物候期与城市化之间的关系。采用物候梯度观测方法,可以建立植物物候期与城市化代理指标之间的定量关系,发现大多数的爆芽和展叶物候期与离市中心距离存在显著的线性关系,离市中心的距离对物候延迟时间的解释度在 31.5%(红叶李的展叶盛期)和 96.7%(悬铃木的爆芽期)之间。可见,城市化程度作为一种综合指标对植物物候的影响相当大。但是近些年来也有研究表明,与城市化有关的混杂因素会对植物物候的研究造成干扰,包括但不限于气候变化、土壤条件、城市环境等多种因素[15, 50],例如土壤水分、养分和土壤干旱[51—54]、温室气体的浓度(例如二氧化碳)和主要污染物[55]、城市局地小气候[56]、城市夜间灯光照明[57],以及农村和城市的植物种群遗传信息的差异[58]等。因此,未来关于物候机制的研究,还需要加强实验设计,考虑更多的影响要素,来深入揭示城市化对

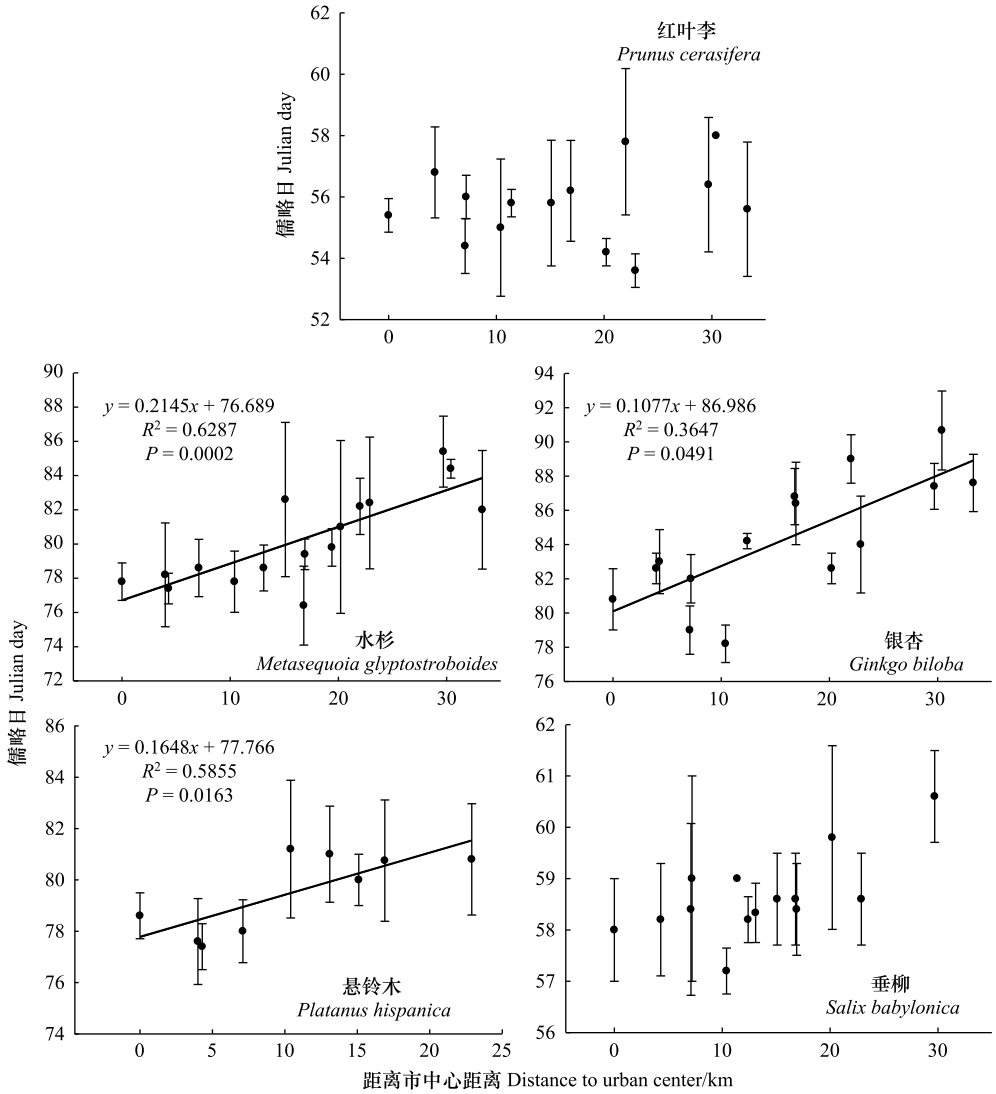

图 3　城-乡梯度上展叶始期的物候格局

Fig.3　Phenological patterns of leaf unfolding along the urban-rural gradient

植物物候的影响机制。此外,引入更多的新技术和新方法,拓宽物候信息的捕捉手段也非常重要,比如运用无人机获取高空间分辨率的城市植物物候数据[59],运用车载行车记录仪记录的城市树木的时间序列图像提取物候信息[60]等,都是提升物候学研究潜力的有效手段。

城乡梯度上植物的爆芽和展叶物候随距市中心离增加而延迟,对城市化程度的响应各异。本研究对六种植物物候在城乡梯度上的格局进行调查,发现市区物候基本比农村物候提前,这与前人关于植物物候城乡差异的研究结果相符[61—62]。植物物候在城-乡梯度上具有延迟的趋势,基本都随着距市中心距离的增大而延迟,但存在波动。这种波动可能有两种原因:一是上海城市景观格局在城-乡梯度上存在较大差异[34, 40];二是植物周围的环境弱化了城市化对物候期的影响。另外,我们发现城-乡梯度上植物物候期延迟趋势的强度存在物候期差异和种间差异。对于延迟趋势强度的物候期差异,整体上爆芽期的延迟趋势强度要高于其他物候期。其原因可能是芽受气温升高影响,还需要一定的低温条件,以及适宜的光周期才能萌动[63],较多的环境因子使爆芽期对城市化造成的城乡气候差异更加敏感。对于延迟趋势强度的种间差异,在爆芽期,悬铃木延迟趋势最为明显;而在展叶始期,水杉延迟趋势最强;展叶盛期,悬铃木比其他物种的延迟趋势更大;开花始期和开花盛期两个物候期,构树都是延迟趋势最大的物种。早春植物物候(本研究中 6 个物种皆为早春植物)

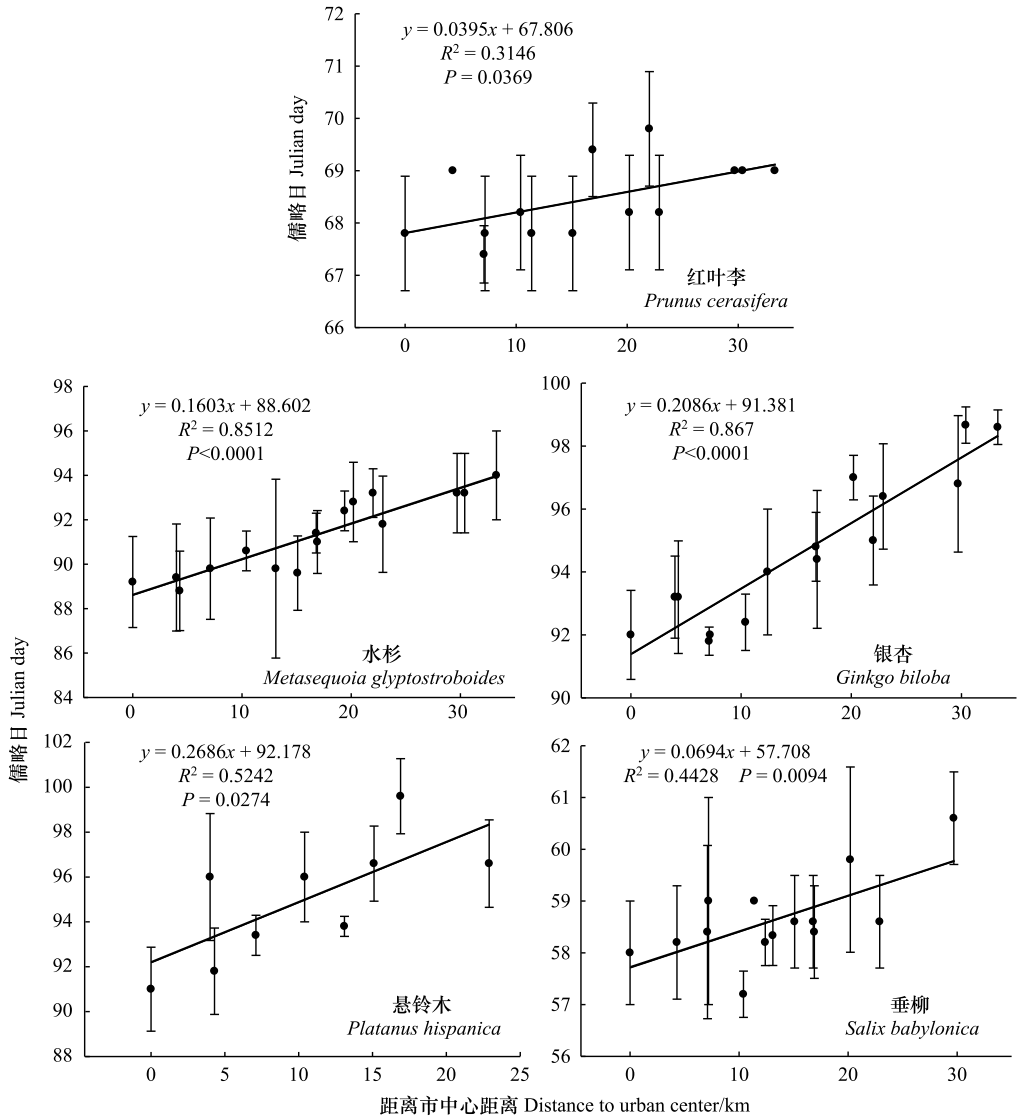

图 4 城-乡梯度上的展叶盛期的物候格局

Fig.4 Phenological patterns of full leaf unfolding along the urban-rural gradient

对城市热岛或全球气候变化造成的气候变暖的响应强烈[48,64],但其变异性也比较大[61]。不同物种对气候变化的响应存在差异[65],可能是导致城-乡梯度上物候期延迟趋势强度存在差异的原因。

其他环境要素会影响植物物候期,扰乱城-乡梯度上的物候与城市化程度之间的定量关系。在马西浜桥(15.1 km)观测点上,构树的爆芽期比市中心观测点提前了 0.3 d;梅陇三村(10.4 km)观测点上,垂柳的展叶盛期比市中心观测点提前了 1.3 d;在六磊塘桥(16.8 km)和吴泾科技园(20.2 km)观测点,垂柳的展叶始期分别比市中心观测点提前 3 d 和 2 d。这些观测点的异常可能是观测的目标植物紧邻工厂,人为热排放、污染或者其他人为影响较大,导致物候期提前。黄晓银等在北京的研究发现,乔灌木物种的生长期在温度较高的工业区比温度较低的游览区提前 10—15 d 开始,晚 15—17 d 结束[66]。植物受到来自工厂的污染、废热排放的影响,使其生长环境变得恶劣,进而影响了植物物候。除了温度,其他环境因子,如降水也会影响植物物候的格局[67],导致物候在城-乡梯度上的波动和变异。植物物候变化涉及气候等环境因素变化和生物之间复杂的相互关系,近些年来有研究指出城市化不止通过改变温度,还通过其他机制影响植物物候,未来需要仔细量化城市化中的复杂因素来深入研究城市化对植物物候的影响[68]。

4　结论

本研究得出如下主要结论:在上海市的城乡梯度上,6 种城市木本植物的爆芽和展叶物候期呈现随着距市中心距离的增加而延迟的趋势。爆芽期延迟时间为 3 d(构树)到 15 d(银杏),展叶始期延长时间为 4 d(垂柳)到 13 d(银杏),展叶盛期延长时间为 3 d(红叶李)到 9 d(悬铃木)。城市化程度与爆芽和展叶物候期之间存在显著的线性关系,城市化代理指标距市中心距离可以解释物候期延迟的 31.5%—96.7%,可以作为植物物候预测的主要因子之一。

致谢:感谢胡瀚文、陈国建、魏本胜、程晓云、王明祖等同学在物候野外观测中给予的帮助。

参考文献(References):

[1] 魏瑶, 马志远, 周佳颖, 张振华. 模拟增温改变青藏高原植物繁殖物候及植株高度. 植物生态学报, 2022, 46(9): 995-1004.

[2] Yang L, Zhao S Q. A stronger advance of urban spring vegetation phenology narrows vegetation productivity difference between urban settings and natural environments. Science of the Total Environment, 2023, 868: 161649.

[3] 肖芳, 桑婧, 王海梅. 气候变化对内蒙古鄂温克旗典型草原植物物候的影响. 生态学报, 2020, 40(8): 2784-2792.

[4] 李晓婷, 郭伟, 倪向南, 卫晓依. 高寒草甸植物物候对温度变化的响应. 生态学报, 2019, 39(18): 6670-6680.

[5] 代武君, 金慧颖, 张玉红, 周志强, 刘彤. 植物物候学研究进展. 生态学报, 2020, 40(19): 6705-6719.

[6] 李雪莹, 朱文泉, 李培先, 谢志英, 赵涔良. 气候变暖背景下青藏高原草本植物物候变化空间换时间预测. 植物生态学报, 2020, 44(7): 742-751.

[7] 胡植, 王焕炯, 戴君虎, 葛全胜. 利用控制实验研究植物物候对气候变化的响应综述. 生态学报, 2021, 41(23): 9119-9129.

[8] Lindh B C, McGahan K A, Bluhm W L. Changes in urban plant phenology in the Pacific Northwest from 1959 to 2016: anthropogenic warming and natural oscillation. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(9): 1675-1684.

[9] Liu Q A, Piao S L, Fu Y H, Gao M D, Peñuelas J, Janssens I A. Climatic warming increases spatial synchrony in spring vegetation phenology across the Northern Hemisphere. Geophysical Research Letters, 2019, 46(3): 1641-1650.

[10] Liu H Y, Lu C Y, Wang S D, Ren F, Wang H. Climate warming extends growing season but not reproductive phase of terrestrial plants. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(5): 950-960.

[11] Keenan T F, Gray J, Friedl M A, Toomey M, Bohrer G, Hollinger D Y, Munger J W, O'Keefe J, Schmid H P, Wing I S, Yang B, Richardson A D. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. Nature Climate Change, 2014, 4(7): 598-604.

[12] Kross A S E, Roulet N T, Moore T R, Lafleur P M, Humphreys E R, Seaquist J W, Flanagan L B, Aurela M. Phenology and its role in carbon dioxide exchange processes in northern peatlands. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(7): 1370-1384.

[13] Ware I M, Van Nuland M E, Schweitzer J A, Yang Z, Schadt C W, Sidak-Loftis L C, Stone N E, Busch J D, Wagner D M, Bailey J K. Climate-driven reduction of genetic variation in plant phenology alters soil communities and nutrient pools. Global Change Biology, 2019, 25(4): 1514-1528.

[14] Wohlfahrt G, Tomelleri E, Hammerle A. The urban imprint on plant phenology. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(12): 1668-1674.

[15] Jochner S, Menzel A. Urban phenological studies-Past, present, future. Environmental Pollution, 2015, 203: 250-261.

[16] Qiu T, Song C H, Li J X. Impacts of urbanization on vegetation phenology over the past three decades in Shanghai, China. Remote Sensing, 2017, 9(9): 970.

[17] Kareiva P, Watts S, McDonald R, Boucher T. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. Science, 2007, 316(5833): 1866-1869.

[18] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864): 756-760.

[19] Luck M, Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the *Phoenix* metropolitan region, Arizona, USA. Landscape Ecology, 2002, 17(4): 327-339.

[20] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3249-3263.

[21] Buyantuyev A, Wu J G. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and

socioeconomic patterns. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 17-33.

[22] Qiu T, Song C H, Zhang Y L, Liu H S, Vose J M. Urbanization and climate change jointly shift land surface phenology in the northern mid-latitude large cities. Remote Sensing of Environment, 2020, 236: 111477.

[23] Neil K L, Landrum L, Wu J G. Effects of urbanization on flowering phenology in the metropolitan phoenix region of USA: Findings from herbarium records. Journal of Arid Environments, 2010, 74(4): 440-444.

[24] Ohashi Y, Kawakami H, Shigeta Y, Ikeda H, Yamamoto N. The phenology of cherry blossom (*Prunus yedoensis* "Somei-yoshino") and the geographic features contributing to its flowering. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(5): 903-914.

[25] Fisogni A, Hautekèete N, Piquot Y, Brun M, Vanappelghem C, Michez D, Massol F. Urbanization drives an early spring for plants but not for pollinators. Oikos, 2020, 129(11): 1681-1691.

[26] 孟丹, 刘芯蕊, 张聪聪. 北京市植物物候对热岛效应的响应. 生态学杂志, 2021, 40(3): 844-854.

[27] Jeong J H, Ho C H, Linderholm H W, Jeong S J, Chen D L, Choi Y S. Impact of urban warming on earlier spring flowering in Korea. International Journal of Climatology, 2011, 31(10): 1488-1497.

[28] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, Liu S G. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 272-281.

[29] 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): L11209.

[30] Jochner S, Heckmann T, Becht M, Menzel A. The integration of plant phenology and land use data to create a GIS-assisted bioclimatic characterisation of Bavaria, Germany. Plant Ecology & Diversity, 2011, 4(1): 91-101.

[31] 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.

[32] Ahmed G, Zan M, Helili P, Kasimu A. Responses of vegetation phenology to urbanisation and natural factors along an urban-rural gradient: a case study of an urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains. Land, 2023, 12(5): 1108.

[33] Su Y B, Wang X M, Gong C, Chen L, Cui B W, Huang B B, Wang X K. Advances in spring leaf phenology are mainly triggered by elevated temperature along the rural-urban gradient in Beijing, China. International Journal of Biometeorology, 2023, 67(5): 777-791.

[34] 李俊祥, 王玉洁, 沈晓虹, 宋永昌. 上海市城乡梯度景观格局分析. 生态学报, 2004, 24(9): 1973-1980.

[35] Deng L J, Lin Y, Yan L, Tesfamichael S, Billen R, Yao Y J, Yao W, Chen X W, Fang X, Wang C, Jing X. Urban plant phenology monitoring: expanding the functions of widespread surveillance cameras to nature rhythm understanding. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2019, 15: 100232.

[36] Li X C, Zhou Y Y, Asrar G R, Mao J F, Li X M, Li W Y. Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States. Global Change Biology, 2017, 23(7): 2818-2830.

[37] Qiu T, Song C H, Clark J S, Seyednasrollah B, Rathnayaka N, LI J X. Understanding the continuous phenological development at daily time step with a Bayesian hierarchical space-time model: impacts of climate change and extreme weather events. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111956

[38] 代奎, 曾秀, 王鑫洋, 薛乾怀, 杜彦君. 春季增温对亚热带木本植物物候和生长的影响. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3881-3889.

[39] 丛楠, 张扬建, 朱军涛. 北半球中高纬度地区近 30 年植被春季物候温度敏感性. 植物生态学报, 2022, 46(2): 125-135.

[40] Li J X, Li C, Zhu F G, Song C H, Wu J G. Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005. Landscape Ecology, 2013, 28(8): 1545-1565.

[41] Wu C Y, Li C, Ouyang L K, Xiao H R, Wu J, Zhuang M H, Bi X, Li J X, Wang C F, Song C H, Qiu T, Haase D, Hahs A, Finka M. Spatiotemporal evolution of urbanization and its implications to urban planning of the megacity, Shanghai, China. Landscape Ecology, 2023, 38(4): 1105-1124.

[42] 胡瀚文, 魏本胜, 沈兴华, 李俊祥. 上海市中心城区城市用地扩展的时空特征. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3439-3445.

[43] Qiu T, Song C H, Li J X. Deriving annual double-season cropland phenology using landsat imagery. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3275.

[44] 胡瀚文. 城市景观格局对城乡梯度上植物物候的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.

[45] 赵生寿. 城市化梯度上植物物候动态及其响应尺度[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.

[46] 宛敏渭,刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1979.

[47] Mimet A, Pellissier V, Quénol H, Aguejdad R, Dubreuil V, Rozé F. Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*. International Journal of Biometeorology, 2009, 53(3): 287-298.

[48] Neil K, Wu J G. Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review. Urban Ecosystems, 2006, 9(3): 243-257

[49] Dallimer M, Tang Z Y, Gaston K J, Davies Z G. The extent of shifts in vegetation phenology between rural and urban areas within a human-dominated region. Ecology and Evolution, 2016, 6(7): 1942-1953.

[50] 陶泽兴, 戴君虎. 中国常见木本植物春季展叶物候及叶冻害变化. 地理科学进展, 2023, 42(4): 766-781.

[51] Liu Z C, Fu Y H, Shi X R, Lock T R, Kallenbach R L, Yuan Z Y. Soil moisture determines the effects of climate warming on spring phenology in grasslands. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 323: 109039.

[52] Lian X, Piao S L, Li L Z X, Li Y E, Huntingford C, Ciais P, Cescatti A, Janssens I A, Peñuelas J, Buermann W, Chen A P, Li X Y, Myneni R B, Wang X H, Wang Y L, Yang Y T, Zeng Z Z, Zhang Y Q, McVicar T R. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. Science Advances, 2020, 6(1): eaax0255.

[53] Fu Y H, Piao S L, Delpierre N, Hao F H, Hänninen H, Geng X J, Peñuelas J, Zhang X, Janssens I A, Campioli M. Nutrient availability alters the correlation between spring leaf-out and autumn leaf senescence dates. Tree Physiology, 2019, 39(8): 1277-1284.

[54] Andresen C G, Tweedie C E, Lougheed V L. Climate and nutrient effects on Arctic wetland plant phenology observed from phenocams. Remote Sensing of Environment, 2018, 205: 46-55.

[55] Jochner S, Markevych I, Beck I, Traidl-Hoffmann C, Heinrich J, Menzel A. The effects of short- and long-term air pollutants on plant phenology and leaf characteristics. Environmental Pollution, 2015, 206: 382-389.

[56] Parece T, Campbell J. Intra-urban microclimate effects on phenology. Urban Science, 2018, 2(1): 26.

[57] Hopkins G R, Gaston K J, Visser M E, Elgar M A, Jones T M. Artificial light at night as a driver of evolution across urban-rural landscapes. Frontiers in Ecology and the Environment, 2018, 16(8): 472-479.

[58] Gorton A J, Moeller D A, Tiffin P. Little plant, big city: a test of adaptation to urban environments in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*). Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2018, 285(1881): 20180968.

[59] Klosterman S, Melaas E, Wang J A, Martinez A, Frederick S, O'Keefe J, Orwig D A, Wang Z S, Sun Q S, Schaaf C, Friedl M, Richardson A D. Fine-scale perspectives on landscape phenology from unmanned aerial vehicle (UAV) photography. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 397-407.

[60] Boyd D S, Crudge S, Foody G. Towards an automated approach for monitoring tree phenology using vehicle dashcams in urban environments. Sensors, 2022, 22(19): 7672.

[61] Roetzer T, Wittenzeller M, Haeckel H, Nekovar J. Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 60-66.

[62] Jochner S C, Sparks T H, Estrella N, Menzel A. The influence of altitude and urbanisation on trends and mean dates in phenology (1980-2009). International Journal of Biometeorology, 2012, 56(2): 387-394.

[63] Caffarra A, Donnelly A. The ecological significance of phenology in four different tree species: effects of light and temperature on bud burst. International Journal of Biometeorology, 2011, 55(5): 711-721.

[64] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. Science, 2002, 296(5573): 1689-1691.

[65] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in *Alberta*, Canada: links to ocean temperature. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 53-59.

[66] 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): 256-264.

[67] Peñuelas J, Filella I, Zhang X Y, Llorens L, Ogaya R, Lloret F, Comas P, Estiarte M, Terradas J. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. The New Phytologist, 2004, 161(3): 837-846.

[68] Li D J, Stucky B J, Deck J, Baiser B, Guralnick R P. The effect of urbanization on plant phenology depends on regional temperature. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(12): 1661-1667.