

DOI: 10.20103/j.stxb.202403070462

肖雨慧, 韩立建, 刘佳欣, 李伟峰, 周伟奇, 钱雨果, 王斐, 朱孟郡. 北京市典型致敏植物空间分布格局及物候特征. 生态学报, 2024, 44(24): 11065-11078.

Xiao Y H, Han L J, Liu J X, Li W F, Zhou W Q, Qian Y G, Wang F, Zhu M J. Analysis on the spatial distribution pattern and phenological characteristics of typical allergenic plants in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11065-11078.

北京市典型致敏植物空间分布格局及物候特征

肖雨慧^{1,2}, 韩立建^{2,3,*}, 刘佳欣^{1,2}, 李伟峰^{2,3}, 周伟奇^{2,3,4,5}, 钱雨果^{2,3}, 王斐⁶, 朱孟郡⁷

1 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站, 北京 100085

5 京津冀区域生态环境变化与综合治理野外科学观测研究站, 北京 100085

6 北京市园林绿化局综合事务中心, 北京 100000

7 山东润君环保咨询有限公司, 济南 250000

摘要:城市致敏花粉是伴随城市生态建设引种高致敏花粉植物产生的新兴且日益严重的城市生态问题之一。针对该问题,开展高致敏植物的位置与花期识别,并基于此评估其花粉对城市居民的潜在暴露风险,有助于花粉过敏人群合理规划行程和户外活动时间。因此,以高度城市化、人口密集是北京五环为研究区,以数量多、分布密度高、花粉量大和因人为种植引入的松、柏类为典型案例,探讨其空间分布和花粉释放时间。并基于此,揭示其过敏风险的时空格局特征,进而阐明城市空间格局与致敏植被栽种之间的关系,加深致敏植物对城市环境变化的响应和适应策略的理解。研究表明:①城市发展程度和不同的城市功能区对致敏植物的分布影响显著,城市化程度越高的地方松、柏类植被的栽种会相对较少,住宅区、科教文化区、历史文化遗产保护区等功能区(四季青乡、海淀乡、天坛等 27 个街道)松、柏类植被密度高,而农业、工业等功能区(老庄子乡、黄村镇等 17 个街道)松、柏类植被密度低;②城市致敏植物的花期时间差异展现了植物个体对城市环境的响应与适应的多样性;2019—2022 年松、柏类植物开始提前开花,该适应策略有助于致敏植物在城市环境中生存和繁衍;③松柏致敏花粉的潜在暴露风险等级随着致敏植物对城市的适应而改变;但城区内大部分街道都是低风险区域(93 个),其次是中低风险区域(15 个)>中高风险区域(5 个),以及少部分的高风险区域(4 个)和中等风险区域(1 个)。基于典型致敏植物空间分布格局及物候特征分析可将城市绿地的花粉致敏暴露与人群健康相耦合,为城市绿化建设的优化和致敏花粉缓解提供科学证据,并为未来的城市绿地规划与建设提供实证参考。

关键词:城市区域;致敏花粉;松柏;时空分布特征;潜在暴露风险研究

Analysis on the spatial distribution pattern and phenological characteristics of typical allergenic plants in Beijing

XIAO Yuhui^{1,2}, HAN Lijian^{2,3,*}, LIU Jiixin^{1,2}, LI Weifeng^{2,3}, ZHOU Weiqi^{2,3,4,5}, QIAN Yuguo^{2,3}, WANG Fei⁶, ZHU Mengjun⁷

1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1301103);国家自然科学基金面上项目(32071579)

收稿日期:2024-03-07; **采用日期:**2024-09-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljhan@cees.ac.cn

3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

4 *Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*

5 *Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station or Eco-Environmental Change, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*

6 *General Affairs Center of Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau, Beijing 100000, China*

7 *Shandong Runjun Environmental Consulting Co., Ltd., Jinan 250000, China*

Abstract: Urban allergenic pollen is one of the emerging and increasingly severe urban ecological problems associated with the process of urban ecological construction. To address this issue, it is important to identify the locations and flowering periods of highly allergenic plants and assess the potential exposure risk of their pollen to urban residents. This can help individuals with pollen allergies plan their schedules and outdoor activities more effectively. The study focuses on the highly urbanized area within the fifth ring road of Beijing and uses the densely distributed, high-pollen-producing pine and cypress trees as a typical case, mainly introduced through human planting. By exploring their spatial distribution and pollen release timing, we aim to reveal the spatiotemporal patterns of allergic risks and highlight the relationship between urban spatial patterns and the planting of allergenic vegetation. In addition, the study investigates the response and adaptation strategies of allergenic plants to urban environmental changes, highlighting their resilience and survival intelligence in urban environments. The results show that: 1) There are significant differences in the distribution of allergenic vegetation in cities based on urban development and different functional areas. In areas with higher urbanization levels, the planting of pine and cypress trees is relatively scarce. Residential areas, educational and cultural zones, historical and cultural heritage protection areas such as Sijiqing subdistrict, Haidian subdistrict and Tiantan subdistrict have high densities of pine and cypress trees, while agricultural and industrial zones such as Laozhuangzi subdistrict and Huangcun subdistrict have low densities of these trees. 2) The differences in flowering periods of urban allergenic plants demonstrate the diversity of plant responses and adaptations to the urban environment. Plants may begin to bloom early in 2019—2022, strategies that aid allergenic plants in survival and reproduction in urban environment. 3) Potential exposure risk of allergenic pollen change as plants adapt to the urban environment. Most streets in urban areas are classified as low-risk (93 subdistricts), followed by medium-low-risk areas (15 subdistricts), medium-high-risk areas (5 subdistricts), and a few high-risk areas (4 subdistricts) and moderate-risk areas (1 subdistrict). By analyzing the spatial distribution patterns and phenological characteristics of typical allergenic plants can couple urban green space exposure with public health, this study provides scientific evidence for optimizing urban greening construction and alleviating allergic pollen-related issues, and empirical references for future urban green space planning and construction.

Key Words: urban area; allergenic pollen; pine and cypress; spatial and temporal distribution characteristics; potential exposure risk

城市空气质量受城市人类活动的影响较为严重,包括直接向空气中排放的污染物以及盲目的城市园林建设引入的高致敏花粉植物所引发的花粉致敏问题。在城市中,大量引入的高致敏性植物,导致致敏植物的大量繁殖且与城市居民密集活动区域毗邻,造成花粉过敏人数的急剧上升^[1-4]。除此之外,由植物释放的气传花粉是导致变应性鼻炎^[5]、过敏性结膜炎^[6]、过敏性哮喘^[6]等过敏性季节病的主要原因之一。而花粉过敏的治疗费用也较高且通常无法完全治愈,许多患者需要长期接受药物治疗、脱敏治疗甚至住院治疗,患病期间无法正常工作,在给过敏居民带来了沉重经济负担的同时,也在一定程度上影响了城市的可持续发展。虽然这一问题受到了较为广泛的关注^[7-11],但目前研究多采用物候相机或观测站点等传统物候观测手段针对城市典型位置的精准定位观测,而缺乏在城市尺度开展全覆盖地对致敏植物的空间分布和开花物候期的研究。同时,由于全球气候变化、热岛效应增强和高致敏植物广泛种植等原因致使致敏植物分布和开花物候时间逐年

变化,传统的物候观测方法早已不能满足花粉过敏群体获得精准的户外行程和活动时间的实际应用需求,从而无法有效提出城市居民的高致敏花粉回避建议。

国内外针对城市致敏植物种类构成调查研究,主要通过园林统计或城市绿化统计等统计数据说明,或通过抽样、全覆盖式的地面调查作业调研^[12]。在城市密集建成区内,还可以利用高分辨率的遥感影像,将目视解译与基于地面识别获取的计算机特征识别结合用于致敏物种的空间识别^[13-14]。传统的致敏植物调查多采用各地方的植物志、《中国气传致敏花粉调查》以及《中国气传花粉和植物彩色图谱》上的统计数据进行调查^[15],如云文丽等^[15]根据多个统计文鉴确定了呼和浩特市的花粉致敏植物种类清单,但缺点是无法获得其精准的空间位置信息;地面调查的工作方式不仅能精确识别空间位置还观测简便,如张曼琳等^[11]利用随机抽样法对深圳建成区进行了致敏植物的属种调查,熊国威等^[7]利用“形色”APP列出了广州城区各个街区内致敏植物的主要清单,但也存在更新时效慢、效率低、成本高、易受观测者主观经验等问题影响等问题;将遥感数据与地面调查结合,不仅可以弥补统计数据和地面调查的不足,同时也可以支撑实现了空间尺度由“点”监测转向“面”监测^[16-17],尤其是利用哨兵、陆地卫星等影像数据可以有效地提取典型树种的空间分布,并支撑致敏植物的花期物候等的研究工作。

植被物候是植物受自身因素和外界环境的影响而表现出的以年为周期的自然现象,是植物长期适应季节性环境变化而形成的生长发育节律^[18-20]。物候观察起初是基于物候学家对植物的直接观察,费用不高、实验简单易行,可以获取最准确的物候数据^[21-22],但受限于局部尺度的结果难以反应整个城市致敏植物的开花趋势。同时,人工记录耗时多,时效性较差。随着长时间序列对地观测技术的进步,卫星影像序列为大面积花粉季节信息的获取提供了新途径^[23-25]。植被的开花与花粉释放之间存在密切的关联,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和增强型植被指数(Enhanced Normalized Vegetation Index, EVI)等特征指标与植被开花有显著相关性。因此,遥感数据中的植被指数可以作为潜在的花粉释放信号的代表,但需要进一步结合典型物种进行改良,以提高该方法的准确性和可靠性^[23]。

致敏花粉植物的空间分布特征及花期时间受到城市规划建设和空间格局的影响。城市规划者或管理者的喜好往往会对致敏花粉植物的种植产生一定的影响^[26]。松、柏类植被是北京市春季最为典型和主要的致敏花粉产生树种。自然界的松柏主要生活在山区,但在历史上,由于其独特的形态、色彩和文化价值备受皇族喜爱,得以在北京城区中广泛种植,但其花粉也对城市居民产生了不同程度的致敏影响^[27-30]。因此,本研究以北京市五环内为研究区,松柏为典型案例,利用遥感数据精准识别松、柏类植被的空间位置和物候信息,并解析松柏的分布、花期与城市空间格局的关系,开展其潜在花粉致敏风险评估。希望本研究能为城市绿化建设的优化和致敏花粉缓解提供更为宏观的科学依据,为未来的城市绿地规划与建设提供实证参考。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

北京市作为我国的首都,全市面积约 1.68 万 km²,截至 2023 年常住人口约 2184.3 万,尤其是北京市的五环内,面积约 667 km²,却拥有超过一半以上的常住人口,是我国最具代表性的人口高度密集城市区域,也是各种城市生态环境问题对人群健康影响最为凸显的区域。近年来随着空气污染由重减轻,但不断加剧的致敏花粉问题却逐步受到城市居民的关注。目前,北京市花粉过敏病患者占呼吸道过敏病患者的比例已超三分之一,在花粉高峰期约有几十万人受到不同程度的影响。北京市以暖温带湿润大陆性季风气候为主,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春秋两季相对较短。年均气温为 11—12℃,年平均降雨量在 600—700 mm^[31],境内植被种类丰富,春季致敏树种以松科(*Pinaceae*)、柏科(*Cupressaceae*)、壳斗科(*Fagaceae*)、杨柳科(*Salicaceae*)等木本植物为主^[32]。其中松、柏类植被释放的花粉量春季占比较大,是研究区中的优势花粉致敏植物^[14]。此外,松、柏类为常绿植物,尤其在我国的北方城市具有较好的景观效应、观赏价值和人文情怀,受到文人墨客以及皇族的喜爱,在城市中大量种植并遗留至今^[33],也是典型的由人类移栽至城市中的典型树种。因此,本研究

以北京市五环城区(116°11'—116°33'E,39°44'—40°02'N)作为研究区域,松、柏类植被作为研究对象,研究区如图 1 所示。

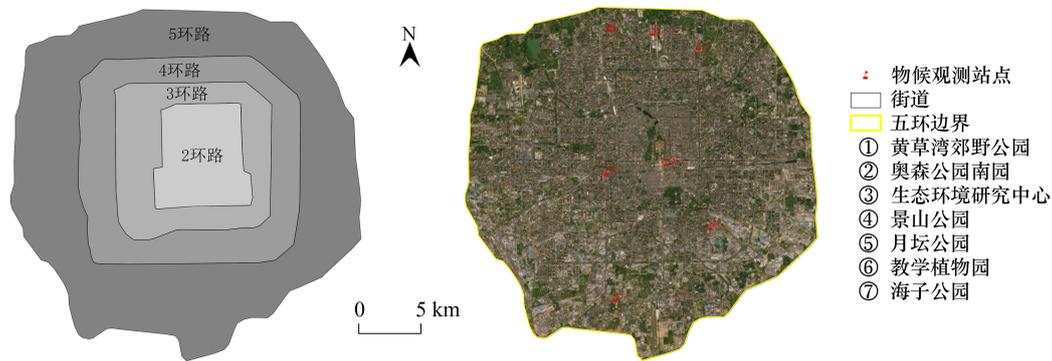


图 1 研究区位置示意图(地图来源:2024 年 3 月 28 日谷歌在线地图)

Fig.1 Study area location diagram (Map source: Google Online Maps, March 28, 2024)

在研究区域内均匀选择公园或绿地作为观测站点,观测样点要求包含本次研究的松、柏类植被,且具有交通便利、地形平坦、无视线遮挡的特点。最终在研究区域内选择了符合特征的 7 个站点作为观测点(图 1),分别为站点 1 黄草湾郊野公园、站点 2 奥森公园南园、站点 3 生态环境研究中心、站点 4 景山公园、站点 5 月坛公园、站点 6 教学植物园、站点 7 海子公园,具体信息参见表 1。

表 1 北京市五环内的采样点的信息

Table 1 Information on sampling sites within the fifth ring road of Beijing

观测站点 Observatory sites	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔/m Altitude	开花始期/日序 Start of Flowering
点位 1 Site 1	116.428611°	40.004167°	32	70
点位 2 Site 2	116.385000°	40.014722°	39	65
点位 3 Site 3	116.337778°	40.007778°	51	63
点位 4 Site 4	116.390278°	39.924167°	53	61
点位 5 Site 5	116.345833°	39.915278°	47	63
点位 6 Site 6	116.428611°	39.872778°	34	69
点位 7 Site 7	116.344167°	39.815278°	47	61

1.2 数据来源及预处理

本研究选取了 Sentinel-2A、Landsat-8 和 MOD09Q1 三个遥感数据分别用于提取松、柏类植被的空间位置和物候信息。Sentinel-2A 具有空间分辨率高的特点,可以准确识别松、柏类植被的冠层形态和分布。除此之外,通过多光谱中不同波段的组合可以区分松、柏类植被和其他植被类型,因此,本研究选择 Sentinel-2A 用于提取松、柏类植被信息^[14, 16]。哨兵 2A 多光谱数据来源于欧洲航天局 ESA 的数据中心(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),时间选择为 2022 年 12 月 15 日到 2023 年 3 月 15 日的冬季影像,共 20 景 10m 的 L2A 级影像数据。

针对物候信息的提取,由于城市区域中相对较小的松柏斑块的监测受到空间分辨率较低的遥感影像数据不能很好地分解混合像元的干扰^[34]。为了解决这个问题,本研究需要使用具有高时空分辨率的遥感影像数据来提取松、柏类植被的物候信息。因此,选择了空间分辨率为 30m、时间分辨率为 16d 的 Landsat-8 OLI C2 L2 数据和空间分辨率为 250m、时间分辨率为 8d 的 MOD09Q1 这两个数据源,以解决“时空矛盾”的问题。Landsat-8 数据源强调空间维度,具有多光谱波段和全色波段,适合提供长时间序列的数据用于松、柏类植被

的监测。本研究通过 Google Earth Engine(GEE)在线平台筛选 2019—2022 年所有时段质量较好、云量较少的 Landsat-8 OLI C2 L2 数据,空间分辨率为 30m、时间分辨率为 16d,共 57 景。该数据集已经过大气校正和基于地形的几何校正等预处理工作,可直接使用。本研究利用波段 4 和 5 计算 2019—2022 年共 57 期 NDVI 结果,形成 30m Landsat-8 NDVI 时间序列影像。

MOD09Q1 数据来源于美国航空航天局 NASA 的数据中心 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)。本研究选取了经过了了几何校正和大气校正,并广泛应用于植被物候变化监测的 NDVI 时间序列产品,并利用 GEE 平台下载 2019—2022 年所有时段的 NDVI 数据,空间分辨率为 250m、时间分辨率为 8d,共 184 景。本研究以高分辨率影像 Landsat 的 NDVI 为基准,将 MODIS NDVI 影像重采样至 30m 的空间分辨率,利用时空非局部滤波融合方法进行批处理融合影像,该方法是通过建立时空块间的相似性矩阵,来描述不同时间和空间上的像素之间的相似度^[35]。最终得到了融合后的 2019—2022 年四年共 184 期 30m NDVI 影像数据(后文简称 L-M 数据)。

1.3 松、柏类植被空间位置识别技术

由于松、柏类植被是常绿针叶林植物,提取松、柏类植被的空间分布格局时可以利用其自身不同于其他植被的生物特性进行提取^[14]。在冬季,松、柏类植被的叶片叶绿素含量和叶片含水量都会显著高于该时段为非生长季的植物。所以本研究参考叶彩华等^[14]提出的方法,利用分层分类的思想,首先基于冬季多时相的 Sentinel-2A 卫星影像(12 月 15 日—次年 3 月 15 日),构建归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)均值影像并设定合适的阈值 a 以区分研究区内的植被和非植被,其次再构建地表水分指数(Land Surface Water Index, LSWI)均值影像设定合适的阈值 b 以区分植被中的常绿植被和非常绿植被,将 NDVI 大于阈值 a 且 LSWI 也大于阈值 b 的像元分为松、柏类植物,最终获得空间分辨率为 10m 的松、柏类植被空间位置分布图。

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (1)$$

其中, R 和 NIR 分别为 Sentinel-2A 卫星的 Band4 和 Band8。

$$\text{LSWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2)$$

其中, NIR 和 SWIR 分别为 Sentinel-2A 卫星的 Band8 和 Band11。

$$\text{VSB} = \begin{cases} 1, & \text{NDVI} > a, \text{LSWI} > b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, VSB 值为 1 时,该像元为松、柏类植被。

经过对比大量 Sentinel-2A 卫星影像目视解译和实地数据分析后,最终确定 NDVI 阈值取 0.18, LSWI 阈值取 0.06。由于初步获取的松、柏类植被空间位置,依然存在错分和漏分的问题,以及细碎斑块的存在,还应该结合谷歌地图订正,并利用 ENVI 的聚类和过滤功能,最终得到空间分辨率 10m 的松、柏类植被空间分布图。技术处理流程包含影像预处理、初步提取、后处理和精度验证四个步骤。

松、柏类植物空间位置的验证样本来自中国科学院生态环境研究中心的野外调查数据,其中包含 2580 个松柏点位、1986 个非松柏点位。精度验证采用混淆矩阵的方法,其中总体精度、松柏的用户和生产者精度、Kappa 系数分别为 86.8%、93.2%、78.0% 和 0.73(表 2)。验证表明基于 Sentinel-2A 卫星影像数据提取的北京市五环范围内的松、柏类植被精度能较好地满足本次松柏花粉分布及潜在风险分析研究的要求。

1.4 松、柏类植被的花期识别技术

鉴于松、柏类植被的叶片绿度会随着光合作用的增强而提升,其叶绿素含量的增加又会导致光谱特性的变化,这种变化在遥感影像中表现为归一化植被指数的相应提升。因此,本研究将 NDVI 作为反映松柏叶片绿度变化的重要指标,考虑到这与开花、花粉释放之间密切相关,并进一步将 NDVI 作为花粉释放信号的潜在代表^[23]。

表 2 北京城区松柏混淆矩阵精度评估

Table 2 Evaluation of precision of pine and cypress confusion matrix in Beijing urban area

	松柏/个 Pine and cypress	非松柏/个 Non pine and cypress trees	用户精度/% User Accuracy	生产者精度/% Producer's accuracy
松柏	820	54	93.2	78.0
非松柏	231	1050	81.9	95.1

现有研究发现物候指标 (Start of season, SOS) 可以作为乔木花粉季开始 (Start pollen season, SPS) 的指标, 但一般存在 5d 左右的差异, 遥感时间序列数据一般具有 8d 左右的时间分辨率, 二者的时间差异小于遥感时间序列数据的时间间隔, 因此, 相关指标也可以作为花期的指示性指标。物候期的遥感提取包括植被指数时间序列的重构以及提取物候参数 2 个过程。常用的拟合算法包含 Savitzky-Golay 滤波法、双 Logistic 函数拟合和非对称高斯滤波法等。Savitzky-Golay 滤波能够更好的保留时间序列的细节信息^[18, 36], 所以本研究利用 Timesat3.2 通过局部多项式回归模型以平滑时序数据的 Savitzky-Golay 滤波法对每个年度的 NDVI 时间序列数据进行数据重构。该方法有两个参数能控制滤波效果: 滑动窗口的大小和拟合多项式的阶数, 本研究分别设置为 9 和 2。其表达式如式 4 所示。

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+i}}{2m+1} \quad (4)$$

其中, Y_j^* 代表滤波后的 NDVI 值; C_i 代表 S-G 滤波器的滤波系数; m 代表平滑窗口的半宽; Y 代表原始的 NDVI 值。

而基于 NDVI 重构时间序列数据的植被物候参数提取的主要方法包括阈值法、导数法、滑动平均法等多种方法^[37]。考虑到松、柏类植物是常绿植物, 年内 NDVI 序列起伏变化不大, 因此, 本研究采取动态阈值法对重构后的 NDVI 时序数据进行物候参数的提取。动态阈值法属于阈值法, 不同于固定阈值法, 它是将 NDVI 增加到当年 NDVI 振幅一定百分比的时间定义为起始期。根据动态阈值的原理物候参数提取公式如式 5 所示:

$$\text{NDVI}_{\text{thr}} = \text{NDVI}_{\text{MIN}} + (\text{NDVI}_{\text{MAX}} - \text{NDVI}_{\text{MIN}}) \times C \quad (5)$$

其中, NDVI_{thr} 代表提取物候参数时的阈值; NDVI_{MAX} 代表上升阶段的最大值; NDVI_{MIN} 代表递减阶段的最小值; C 表示为系数。将时间序列上升曲线振幅达到年振幅的 20% 时刻记录为开花始日 (Start of flowering, SOF), 也就是系数 C 取 0.2, 单位为儒略日序数 (Day of year, DOY), 每年的 1 月 1 日日序为 1, 表示为 1 年中的第几天。

松、柏类植被的物候信息验证样本来自中国科学院生态环境研究中心的物候相机观测数据, 共有 7 个观测站点, 观测站点均匀分布于北京市五环 (图 1), 观测频率为一天一次。样地物候监测管理平台累积的 2021.10—2022.06 实测物候数据, 根据检测照片得出真实的松、柏类植被的开始开花期物候信息, 总体相对误差为 10.7% (图 2 和表 3)。

表 3 七个物候观测站点观测数据

Table 3 Observation data from seven phenological observation stations

数据类别 Data type	站点 1 Site 1	站点 2 Site 2	站点 3 Site 3	站点 4 Site 4	站点 5 Site 5	站点 6 Site 6	站点 7 Site 7
实测数据 In-situ data/日序	70	65	63	61	63	69	61
遥感反演数据 Inversion data/日序	54	59	53	64	69	70	54

1.5 潜在暴露风险分析方法

松、柏类植被密度 (松、柏类植被在特定研究内所占的面积, 即后文中的分布面积指标) 可以有效反应花

粉产量的多少,也就是风险的高低。松、柏类植被花期(包含开花峰值期和花期长度两个指标)可以反应释放花粉时间的早晚,也就是产生风险的时间。因此,本研究选择松、柏类植被的植被密度与物候信息来开展松柏花粉潜在致敏风险评估。

以北京市五环内的各个街道作为分析单元,基于各个街道的松、柏类的植被密度,获得以街道为单元的全部街道的平均值和标准差。根据平均值和标准差将其划分为低、中低、中等、中高、高五个密度等级。具体划分标准如下表 4。

表 4 植被密度等级量化表

Table 4 Quantitative table of vegetation density level

值 Value	$\mu-2\sigma$	$\mu-\sigma$	μ	$\mu+\sigma$	$\mu+2\sigma$
等级 Level	低	中低	中等	中高	高

“ μ ”代表平均值,“ σ ”代表标准差

同时,松、柏类植被的花期采用主要值和范围值两个值进行量化。从物候学的角度来看,松柏花期的主要值代表了研究区域内不同位置松柏花期物候分布的主要时间。这一参数主要反映了该区域内大部分松、柏类植被的开花盛期,即松、柏类植被的开花峰值期。松柏花期的范围值则代表了研究区域内松柏花期的最晚时间和最早时间差。这一参数具体描绘了松柏花粉开始释放到结束释放的持续时间,即松、柏类植被的花期长度。具体含义如图 3。

根据松、柏类植被的植被密度与花期信息,将植被密度划分为低、中低、中等、中高、高五个密度等级,为了方便可视化,将开花峰值期或花期长度划分为了 4 个时间段,最后其分为了 20 个不同植被密度和不同时间的风险等级,形成了潜在暴露风险等级图,以评估松柏花粉的致敏影响(表 5)。

表 5 潜在暴露风险等级划分图

Table 5 Potential exposure risk level classification

密度等级 Density level	时间段 1 Time period 1	时间段 2 Time period 2	时间段 3 Time period 3	时间段 4 Time period 4
低密度 Low density	低-时间 1	低-时间 2	低-时间 3	低-时间 4
中低密度 Medium-low density	中低-时间 1	中低-时间 2	中低-时间 3	中低-时间 4
中等密度 Medium density	中等-时间 1	中等-时间 2	中等-时间 3	中等-时间 4
中高密度 Medium-high density	中高-时间 1	中高-时间 2	中高-时间 3	中高-时间 4
高密度 High density	高-时间 1	高-时间 2	高-时间 3	高-时间 4

2 结果与分析

2.1 松、柏类植被的空间分布特征

本研究在研究松、柏类植被的空间分布特征时,主要采用了分布位置、分布面积和分布比例三个指标对

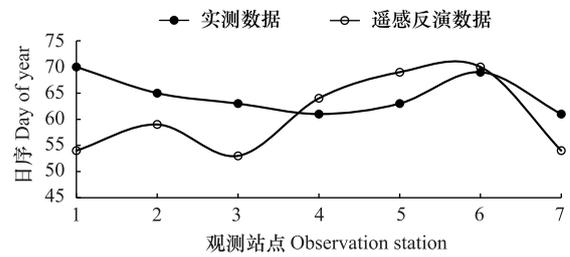


图 2 开花始期遥感反演结果与验证数据散点图

Fig.2 Scatterplot of remote sensing inversion results and validation data at the onset of flowering

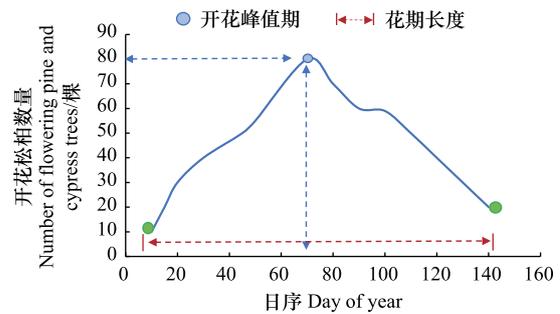


图 3 指标示意图

Fig.3 Indicator diagram

松、柏类植被的空间分布进行了分析。其中,分布位置描述了松、柏类植被在研究区内的具体位置分布情况;分布面积直观反映了松、柏类植被在研究区内所占的实际地面面积大小;而分布比例则是指松、柏类植被在研究区内占地面面积与整个区域总面积之间的比例关系。

北京五环松、柏类植被的分布位置、分布面积和分布比例提取结果如图 4 所示。松、柏类植被在城区内分布不均,主要集中在海淀区、东城区、西城区和朝阳区。“四环至五环”松、柏类植被的分布最多(表 6),达 12.1 km²,占松、柏类植被总面积的 55.2%,但仅占该区域土地面积的 3.3%,表明这一区域是松、柏类植被的主要种植或自然生长区,但并非该环路的优势植被。“二环至三环”和“三环至四环”的松、柏类植被的分布面积分别为 2.8、2.9km²,分别占松、柏类植被总面积的 12.8%和 13.3%,分别占这两个区域土地面积的 2.9%和 2.1%,表明“二环至三环”和“三环至四环”区域的松、柏类植被面积相对较少,且分散分布,不是该环路的优势植被。值得关注的是“二环内”松、柏类植被的分布面积 4.1km²,虽然较少,但占该区域土地面积比例为最高,达 6.6%,表明松、柏类植被是二环内的潜在优势植被。松、柏类植被在不同环路的分布差异,反映出城市发展过程中城市绿化偏好的不同。较老的城区“二环内”,由于历史原因和较早的城市规划,松、柏类植被栽种较多,体现了当时对松、柏类植被作为绿化树种的偏好。而随着城市向外扩张,较新的其他环路区域在绿化选择上可能更加多样,松、柏类植被的分布就相对较少。

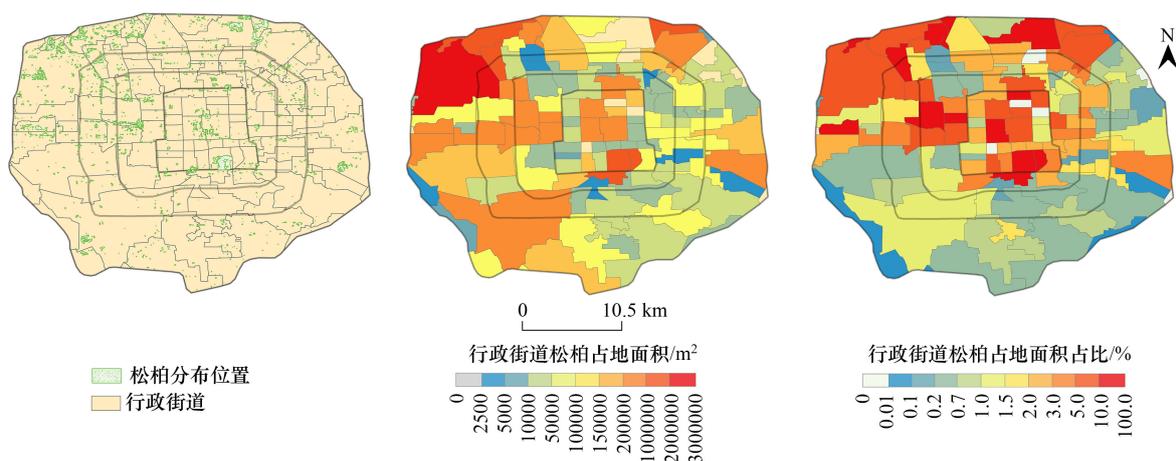


图 4 北京市城区内松、柏类植被空间分布位置图;北京市五环和街道尺度下的松、柏类植被分布面积图;北京市五环和街道尺度下的松、柏类植被分布比例图

Fig.4 Spatial distribution map of pine and cypress vegetation in the urban area of Beijing; Distribution area map of pine and cypress vegetation at the scale of the Fifth Ring Road and streets in Beijing; Distribution ratio map of pine and cypress vegetation at the scale of the Fifth Ring Road and streets in Beijing

表 6 北京五环松柏面积占比情况表

Table 6 The proportion of pine and cypress areas in Beijing's ring road

区域 region	二环内 Within the Second Ring	二环至三环 Second to Third Ring Road	三环至四环 Third to Fourth Ring Roads	四环至五环 The Fourth Ring to the Fifth Ring	总计 Total
松柏面积 Pine and cypress area/km ²	4.1	2.8	2.9	12.1	21.9
面积占比 Area proportion/%	18.7	12.8	13.3	55.2	100.0
松柏与环路面积比 Ratio of pine and cypress to ring road area/%	6.6	2.9	2.1	3.3	14.9

街道作为城市行政管理的基本单元,基于街道的分析结果能够直接与行政管理和政策制定相结合。而且

本研究面向的对象是过敏居民,选择街道作为后续的分析单元,便于城市居民的理解和使用,从而更全面的理解城市环境中植被与过敏风险之间的关系。因此,本研究选择位于五环内的 118 个街道作为分析单元,根据图 4 的街道尺度结果图可以得出,以街道为分析单元的所有街道的松、柏类植被面积的均值为 0.24km^2 ,数值范围在 $0-3\text{km}^2$ 之间,45%以上的街道面积为 0.1km^2 到 3km^2 之间。其中四季青乡的面积最大,达 2.3km^2 。其中 14 个街道的松柏分布比例超过 10%,46 个街道的松柏分布比例均低于 1%。结合这些街道的空间位置特征,可以得出松、柏类植被在街道尺度上主要分布于城市的住宅区、科教文化区及历史文化遗产保护区等功能区,如四季青乡、海淀乡、天坛等街道。相比之下,农业、工业等功能区,如老庄子乡、黄村镇等区域松柏分布较少。

2.2 松柏花期的时间分布特征

在分析了释放松柏花粉植物源的空间分布位置后,本节将探讨致敏花粉释放的两大关键时间节点(开花峰值期和花期长度),为研究松柏花粉的潜在暴露风险的时空特征提供时间数据支撑。在北京五环环路和行政街道两个尺度下,利用长时间序列 NDVI 曲线中提取到的开花始期物候指标,对松、柏类植被的开花峰值期和花期长度分别进行分析。

从五环环路的总体空间格局上来看(表 7),松、柏类植被的开花峰值期和花期长度表现出以下特点。①开花峰值期:“二环内”和“二环至三环”两条环路内的大部分松、柏类植被释放花粉的峰值时间晚于“三环至四环”和“四环至五环”。数据显示,“二环内”和“二环至三环”的花粉释放时间主要集中在 3 月下旬和 4 月;而“三环至四环”和“四环至五环”的花粉释放时间主要集中在 2 月下旬和 3 月上旬。②花期长度:松、柏类植被的花期长度在不同年份和环线之间存在显著的空间异质性。随着环路向外扩展,花期长度呈现增长趋势。具体而言,“二环内”至“四环至五环”区域的花期长度逐渐增加,平均花期长度在环路水平上呈现上升趋势,表明随着城市化程度的降低(即远离城市中心)花期长度相应增长。这表明城市化水平对植物花期长度具有显著影响。

表 7 2019—2022 年各环路开花峰值期和花期长度

Table 7 Peak flowering period and length of flowering period in each ring road from 2019 to 2022

年份 Year	开花峰值期/DOY Peak flowering period				花期长度/d Length of the flowering period			
	二环内	二环至 三环	三环至 四环	四环至 五环	二环内	二环至 三环	三环至 四环	四环至 五环
	2019	94	107	94	86	43	49	54
2020	90	91	90	74	46	44	53	54
2021	88	77	76	74	46	41	50	75
2022	65	64	63	61	31	30	27	42

从街道尺度的空间格局上来看,松、柏类植被的开花峰值期表现出显著的空间异质性,而花期长度空间分布特征较为一致,具体来说。①开花峰值期:北京五环地区花期长度的空间分布如图 5 所示。具有方向性特征,位于东北到西南轴线上的街道松柏花粉释放的时间显著晚于其他街道。如天坛街道种植的松、柏类植被开花峰值期在 3 月中旬($60-72\text{DOY}$),卢沟桥、广外和太平桥等街道集中在 3 月下旬($72-84\text{DOY}$)。而中关村、朝阳门等街道中种植的松、柏类植被开花峰值期位于 2 月。从街道尺度上量化松、柏类植被的开花峰值期可以发现松、柏类植物开花峰值期随着时间在逐步提前。2019、2020 年大部分街道的松、柏类植物开花峰值期集中在 3 月下旬和 4 月上旬,而 2021 年大部分街道的松、柏类植物开花峰值期集中在 3 月中下旬,2022 年则集中在 3 月中下旬。

②花期长度:北京五环地区花期长度的空间分布如图 5 所示。总体空间分布差异较大,北京五环地区花期长度总体呈西北高东南低的格局特征。花期长度空间分布特征较为一致,年际花期长度多年均值介于 $18-31\text{d}$ 之间,最高值通常位于海淀区的街道,最低值多位于朝阳区和大兴区的街道。2019 年松、柏类植被花

期长度均值为 31d,花期持续时间最长的街道为四季青乡。2020 年和 2021 年相较于 2019 年花期长度均值变化不大,都为 29d,花期持续时间最长的街道依旧是四季青乡。比较而言,2022 年花期长度均值为 18d,但大屯街道和四季青乡的花期长度持续时间较长。

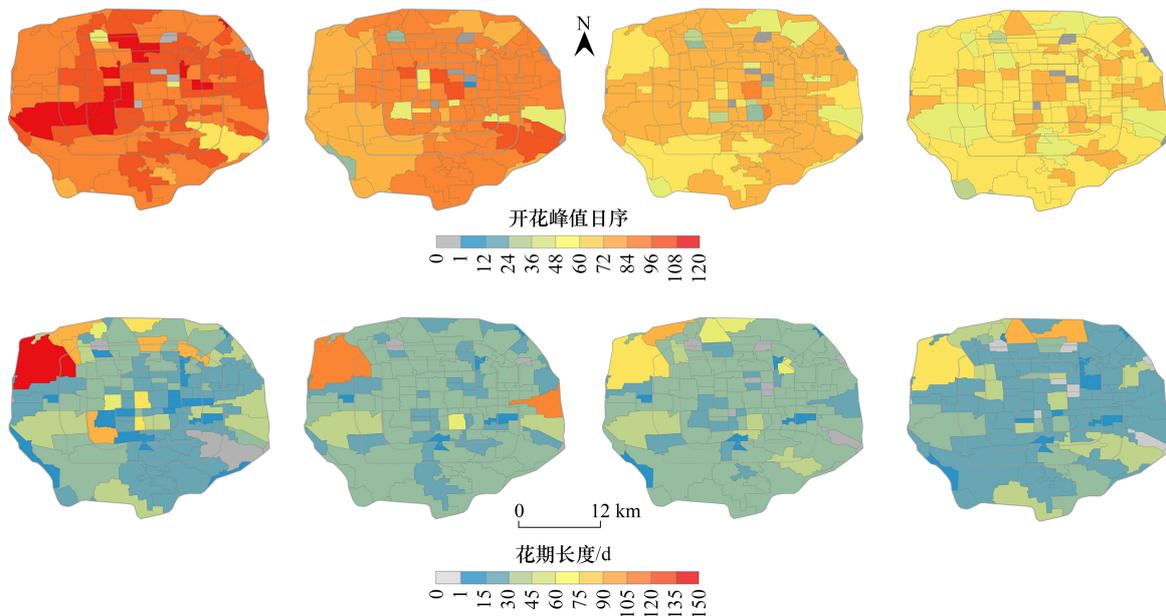


图 5 2019—2022 年北京市松柏花期开花峰值期和花期长度分布图

Fig.5 Distribution of peak flowering period and length of flowering period of *Pinus sylvestris* in Beijing, 2019—2022

2.3 潜在风险分析结果

本研究通过结合城区内松、柏类植被的空间分布特征和松柏开花峰值期及花期长度两个花期分布特征,在街道尺度分别进行了松柏花粉致敏的潜在暴露风险评估分析。同时结合花期的时空特征,根据不同的花期时段进行了风险等级划分,按照表 5 将其划分为 5 个风险等级:低、中低、中、中高、高,并最终制成北京市五环松、柏类植被致敏风险地图。本研究根据 4 年的总体情况,将北京城区内的 118 个街道划分为了 4 个高风险区域、5 个中高风险区域、1 个中等风险区域、15 个中低风险区域以及 93 个低风险区域,其中每个街道具有不同的致敏时间。

图 6 中包含致敏风险高低和发生致敏的时间两个维度信息,其中颜色深(浅)代表致敏风险高(低),而不同颜色代表着不同的发生致敏时间。从空间分布情况来看,高风险的区域主要为四季青乡、永定门外街道、体育馆街道和天坛街道周边;中高风险区域为来广营乡、万寿路街道、大屯路街道、青龙桥街道、海淀乡;中等风险区域为甘家口街道;其他街道皆为中低或低风险区域。中高风险和高风险区域主要分布在研究区的左上和中部区域,即海淀区的东南部、西东城区、朝阳区的西南部;中低、低风险区域则集中分布在研究区的右下区域,即朝阳区和大兴区。2019—2022 年北京五环地区风险地图分为开花峰值期潜在致敏风险和花期长度潜在致敏风险。图 6 为北京五环内街道中松、柏类植被的开花峰值期潜在致敏风险的分布特征,从变化趋势看,各街道潜在致敏时间逐渐提前的趋势,松、柏类植被每年释放的花粉对城市居民的危害随着时间在逐步提前,且西部地区的居民受的影响更严重。图 6 为北京五环内街道中松、柏类植被的花期长度潜在致敏风险的分布特征,从变化趋势来看,各街道潜在致敏时间长度较为稳定,差异较小;但在个别地区会出现变化较大的现象,呈现西北部地区致敏花粉危害时间长于其他地区。整体来看,松、柏类植被每年释放的致敏花粉对城市居民的危害作用时间变化不大,但西部地区的居民受的危害时间更久。其中,风险高的区域为四季青乡,为重点观察的区域。

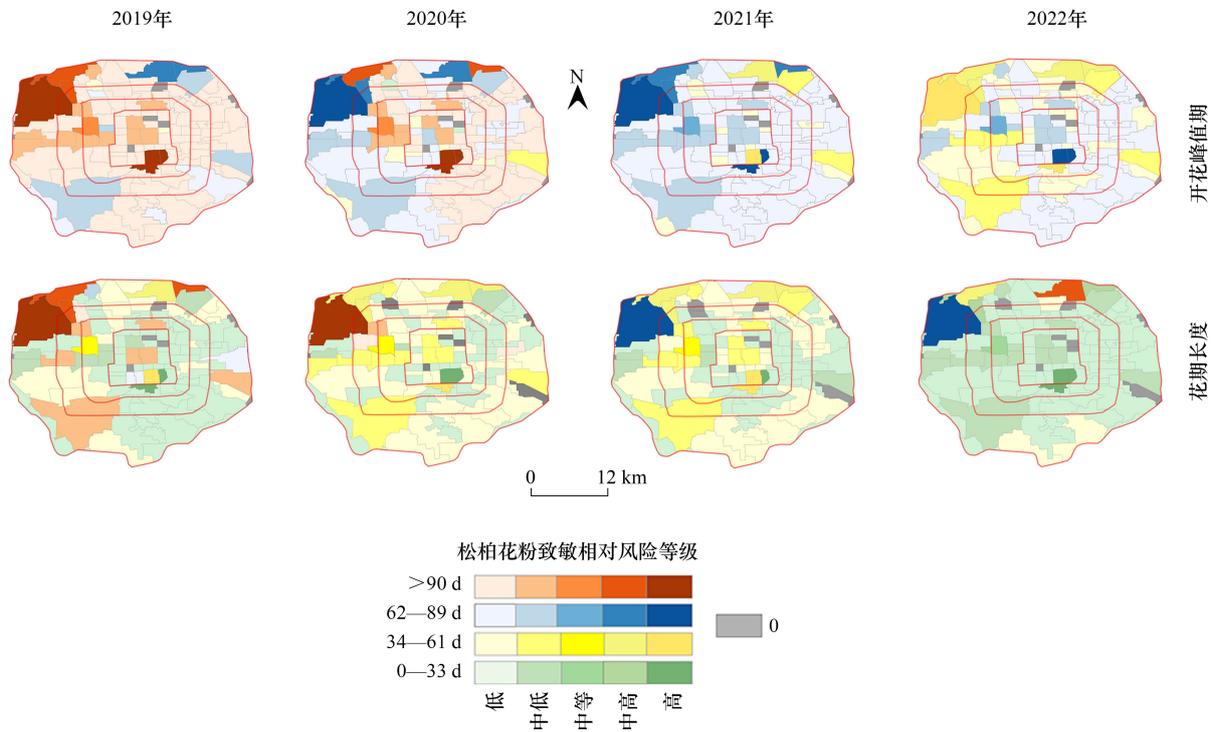


图 6 2019—2022 年北京市的潜在暴露风险评估图(分别依据开花峰值期和花期长度划分)

Fig.6 Risk assessment map of potential exposure under the administrative streets of Beijing for the years 2019—2022 (based on the peak flowering period and length of the flowering period, respectively)

3 讨论

3.1 方法优势及改进空间

目前,北京市的花粉浓度监测站点有 12 个,主要沿区域边界或气候边界分布。每个区域发布的花粉预报信息是基于该区域内的花粉浓度监测点位数据进行模型模拟预测。但是花粉监测站点是利用采集装置进行收集,因此所收集到的数据也仅能反应距监测站一定范围、特定时段内的花粉浓度和特征,无法全面准确的涵括远距离外所有信息。考虑到花粉致敏植物的覆盖密度高低可以一定程度上作为花粉浓度多少的潜在代表,所以本研究提出的卫星遥感监测技术能够在空间上提供连续完整的花粉浓度情况。本研究通过监测卫星物候作为致敏植物开始释放花粉的指示性指标,区别于常规耗时、耗力的实地物候监测或物候相机拍照的工作方式,该方法不仅能够快速检测年际间的变化,而且推广性和可复制性较高。同时,相关研究较多地仅从致敏植物的空间分布来量化并评估该地的潜在暴露致敏风险,而本研究提出了基于空间和时间两个维度的风险量化评估,可以为过敏人群在不同的时间段合理地安排出行路线及户外活动时间,减少致敏花粉暴露风险提供参考。

本研究中的工作范式可以推广至其他致敏植物和其他城市中,然而使用 NDVI 绘制的图谱进行花粉预测时,需注意该图谱仅显示了当地致敏植物开花的开始,而没有提供其他更多的信息,如致敏植物开花的结束时间和致敏植物释放花粉远距离运输行为。本研究没有做长时间序列的物候分析。通过遥感卫星提取的植物包含松和柏科,而没有从属种的角度去分析所包含的每一种植物的特性。研究结果中某些街道松、柏类植被面积呈现 0 值,这并不代表这些街道中不含有松、柏类植被,而是由于处理过程中进行了聚类、合并等处理操作,导致了值的缺失。由于本研究主要是基于松、柏类植被的生物特性进行提取空间位置,而忽略了其它特征,经验阈值的存在,使得不确定性存在于致敏植被识别、致敏植被花期预测和致敏风险评估三个环节当中。

3.2 致敏花粉花期时空分布特征及其与城市发展间的关系

利用环路和街道两个尺度分别进行了松、柏类植被空间位置分布和花期的综合分析。在环路尺度下的分析可以揭示城市中不同发展水平对致敏植物分布的影响,进而探讨其在城市生态系统中的作用。而在街道尺度下的研究则有助于揭示城市中不同功能区对松、柏类植被花期的影响,从而更全面地理解城市环境中植被与过敏风险之间的关系。

在环路尺度下,研究发现随着距离城市中心的增加,松、柏类植被的密度逐渐减少。这与城市发展规划相关,北京“二环至三环”和“三环至四环”建筑物多,空地少,植被种植受限。相反,远离城市中心的环路周围,“四环至五环”由于土地利用较为分散和开阔,松、柏类植被分布较密集。在街道尺度下,松、柏类植被的分布会受到局部地理环境和城市规划的影响。一些街道用于保护历史文化遗产,该类型的街道中就会存在着集中种植松、柏类植被的区域,使得该街道上的植被覆盖率较高,如天坛等街道;而其他街道上,由于建筑物密集或土地利用方式不同,松、柏类植被分布相对稀疏,如老庄子乡、黄村镇等街道。因此,不同街道之间存在着松、柏类植被空间位置分布的差异,这与城市功能区划和植被规划密切相关。

从各环带松、柏类植被的开花峰值期的变化趋势来看(图7),总体呈现下降趋势,即越远离城市中心的环线,松、柏类植被释放花粉的时间越早。同时,花粉释放的持续时间也随之增加(图7)。“二环内”的松、柏类植被的开花峰值期显著晚于其他三个环线,这是由于“二环内”的建筑以故宫为主,该区域以保护文物和旅游功能为主。而“四环至五环”的松、柏类植被的开花峰值期较早,说明城市管理改变了土壤养分、水分等条件,以及城市下垫面改变了微气候环境,如城市热岛现象导致温度升高,从而影响植物的生长环境。在街道尺度上,不同街道内松柏花粉的释放时间存在差异。由于松、柏类植物大面积分布在海淀区、东西城区和朝阳区,因此东北到西南轴线上方街道松柏花粉释放时间较晚,而其他街道相对较早。由于在海淀区、东西城和朝阳区部分街道松、柏类植被大面积种植,再加上局部气候的影响,该区域的花期长度显著长于其他街道。

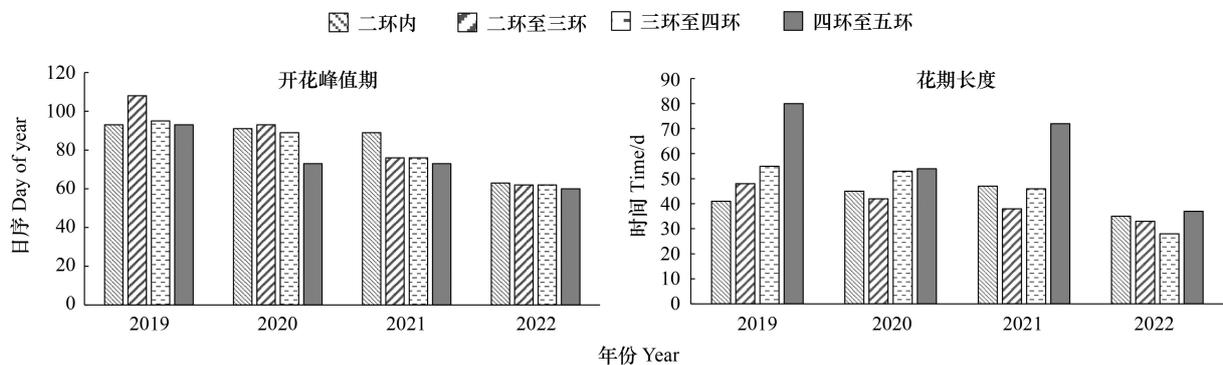


图7 2019—2022年北京市五环松、柏类植被开花峰值期和花期长度变化趋势图

Fig.7 Trends in peak flowering period and length of flowering period of pine and cypress vegetation in the five rings of Beijing, 2019—2022

3.3 潜在暴露风险分析

按照街道致敏花粉释放的几大时间段,将不同街道划分为了低、中低、中等、中高、高五大风险等级。总体上,大部分街道都是低风险区域,其次是中低风险区域>中高风险区域,以及少部分的高风险区域和中等风险区域。对于生活在不同街道的过敏人群应该给出不同的出行时间及路线规划方案。如对于19年的情况,患者应尽量避免在72—108DOY这段时间出行,因为这是松柏花粉释放的主要时期。特别是四季青乡等区域,花期长度较长,即致敏花粉作用危害的时间长,建议患者在这段时间内减少户外活动。相较于2019年,2020年松柏花期的集中时间较为提前,花期长度持续时间也较长。患者需要注意60—96DOY这段时间,尽量避免在此期间在高风险区域内外出,或者选择佩戴口罩等防护措施。2021年松柏花期的开花峰值期相较于2020

年更为提前,花期长度变化不大,患者应注意这一时期的花粉情况。2022 年花期长度时间较为短暂,花期长度在半个月左右,患者可以重点关注这段时间,减少在这一时期的户外活动,以减少花粉过敏的风险。总的来说,建议患者密切关注当年的松柏花期情况,避免在高风险区域内长时间停留或进行户外活动,采取必要的防护措施,如佩戴口罩等,以减少花粉过敏的影响。

综合 2019—2022 年的风险等级趋势来预测未来的出行情况,2019—2022 年的风险等级表现出了不同的变化趋势。因此,对于未来的出行规划,患者可以参考 2019—2022 年的经验,重点关注松柏花期集中的高风险时间段,并注意提前规划以预防将提前到来的致敏花粉,避免在这些时间段内进行户外活动。此外,根据具体街道的风险等级,选择低风险区域内的路径规划,以减少花粉过敏的风险。

4 结论

①城市空间结构和功能区与致敏植被的定量关系:“二环内”和“四环至五环”的城市化发展水平相较于其余两个环路较低(二环内多为古迹保护区,本研究将其城市化发展水平视为较低),而松、柏类植被密度却较高,城市化程度越高的地方致敏植被的栽种会相对较少。不同的城市功能区中的分布也不同,住宅区功能区、科教文化功能区、历史文化遗产保护区等功能区松、柏类植被密度高,而农业、工业等功能区松、柏类植被密度低。

②城市致敏植物的花期时间差异展现了植物个体对城市环境的响应与适应的多样性:城市下垫面改变了微气象环境,例如城市热岛现象导致城市中的温度升高或城市管理改变了土壤养分、水分等条件,从而改变了植物的生长环境。为了适应这种变化,植物开始提前开花,这种适应策略有助于致敏植物在城市环境中生存和繁衍。

③致敏花粉的潜在暴露风险会随着致敏植物对城市的适应而改变:致敏花粉的潜在暴露风险因城市内部高致敏植物的分布与花期不同,根据研究区城区内不同街道的花粉释放情况,本研究将其划分为低、中低、中等、中高和高五个风险等级。总体而言,大部分街道属于低风险,其次是中低风险、中高风险,还有少部分的高风险和中等风险区域。

鉴于 2019—2022 年的研究工作,本研究建议市民在户外活动时特别关注松、柏类植物花期集中的高风险时间段,尽量避免在这些时间段内进行活动,并选择低风险区域进行活动。政府应在城市规划和绿化工作中充分考虑致敏植被对居民健康的影响,合理规划致敏植被种植布局,加强花粉监测和预警系统,为市民提供更全面的过敏信息,形成更加健康、宜居的城市环境。

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站孙旭、王静工程师在物候工作中给予的数据支持。

参考文献 (References):

- [1] Gisler A. Allergies in urban areas on the rise: the combined effect of air pollution and pollen. *International Journal of Public Health*, 2021, 66: 1604022.
- [2] Uetake J, Tobo Y, Kobayashi S, Tanaka K, Watanabe S, DeMott P J, Kreidenweis S M. Visualization of the seasonal shift of a variety of airborne pollens in western Tokyo. *The Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147623.
- [3] Cecchi L, D'Amato G, Ayres J G, Galan C, Forastiere F, Forsberg B, Gerritsen J, Nunes C, Behrendt H, Akdis C, Dahl R, Annesi-Maesano I. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology. *Allergy*, 2010, 65(9): 1073-1081.
- [4] Negrini A C, Negrini S, Giunta V, Quaglini S, Ciprandi G. Thirty-year survey on airborne pollen concentrations in Genoa, Italy: relationship with sensitizations, meteorological data, and air pollution. *American Journal of Rhinology & Allergy*, 2011, 25(6): e232-e241.
- [5] 马婷婷,王朝霞,贺宁,陈艳蕾,兰天飞,王洪田,王也,王学艳.北京地区葎草花粉致敏的特征分析. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2022, 36(1): 41-44, 50.
- [6] 宁慧宇,王洪田,陈艳蕾,王学艳.北京城区春季花粉与过敏性疾病就诊比例分析. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2021, 28(2): 98-100, 104.

- [7] 熊国威, 成响, 粟静, 黄雪琨, 黎雅婷, 郑瑞, 周琪琳. 基于“形色 APP”筛选广州中心城区致敏花粉植物. 中山大学学报: 医学科学版, 2022, 43(1): 27-34.
- [8] 赵德鹏宇, 叶彩华, 王宇飞, 姚铁锋. 京津冀地区气传花粉数据分析. 植物学报, 2021, 56(6): 751-760.
- [9] 周江鸿, 夏菲, 车少臣, 李新宇, 李洁, 刘育俭, 张卉, 叶彩华, 尤焕苓. 城市绿地春季潜在花粉污染风险评估. 中国城市林业, 2022, 20(4): 1-6.
- [10] 郑家华, 李健, 李清华, 赵运华, 隋利萍, 郭有新, 欧阳昱晖. 承德市区气传花粉浓度监测及意义. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021, 28(5): 301-304.
- [11] 张曼琳, 潘妮, 赵娟娟, 李明娟, 江南. 城市花粉致敏植物种类构成、分布与潜在危害评估——以深圳市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 8746-8757.
- [12] 刘昌, 邢韶华, 姚扬, 张红星, 王效科. 北京城区自生植物分布格局及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(2): 544-558.
- [13] 王祎宸, 贺洁, 何亮, 张宇洁, 张晓萍. 黄河流域 2001—2020 年植被物候及其对气候变化的响应. 生态学报, 2024, 44(2): 844-857.
- [14] 叶彩华, 刘勇洪, 崔文杰, 尤焕苓, 齐晨, 杨鹤松, 姜江. 基于哨兵 2A 数据的北京松柏分布及花粉致敏风险评估初步研究. 气象科技, 2023, 51(1): 157-166.
- [15] 云文丽, 刘克利. 城市中花粉致敏植物及其影响因素研究进展. 内蒙古气象, 2008(4): 14-17.
- [16] 姚扬. 基于多源遥感数据的城市植被优势树种分类[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [17] 杨城. 基于多源遥感数据和植被物候特征的优势树种分类研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- [18] 协子昂, 张超, 冯绍元, 张富仓, 蔡焕杰, 唐敏, 孔纪迎. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感技术与应用, 2023, 38(01): 1-14.
- [19] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(03): 304-319.
- [20] 李建豪, 陶建斌, 程波, 吴琪凡, 彭宏杰. 秦岭山区植被春季物候的海拔敏感性. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2089-2097.
- [21] Bogawski P, Grewling L, Jackowiak B. Predicting the onset of *Betula pendula* flowering in Poznań (Poland) using remote sensing thermal data. The Science of the Total Environment, 2019, 658: 1485-1499.
- [22] Bogawski P, Borycka K, Grewling L, Kasprzyk I. Detecting distant sources of airborne pollen for Poland: integrating back-trajectory and dispersion modelling with a satellite-based phenology. The Science of the Total Environment, 2019, 689: 109-125.
- [23] Karlsen S R, Ramfjord H, Høgda K A, Johansen B, Danks F S, Brobakk T E. A satellite-based map of onset of birch (*Betula*) flowering in Norway. Aerobiologia, 2009, 25(1): 15-25.
- [24] Li X C, Zhou Y Y, Meng L, Asrar G, Sapkota A, Coates F. Characterizing the relationship between satellite phenology and pollen season; a case study of birch. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 267-274.
- [25] Devadas R, Huete A R, Vicendese D, Erbas B, Beggs P J, Medek D, Haberle S G, Newnham R M, Johnston F H, Jaggard A K, Campbell B, Burton P K, Katelaris C H, Newbiggin E, Thibaudon M, Davies J M. Dynamic ecological observations from satellites inform aerobiology of allergenic grass pollen. The Science of the Total Environment, 2018, 633: 441-451.
- [26] 肖兰, 王晨钰, 宋天园, 马云飞, 刘博, 岳丽君, 唐丽. 城市绿地花粉暴露特征与致敏风险评估研究进展. 中国城市林业, 2022, 20(6): 159-167.
- [27] 孟龄, 杨磊, 王巧环, 王俊杰. 致敏性气传花粉的分布、危害评价及防治措施. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2845-2853.
- [28] 孟龄, 王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 逯非. 北京城区气传花粉季节分布特征. 生态学报, 2013, 33(8): 2381-2387.
- [29] 王春玲, 叶彩华, 姜江. 北京地区春季木本植物花粉起始期预报模型研究. 中国农学通报, 2022, 38(28): 89-97.
- [30] 赵文芳, 王京丽, 尚敏, 刘亚楠. 基于粒子群优化和支持向量机的花粉浓度预测模型. 计算机应用, 2019, 39(1): 98-104.
- [31] 袭月, 张志强, 周洁, 王丽群, 陈立欣. 城市化进程下地表温度时空变化及其与植被覆盖度的相关性——以北京五环区域为例. 林业科学, 2021, 57(6): 1-13.
- [32] 徐景先, 李耀宁, 张德山. 空气花粉变化规律和预测预报研究进展. 生态学报, 2009, 29(7): 3854-3863.
- [33] 贺同赏. 松柏种植与苏轼的“松柏世界”. 北方论丛, 2023(5): 127-135.
- [34] 陈焕南, 林红燕, 邢海花. 遥感影像数据分类的不确定性分析及其处理方法综述. 现代计算机, 2021, 27(31): 33-39.
- [35] Cheng Q, Liu H Q, Shen H F, Wu P H, Zhang L P. A spatial and temporal nonlocal filter-based data fusion method. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4476-4488.
- [36] 卜亚勤, 丁海勇. 北京植被物候时空变化及其对城市化的响应. 遥感信息, 2022, 37(2): 112-118.
- [37] Zeng L L, Wardlow B D, Xiang D X, Hu S, Li D R. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111511.