北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应

邢小艺 张梦园 李晓璐 范舒欣 董丽

Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees

Xing Xiaoyi, Zhang Mengyuan, Li Xiaolu, Fan Shuxin, Dong Li

引用本文:
邢小艺, 张梦园, 李晓璐, 范舒欣, 董丽. 北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1):119–130. doi: 10.12171/j.1000–1522.20210546
Xing Xiaoyi, Zhang Mengyuan, Li Xiaolu, Fan Shuxin, Dong Li. Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1):119–130. doi: 10.12171/j.1000–1522.20210546

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

植物功能性状及其叶经济谱对城市热环境的响应
Response of plant functional traits and leaf economics spectrum to urban thermal environment
北京林业大学学报, 2018, 40(9): 72–81. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180132

阔叶红松混交林不同大小林隙地表温度和浅层土壤温度的时空异质性
Heterogeneity of soil surface temperature and shallow soil temperature in different size gaps of broadleaved *Pinus koraiensis* forest
北京林业大学学报, 2019, 41(9): 108–121. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180390

典型阔叶红松林叶面积指数的空间异质性
Spatial heterogeneity of leaf area index in a typical mixed broadleaved–Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2018, 40(11): 1–11. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170468

板栗冠层光合特性的空间异质性研究
Spatial heterogeneity of photosynthetic characteristics in Chinese chestnut canopy
北京林业大学学报, 2020, 42(10): 71–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200059

下垫面覆盖类型变化对城市热岛的影响
Effects of land surface type changes on urban heat island: a case study of Chaoyang District, Beijing
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 99–109. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190045

广东省森林土壤养分异质性析因
Analysis on the heterogeneity of forest soil nutrients in Guangdong Province of southern China
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 90–101. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200164

DOI:10.12171/j.1000−1522.20210546

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应

邢小艺[1,2]　张梦园[1]　李晓璐[1]　范舒欣[1]　董　丽[1]
（1. 北京林业大学园林学院，城乡生态环境北京实验室，北京 100083；2. 华中农业大学风景园林系，湖北 武汉 430070）

摘要:【目的】城市化进程影响下，城市内部热环境的空间分布不均导致植物物候的空间异质性突出。秋色盛期作为落叶树种生长季的终点，其空间异质性对于城市植被的年周期固碳量及整个城市生态系统的初级生产力具有重要影响，同时会引起秋季季相景观的空间变化，是监测城市生态及景观动态的一个关键角度，值得深入探究。本研究以此为切入点，旨在揭示北京城市环境中秋色盛期的空间异质性特征及其对下垫面热环境的响应。**【方法】**本研究以北京主城区西北城郊梯度上 9 处公园绿地中的 5 种秋色叶树种为研究对象，基于地面物候观测对 2017—2019 年的秋色盛期数据进行采集，基于 MODIS 地温反演对样地热环境数据进行采集，对秋色盛期空间差异及其与秋季热环境的相关性进行分析。**【结果】**(1)北京主城区各树种的秋色盛期整体发生于 10 月中旬至 12 月上旬、集中于 11 月上中旬，由早到晚依次为洋白蜡、元宝枫、银杏、水杉、旱柳，且银杏雌株的秋色盛期显著早于雄株。(2)各树种秋色盛期整体上由二环—三环—五环—五环外逐渐提前，城郊物候天数差异达(10.1 ± 0.3) d；样地间物候期整体差异显著，尤其四环外样地的秋色盛期显著早于三环内。(3)各树种秋色盛期与样地秋季平均地温(LST_a)呈显著正相关($P < 0.01$)，表明北京主城区内秋季地表热量的大量积累会导致秋色盛期延后；各树种秋色盛期对 LST_a 空间差异的响应敏感度平均为(4.11 ± 0.83) d/℃，以洋白蜡和水杉响应最为敏感。**【结论】**北京主城区的秋色盛期表现出对城市秋季热环境空间差异的显著响应，城市热岛效应是未来气候变化的一个缩影，城市环境中物候期对热环境空间差异的响应可反映未来气候变化对植物物候的潜在影响，即具有“空间代替时间”的研究价值。

关键词：秋色盛期；空间异质性；城市热环境；地表温度；株间差异
中图分类号：S731.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)01−0119−12
引文格式：邢小艺，张梦园，李晓璐，等. 北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应［J］. 北京林业大学学报，2024，46(1)：119−130. Xing Xiaoyi, Zhang Mengyuan, Li Xiaolu, et al. Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 119−130.

Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees

Xing Xiaoyi[1,2]　Zhang Mengyuan[1]　Li Xiaolu[1]　Fan Shuxin[1]　Dong Li[1]
(1. Beijing's Laboratory of Urban-Rural Ecological Environment, School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Landscape Architecture Department, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: [**Objective**] Under the impact of urbanization, the spatial unevenness of thermal environment

收稿日期: 2021−12−23　**修回日期:** 2022−07−17
基金项目: 2018 北京园林绿化增彩延绿科技创新工程科研项目(CEG-2018-01)，中央高校基本科研业务费专项(2662022YLQD002)。
第一作者: 邢小艺，博士，讲师。主要研究方向：园林植物应用与园林生态。Email: xingxiaoyi@mail.hzau.edu.cn　地址：430070 湖北省武汉市洪山区狮子山街 1 号。
责任作者: 董丽，博士，教授。主要研究方向：园林植物应用与园林生态。Email: dongli@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

within urbanized area leads to more prominent spatial heterogeneity of urban plant phenology. The spatial unevenness of leaf coloring date (LCD), the end of deciduous trees' growing season has a far-reaching influence on the annual carbon sequestration of urban vegetation and the primary productivity of urban ecosystem, also causes spatial variation in the autumn seasonal aspect. Therefore, the spatial heterogeneity of leaf senescence is one critical cut-in point for monitoring urban ecology and landscape dynamics, and deserves profound exploration. Regarding this point, this research aimed to explore the spatial heterogeneity characteristics of leaf coloring date (LCD) and the phenological response to thermal environment of underlying surface in the highly urbanized Beijing City. [**Method**] This research selected five autumn-color tree species as the research objects that distributed in 9 green spaces along the urban-suburb gradient in Beijing's northwestern urban area. We applied ground phenological observation to collect the LCD data during 2017−2019, and collected thermal environment data by retrieving MODIS land surface temperature (LST). Then, we analyzed the spatial difference of LCD and its correlation with the autumn thermal environment. [**Result**] (1) the LCD of various tree species in Beijing's urban area occurred during mid-October to early December and clustered in early and mid-November, with the species order of LCD ranked as follows: *Fraxinus pennsylvanica*, *Acer truncatum*, *Ginkgo biloba*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Salix matsudana*. The LCD for female ginkgo trees occurred significantly earlier than male ones. (2) The LCD of various species gradually advanced from the central urban area in 2nd Ring to the outskirts beyond 5th Ring, with the spatial range of LCD reaching (10.1 ± 0.3) d in average. A significant phenological difference existed among different sample plots and the LCD outside of 4th Ring occurred significantly earlier than that within 3rd Ring. (3) The LCD of various species showed a significantly positive correlation with the mean LST in autumn-LST_a ($P < 0.01$), which means the high accumulation of surface heat in autumn can drive leaf senescence to delay in Beijing's urban area. The response sensitivity of LCD to the spatial variation of LST_a was (4.11 ± 0.83) d/℃ with *F. pennsylvanica* and *M. glyptostroboides* as the most sensitive species. [**Conclusion**] The leaf coloring date shows a significant response to the spatial variation of surface thermal environment in Beijing's urban area. UHI effect represents the microcosms of long-term climate change, and the phenological response to thermal environment variation in urban area can reflect the potential impact of future climate change on plant phenology, i.e., a space-time substitution.

Key words: leaf coloring date; spatial heterogeneity; urban thermal environment; land surface temperature; interindividual difference

工业革命时代以来，人类经济社会的快速发展显著改变了城市热环境，并对城市植被的生长发育节律产生突出影响。20 世纪 80 年代末是全球气候变化及城市化发展的重要拐点[1]，在气候变暖及城市热岛的协同作用下，城市热环境发生急剧改变，加剧了城市植物物候的时空异质性[2−3]，进而对城市生态[4−6]、植物景观[7−8]及公众健康[9]等造成突出影响。

已有研究表明，当前城市地区的升温程度已超过未来几十年全球气温的预测变化量[10]，因而城市环境是观察和模拟植物物候如何响应全球变暖的绝佳场所[11]，物候期的空间异质性及其对城市热环境的响应可反映未来气候变化对植物物候的潜在影响[12−13]，即具有“空间代替时间”(space-for-time substitution)的重要研究价值。城乡物候差异是城市植物物候空间异质性的一个典型现象，诸多研究表明，受热岛效应影响，与乡村或郊区相比，城区的春季物候明显提前[14−16]，秋季物候延后[17−18]，生长季延长[13,19]；此外城市内部的物候期也呈现空间异质性现象，且生长季物候和叶衰老物候分别受到春季、秋季热环境空间差异的显著影响[13,17,20−21]。

北京作为城市化水平突出的超大城市，其城市化区域自 20 世纪 80 年代以来由中心二环区域至周边呈环状持续扩张，热岛效应突出。随着城市下垫面景观格局的复杂性增加，城市热环境的空间异质性增强[14,22]，从而导致城市内部植物物候的空间异质性程度和复杂性愈加显著[23−24]，而当前聚焦北京地区植物物候空间异质性的研究较少。此前，王静等[25]探究了 7 种春花草本的开花物候在北京城市化梯度上的变化特征，发现其花期从市中心至五环外显著延后且与样地热有效积温呈显著负相关。尚未有研

究关注北京城市环境中秋色盛期物候的空间差异及其响应机制。

秋色盛期作为落叶树树叶衰老进程的关键阶段及营养生长的终点，是植株落叶前完成营养物质回收，保护其免受冬季冻害的关键物候阶段，也是下一个年周期植物正常重启生长发育的重要保障[26]。秋色盛期变动关系到植株生长季长短及每年的碳吸收和养分积累，进而会影响整个城市生态系统的生产力[5,27]。同时秋色叶作为北京等温带城市植物景观的关键构成，秋色盛期的时空动态会对城市秋色观赏季的时间安排及季相景观产生直接影响[28]。由此可见，秋色盛期物候对于城市树木生长、生态系统和植物景观十分重要，因而对秋色盛期的空间异质性进行探究正是了解城市热岛效应如何影响城市景观及生态的重要切入点。以此为出发点，本研究对北京主城区内主要秋色叶树种秋色盛期的空间异质性特征进行了探究，旨在揭示城市热环境空间差异对以秋色盛期为代表的叶衰老物候的影响，在城市气候急剧变化的背景下，从植物物候的角度为城市植被的可持续营建、监测及管理提供一定参考。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

北京（39°28′～41°03′N，115°25′～117°35′E）位于华北平原西北边缘，西部和北部被太行山、燕山余脉环抱。温带季风气候，四季分明，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥。春秋季短促，植物景观丰富；夏冬季漫长，季相相对单调。目前北京市主城区集中分布于六环内，以西北象限的城市化水平最为突出。

本研究以北京主城区内城市化最突出的西北象限为研究区域，涵盖西城区、东城区和海淀区。为探究各树种秋色盛期从中心城区至西北近郊的空间递变规律，样地设置在北京六环内，从南二环至北–西北方向上分布的多处城市绿地。样地选择要求绿地建成期较长，树种丰富，植被茂盛，树木养护条件良好，植株生长发育健康（无病虫害等胁迫），满足多树种物候观测的基本条件。根据此标准，选择以下 9 处公园绿地作为研究样地：北京植物园、颐和园、奥林匹克森林公园南园（以下简称奥森南园）、地坛公园、玉渊潭公园、北海公园、景山公园、陶然亭公园、龙潭公园。各样地分布于不同环区，距北京城市中心—天安门广场有不同距离，形成一定城郊梯度分布（图 1）。陶然亭公园、龙潭公园位于南二环，北海公园、景山公园位于北二环，玉渊潭公园、地坛公园分别位于西三环、北三环，奥森南园、颐和园分别位于北五环和西北五环，北京植物园位于五环外。因北京主城区西北部的四环与三环间并无符合条件的绿地，故未在四环环区内设置样地。

1.2　研究对象

研究对象为北京主城区常见的 5 种秋色叶树种：银杏（*Ginkgo biloba*）、旱柳（*Salix matsudana*）、水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）、元宝枫（*Acer truncatum*）、洋白蜡（*Fraxinus pennsylvanica*）。选择这 5 个树种主要出于以下考虑：首先，其在北京园林



图 1　物候观测样地分布

Fig. 1　Distribution of sample plots for phenological observation

绿地中应用广泛，在 9 处样地中皆有分布，作为物候观测及研究对象有充足的样本量；再者，其秋色景观突出，叶变色期较为集中，秋色盛期形态特征清晰、明确易识别。5 个树种的秋色盛期形态如图 2 所示。

关于样株的选择，根据《中国物候观测法》[29]，各样地中每一树种选择 10 株以上生长发育良好、长势旺盛、无病虫害等生理胁迫、生长于光照充足空间处的成龄植株作为观测样株，要求各样株尽可能均匀地分布于样地内部，以代表样地物候整体情况。考虑到前人研究发现银杏雌株与雄株的叶衰老期存在一定差异[30–31]，在银杏样株的选择上选取同等株数的雌株和雄株，对其秋色盛期分别观测记录。

1.3 物候数据的采集与处理

1.3.1 物候观测

秋色盛期指植株上 90% 叶片完全变色的日期，用日序表示（day of year，DOY），即自然年自 1 月 1 日起的第 n 日。各树种秋色盛期的物候观测以《中国物候观测方法》[29]为标准，于 2017—2019 年共持续 3 年作为重复，每年由 9 月初降温始观测至 12 月落叶末。各样地物候期由 1～2 名固定观测者以 1～2 d 为观测周期进行持续观测，考虑到秋季叶色变化常于植株经过夜晚低温诱导后发生，故于每日上午 8:00 开始进行观测。

1.3.2 物候数据的处理与计算

以各样地秋色盛期的最大值和最小值之差计算秋色盛期的空间极差。为对各样地多树种的整体秋色盛期进行对比，将每一树种在各样地中的秋色盛期值进行 Z-score 标准化处理，即将不同量级的物候期数据（DOY）转化为统一量度的均值为 0、标准差为 1 的标准化数据[32]。每样地以其中 5 个树种秋色盛期 Z-score 标准化值的均值衡量该样地秋色盛期的整体早晚情况。

1.4 地表温度数据的采集与处理

前人研究表明，城市环境中叶衰老物候的空间差异主要受到秋季热环境空间差异的影响[17]。为探究北京主城区内秋色盛期对热环境空间差异的响应规律，本研究对各样地秋季（9—11 月）地表温度数据（land surface temperature，LST，以下简称地温）进行采集。地温数据来自 MODIS（中分辨率成像光谱仪）的 MOD11A1 产品，时间分辨率为 1 d，空间分辨率为 1 km（实际为 0.93 km）。

1.4.1 MODIS 地温数据的获取

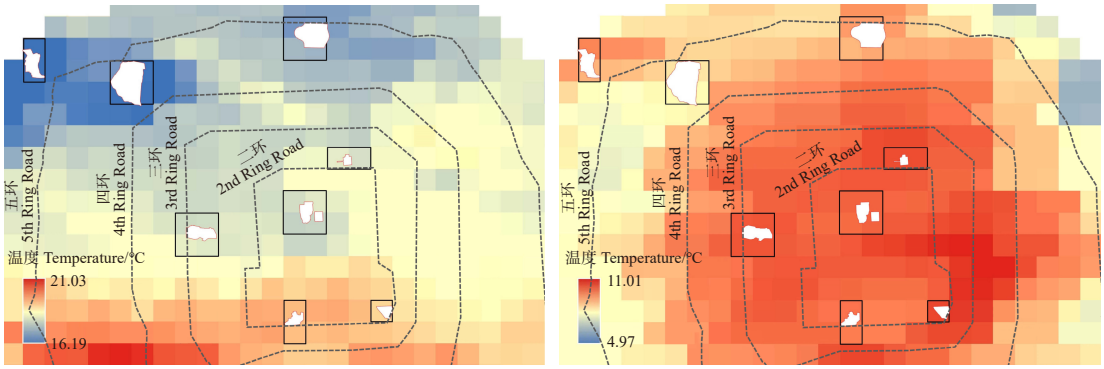
从 NASA-EARTH DATA 数据库下载 2017—2019 年北京地区（h26V04、h26V05）的每日 MOD11A1 产品。使用 MRT 工具对数据进行预处理，包括数据拼接、波段筛选和投影转换，提取 LST_Day_1 km（日间地表温度）及 LST_Night_1 km（夜间地表温度）两个波段的数据以计算日均温。将数据导入 ARCGIS，通过坐标系转换和去除无效值对数据进行进一步校正。受云层遮挡影响，一些日期的 MOD11A1 产品存在部分样地数据缺失的情况。对于本研究，如果某日产品出现日间或夜间样地数据缺失，则该日数据无法支持样地间的日均地温对比，被视为无效。基于此标准对每日产品的数据有效性进行逐一排查，2017—2019 年各年的数据有效天数大于 25%，平均每 4～5 d 即有一日数据有效，故每 5 d 取一次数据。

在 ARCGIS 中导入北京主城区的 Worldview-3 遥感影像，明确各样地的 MODIS 栅格像元范围，每日数据提取各像元的日间地表温度（LST_Day_1 km）和夜间地表温度（LST_Night_1 km）值（图 3）。



图 2 各树种秋色盛期的植株形态

Fig. 2 Plant morphology of various tree species during the leaf coloring date



a 日间地温 Day LST　　b 夜间地温 Night LST

图 3　MOD11A1 产品日间和夜间地温(LST)波段遥感数据(2019 年 10 月 20 日影像)

Fig. 3　Satellite data of day and night land surface temperature(LST) in MOD11A1 product (image of October 20th, 2019)

1.4.2　MODIS 地温数据的处理与计算

MOD11A1 产品的像元大小(1 km × 1 km)与各样地的空间尺度相近，即某样地的整体热环境可用 1 ~ 4 个像元的 LST 数据计算得到。对于位于 1 个像元内的样地，其 LST 值取该像元的数据值；对于跨多个像元的样地，以各像元占该样地面积的比例为权数对各像元的 LST 数据值进行加权平均，计算结果为该样地的整体 LST 值。

通过以下公式将 MODIS 地温数据的像元亮度值换算为摄氏度值[33]。

$$LST_C = 0.02T_D - 273.15 \quad (1)$$

式中：T_D 指 MODIS 地温数据的像元亮度值，LST_C 指地温数据的摄氏度值。

取日间地温、夜间地温的均值为日均地温值。基于日均地温数据计算各样地秋季 9—11 月各月的月均地温，以 9—11 月各月月均地温取平均计算秋季平均地温 LST_a。

1.5　数据分析

1.5.1　北京主城区秋色盛期的空间异质性特征分析

以物候期空间极差反映北京主城区内秋色盛期的城郊物候差异，以样地中各树种秋色盛期 *Z*-score 标准化值的均值来衡量该样地秋色盛期的整体早晚情况并进行差异显著性分析，以揭示北京主城区内秋色盛期的空间异质性特征。

1.5.2　秋色盛期与样地秋季平均地温的 Pearson 相关性分析

以秋季平均地温 LST_a 衡量各样地在秋色物候发育阶段的地表热环境特征，对各样地秋色盛期值与秋季平均地温进行 Pearson 相关性分析及线性拟合，以探究各树种秋色盛期对秋季地表热环境空间差异的响应。以相关系数绝对值 $|r|$、线性拟合度 R^2 衡量各树种秋色盛期与 LST_a 的相关性强弱，以回归系数绝对值 $|k|$ 衡量秋色盛期对 LST_a 空间差异的响应敏感度[34]。

2　结果与分析

2.1　北京主城区各树种秋色盛期的整体特征

根据 2017—2019 年物候数据，北京主城区各树种的秋色盛期整体发生于 10 月中旬至 12 月上旬，集中发生于 11 月上中旬，各树种秋色盛期由早到晚依次排序为洋白蜡、元宝枫、银杏、水杉、旱柳。

洋白蜡的秋色盛期整体发生于 DOY 283—318(10 月 10 日—11 月 14 日)，多年平均为 DOY(300.0 ± 9.1)(10 月 27 日)。元宝枫的秋色盛期整体发生于 DOY 289—324(10 月 16 日—11 月 20 日)，多年平均为 DOY(307.8 ± 6.9)(11 月 4 日)。水杉的秋色盛期整体发生于 DOY 295—330(10 月 22 日—11 月 26 日)，多年平均为 DOY(313.4 ± 7.2)(11 月 9 日)。旱柳的秋色盛期整体发生于 DOY 306—343(11 月 2 日—12 月 9 日)，多年平均为 DOY(326.4 ± 9.3)(11 月 22 日)，显著晚于其他树种。

银杏的秋色盛期整体发生于 DOY 291—329(10 月 18 日—11 月 25 日)，多年平均为 DOY(310.1 ± 6.6)(11 月 6 日)。银杏雌株的秋色盛期显著早于雄株($P < 0.01$)(图 4)。银杏雌株的秋色盛期整体发生于 DOY 291—314(10 月 18 日—11 月 10 日)，多年平均为 DOY(305.6 ± 4.9)(11 月 2 日)；银杏雄株的

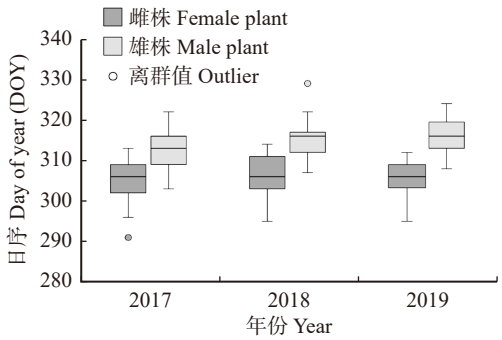


图 4　银杏雌株与雄株的秋色盛期对比

Fig. 4　Comparison in leaf coloring date between female and male ginkgo trees

秋色盛期整体发生于 DOY 303—329(10 月 30 日—11 月 25 日)，多年平均为 DOY(314.6 ± 4.7)(11 月 11 日)，即银杏雌株的秋色盛期比雄株平均提早 9.0 d，雌、雄株秋色盛期的显著差异导致城市绿地中银杏的整体秋色观赏期大大延长。

2.2 北京主城区秋色盛期的空间异质性特征

样地间对比分析发现，各树种秋色盛期最晚出现于中心城区二环内，最早出现于西北郊五环外的北京植物园，城郊物候差异突出。2017—2019 年各树种秋色盛期的空间极差平均达(10.1 ± 0.3) d，其中洋白蜡、元宝枫、水杉、旱柳秋色盛期的空间极差分别平均为(10.2 ± 1.1) d、(9.7 ± 1.5) d、(10.7 ± 2.3) d、(10.5 ± 0.7) d；银杏秋色盛期的空间极差平均为(9.9 ± 0.3) d，雌株及雄株的空间极差分别为(10.4 ± 1.1) d 、(9.2 ± 1.1) d。各树种秋色盛期数据详见表 1。

基于每样地中 5 个树种秋色盛期 *Z*-score 标准化值的均值对各样地秋色盛期整体早晚排序如下：北海公园(0.795 ± 0.216) > 龙潭公园(0.788 ± 0.141) > 陶然亭公园(0.772 ± 0.104) > 玉渊潭公园(0.569 ± 0.196) > 景山公园(0.421 ± 0.204) > 地坛公园(0.307 ± 0.289) > 奥森南园(−0.986 ± 0.119) > 颐和园(−1.204 ± 0.160) > 北京植物园(−1.515 ± 0.224)，即秋色盛期整体上由二环—西三环—北三环—北五环—西北五环—五环外逐渐提前。且各样地的秋色盛期标准化

表 1 2017—2019 年各树种秋色盛期数据（日序）

Tab. 1 Data in leaf coloring date (DOY) of various species during 2017−2019

树种 Tree species	年份 Year	样地 Sample plot								
		北京植物园 Beijing Botanical Garden	颐和园 Summer Palace	奥森南园 South Olympic Forest Park	地坛公园 Ditan Park	玉渊潭公园 Yuyuantan Park	北海公园 Beihai Park	景山公园 Jingshan Park	陶然亭公园 Taoranting Park	龙潭公园 Longtan Park
洋白蜡 *Fraxinus pennsylvanica*	2017	287.5	289.5	290.0	297.2	297.5	297.5	296.0	295.1	298.0
	2018	295.0	297.2	298.9	305.0	303.7	305.5	303.0	306.3	303.3
	2019	299.3	300.5	302.1	308.0	304.7	307.0	306.5	307.0	306.5
	3年平均 Mean of three years	293.9	295.7	297.0	303.4	301.9	303.3	301.8	302.8	302.6
元宝枫 *Acer truncatum*	2017	301.5	302.0	302.5	309.0	308.5	311.0	305.0	309.0	311.0
	2018	299.3	301.5	302.3	305.1	308.2	311.0	310.0	310.7	311.0
	2019	308.1	308.0	309.0	313.5	311.3	316.0	312.5	314.2	314.3
	3年平均 Mean of three years	303.0	303.8	304.6	309.2	309.3	312.7	309.2	311.3	312.1
水杉 *Metasequoia glyptostroboides*	2017	312.5	312.3	313.8	318.0	319.0	319.4	317.0	318.0	321.0
	2018	311.0	308.0	308.8	318.0	317.8	322.0	321.0	319.5	321.5
	2019	313.2	311.5	312.5	319.5	320.0	319.0	318.0	321.0	319.6
	3年平均 Mean of three years	312.2	310.6	311.7	318.5	318.9	320.1	318.7	319.5	320.7
旱柳 *Salix matsudana*	2017	322.2	324.1	325.4	330.0	331.8	329.4	330.0	331.3	333.0
	2018	319.7	323.9	323.3	328.5	327.5	327.6	329.0	330.8	329.6
	2019	318.0	319.8	319.0	325.0	325.4	327.6	326.0	327.3	326.5
	3年平均 Mean of three years	320.0	322.6	322.5	327.8	328.2	328.2	328.3	329.8	329.7
银杏 *Ginkgo biloba*	2017	302.6	305.5	306.8	308.3	311.9	312.8	311.2	309.4	312.4
	2018	304.7	308.0	307.0	311.0	311.1	313.7	311.5	314.7	312.8
	2019	306.0	305.1	307.5	311.0	314.6	314.4	312.8	313.2	313.1
	3年平均 Mean of three years	304.4	306.2	307.1	310.1	312.5	313.6	311.8	312.5	312.7
银杏雌株♀ Female *G. biloba*	2017	297.4	304.3	303.0	305.8	309.1	307.0	308.2	309.3	308.0
	2018	299.7	302.5	300.0	304.8	308.4	308.5	307.4	309.3	309.0
	2019	301.2	303.0	302.7	305.9	309.0	309.0	310.7	307.8	308.5
	3年平均 Mean of three years	299.4	303.3	301.9	305.5	308.8	308.2	308.8	308.8	308.5
银杏雄株♂Male *G. biloba*	2017	307.4	313.7	310.6	317.0	315.6	315.3	314.2	317.8	316.0
	2018	310.5	313.5	313.0	315.7	318.0	317.5	315.4	318.2	317.6
	2019	309.6	313.7	310.0	315.2	319.0	318.4	317.0	317.6	317.5
	3年平均 Mean of three years	309.2	313.6	311.2	315.9	317.5	317.1	315.5	317.9	317.0

注：表中各样地的物候值取自样地内多样株的物候期均值。Note: phenology value for each sample plot takes the average phenology of multiple sampling trees in the sample plot.

值均值与样地距北京城中心的直线距离呈显著负相关（r=−0.956，P < 0.001），体现了树木秋色盛期随着远离城中心逐渐提早的空间递变规律。

各样地秋色盛期整体差异显著（P < 0.001），尤其四环外样地的秋色盛期显著早于三环内（P < 0.001）。而四环外各样地间及三环内各样地间的物候差异较小，五环颐和园、奥森南园的秋色盛期无显著差异（P > 0.05），二环内北海公园、龙潭公园、陶然亭公园及西三环玉渊潭公园的秋色盛期无显著差异（P > 0.05），北二环景山公园与北三环地坛公园的秋色盛期无显著差异（P > 0.05）。

而除了样地间物候期的明显分异，秋色盛期在样地内也呈十分明显的株间差异，以银杏最为突出。图 5 显示：各样地内银杏秋色盛期的株间极差平均达（17.0 ± 2.1）d，株间标准差平均达（4.9 ± 0.5）d，除去不同性别植株物候差异的影响，样地内银杏雌株和银杏雄株秋色盛期的株间极差仍分别达（8.3 ± 1.9）d 、（9.2 ± 3.3）d，株间标准差分别达（2.7 ± 0.6）d 、（3.2 ± 1.1）d。受样地间和样地内株间物候差异的影响，北京主城区银杏的秋色盛期整体可持续 30 余日。

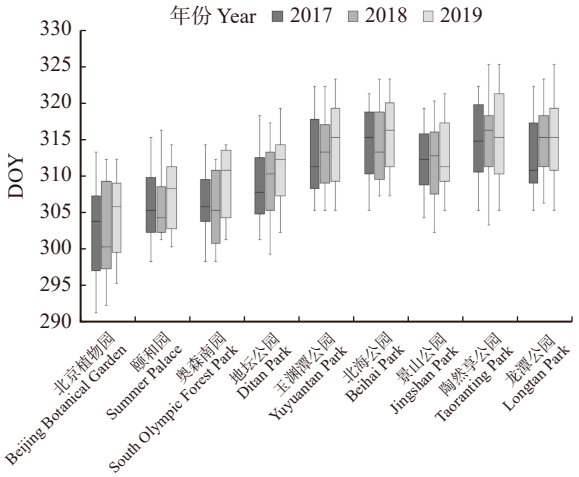


图 5　各样地银杏秋色盛期

Fig. 5　leaf coloring date of *Ginkgo biloba* in various sample plots

2.3　秋色盛期对秋季地表热环境差异的响应

基于秋季平均地温 LST_a 对各样地秋季地表热环境进行对比分析。秋季地温最高值出现于二环内的北海公园（16.54 ± 0.67）℃、陶然亭公园（16.41 ± 0.69）℃，最低值出现于五环外的北京植物园（14.13 ± 0.72）℃ 及颐和园（14.69 ± 0.48）℃，从城中心二环至西北郊五环外整体降低，热岛效应减弱，最大地温差达 2.41 ℃（图 6）。各样地间秋季均温整体差异显著（P < 0.001），尤其四环外绿地的秋季均温显著低于三环内（P < 0.001），而三环内各绿地间的秋季均温并无显著差异（P > 0.05）。

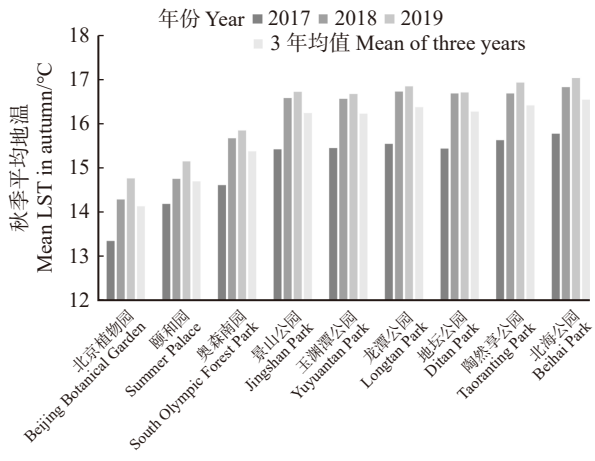


图 6　2017—2019 年北京主城区各样地秋季平均地温

Fig. 6　Mean LST of autumn (LST_a) in various sample plots of Beijing's urban area during 2017−2019

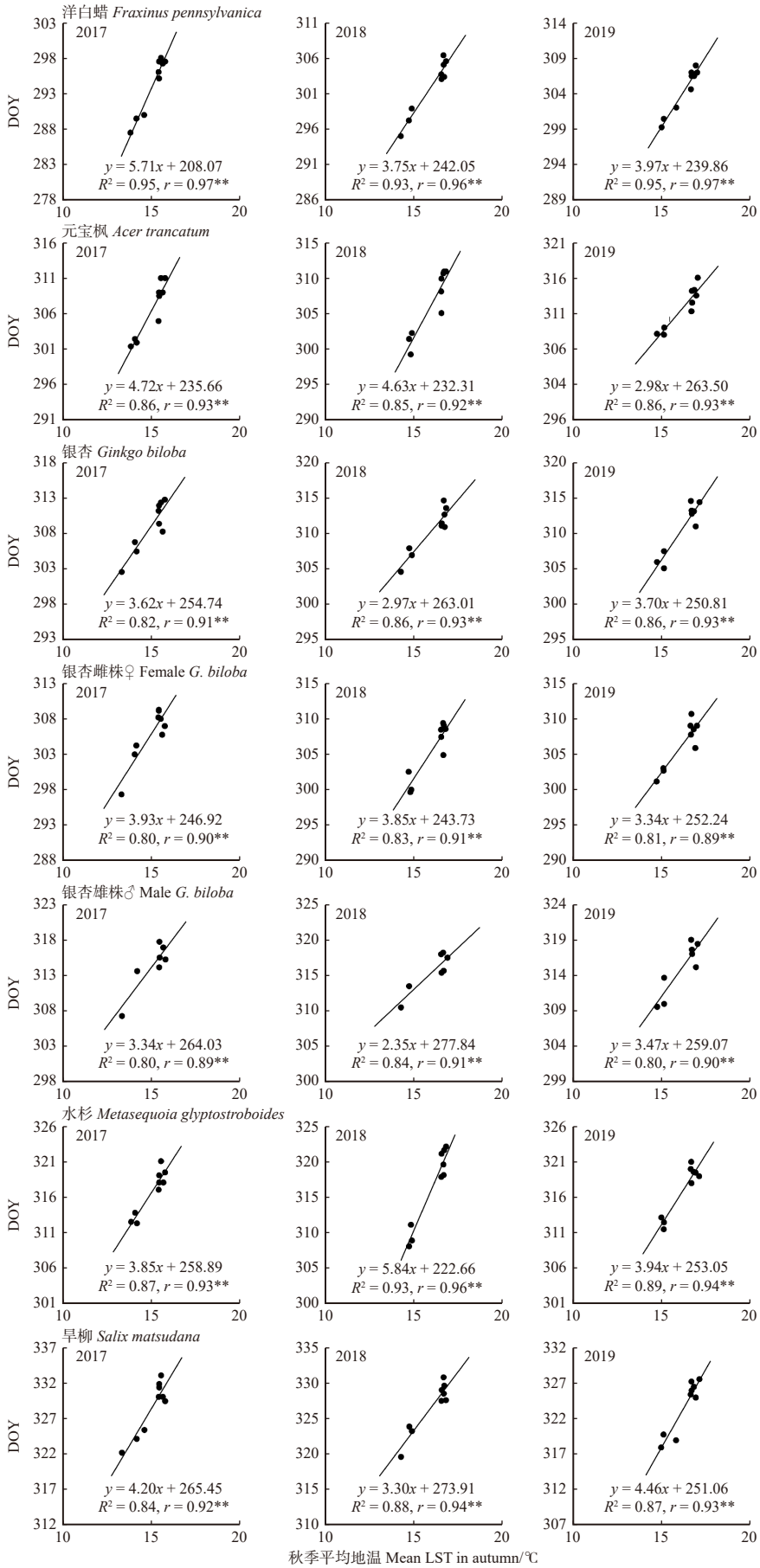
基于相关性分析探究各树种秋色盛期对样地秋季地温的响应（图 7），洋白蜡、元宝枫、银杏（雌株及雄株）、水杉、旱柳的秋色盛期皆与各样地秋季平均地温呈显著正相关（P < 0.01）。这表明北京主城区内秋季地表热环境对各树种秋色盛期具有显著的正向影响：在秋季地表温度偏高的中心城区，秋色盛期偏晚；而在地表温度偏低的四环外，秋色盛期偏早。各树种秋色盛期与 LST_a 的相关系数 r 平均为（0.94 ± 0.02）；线性拟合度 R^2 平均为（0.88 ± 0.04）；回归系数绝对值即响应敏感度|k|平均为（4.11 ± 0.83）d/℃，即样地间 1 ℃ 的秋季地温差异会导致平均 4.11 d 的秋色盛期差异。

5 个树种中，洋白蜡、水杉的秋色盛期与秋季平均地温的相关性整体最强（r 分别为 0.97，0.95）、响应敏感度最高（|k| 分别为 4.48，4.54），表明其对秋季热环境空间差异的响应更为敏感。而银杏秋色盛期与秋季地表热环境的相关性和响应敏感性最弱，银杏雌株、雄株秋色盛期与样地秋季地温的相关系数 r、线性拟合度 R^2 及响应敏感度| k |明显低于其他树种，这与样地内不同银杏植株的秋色盛期存在突出株间差异有关。

3　讨　　论

3.1　北京主城区秋色盛期的空间异质性及其响应机制

本研究发现北京主城区内各秋色叶树种的秋色盛期整体上由二环内的中心城区至西北郊五环外逐渐提前，城郊差异达 10 d 以上；各样地的秋色盛期呈显著的空间异质性（P < 0.01），尤其三环内样地的秋色盛期显著晚于四环外，而三环内各样地间物候差异并不甚突出；这一异质性格局的形成受到样地间秋季地表热环境差异的显著影响（P < 0.05）。杨敏等[35]研究指出，20 世纪 80 年代以来，受城市化进



指在 0.01 水平上显著相关。 refers to significant correlation at 0.01 level.

图 7 2017—2019 年各树种秋色盛期与样地秋季平均地温的相关性

Fig. 7 Correlations between leaf coloring date of various tree species and average autumn ground temperature (LST) of the sample plots

程影响，北京城市热岛的高温区由东、西城区的北二环地带向南二环、海淀区南部、东部等外围区域扩展或偏移，于三环内形成若干个同级热岛，热岛效应尤为突出，与山、水、绿地密集分布的西北郊形成显著的热环境对比。本研究进一步表明，北京主城区秋色盛期的空间异质性格局可在一定程度上表征以三环为中心的秋季热岛的空间分布特征。

诸多前人研究也已证实，城市化发展产生的城市热岛效应已经导致城市中心的秋季物候显著晚于周边郊区或乡村，且秋色盛期的空间异质性与城市下垫面热环境空间分布不均密切相关。Jeong 等[36]探究了韩国首都圈内城市化水平对银杏、鸡爪槭（*Acer palmatum*）秋色盛期的影响，发现不同城市化水平样点间的秋色盛期差异达 15.0 d，且 10 月平均夜温每升高 1℃ 秋色盛期会延后 2.6 d。Zhou 等[17]对 32 个中国城市中植被生长季末期即秋色盛期的空间差异进行分析，发现从城中心到周围缓冲区的城乡梯度上秋色盛期逐渐提前，城郊物候差达 5.4 d，且秋色盛期与秋季地表温度呈显著正相关（$P < 0.01$），对日温及夜温的响应敏感度分别为 9.8、5.6 d/℃。同样，Jia 等[13]对 343 个中国城市中植被生长季末期的城乡梯度变化进行分析，发现与乡村及远郊相比，城市核心区的秋色盛期平均延后 1.3 d，且秋色盛期与秋季 9—11 月平均地温呈显著正相关（$P < 0.05$），响应敏感度为 2.9 d/℃。Yang 等[18]对大连市内植被生长季结束期的城乡梯度变化进行分析，发现中心城区的秋色盛期比远郊延后 5.4 d（$P < 0.01$），且秋色盛期与秋季平均地温呈显著正相关（$P < 0.01$），响应敏感度平均为 2.0 d/℃。上述研究皆发现城市内秋色盛期与秋季地表温度的显著相关性，城郊物候差异为 1.3 ~ 15.0 d 不等，响应敏感度为 2 ~ 8 d/℃ 不等而集中于 2 ~ 3 d/℃。本研究结果也在上述数值范围之内。

而 Zhao 等[11]研究也发现中国南方城市出现城区植被秋色盛期早于周边乡村的反常现象。这主要是由于近年来城市环境中夏季热浪等极端气候现象频发，大面积下垫面硬化加剧了城市洪涝风险等，导致城市植被的生长更易遭受高温及水分胁迫，从而引起叶衰老提前[37]。这表明除了热岛效应的持续影响，极端天气对城市秋色物候的影响也在加剧，值得进一步关注。

再者，城市内部热环境空间分布不均主要由城市下垫面用地构成及景观格局的空间差异造成[14,38−43]，因而一些研究已从城市景观格局的角度探究了城市内部下垫面结构对物候期的影响，如 Qiu 等[16]研究表明上海市内植被生长季的起始期与下垫面用地类型、斑块密度等显著相关。随着城市热力景观格局日趋破碎化[44]，城市内部热环境的空间异质性也愈加复杂，从下垫面景观格局和用地结构的角度探究城市植物物候空间异质性的影响机制具有重要研究意义，有助于深入了解城市化建设如何改变植物的生长发育节律，是下一步研究工作的方向。

温度和光周期是温带地区秋色物候的主要调控因子[45−46]。在时间尺度下，光周期无明显年际变化，而夏秋季热环境尤其秋季气温的年际变化已被前人研究证明是导致温带地区秋色盛期年际波动的主要环境因素，工业革命以来的秋季变暖已导致秋色盛期等叶衰老物候期明显延后[47−50]。而除气温外，降水量、风环境等其他环境因子及病虫害等胁迫也对秋季物候的发生具有显著影响[51−53]，如城市环境中干旱、洪涝、高温热浪或大风等极端天气事件会导致叶衰老期异常提前，加剧秋色盛期的年际波动。在城市空间尺度下，如本研究结果显示，秋季热环境差异同样是导致秋色盛期空间异质性的关键影响因素，而光照、降水等区域性气象条件的空间差异及其对秋色盛期的影响可以忽略不计，这一点与时间尺度有所不同。

3.2　秋色盛期对城市热环境响应特征的种间差异及种内差异

本研究发现 5 个目标树种的秋色盛期对样地秋季热环境空间差异的响应特征呈明显种间差异，具体表现为相关性程度及响应敏感度有所不同。Cook 等[54] 指出，物候−气候响应特征的种间差异主要是由于不同树种生长发育对温度等环境因子的特定需求及响应机制有所不同。在本研究中，水杉和洋白蜡的秋色盛期对城市热环境的响应最为敏感，可作为表征北京城市气候秋季时空变化的指示树种，同时这也意味着在未来气候变化影响下两者的秋色景观将发生更明显的年际变动，对北京城市植被的整体秋季季相产生重要影响。

再者，本研究发现同一树种的秋色盛期在样地间及样地内均表现出明显的株间差异。物候作为植株表型（phenotype）的一个方面，物候期的株间差异是衡量树种表型丰富性的重要指标，由环境因子作用下物候的可塑性（phenological plasticity）及树种基因多样性共同决定[55]，对于提高树种的气候适应性具有积极作用。本研究揭示了城市热环境空间差异导致的秋色盛期空间异质性，即为物候可塑性的一个重要体现。而除了样地间物候差异，在热环境相对一致的样地内，同一树种的秋色盛期也被发现具有明显株间差异，以银杏最为突出，其雌、雄株秋色

盛期在样地内的株间极差平均达 8 d 以上。除绿地微气候的影响[56]，植株间种源（seed provenance）及基因构成（genetic makeup）的不同是造成物候–气候响应特征种内差异，进而导致样地内物候期株间分异的重要原因[57]。

以秋色和落叶为典型特征的叶衰老是植株完成养分回收、调节生长及休眠节律的关键阶段，而城市热岛影响下叶衰老期的延后会对植株生长同时产生正面和负面影响，叶衰老期延后意味着植株生长季延长，年生长周期的养分积累增加，但同时植株遭受冬季霜冻的风险也会增加[58]。从进化学的角度，在延长生长季及避免冻害的双向选择压力下，叶衰老物候会对热环境的响应表现出明显的株间分异[57]。换言之，秋色盛期的突出株间差异有助于植物种群在实现生长季延长之利和规避冻害风险之间达成一定平衡，从而提高其对城市气候变化的整体适应性。从这一角度，城市热环境变化影响下物候期的株间分异程度是预测某树种对未来气候动态适应能力的一个重要指标[59]，值得进一步关注。

3.3 局限及展望

本研究以北京主城区内高度城市化的西北象限为研究区域，研究结果揭示了从中心城区至西北郊 5 种秋色叶树种秋色盛期的空间变化。考虑到北京主城区不同象限的城市化水平发展不均，若要对北京城区内物候期的空间异质性进行更全面、综合的分析，研究区域理应涵盖其他不同象限；再者，物候期对热环境时空变化的响应存在明显种间差异，北京其他常见树种秋色盛期的响应特征也值得进一步探究。然而基于地面传统观测的多样地、多树种同步物候监测对人力、物力投入有很高要求，因而限制了在更大空间范围内对更多树种开展研究的可行性。对此，通过开展公众物候观测项目、应用物候相机定点监测等新观测方式对物候大数据进行高效采集将会为下一步城市植物物候研究提供更多可能。

4 结 论

北京主城区 5 种秋色叶树种的秋色盛整体发生于 10 月中旬至 12 月上旬，由早到晚依次为洋白蜡、元宝枫、银杏、水杉、旱柳，且银杏雌株的秋色盛期显著早于雄株。各树种秋色盛期整体上由二环—西三环—北三环—北五环—西北五环—五环外逐渐提前，城郊差异突出，空间极差平均达 10 d 以上；样地间物候差异显著，尤其四环外样地的秋色盛期显著早于三环内。各树种秋色盛期与样地秋季平均地温呈显著正相关，表明北京主城区内秋季地表热环境对秋色盛期具有显著的正向影响、热岛效应会导致秋色盛期延后，各树种中以洋白蜡、水杉秋色盛期对热环境空间差异的响应最为敏感。此外，受种源及基因差异等影响，样地内银杏种群的不同植株间亦呈突出的秋色盛期差异，值得关注。

本文探究了北京主城区内主要秋色叶树种秋色盛期的空间异质性特征及其对城市热环境的响应，研究结果有助于揭示处于动态变化中的日益复杂的城市气候对以秋色盛期为代表的叶衰老物候的影响。城市热岛效应是未来气候变化的一个缩影，城市环境中物候期的空间异质性及其对热环境差异的响应可反映未来气候变化对城市植物物候的潜在影响，即具有“空间代替时间”的重要研究意义。

通过对园林树木的秋色物候进行持续监测，可以此为切入点，了解气候变化背景下城市植被秋季景观、整体生长季和初级生产力的动态变化及其对来来城市生态的长期影响。同时可将物候–气候响应敏感性作为城市绿化树种选择的重要依据。以本研究为例，一方面，洋白蜡、水杉等秋色盛期呈高温度敏感性的树种可作为北京秋季热环境变化的指示植物；另一方面，选择银杏等秋色盛期对热环境异质性呈低敏感响应的树种，对于保障城市秋季景观可持续及生态稳定性也具有一定积极作用。研究结果可从树种层面为增强城市植被的景观可持续及气候韧性提供科学支持与参考。

参 考 文 献

[1] Wang S, Gong D. Enhancement of the warming trend in China[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(16): 2581−2584.

[2] Neil K, Wu J. Effects of urbanization on plant flowering phenology: A review[J]. Urban Ecosystems, 2006, 9: 243−257.

[3] Visser M E, Both C. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick[J]. Proceedings of the Royal Society B, 2005, 272(1581): 2561−2569.

[4] Miller-Rushing A J, Høye T T, Inouye D W, et al. The effects of phenological mismatches on demography[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365: 3177−3186.

[5] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365: 3227−3246.

[6] Tang J, Körner C, Muraoka H, et al. Emerging opportunities and challenges in phenology: a review[J]. Ecosphere, 2016, 7(8): e01436.

[7] 叶清, 焦庚英, 许晓利, 等. 物候学在植物季相景观规划中的应用 [C]// 中国气象学会农业气象与生态学委员会, 江西省气象学会. 全国农业气象与生态环境学术年会论文集. 北京: 中国气象学会农业气象与生态学委员会, 2006: 409−411.
Ye Q, Jiao G Y, Xu X L, et al. Application of phenology in the landscape planning of plant seasonal aspects [C]// Agricultural Meteorology and Ecology Committee of the Chinese

Meteorological Society, Jiangxi Meteorological Society. Annual Conference Proceeding of National Agrometeorology and Ecology Committee. Beijing: Agrometeorology and Ecology Committee of Chinese Meteorological Society, 2006: 409−411.

[8] Nagai S, Saitoh T, Yoshitake S. Cultural ecosystem services provided by flowering of cherry trees under climate change: a case study of the relationship between the periods of flowering and festivals[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(4): 1051−1058.

[9] World Health Organization. Phenology and Human Health: Allergic Disorders: report of WHO Regional Office for Europe (No. 108750) [R]. Rome: WHO, 2003.

[10] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319: 756−760.

[11] Zhao S, Liu S, Zhou D. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113: 6313−6318.

[12] Farrell C, Szota C, Arndt S K. Urban plantings: 'Living Laboratories' for climate change response[J]. Trends in Plant Science, 2015, 20: 597−599.

[13] Jia W, Zhao S, Zhang X, et al. Urbanization imprint on land surface phenology: the urban-rural gradient analysis for Chinese cities[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2895−2904.

[14] 王静. 北京市土地利用空间格局对城市热岛强度的影响研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
Wang J. Impacts of spatial pattern of land use on urban heat island intensity in Beijing [D]. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2014.

[15] 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.
Chen Z. Effects of urbanization on phenology of spring-flowering plants[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.

[16] Qiu T, Song C H, Li J X. Impacts of urbanization on vegetation phenology over the past three decades in Shanghai, China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 970−985.

[17] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 272−281.

[18] Yang J, Luo X, Jin C, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation phenology along the urban-rural gradient in coastal Dalian, China [J/OL]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 54: 126784 [2021−09−20]. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126784Get.

[19] Melaas E K, Wang J A, Miller D L, et al. Interactions between urban vegetation and surface urban heat islands: a case study in the Boston metropolitan region[J/OL]. Environmental Research Letters, 2016, 11(5): 054020[2021−09−20]. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054020.

[20] Mimet A, Pellissier V, Quénol H, et al. Urbaniszation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*[J]. International Journal of Biometeorology, 2009, 53(3): 287−298.

[21] Parece T, Campbell J. Intra-urban microclimate effects on phenology[J]. Urban Science, 2018, 2(26): 1−22.

[22] 曹广真, 侯鹏, 毛显强. 北京市城市化对地表温度时空特征的影响 [J]. 气象, 2010, 36(3): 19−26.
Cao G Z, Hou P, Mao X Q. Impacts f urbanization on temporal and spatial characteristics of land surface temperature in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(3): 19−26.

[23] Neil K, Wu J G, Bang C, et al. Urbanization affects plant flowering phenology and pollinator community: effects of water availability and land cover[J]. Ecological Processes, 2014, 3(17): 1−12.

[24] Katz D S, Dzul A, Kendel A, et al. Effect of intra-urban temperature variation on tree flowering phenology, airborne pollen, and measurement error in epidemiological studies of allergenic pollen[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 1213−1222.

[25] 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 [J]. 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[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6701−6710.

[26] Woo H R, Kim H J, Lim P O, et al. Leaf senescence: systems and dynamics aspects[J]. Annual Review of Plant Biology, 2019, 70: 347−376.

[27] Wu C, Chen J M, Black T A, et al. Interannual variability of net ecosystem productivity in forests is explained by carbon flux phenology in autumn[J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(8): 994−1006.

[28] 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.
Dong L, Xing X Y. Review of researches on impacts of climate change on urban vegetation[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(11): 61−67.

[29] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Wan M W, Liu X Z. Chinese phenological observation method [M]. Beijing: Science Press, 1979.

[30] 田丽媛. 温湿度对北京 5 种秋色叶树种秋叶变色的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Tian L Y. The impact of temperature and humidity on five kinds of fall-color trees' color changing in autumn of Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[31] Shi D, Wei X, Chen G, et al. Changes in photosynthetic characteristics and antioxidative protection in male and female ginkgo during natural senescence[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2012, 137(5): 349−360.

[32] Curtis A E, Smith T A, Ziganshin B A, et al. The mystery of the Z-score[J]. Aorta, 2016, 4(4): 124−130.

[33] Alqasemi A S, Hereher M E, Al-Quraishi A M F, et al. Retrieval of monthly maximum and minimum air temperature using MODIS aqua land surface temperature data over the United Arab Emirates[J]. Geocarto International, 2020, 37(10): 2996−3013.

[34] Prevéy J, Vellend M, Rüger N, et al. Greater temperature sensitivity of plant phenology at colder sites: implications for convergence across northern latitudes[J]. Global Change Biology, 2017, 23(7): 2660−2671.

[35] 杨敏, 杨贵军, 王艳杰, 等. 北京城市热岛效应时空变化遥感分析 [J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 213−223.
Yang M, Yang G J, Wang Y J, et al. Remote sensing analysis of

temporal-spatial variations of urban heat island effect over Beijing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(3): 213−223.

[36] Jeong S J, Park H, Ho C H, et al. Impact of urbanization on spring and autumn phenology of deciduous trees in the Seoul capital area, South Korea[J]. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(5): 627−637.

[37] Estiarte M, Peñuelas J. Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1005−1017.

[38] Yan H, Fan S, Guo C, et al. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: the case of Beijing, China[J]. Building and Environment, 2014, 76: 44−53.

[39] 陈睿智. 城市公园景观要素的微气候相关性分析 [J]. 风景园林, 2020, 27(7): 94−99.
Chen R Z. Microclimate correlation analysis of landscape elements in city parks[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(7): 94−99.

[40] 游晓婕, 李琼, 孟庆林. 城市热岛空间格局及形态差异化调控策略研究: 以广州市中心城区为例 [J]. 风景园林, 2021, 28(5): 74−79.
You X J, Li Q, Meng Q L. Research on spatial patterns and morphological differentiation control strategy of urban heat islands: a case study of downtown area of Guangzhou City[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(5): 74−79.

[41] 李膨利, Muhammad Amir Siddique, 樊柏青, 等. 下垫面覆盖类型变化对城市热岛的影响: 以北京市朝阳区为例 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 99−109.
Li P L, Siddique M A, Fan B Q, et al. Effects of land surface type changes on urban heat island: a case study of Chaoyang District, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 99−109.

[42] 范舒欣, 李坤, 张梦园, 等. 城市居住区绿地小微尺度下垫面构成对环境微气候的影响: 以北京地区为例 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 100−109.
Fan S X, Li K, Zhang M Y, et al. Effects of micro scale underlying surface type and pattern of urban residential area on microclimate: taking Beijing as a case study[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(10): 100−109.

[43] 王爱霞, 任光淳, 秦亚楠. 半干旱区城市广场树木形态对微气候的影响研究 [J]. 风景园林, 2020, 27(7): 100−107.
Wang A X, Ren G C, Qin Y N. Research on influence of tree shape of city squares on microclimate in semi-arid areas[J]. Landscape Architecture, 2020, 27(7): 100−107.

[44] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003-2017 年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律 [J]. 地理学报, 2019, 74(3): 475−489.
Qiao Z, Huang N Y, Xu X L, et al. Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 475−489.

[45] Fracheboud Y, Luquez V, Björkén L, et al. The control of autumn senescence in European aspen[J]. Plant Physiology, 2009, 149(4): 1982−1991.

[46] Way D A, Montgomery R A. Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world[J]. Plant Cell & Environment, 2015, 38(9): 1725−1736.

[47] Estrella N, Menzel A. Responses of leaf coloring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany[J]. Climate Research, 2006, 32(3): 253−267.

[48] 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.

[49] 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.

[50] Liu Q, Piao S, Campioli M, et al. Modeling leaf senescence of deciduous tree species in Europe[J]. Global Change Biology, 2020, 26(7): 4104−4118.

[51] Archetti M, Richardson A D, O'Keefe J, et al. Predicting climate change impacts on the amount and duration of autumn colors in a New England forest[J/OL]. PLoS One, 2013, 8(3): e57373[2022−02−22]. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057373.

[52] Lang W, Chen X, Qian S, et al. A new process-based model for predicting autumn phenology: How is leaf senescence controlled by photoperiod and temperature coupling?[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 268: 124−135.

[53] Wu C, Wang J, Ciais P, et al. Widespread decline in winds delayed autumn foliar senescence over high latitudes[J/OL]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(16): e2015821118[2022−02−22]. https://doi.org/10.1073/pnas.2015821118.

[54] Cook B I, Wolkovich E M, Davies T J, et al. Sensitivity of spring phenology to warming across temporal and spatial climate gradients in two independent databases[J]. Ecosystems, 2012, 15(8): 1283−1294.

[55] Wilson K B, Baldocci D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1): 1−18.

[56] Xing X Y, Dong L, Konijnendijk C, et al. The Impact of microclimate on the reproductive phenology of female *Populus tomentosa* in a micro-scale urban green space in Beijing[J/OL]. Sustainability, 2021, 13(6): 3518[2022−03−23]. https://doi.org/10.3390/su13063518.

[57] Rosique-Esplugas C, Cottrell J E, Cavers S, et al. Clinal genetic variation and phenotypic plasticity in leaf phenology, growth and stem form in common ash (*Fraxinus excelsior* L.)[J]. Forestry, 2021, 95(1): 83−94.

[58] Keskitalo J, Bergquist G, Gardestrom P, et al. A cellular timetable of autumn senescence[J]. Plant Physiology, 2005, 139(4): 1635−1648.

[59] Alberto F J, Aitken S N, Alía R, et al. Potential for evolutionary responses to climate change: evidence from tree populations[J]. Global Change Biology, 2013, 19: 1645−1661.

（责任编辑 范 娟 孟 瑶
责任编委 李 雄）