

DOI: 10.5846/stxb201809252082

赖小红, 李名扬, 刘聪, 钟雨航, 林立, 王海洋. 植物物候对重庆主城区热岛效应的响应. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Lai X H, Li M Y, Liu C, Zhong Y H, Lin L, Wang H Y. The phenological responses of plants to the heat island effect in the main urban area of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

## 植物物候对重庆主城区热岛效应的响应

赖小红<sup>1,2,3</sup>, 李名扬<sup>1,2,3</sup>, 刘聪<sup>1</sup>, 钟雨航<sup>1</sup>, 林立<sup>1,2,3</sup>, 王海洋<sup>1,\*</sup>

1 西南大学园艺园林学院, 重庆 400715

2 重庆市花卉工程技术研究中心, 重庆 400715

3 南方山地园艺学教育部重点实验室, 重庆 400715

**摘要:**为探究植物物候对山地城市内部热岛效应的响应特征,于2016年1月—2017年1月对重庆市主城区80种木本植物进行地面物候观测,同时利用Landsat 8热红外数据反演研究区地表温度,结合同时期地面实测气温,对研究区热岛强度等级进行划分,进而比较城市内部不同热岛强度等级下植物物候变化特征。结果表明,热岛过渡区与热岛区植物展叶期较凉岛区分别提前了5.1天和8.1天,初花期分别提前了4.0天和20.8天,终花期分别提前了4.8天和11.6天,而落叶期分别推迟了8.5天和18.9天,即城市内部热岛增温使植物春季物候提前,秋季物候推迟,生长季延长,且物候变化幅度随热岛强度等级增大而增大。不同功能型植物物候对热岛增温的响应存在差异,灌木、常绿植物和引种植物物候比乔木、落叶植物和本土植物更加敏感。本研究在一定程度上填补了我国西南山区物候研究的空缺,可为预测城市植物物候对未来山地城市小气候变化乃至全球气候变暖趋势的响应提供早期预警。

**关键词:**热岛效应;山地城市;植物物候;功能型;响应

## The phenological responses of plants to the heat island effect in the main urban area of Chongqing

LAI Xiaohong<sup>1,2,3</sup>, LI Mingyang<sup>1,2,3</sup>, LIU Cong<sup>1</sup>, ZHONG Yuhang<sup>1</sup>, LIN Li<sup>1,2,3</sup>, WANG Haiyang<sup>1,\*</sup>

1 College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Chongqing Engineering Research Center for Floriculture, Chongqing 400715, China

3 Key Laboratory of Horticulture Science for Southern Mountainous Regions, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In this study, we aimed to reveal the impact of the urban heat island effect on plant phenology in a mountain city. To this end, ground observations of the phenology of 80 woody plants were conducted from January 2016 to January 2017 in the main urban area of Chongqing, and Landsat 8 thermal infrared data as well as concurrent temperature data were used for classification of heat island intensity. The result showed that, compared with a cool island, the urban heat island has led to an advance in the transition zone and heat island zone for spring phenology (5.1 and 8.1 days for the timing of leaf expansion, 4.0 and 20.8 days for the timing of blossoming, and 4.8 and 11.6 days for the timing of flower fall, respectively), and a delay for autumn phenology (8.5 and 18.9 days for the timing of leaf fall, respectively). Furthermore, the growth season has been extended. Differences existed among functional types in response to urban heat island effect; the sensitivity of shrubs, evergreens and exotic plants to urban warming were found to be higher than that of trees, and deciduous and native species. Our research, to some extent, fills the gap in the research on phenology in the southwest area of China and might provide an early warning for predicting the phenological responses of urban plants to future urban

**基金项目:**重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jsex-mszdX0069)

**收稿日期:**2018-09-25; **网络出版日期:**2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whyswau@126.com

microclimate changes in mountain cities and even to global warming trends.

**Key Words:** urban heat island; mountain city; plant phenology; functional type; response

植物物候是气候和环境变化的重要指示器<sup>[1-2]</sup>。城市热岛效应通过温度变化直接影响植物物候,是城市植物物候变化最主要的影响因子,城市内热岛强度的时空差异导致物候空间格局的分异<sup>[1]</sup>,目前已有相关研究利用长期地表植被物候观测资料以及时间序列遥感影像定量分析不同城市化强度下植物物候的差异<sup>[2-5]</sup>,发现物候随着距离中心城区的距离变化而变化,距离城市中心越近、热岛强度越大,物候变化越明显<sup>[6-8]</sup>,热岛增温使植物春季物候提前,秋冬季物候推迟,生长季延长<sup>[3,8-9]</sup>,是城乡物候差异的直接诱因<sup>[1,8]</sup>。

然而,现有研究大多把城市作为整体进行城乡物候差异对比,热岛效应虽与城市化程度密切相关<sup>[2]</sup>,但通过距离中心城区的远近划分热岛强度的方法忽略了城市内部异质结构的复杂性以及地形变化对物候的影响,相对而言,城市内部精细尺度下物候对不同热岛增温强度的响应研究较为匮乏。同时,不同功能型植物应对热岛效应所采取的生态策略反映到物候变化上也会有所不同,但现有研究大多忽略了植物功能性状差异在城市物候研究中所起的作用,故而可能会掩盖植物物候响应的内在机制<sup>[10]</sup>。此外,从地域上看,中国目前各物候观测站点主要位于中东部平原地区<sup>[11]</sup>,包括重庆在内的西南山区物候研究较为缺乏,而前人研究已经证实,物候会随海拔高度而变化,城市热岛对植物物候的影响可能被高程的额外影响增强<sup>[12-14]</sup>。因此山区对于研究物候特征的广泛变化更具价值。

重庆是典型的山地城市,其主城区被山脉河流分割而形成多中心、组团式分布格局,且地形复杂,自然通风条件差,故而热岛现象明显。

基于此,本文通过分析重庆主城区内部不同热岛强度下不同功能型植物物候的空间变化,探讨物候对山地城市内部热岛效应的响应特征,试图阐明不同功能型植物物候对热岛效应的响应机制,从而预测山地城市植物物候对未来城市扩张带来的城市小气候变化以及全球气候变化的响应。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

以重庆主城区外环高速公路及沿线城镇、居住组团为界,确定研究区范围(图1),选择重庆主城8区内31个典型城市绿地中80种常见城市木本植物进行研究,其中常绿植物36种,落叶植物44种;灌木33种,乔木47种;本土植物39种,引种植物41种,其中本土植物与引种植物的划分依据《重庆市维管植物检索表》确定(见表1)。

表1 植物基本信息表

Table 1 Basic information of the object plants

| 植物<br>Species                                                         | 科<br>Family | 乔木/灌木<br>Tree/shrub | 常绿/落叶<br>Evergreen/<br>deciduous | 本土/引种<br>Native/exotic |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| 白兰 <i>Michelia alba</i> DC.                                           | 木兰科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 碧桃 <i>Amygdalus persica</i> Linn. 'Duplex'                            | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 垂柳 <i>Salix babylonica</i> L.                                         | 杨柳科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 垂丝海棠 <i>Malus halliana</i> Koehne                                     | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i> Planch.                                 | 杜鹃花科        | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 刺桐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.                                     | 豆科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 大花梔子 <i>Gardenia jasminoides</i> Ellis var. <i>grandiflora</i> Nakai. | 茜草科         | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i> Hemsl.                                | 杜英科         | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 鹅掌柴 <i>Schefflera heptaphylla</i> (L.) D. G. Frodin                   | 五加科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |

续表

| 植物<br>Species                                                                               | 科<br>Family | 乔木/灌木<br>Tree/shrub | 常绿/落叶<br>Evergreen/<br>deciduous | 本土/引种<br>Native/exotic |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| 鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> (Hemsl.) Sarg.                                             | 木兰科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 二乔玉兰 <i>Magnolia soulangeana</i> Soul.- Bod.                                                | 木兰科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 法桐 <i>Platanus acerifolia</i> (Aiton) Willd.                                                | 悬铃木科        | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 佛顶珠 <i>Osmanthus fragrans</i> 'Fodingzhu'                                                   | 木犀科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 复羽叶栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i> Franch.                                                 | 无患子科        | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 构树 <i>Broussonetia papyrifera</i> (L.) L'Her. ex Vent.                                      | 桑科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> L.                                                          | 木兰科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 桂花 <i>Osmanthus fragrans</i> Lour.                                                          | 木犀科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 海桐 <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) Ait.                                                  | 海桐花科        | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 含笑 <i>Michelia figo</i> (Lour.) Spreng.                                                     | 木兰科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i> Lour.                                                 | 大戟科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 红枫 <i>Acer palmatum</i> 'Atropurpureum'                                                     | 槭树科         | 灌木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 红继木 <i>Loropetalum chinense</i> (R. Br.) Oliv. var. <i>rubrum</i> Yieh                      | 金缕梅科        | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 红梅 <i>Armeniaca mume</i> Sieb.                                                              | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 红叶李 <i>Prunus Cerasifera</i> Ehrhar f. <i>atropurpurea</i> (Jacq.)                          | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 红叶石楠 <i>Photinia</i> × <i>fraseri</i> Dress                                                 | 蔷薇科         | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 槐树 <i>Sophora japonica</i> Linn.                                                            | 蝶形花科        | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 黄葛树 <i>Ficus virens</i> Ait. var. <i>sublanceolata</i> (Miq.) Corner                        | 桑科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 黄花槐 <i>Sophora xanthantha</i> C. Y. Ma                                                      | 豆科          | 灌木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 黄荆 <i>Vite negundo</i> L.                                                                   | 马鞭草科        | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 火棘 <i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li                                                 | 蔷薇科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 金森女贞 <i>Ligustrum japonicum</i> Thunb. 'Howardii'                                           | 木犀科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> L. 'Golden Leaves'                                              | 鞭草科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 金叶女贞 <i>Ligustrum</i> × <i>vicaryi</i> Rehder                                               | 木樨科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 蜡梅 <i>Chimonanthus praecox</i> (L.) Link                                                    | 蜡梅科         | 灌木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 蓝花楹 <i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don                                                     | 紫葳科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i> Dandy                                                        | 木兰科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 楝树 <i>Melia azedarach</i> L.                                                                | 楝科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 六月雪 <i>Serissa japonica</i> (Thunb.) Thunb.                                                 | 茜草科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i> (Thunb.) D. Don                                          | 罗汉松科        | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 满天星 <i>Cuphea hookeriana</i> Walp.                                                          | 千屈菜科        | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i> Linn.                                                         | 锦葵科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 木槿 <i>Hibiscus syriacus</i> L.                                                              | 锦葵科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 南天竹 <i>Nandina domestica</i> Thunb.                                                         | 小檗科         | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> Ait.                                                            | 木犀科         | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 枇杷 <i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.                                               | 蔷薇科         | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 朴树 <i>Celtis sinensis</i> Pers.                                                             | 榆科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> (Thunb.) Oerst.                                            | 壳斗科         | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 日本珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i> Ker-Gawl. var. <i>awabuki</i> (K. Koch) Zabel ex Rumpf. | 忍冬科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 日本晚樱 <i>Cerasus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i> (Carr.) Makino                         | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 三角槭 <i>Acer buergerianus</i> Miq.                                                           | 槭树科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 山茶 <i>Camellia japonica</i> L.                                                              | 山茶科         | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 山麻杆 <i>Alchornea davidii</i> Franch.                                                        | 大戟科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 山樱花 <i>Cerasus serrulata</i> (Lindl.) G. Don ex London                                      | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 深山含笑 <i>Michelia maudiae</i> Dunn                                                           | 木兰科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |

续表

| 植物<br>Species                                      | 科<br>Family | 乔木/灌木<br>Tree/shrub | 常绿/落叶<br>Evergreen/<br>deciduous | 本土/引种<br>Native/exotic |
|----------------------------------------------------|-------------|---------------------|----------------------------------|------------------------|
| 十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i> (Lindl.) Fedde        | 小檗科         | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 石榴 <i>Punica granatum</i> L.                       | 石榴科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 水晶蒲桃 <i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston            | 桃金娘科        | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu et Cheng | 杉科          | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 桃 <i>Amygdalus persica</i> L.                      | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 天竺桂 <i>Cinnanomum japonicum</i> (Diels) Sieb.      | 樟科          | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 贴梗海棠 <i>Chaenomeles speciosa</i> (Sweet) Nakai     | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 蚊母 <i>Distylium racemosum</i> Sieb. et Zucc        | 金缕梅科        | 灌木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i> (L. f.) Marsili    | 梧桐科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 喜树 <i>Camptotheca acuminata</i> Decne.             | 蓝果树科        | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 夏鹃 <i>Rhododendron obtusum</i> (Lindl.) Planch.    | 杜鹃花科        | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 香樟 <i>Cinnanomum camphora</i> (L.) Presl.          | 樟科          | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 小蜡 <i>Ligustrum sinense</i> Lour.                  | 木犀科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i> L. f.                  | 桑科          | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 小叶桢楠 <i>Phoebe microphylla</i> H. W. Li            | 樟科          | 乔木                  | 常绿                               | 本土                     |
| 羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> L.                    | 云实科         | 乔木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 叶子花 <i>Bougainvillea spectabilis</i> Willd.        | 紫茉莉科        | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 银杏 <i>Ginkgo biloba</i> L.                         | 银杏科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 迎春 <i>Jasminum nudiflorum</i> Lindl.               | 木犀科         | 灌木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 皂荚 <i>Gleditsia sinensis</i> Lam.                  | 云实科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 栀子 <i>Gardenia jasminoides</i> Ellis               | 茜草科         | 灌木                  | 常绿                               | 引种                     |
| 重阳木 <i>Bischofia polycarpa</i> (Levl.) Airy Shaw   | 大戟科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 紫荆 <i>Cercis chinensis</i> Bunge                   | 云实科         | 灌木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i> L.                  | 千屈菜科        | 灌木                  | 落叶                               | 引种                     |
| 紫叶桃 <i>Amygdalus persica</i> L. 'Atropurpurea'     | 蔷薇科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |
| 紫玉兰 <i>Magnolia liliflora</i> Desr.                | 木兰科         | 乔木                  | 落叶                               | 本土                     |

## 1.2 热岛强度等级划分

选用 2016 年 7 月 10 日的 Landsat 8 第 10 波段作为单波段热红外数据反演地表温度<sup>[15]</sup>,影像轨道号为 p128,行号为 r39,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)。应用遥感软件 EVNI 对影像进行预处理后,结合卫星影像和研究区气象数据,利用覃志豪单窗算法<sup>[16]</sup>进行地表温度反演。同时,于 2016 年 7 月 10 日采用 Kestrel 4000 手持式风速仪对 31 个研究样地实时温度进行同步观测,每个研究样地内根据用地类型不同选择 3—5 个样点进行测量后取平均值代表样地平均温度。然后运用软件 SPSS 对实测点的气温与反演的地表温度进行回归分析,获得研究区气温分布图,以研究区内的平均气温值作为对照温度计算热岛强度,即相对热岛强度(RHII, relative heat island intensity),本研究中的热岛强度在未特别说明时均指 RHII。在 ArcGIS10.2 中对研究样地与热岛强度分布图进行叠加分析,提取出各样地热岛强度值,采用均值标准差等级划分法<sup>[17-18]</sup>,划分热岛强度等级。

传统的绝对热岛强度通过城市的年平均气温与郊区年平均气温差值计算获得<sup>[19]</sup>,本研究利用相对热岛强度进行等级划分,目的在于消减城市化对城市参照背景的影响<sup>[20-21]</sup>。此外,地面热力空间分布特征主要决定于城市下垫面性质和城市格局变化,气候、季节的变化只会对热岛强度造成影响,而不会改变热岛强度的空间分布特征<sup>[22-24]</sup>,因此,本研究利用特定时间节点遥感地图反演所得到的气温分布图,虽不能全面反映热岛效应的季节变化或年际变化,但用于热岛强度等级的空间划分是可行的。

### 1.3 物候观测方法

于 2016 年 1 月-2017 年 1 月,每隔半个月进行一次物候观测(春季每周进行一次)。观测时,同种植物在每个样地内选定 3-5 株树龄 3 年以上的成年植株进行定点定株观察,其他植物作为记录参考,按年月日记录各物候出现的时间。观察的物候期包括与城市植物观赏价值相关的展叶期、花期和落叶期,展叶期为观测植株上叶片开始展开的日期,全株约有 5% 的叶片开始展开时进行记录。开花期分为初花期和终花期,初花期指观测植株上约 5% 的花开放的日期,终花期指观测植株上约 95% 花已开放且 75% 花开始落瓣的日期。落叶期指观测植株叶片开始正常脱落的日期,全株约有 5% 的叶片脱落时进行记录。灌木与小乔木直接肉眼观测,而对于高大乔木则借助双筒望远镜进行观测。

分析时将具体的物候日期转换成儒略日(Julian day),即距当年 1 月 1 日的实际天数,应用单因素方差分析(ANOVA)比较不同功能型植物叶性状特征差异以及不同生活型植物在不同热岛强度下的差异。数据分析在 SPSS22.0 软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 重庆主城区热岛强度分布特征

对遥感反演地表温度与实测气温进行回归分析,建立气温与地表温度的回归方程( $y = 13.2067 + 0.6576x$ ,  $P < 0.001$ ,  $r^2 = 0.70$ ),获得研究区气温分布图,利用研究区内平均气温值作为对照温度来计算热岛强度,如图 2 所示,重庆主城区热岛分布特征与前人研究结果基本一致<sup>[25-26]</sup>,低温区域位于缙云山、歌乐山、南山所在的带状山脉以及长江、嘉陵江水域沿线,形成城市凉岛区;热岛过渡区主要包括城市内部公园绿地、绿化较好的居住区绿地等;热岛区相对分散,主要分布在城市人口与建构筑物密集的商业区、居住区、火车站、道路、广场等高温区域。

在 GIS 中对研究样地热岛强度值进行提取,然后采用均值标准差等级划分法<sup>[17-18]</sup>,将研究样地热岛强度划分为凉岛区( $RHII < 0^\circ\text{C}$ )、热岛过渡区( $0^\circ\text{C} < RHII < 2^\circ\text{C}$ )和热岛区( $RHII > 2^\circ\text{C}$ )三大等级,结果如表 2 所示。

表 2 研究样点热岛强度等级划分

Table 2 Classification of the UHI intensity

| 热岛强度划分<br>UHI intensity division      | 研究样地<br>Sample sites                                                                                |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 凉岛区( $RHII < 0^\circ\text{C}$ )       | 缙云山植物园、南山植物园、歌乐山公园、园博园                                                                              |
| 热岛过渡区( $0 < RHII < 2^\circ\text{C}$ ) | 沙坪公园、照母山公园、鹅岭公园、重庆医科大学、学府大道、西南大学、行政中心、天生路、学苑小区、耐德佳苑、鸿恩寺公园、洋河花园、花卉园、大渡口公园、动物园、金兴大道、北碚公园、奥林匹克花园、竞地溯源阁 |
| 热岛区( $RHII > 2^\circ\text{C}$ )       | 春晖路、渝州路、长江一路、星光大道、新南路、诺丁阳光小区、小龙坎街道、三峡广场                                                             |

### 2.2 不同热岛强度下植物物候空间格局

根据调查统计数据可知,从凉岛区到热岛区植物平均展叶期分别为 78.7 天、73.6 天、70.6 天;凉岛区到热岛区植物平均初花期分别为 113.9 天、109.9 天、93.1 天;平均终花期分别为 143.3 天、138.4 天、131.7 天;平均

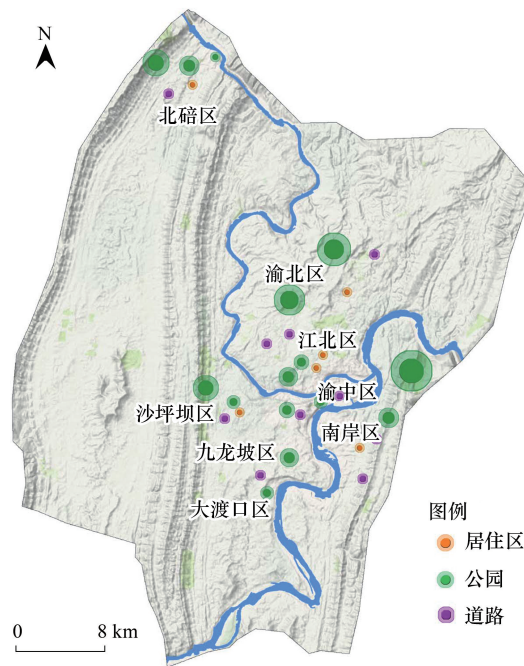


图 1 样地分布示意图

Fig.1 Distribution of sample plots

落叶期分别为 339.4 天, 347.9 天, 358.3 天 (见图 3)。通过单因素方差分析可知, 不同热岛强度等级下植物展叶期、初花期、终花期、落叶期均存在显著差异 ( $P < 0.001$ ), 以凉岛区为对照, 热岛过渡区与热岛区植物展叶期较凉岛区分别提前了 5.1 天和 8.1 天, 初花期分别提前了 4.0 天和 20.8 天, 终花期分别提前了 4.8 天和 11.6 天, 而落叶期分别推迟了 8.5 天和 18.9 天, 且热岛强度等级越大, 提前或推迟于凉岛区的天数越多。

### 2.3 不同功能型植物物候对热岛效应的响应

#### 2.3.1 不同生长型植物物候对热岛效应的响应

灌木与乔木的展叶期在热岛过渡区较凉岛区分别提前了 5.3 天和 4.7 天, 热岛区分别提前了 9.2 天和 7.0 天; 初花期在热岛过渡区分别提前了 10.5 天和 1.1 天, 热岛区分别提前了 23.9 天和 20.7 天; 终花期在热岛过渡区分别提前了 11.6 天和 2.3 天, 热岛区分别提前了 14.2 天和 12.1 天; 而落叶期在热岛过渡区分别推迟了 10.2 天和 8.1 天, 热岛区分别推迟了 20.2 天和 20.3 天 (见图 4)。

可见灌木与乔木的展叶期、初花期、终花期均随热岛强度等级的增强而提前 ( $P < 0.05$ ), 落叶期均随热岛强度等级的增强而推迟 ( $P < 0.05$ ), 且热岛强度等级越大, 物候变化幅度越大。相同热岛强度等级下, 灌木展叶期与落叶期变化幅度均显著大于乔木变化幅度 ( $p < 0.05$ ), 初花期与终花期虽差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但也呈现出灌木变化幅度大于乔木的趋势。

#### 2.3.2 不同叶生活型植物物候对热岛效应的响应

常绿与落叶植物的展叶期在热岛过渡区较凉岛区分别提前了 6.3 天和 5.0 天, 热岛区分别提前了 9.2 天和 8.1 天; 初花期在热岛过渡区分别提前了 8.1 天和 3.0 天, 热岛区分别提前了 21.3 天和 22.3 天; 终花期在热岛过渡区分别提前了 11.3 天和 1.7 天, 热岛区分别提前了 15.1 天和 10.4 天; 落叶期不存在常绿与落叶的比较 (见图 5)。

单就落叶植物而言, 植物展叶物候在热岛区与热岛过渡区分别提前了 5.0 天和 8.1 天, 而落叶期分别推迟了 8.5 天和 18.9 天 (见图 5), 进而导致叶生长季分别延长了 13.5 天和 27.0 天 ( $P < 0.001$ ), 并且落叶期推迟天数大于展叶期提前天数, 对生长季延长的贡献更大。

可见常绿与落叶植物春季物候均随热岛增温而提前 ( $P < 0.05$ ), 且热岛强度等级越大, 物候变化幅度越大。相同热岛强度等级下, 常绿植物物候变化幅度大于落叶植物, 且终花期两者变化幅度差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.3.3 不同区系成分植物物候对热岛效应的响应

本土植物与引种植物的展叶期在热岛过渡区较凉岛区分别提前了 5.3 天和 5.5 天, 热岛区分别提前了 5.9 天和 10.9 天; 本土植物初花期在热岛过渡区推迟了 0.7 天而引种植物提前了 10.6 天, 在热岛区两者分别提前

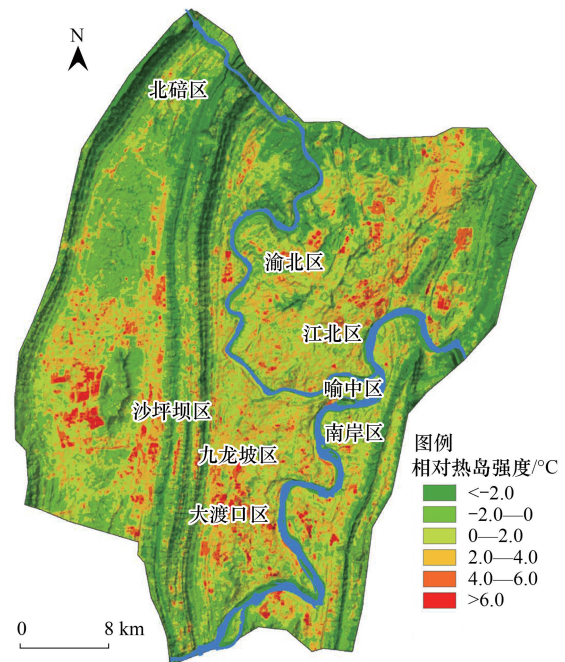


图 2 重庆主城区热岛强度空间分布图

Fig. 2 Distribution chart of the UHI intensity of Chongqing

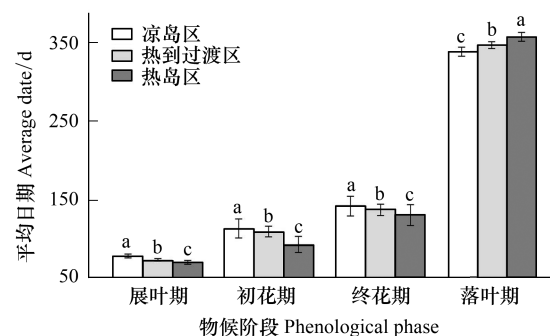


图 3 不同热岛强度等级下植物各物候差异比较

Fig. 3 Differences in phenology under different UHI intensity levels

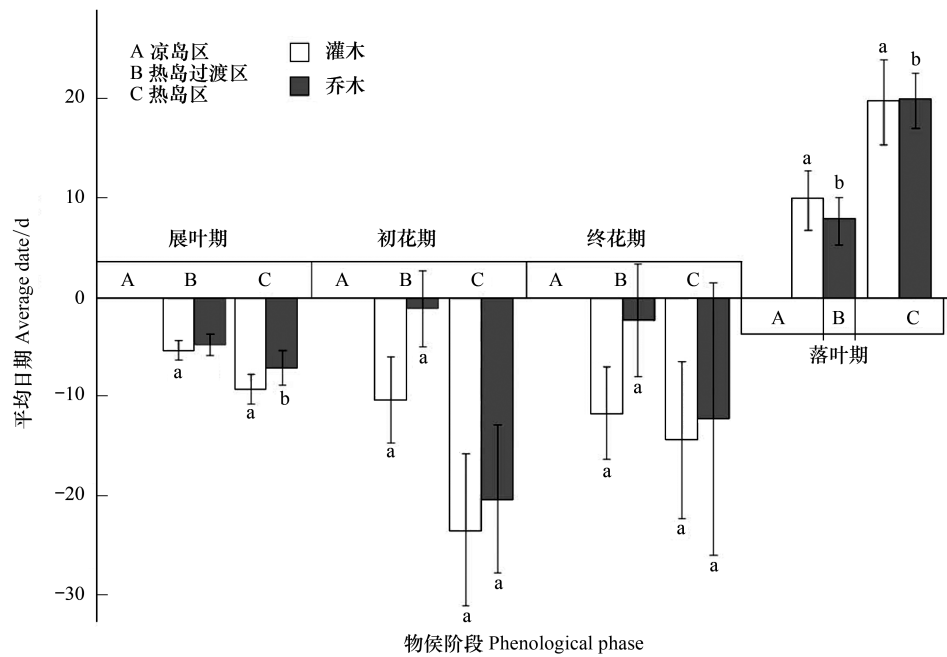


图 4 乔木与灌木物候对不同热岛强度的响应差异

Fig.4 Differences in phenology between trees and shrubs under different UHI intensity level

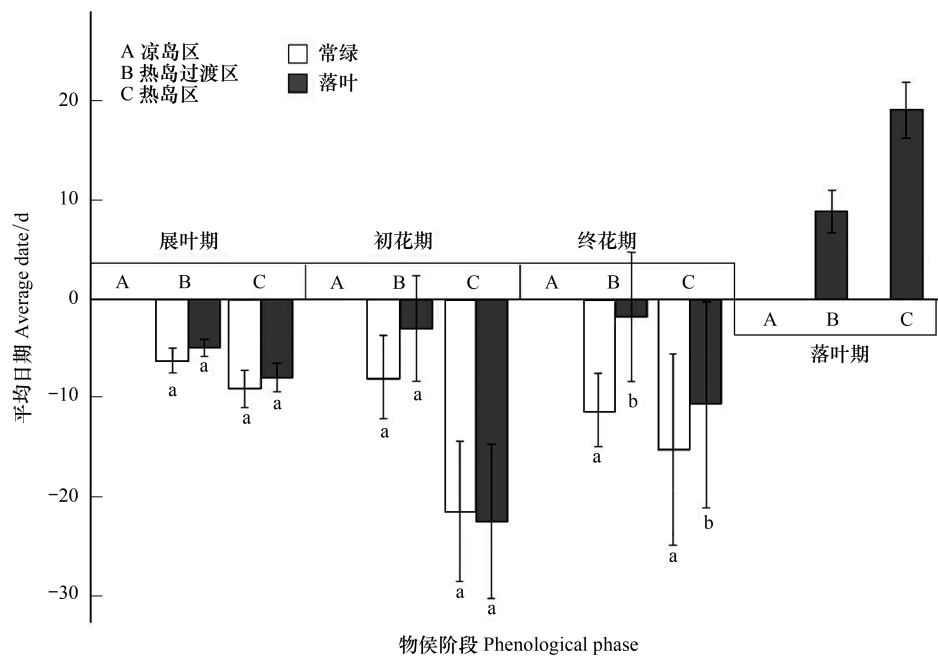


图 5 常绿植物与落叶植物物候对不同热岛强度的响应差异

Fig.5 Differences in phenology between evergreen and deciduous under different UHI intensity level

了 18.0 天和 25.0 天;本土植物终花期在热岛过渡区推迟了 1.0 天而引种植物提前了 12 天,热岛区两者分别提前了 3.5 天和 21.2 天;落叶期在热岛过渡区分别推迟了 5.7 天和 11.5 天,热岛区分别推迟了 18.9 天和 20.5 天(见图 6)。

可见本土植物与引种植物展叶期均随热岛增温而提前 ( $P < 0.05$ ),落叶期均随热岛增温而推迟 ( $P < 0.05$ ),本土植物初花期与终花期随热岛增温先略微延后然后再提前,而引种植物则随之明显提前。从变化幅度上

看,热岛强度等级越大,各物候期物候变化幅度越大,相同热岛强度等级下,引种植物物候变化幅度大于本土植物,且展叶期、终花期两者变化幅度差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

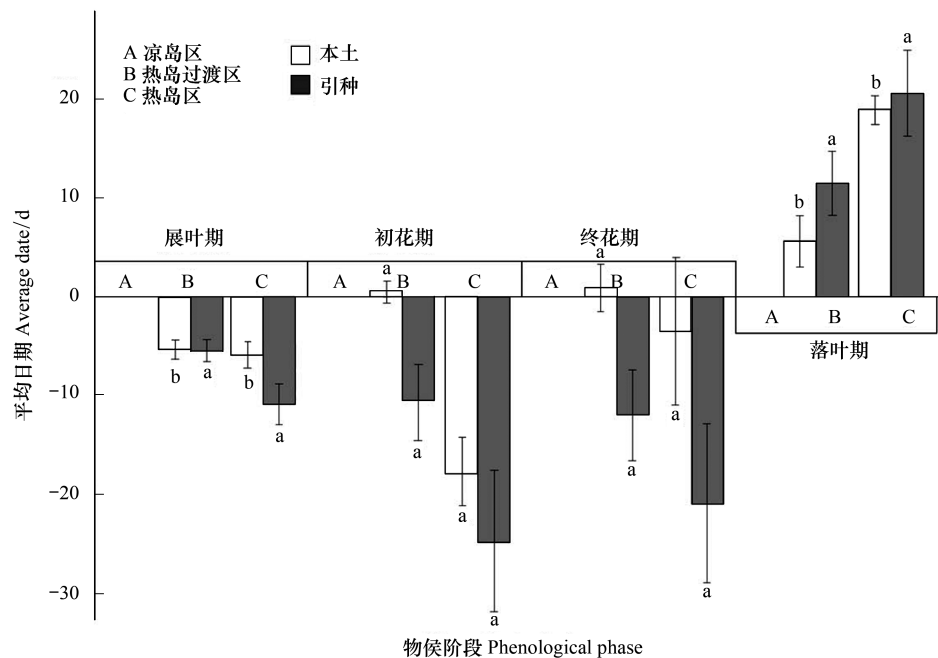


图6 本土植物与引种植物物候对不同热岛强度的响应差异

Fig.6 Differences in phenology between exotic and native species under different UHI intensity level

### 3 讨论

#### 3.1 植物物候对城市热岛效应的响应机制

目前,有关城市内部不同热岛强度下植物物候变化趋势的研究报道不多<sup>[8-9]</sup>,更没有人研究过山地城市不同生活型植物物候对热岛增温响应的差异。本研究发现,山地城市内部热岛增温使植物春季物候提前,秋季物候推迟,植物生长季延长,与物候在城乡梯度上的变化趋势一致<sup>[1,6-8,27-28]</sup>。可见热岛效应带来的温度变化依然是影响城市内部精细尺度下物候变化的主要驱动因子<sup>[8-9,29]</sup>,温度通过影响酶的活性影响植物生长过程及植物物候,温度升高促进植物酶的活性,从而加快植物发育进程<sup>[30-31]</sup>。

已有研究表明,热岛增温导致的植物叶生长季延长主要依赖于春季物候的提前<sup>[4,32-33]</sup>,本研究却发现落叶物候比展叶物候敏感,秋季落叶期推迟天数对生长季延长的贡献大于春季展叶期提前天数,与已有研究相悖,可能原因有三点:一是高程对植物物候的影响<sup>[6,13-14]</sup>。山地城市热岛强度等级不仅体现在温度的差异上,同时也体现了海拔高度的差异,故高程对物候的影响也会叠加到热岛效应之上,但高程对物候变化的贡献有多大?还需进一步研究;二是热岛效应的季节变化。重庆主城区热岛效应在秋冬季节最强<sup>[25-26]</sup>,故秋冬季节不同热岛强度等级的温差大于春季温差,因而落叶期物候变化幅度随温差的增大而增大,同时,冬季热岛区增温偏高可能不利于打破芽的休眠而使春季物候推迟,凉岛区较冷的冬温则有利于打破休眠,促进春季物候的发生<sup>[34]</sup>,从而部分抵消春季物候随热岛增温的提前效应;此外,本课题组还发现,城市植物在人工修剪状态下的春季物候较自然状态下推迟<sup>[35]</sup>,而随着城市热岛强度等级的增加,植物人工修剪痕逐渐加重,故春季物候随热岛增温的提前幅度会因修剪程度的增加而部分抵消,使春季物候提前效应减弱。

由于城市热岛效应受城市化程度及人类活动的影响,若未来热岛效应继续增强,其对植物物候的影响幅度可能会持续增大,但是否存在增温阈值,还需要进一步研究<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.2 不同功能型植物物候变化差异的原因分析

植物功能型(plant functional types)反映植物对环境变化的适应策略<sup>[36]</sup>,因此,不同功能型植物对热岛效

应的响应特征也应存在差异<sup>[5,37]</sup>。目前已开展有草本植物与木本植物物候对环境变化的响应研究,结果表明,一年生、草本植物比多年生木本植物对增温的响应更加敏感<sup>[8,32]</sup>,但不同功能型木本植物对热岛效应的响应如何却鲜有研究,Jeong 等对南韩 4 种植物物候研究发现,两种灌木对城市热岛增温的响应较两种乔木更加敏感,本研究结果也显示灌木各物候期随热岛强度的增加变化幅度大于乔木,即灌木对热岛增温的敏感度高于乔木<sup>[38]</sup>。其原因可能在于,用以岛强度等级划分的气温的测定高度为 1.5 m,而用以物候观测对象的乔木高度大都在 3 m 以上,灌木高度多集中在 0.6-2 m,故灌木层尤其是低矮灌木的物候受地面温度影响显著。城市内复杂的下垫面性质使地面温度的日变差显著大于气温的日变差<sup>[39]</sup>,因而不同热岛强度等级下,灌木层温差实际大于乔木层温差,故灌木层物候变化幅度更大。结合前人研究可推测,对热岛效应的效应敏感程度由大到小为草本>灌木>乔木,因此植物距离地面的高度可能是造成不同生长型植物物候对热岛响应差异的主要原因。

不同叶生活型植物物候对热岛的响应也存在差异,常绿植物与落叶植物相比,常绿植物对热岛增温更加敏感,可见不同叶生活型植物对热岛增温的适应策略不同。引种植物与本土植物相比,引种植物物候对热岛增温的响应更加敏感,可能是由于引种植物在异地栽培过程中,对环境变化有更强的可塑性,而本土植物在长期进化过程中,各性状对生长地环境均具有极强的适应能力,因此,本土植物物候对热岛效应的长期缓慢变化具有更强的稳定性。

#### 4 结论

城市热岛是伴随城市化过程产生的局地小气候的改变。重庆作为典型的山地城市,因地形复杂、区域封闭而表现出明显的热岛效应,随着城市内部热岛强度的增加,植物春季物候明显提前而秋季物候显著推迟,植物生长季延长。不同功能型植物物候进行比较得出:灌木物候较之乔木对热岛增温更加敏感,可能是由植物距离地面的高度差异导致的增温差异造成的;常绿植物较之落叶植物对热岛增温更加敏感,体现出不同叶生活型植物的不同适应策略;引种植物较之本土植物对热岛增温更加敏感,归因于本土植物对原生环境的长期适应性以及引种植物对异地栽培的高度可塑性。

本研究揭示了植物物候对山地城市内部热岛效应的响应特征以及不同功能型植物物候对热岛效应的响应机制,在一定程度上填补了我国西南山区物候研究的空缺,为预测山地城市植物物候对未来城市小气候变化乃至全球气候变暖趋势的响应提供了早期预警。但热岛效应不仅仅体现在温度的差异,还包括湿度、下垫面性质、城市地表径流等的变化,物候的影响因素也不仅限于温度,降雨、湿度、辐射等也会对其造成一定影响。未来物候变化是否会随热岛强度等级的增加持续变化,是否存在变化阈值?除温度以外的其他城市小气候的变化对植物物候的影响如何?各气候因子的综合作用对植物物候的影响又如何?值得未来进一步探讨。

**致谢:**感谢西南大学园艺园林学院硕士生欧阳丽娜、金光娟、赵心怡、郝桂芝、刘磊在野外物候观测及气温测量中提供的帮助。

#### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Xu H, Yang X, Huang Q X, Fang W H, Shi P J. Study of impact of urbanization on phenology using multisource satellite data//*Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Boston, MA, USA: IEEE, 2008: III-804-III-807.
- [3] Neil K, Wu J G. Effects of urbanization on plant flowering phenology: a review. *Urban Ecosystems*, 2006, 9(3): 243-257.
- [4] 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): 260-273.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [ 7 ] 韩贵锋, 徐建华, 袁兴中. 城市化对长三角地区主要城市植被物候的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1803-1809.
- [ 8 ] Mimet A, Pellissier V, Quénol H, Aguejedad 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.
- [ 9 ] Shustack D P, Rodewald A D, Waite T A. Springtime in the city: exotic shrubs promote earlier Greenup in urban forests. *Biological Invasions*, 2009, 11(6): 1357-1371.
- [ 10 ] 蔡红艳, 杨小唤, 张树文. 植物物候对城市热岛响应的研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 221-228.
- [ 11 ] 葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战. *中国科学院院刊*, 2010, 25(3): 310-316.
- [ 12 ] Studer S, Appenzeller C, Defila C. Inter-annual variability and decadal trends in Alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Climatic Change*, 2005, 73(3): 395-414.
- [ 13 ] Ziello C, Estrella N, Kostova M, Koch E, Menzel A. Influence of altitude on phenology of selected plant species in the Alpine region (1971-2000). *Climate Research*, 2009, 39(3): 227-234.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 徐涵秋, 唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义. *生态学报*, 2013, 33(11): 3249-3257.
- [ 16 ] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 陈仲新, 刘佳. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. *国土资源遥感*, 2004, 16(3): 28-32, 36-36, 41-41.
- [ 17 ] 张金区. 珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究[D]. 广州: 中国科学院(广州地球化学研究所), 2006.
- [ 18 ] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值-标准差法界定城市热岛的对比研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(2): 145-150.
- [ 19 ] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(3): 282-289.
- [ 20 ] Morris C J G, Simmonds I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(15): 1931-1954.
- [ 21 ] 许格希, 裴顺祥, 郭泉水, 牛树奎. 城市热岛效应对气候变暖和植物物候的影响. *世界林业研究*, 2011, 24(6): 12-17.
- [ 22 ] 徐家良. 近百余年来上海两次增暖期的特征对比及其成因. *地理学报*, 2000, 55(4): 501-506.
- [ 23 ] 周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994.
- [ 24 ] 周红妹, 周成虎, 葛伟强, 丁金才. 基于遥感和 GIS 的城市热场分布规律研究. *地理学报*, 2011, 56(2): 189-197.
- [ 25 ] 邹敏. 重庆主城区绿地对城市热岛效应影响的多尺度研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [ 26 ] 何泽能, 高阳华, 杨世琦, 上官昌贵. 重庆市城市热岛效应变化特征及减缓措施. *高原山地气象研究*, 2017, 37(4): 48-52.
- [ 27 ] Luo Z K, Sun O J, Ge Q S, Xu W T, Zheng J Y. Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. *Ecological Research*, 2007, 22(3): 507-514.
- [ 28 ] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296(5573): 1689-1691.
- [ 29 ] Dhami I, Arano K G, Warner T A, Gazal R M, Joshi S. Phenology of trees and urbanization: a comparative study between New York City and Ithaca, New York. *Geocarto International*, 2011, 26(7): 507-526.
- [ 30 ] Chmielewski F M, Rötter T. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(2): 101-112.
- [ 31 ] 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 张福春. 近 150 年北京春季物候对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2005, 26(4): 263-267.
- [ 32 ] 常兆丰, 王强强, 韩福贵, 仲生年. 民勤荒漠区不同生活型植物物候响应气候变暖的差异. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1921-1929.
- [ 33 ] Menzel A. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(2): 76-81.
- [ 34 ] 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. *地理学报*, 1995, 50(5): 402-410.
- [ 35 ] 刘聪, 王海洋, 阳佩良. 重庆园林绿化树种红檫木春季物候特征研究. *林业调查规划*, 2018, 43(1): 182-186, 195-195.
- [ 36 ] McIntyre S, Lavorel S, Landsberg J, Forbes T D A. Disturbance response in vegetation—towards a global perspective on functional traits. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(5): 621-630.
- [ 37 ] Dormann C F, Woodin S J. Climate change in the Arctic: using plant functional types in a meta-analysis of field experiments. *Functional Ecology*, 2002, 16(1): 4-17.
- [ 38 ] 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.
- [ 39 ] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006.