专题：城市飞絮污染与治理

社区花粉致敏植物空间分布特征及其影响因素*

杨雅榕[1,2,3] 朱悦宁[1,2,3] 王 成[1,2,3] 金佳莉[1,2,3] 韩彦华[4] 李 欣[4]

1 中国林业科学研究院林业研究所 北京 100091
2 国家林业和草原局林木培育重点实验室 北京 100091
3 国家林业和草原局城市森林研究中心 北京 100091
4 北京市昌平区园林绿化局 北京 102200

摘要：【目的】探究花粉致敏植物在社区中的时空分布，以缓解甚至解决居民的花粉过敏问题，为昌平社区花粉致敏植物防治以及低敏社区的绿地空间格局与植物配置奠定基础。【方法】以北京市昌平区为研究范围，选取均匀分布的 20 个社区进行植物本底调查，明确昌平社区致敏植物数量及特征，从致敏植物的致敏强度、花粉量等方面入手，探究社区花粉致敏植物的空间分布格局及相关因素。【结果】1）昌平区社区常见的花粉致敏乔木有 19 种，数量占乔木总量的 62%；常见的花粉致敏草本植物 16 种，种类占社区草本植物总量的 32%。2）从花粉致敏植物空间分布格局来看，中心绿地、动态活动绿地、外围绿地乔木花粉致敏强度较高；动态活动绿地、静态休息绿地、外围绿地乔木致敏花粉量等级较高。3）建成年代越晚的社区，距北京市中心越近的社区，花粉致敏乔木数量越多，致敏强度越高，花粉量越大。【结论】揭示了不同类型的绿地和人类活动区域对致敏植物的分布有重要影响。此外，社区绿地的花粉致敏风险与植物种类和配置密切相关，未来绿地规划应根据功能需求合理配置低致敏植物，还应考虑更多环境变量（如气温、空气污染等）与花粉致敏植物的交互效应，并提高精度，以完善城市绿地的花粉致敏风险管理。

关键词：花粉污染；花粉致敏植物；社区绿地；空间分布；影响因素
DOI：10.12169/zgcsly.2024.09.11.0002

Spatial Distribution Characteristics of Allergenic Pollen Plants in Communities and Their Influencing Factors

Yang Yarong[1,2,3] Zhu Yuening[1,2,3] Wang Cheng[1,2,3] Jin Jiali[1,2,3] Han Yanhua[4] Li Xin[4]

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Tree Breeding and Cultivation, Beijing 100091, China; 3. Urban Forest Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 4. Bureau of Landscape and Forestry, Changping District, Beijing 102200, China)

Abstract：【Objective】 Exploring the spatial and temporal distribution of allergenic pollen plants in communities can alleviate or even solve the pollen allergies facing residents and lay a foundation for Changping District to strengthen the prevention and control allergenic pollen plants and propose the spatial pattern and the plant configuration of green spaces for the hypoallergenic community creation. 【Method】 The paper selects 20 evenly distributed communities in Changping District of Beijing to conduct plant

收稿日期：2024-09-11
* 基金项目：国家林草局推广项目：城市树木飞絮、花粉等植源性污染防控技术推广示范（2020133129）；国家重点研发计划（2021YFE0193200）
第一作者：杨雅榕（1999-），女，博士生，研究方向为城市林业与声景生态学。E-mail：18089351727@163.com
通信作者：韩彦华（1976-），男，本科，工程师，研究方向为园林绿化养护。E-mail：740407161@qq.com

background investigation, clarify the number of allergenic plants and their characteristics in the communities, and explore the spatial distribution pattern of allergenic pollen plants in the community and its relevant factors from the perspectives of allergenic intensity and pollen amount of allergenic plants. 【Result】 1) There are 19 common species of allergenic pollen trees in the communities of Changping District, accounting for 62% of the total number of trees, and there are 16 common species of allergenic pollen herbaceous plants, accounting for 32% of the total number of herbaceous plants in the community. 2) In terms of the spatial distribution pattern of allergenic pollen plants, the trees in the central green space, dynamic-activity-oriented green space, and peripheral green space have higher allergenic intensity; and t the trees in the dynamic-activity-oriented green space, static resting green space, and peripheral green space have the larger allergenic pollen amounts; and 3) The later the community is built, and the closer the community is to the center of Beijing, the higher the number of allergenic pollen trees is with higher allergenic intensity and larger pollen amounts. 【Conclusion】 It is revealed that green spaces and human activity areas of different types have a significant impact on the distribution of allergenic plants. Furthermore, the pollen allergenic risk in community green spaces is closely related to plant species and configuration. In the future, the green space planning should reasonably configure hypoallergenic plants according to functional needs. More attention should be paid to the interactions between environment variables (such as temperature, air pollution, etc.) and allergenic plants and the improvement of precision so as to enhance the pollen allergenic risk management of urban green spaces.

Keywords: pollen pollution; allergenic pollen plant; community green space; spatial distribution; influencing factor

花粉污染近年来受到城市居民，特别是过敏人群的重点关注，也受到了城市绿化管理部门的高度重视，如北京、上海等地根据花粉浓度监测提出花粉预警，中国天气网推出全国花粉过敏预警地图，提醒过敏人群注意防范。花粉致敏植物概念的首次提出来自英国的 John Bostock，此后，国际上对花粉致敏植物的研究主要集中于花粉致敏植物在不同地区的种类分布及花粉飘散在空气中的浓度变化。在对花粉致敏植物种类的研究上，豚草（*Ambrosia artemisiifolia*）花粉是目前发现的致敏性最强的花粉之一，也是严重危害北美等国家的主要致敏花粉之一[1]。Prigioniero 等[2]通过城市绿区致敏性指数的新型方法（modIUGZA）评估 Vesuvius 公园的致敏性。在针对致敏花粉浓度变化的研究上，Ziska 等[3]发现极端温度（最高温度和最低温度）的持续增加会增加空气中的花粉数量和延长气传花粉的飘散时间。Lake 等[4-6]运用数学建模的方法，预测出 2041—2060 年，豚草花粉在欧洲将会分布得更广，在空气中飘散时间更长且浓度更高。

研究发现，气传花粉种类和浓度一般具有较强的时空分布特征，但目前城市致敏植物的空间分布尚不清楚，难以对这些植物花粉致敏风险开展空间精细化评估，因此有必要开展花粉致敏植物的空间信息提取，进而结合花粉浓度观测数据开展植物花粉致敏风险评估，从而为植被花粉监测和浓度预报提供参考[7]。当前研究把花粉致敏与空间格局联系起来的很少，且多数研究集中在城市整体污染状况以及部分综合性公园等大尺度与中尺度绿地[8-10]，对于与居民生活相关最紧密的、尺度较小的社区绿地的花粉污染相关研究却很少[11-13]。当前对于花粉致敏的研究大多从植物花粉本身以及花粉过敏症状入手探讨花粉飘散情况、花粉浓度，考虑了气候、土壤等物理影响因素，却忽略人的行为活动与所处空间环境带来的差异。在研究中把花粉致敏与空间格局联系起来的很少，其研究结果用于实际的城市绿化及社区景观规划的更少，因此，探索社区绿地空间格局优化对于人居环境具有很强的实践意义。

近年来，北方地区包括北京市植物花粉引起的居民过敏问题日益突出，受到越来越多的关注。昌平区是北京市花粉污染较为严重的区域，且有近四成的居民患有花粉过敏症。因此，本研究针对昌平区社区花粉致敏植物展开研究，探究社区空间花粉致敏风险程度的总体特征及不同社区间、不同类型绿地空间之间的致敏度特征差异。此外，通过分析不同社区属性下致敏程度在各类因子中

的反应，探究社区花粉污染程度与社区属性的相关性，为昌平社区花粉致敏植物防治以及低敏社区的绿地空间格局与植物配置提出优化建议。

1　研究区概况

以花粉污染问题比较严重的北京市昌平区为研究区域，均匀选取 20 个不同年代建成的居住区作为调研对象（表 1），这些社区均匀分布于昌平区各个街道，社区内绿地种类复杂多样，植被丰富，比较适合本次研究。昌平区位于北京西北部，地处燕山、太行山支脉结合地带，北倚军都山，南俯北京城，面积 1 343.5 km^2，人口 201 万，属于温带季风气候区，呈西北高，东南低的地势走向。本次研究选取的社区不完全等同于社会管理层面的行政管理单元，而是面向居住层面的居住区单元也就是小区，这些居住小区都有相对独立完善的物业管理机构，对绿地行使具体的管理权，也是落实花粉植物调控对策的最基层单位。

表 1　社区基本情况一览表

社区名称	建成时间/年	建筑数量/栋	居住户数/户	层数/层
蓝郡国际花园	2005	14	1 124	8
华安小区（南辛路七号院）	1980	6	110	4~6
丰景高苑	2000	4	204	5
南农家园	1989	16	798	6
桥梁厂小区	1975	12	558	6
碧春园	2004	9	338	6
宜山居（四区）	2004	8	358	5
花雨汀	2014	8	804	5
保利芳园	2010	7	1962	12~28 不等
土沟新村	2015	21	90	6
善缘家园-南区	2003	16	792	5
宏福苑	1999	112	12409	6
秦城家园	2006	6	396	6
纳帕澜郡	2012	7	863	14
东二旗新村	2009	12	918	9
民园小区	1987	18	1301	6
冠庭园	2006	9	591	5
园林圣懋	2009	27	938	6
燕城苑-北区	1995	7	461	6
润枫欣尚	2011	7	1083	20

2　研究方法

2.1　社区绿地分类

根据城市绿地分类标准（CJJ/T85—2017）将居住区绿地统一归类为居住用地附属绿地（RG），但对于社区内部绿化建设和管理来说，需要结合社区特点进行更精细的分类，以便绿化建设和养护管理的实际操作。故将样地区域按类型划分为 11 类，即宅前绿地、宅后绿地、宅间绿地、动态活动绿地、静态休息绿地、中心绿地、外围绿地、农园、道路绿地、入口绿地、停车场绿地（表 2）。

表 2　社区绿地分类

绿地类型	定义
宅前绿地	居民楼前方的绿地，在楼门一侧
宅间绿地	两栋楼中间的绿地，通常夹在宅前绿地与宅后绿地之间
宅后绿地	居民楼后方的绿地，在楼无门一侧
动态活动绿地	为居民提供活动场所的空间，有的具备运动设施或儿童娱乐设施
静态休息绿地	为居民提供休息、交流场所的空间，多具备座椅
外围绿地	在小区边缘的绿地，起到与小区外部分隔的作用
农园	园林植物较少而农作物较多的绿地
道路绿地	在小区主干道两侧呈带状的绿地
入口绿地	在小区入口处独立出来的绿地
停车场绿地	停车场及环绕停车场的绿地
中心绿地	在小区较中心地区不靠近楼，有大量植物且观赏性较好的绿地

2.2 社区致敏植物分布调查

于 2021 年 3—11 月，分别在 20 个社区中选取不同绿地类型的样地，记录社区范围内建筑的位置、层数、朝向，对各社区选定样地的植物在社区平面图中定位，并进行编号，列表记录植物所在绿地类型、编号、种类并记录植物 GPS 定位，最后总结调查结果中花粉致敏植物的种类、数量，以及不同致敏植物的数量占比。

2.3 社区花粉致敏等级空间化

将各种花粉致敏植物致敏性按照花粉致敏强度、致敏花粉量两个因子进行等级评价[14-15]，致敏等级与花粉量等级参照国家林业和草原局城市森林研究中心“城市植源性污染发生规律及其防控技术”科技成果及其出版物《城市植源性污染及其防治》。之后基于 ArcGIS10.2 软件平台，根据植物 GPS 定位信息，建立致敏植物的空间数据库，明确其空间分布特征，同时建立植物致敏属性（数量、种类、致敏等级）等属性信息，将其空间化。

2.4 影响因子的选择

致敏植物的数量、覆盖度、植物自身的花粉量及其划分致敏强度等与花粉致敏树种对易感人群的影响有一定的相关关系[16-17]，故本研究选取以上 4 个指标作为社区花粉致敏指标。此外，社区属性的自身属性（如建成年代、所处地理位置等）也会对植物配置及花粉飘散产生一定的影响[18-24]，考虑到北京市城市发展是根据环路向外扩张的模式，建成年代与地理位置从城市扩张的角度来看有一定关联，但建成年代对社区植物配置方式与社区规划影响更大，而从昌平所处的北京市城市机理和城乡梯度来看，社区距离北京市中心的距离远近对社区绿地率等影响更大。因此，本研究中选择社区建成年代、社区在昌平区风向上的位置和社区距离北京市中心的距离 3 个指标作为社区属性影响因素进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 社区花粉致敏植物构成特征

3.1.1 社区花粉致敏植物构成

20 个社区共记录到 269 种植物，隶属 97 科 212 属。其中，乔木共计 2 459 株，隶属 26 科 40 属 56 种，占植物种类的 21%；灌木共 21 科 38 属 54 种，占植物种类的 20%；草本植物共 50 科 134 属 159 种，占植物种类的 59%。

由图 1 可知：20 个小区样地中共有花粉致敏乔木 19 种，隶属 11 科 17 属，数量占调查乔木总量的 62%，种类占总量的 34%。从致敏乔木使用数量上看，使用最多的树种为臭椿（*Ailanthus altissima*）(17%)，使用较多的树种有圆柏（*Juniperus chinensis*）(15%)、香椿（*Toona sinensis*）(10%)、白蜡（*Fraxinus chinensis*）(10%)、毛白杨（*Populus tomentosa*）(9%) 等。20 个社区共有花粉致敏草本植物 16 种，隶属 5 科 15 属，种类占草本植物总量的 32%。从植物覆盖度来看，使用较多的草本植物有狗尾草（*Setaria viridis*）(32%)、牛筋草（*Eleusine indica*）(28%)、藜（*Chenopodium album*）(16%) 等。

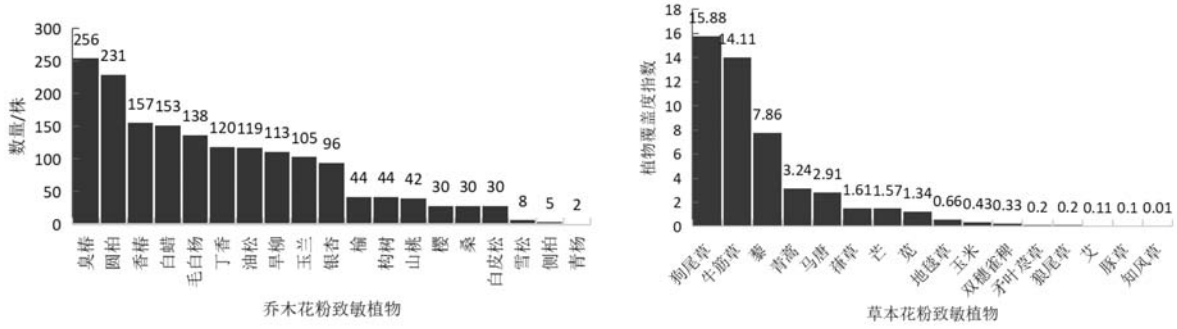
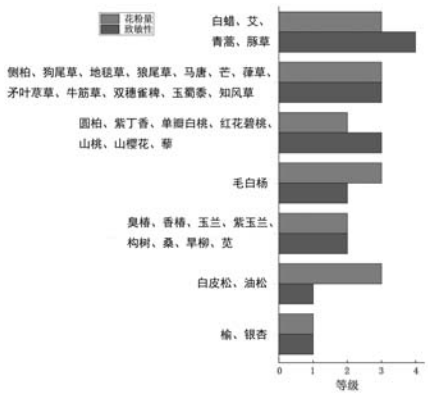


图 1 昌平区社区乔木及草本花粉致敏植物构成比例

由图 2 可知：从花粉致敏性看，社区中致敏性最强的树种主要为白蜡；致敏性较强的树种有柏科植物、蔷薇科植物（如樱、桑等）及木犀科的紫丁香（*Syringa oblata*）。从花粉量看，花期花粉量大的乔木花粉致敏树种有白皮松（*Pinus bungeana*）、油松（*Pinus tabuliformis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）、毛白杨、白蜡；花粉量少的有银杏（*Ginkgo biloba*）和榆（*Ulmus pumila*）。



注：致敏性：1 弱，2 较弱，3 较强，4 强；花粉量：1 少量，2 中等，3 大量。

图 2　乔木及草本花粉致敏植物种类及其致敏特征

致敏性最强的草本植物主要为菊科蒿属、桑科葎草属、藜科藜属及禾本科植物，正是这 4 类植物产生大量的花粉构成昌平区社区夏秋草本植物致敏花粉的主体。

3.1.2　不同社区花粉致敏植物构成差异

不同社区花粉致敏植物不同。综合（表 3）来看，昌平区不同社区绿地常用花粉致敏树种有香椿、臭椿、圆柏、丁香、旱柳（*Salix matsudana*）、银杏、油松、毛白杨；常用花粉致敏草本植物有牛筋草、狗尾草、藜、青蒿（*Artemisia caruifolia*）。

表 3　不同社区花粉致敏植物构成

社区名称	常用花粉致敏树种	常用花粉致敏草本植物
冠庭园	圆柏、毛白杨、臭椿、香椿	牛筋草
东二旗新村	白蜡、玉兰、山桃、旱柳	狗尾草
蓝郡国际花园	油松、毛白杨、旱柳、银杏	狗尾草、藜
善缘家园	旱柳、香椿、圆柏、玉兰	狗尾草、藜
民园小区	圆柏、香椿、桑、丁香	狗尾草、藜
花雨汀	丁香、白蜡	狗尾草
宏福苑	臭椿、香椿	狗尾草、马唐、青蒿、牛筋草
碧春园	臭椿、圆柏、榆	青蒿、狗尾草
纳帕澜郡	丁香、毛白杨、臭椿、玉兰	狗尾草、马唐
保利芳园	丁香、构树、香椿	矛叶荩草
宜山居-四区	香椿	马唐
桥梁厂小区	臭椿、圆柏	狗尾草、藜
润枫欣尚	油松、白皮松、银杏	狗尾草
南农家园	油松、旱柳	牛筋草、狗尾草、藜、葎草、苋
燕城苑-北区	银杏、旱柳	藜
华安小区	臭椿	苋
土沟新村	圆柏、榆	牛筋草、狗尾草
丰景高苑	动态活动绿地、静态休息绿地	牛筋草、狗尾草、藜
园林圣懋	香椿	苋、狗尾草
秦城家园	香椿、臭椿	青蒿、狗尾草、藜

3.2　不同花粉致敏强度等级植物的空间分布格局

3.2.1　社区分布特征

根据致敏强度等级分析可知，致敏强度等级为 1 的有白皮松、银杏、油松、榆；致敏强度等级为 2 的有毛白杨、旱柳、桑（*Morus alba*）、构树（*Broussonetia papyrifera*）、白玉兰（*Yulania denudata*）、紫玉兰（*Yulania liliiflora*）、香椿、臭椿；以及致敏强度等级为 3 的有圆柏、侧柏、山桃（*Prunus davidiana*）、红花碧桃（*Prunus persica* ‘Rubro-plena’）、白碧桃（*Prunus persica* ‘Bai Bitao’）、樱花（*Prunus serrulata*）、紫丁香（*Syringa oblata*），以上 3 个等级的致敏树种分布于 90%以上的社区。而致敏强度等级为 4 的白蜡，仅覆盖了 50%左右的社区。

3.2.2　社区内不同绿地类型空间分布特征

不同绿地类型的花粉致敏植物组成存在差异。宅前绿地常见的致敏树种包括臭椿、香椿、白蜡、圆柏、银杏；宅后绿地则以臭椿、丁香、白蜡、油松、香椿、玉兰为主；动态活动绿地常见树种为圆柏、玉兰、油松、银杏、毛白杨；静态休息绿地则以毛白杨、丁香、白蜡、银杏、臭椿为主；外围绿地常见的致敏树种包括圆柏、臭椿、旱柳、毛白杨；中心绿地则以白蜡、毛白杨、丁香、油松为主；道路绿地常见树种为臭椿、香椿、白蜡；停车场绿地主要有香椿、丁香、白蜡；农园常用

树种为香椿、臭椿；宅间绿地则有油松、银杏、山桃；入口绿地主要为旱柳。综合调查发现，广泛分布于各类绿地的致敏树种包括臭椿、白蜡、香椿、丁香、银杏、油松、毛白杨。

绿地的整体致敏强度与绿地类型没有完全的关联，主要与该社区的树种栽植偏好有关。总体来看，在各类绿地致敏树种选择的基础上，花粉致敏强度高的树种更多于分布在动态活动绿地、中心绿地、外围绿地；花粉致敏树种在入口绿地和道路绿地栽植反而相对较少。

3.3 花粉致敏乔木的花粉量等级空间分布格局

3.3.1 社区分布特征分析

结合各社区乔木花粉量等级空间分布可知，花粉量等级为1的银杏、榆分布于90%的社区中；花粉量等级为2的圆柏、旱柳、桑树、构树、紫玉兰、白玉兰、山桃、白碧桃、红花碧桃、樱花、香椿、臭椿、紫丁香在各个社区全覆盖；而花粉量等级为3的白皮松、油松、侧柏、毛白杨、白蜡，分布社区占80%。

3.3.2 社区内不同绿地类型空间分布特征

各类绿地在不同社区中的花粉量等级不一定相似，绿地的整体花粉量水平与绿地类型没有完全的规律。总体（表4）来看，在大多数社区中，动态活动绿地、静态休息绿地、外围绿地花粉量等级较高；停车场绿地、道路绿地、中心绿地花粉量等级较低；宅前、宅后绿地的花粉量水平在不同社区区别较大，没有趋势性规律。

表4 不同类型绿地空间花粉量等级评价

社区名称	乔木花粉量高	乔木花粉量低
冠庭园	外围绿地、静态休息绿地	道路绿地、停车场绿地
东二旗新村	宅后绿地、动态活动绿地、外围绿地	中心绿地、停车场绿地、宅前绿地
蓝郡国际花园	动态活动绿地、中心绿地、宅后绿地	停车场绿地、宅前绿地、宅间绿地
善缘家园	宅后绿地、静态休息绿地、动态活动绿地	停车场绿地、宅前绿地、道路绿地
民园小区	动态活动绿地、宅后绿地	道路绿地、宅间绿地、入口绿地
花雨汀	宅前绿地、宅后绿地	道路绿地
宏福苑	宅前绿地、宅后绿地	静态休息绿地、道路绿地
碧春园	宅前绿地、道路绿地	宅后绿地
纳帕澜郡	动态活动绿地、静态休息绿地、外围绿地	中心绿地、停车场绿地、道路绿地
保利芳园	动态活动绿地、停车场绿地、宅后绿地	中心绿地、宅前绿地
宜山居-四区	停车场绿地、外围绿地	宅后绿地
桥梁厂小区	外围绿地、宅前绿地	农园
润枫欣尚	道路绿地	宅前绿地、停车场绿地、动态活动绿地
南农家园	动态活动绿地	道路绿地、停车场绿地
燕城苑-北区	动态活动绿地	宅前绿地、停车场绿地
华安小区	农园	宅后绿地
土沟新村	—	宅前绿地
丰景高苑	静态休息绿地、动态活动绿地	宅前绿地、宅后绿地
园林圣懋	—	—
秦城家园	—	—

3.4 社区属性对植物花粉致敏程度的影响

总体而言，社区致敏树种数量及其所占比例与社区建成年代无显著相关性（表5）。然而，社区乔木花粉致敏强度4级树种的分布量与社区年代呈低度正相关，即社区建成时间越晚，4级致敏树种的总致敏强度越高。同样，社区建成年代与3级致敏花粉量树种的分布量也呈低度正相关，表明建成较晚的社区中3级致敏树种的总花粉量更大（图3）。由于不同致敏草本植物的致敏强度和花粉量差异较小，因此这两个因子对草本植物致敏风险的影响较为有限。分析发现，致敏草本植物的平均覆盖度与社区建成年代无显著相关性，且未观察到草本植物致敏花粉与社区建成年代之间的关联。

尽管社区位置与建成年代在理论上具有一定关联，但社区位置对绿地规划与植物配置的影响更为显著，而距离北京市中心的偏远程度则更侧重于城乡梯度及不同城市肌理对植物花粉致敏情况的影响。经分析，发现两者间存在一定相关性，但相关性较弱（斯皮尔曼相关系数为-0.45）。由于各社区情况不同，社区年代和位置不应作为单一指标进行统一分析。部分社区显示，致敏乔木

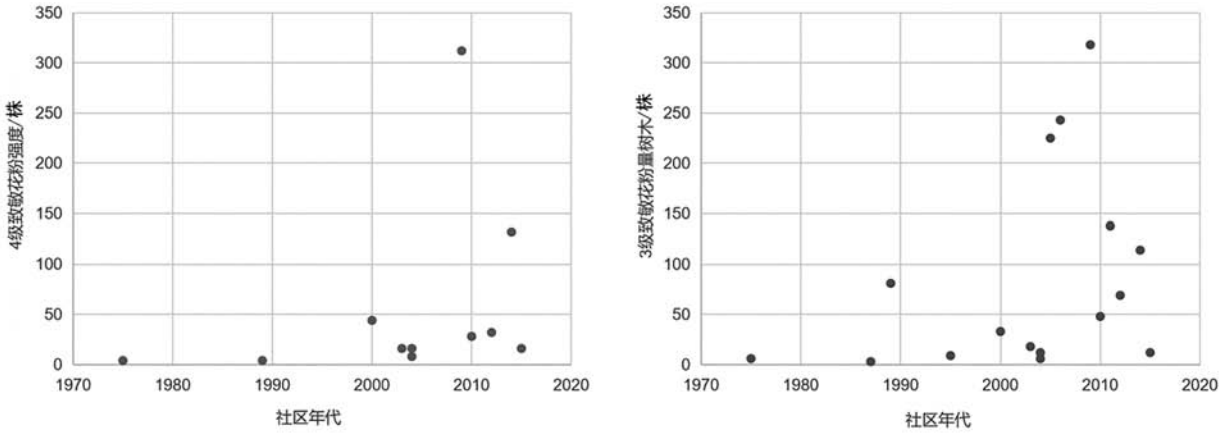


图 3　昌平区社区年代与 4 级及 3 级强度致敏花粉树种相关性

数量与社区距市中心的距离呈轻微负相关，即距离市中心较近的区域致敏乔木数量较多，而较远的区域致敏乔木数量较少。靠近市中心的社区通常规划更为细致，树种丰富，致敏乔木数量和种类较多；而远离市中心的社区大多在城市化过程中由村落划入市区，缺乏详细的植物配置规划，致敏乔木数量和种类较少。

社区花粉致敏强度及乔木花粉量（2、3、4 级）与社区距北京市中心的距离呈负相关，尽管相关系数较小。这表明，距离市中心较近的社区，致敏乔木花粉致敏强度较高，2、3 级乔木花粉量较多，乔木花粉致敏总量较高；而距离市中心较远的社区，则表现出致敏乔木花粉致敏强度较低，2、3 级乔木花粉量较少的趋势。但是社区致敏草本植物的平均覆盖度与距市中心的距离无显著相关性，草本植物的分布与市中心的距离无明显关系。

依据昌平区风玫瑰图（图 4）可知，昌平区风向主要为西南向与东北向，乔木花粉爆发期在春季，故大多为东北风。对东北风向上的社区位置与社区致敏乔木数量进行分析发现，下风口的社区致敏乔木比例更高，致敏草本植物的分布与风向不相关。



图 4　昌平区社区风向位置图

表 5　昌平区花粉致敏植物与社区属性相关性

社区属性		致敏树种比例及数量		致敏强度				花粉量					致敏草本植物平均覆盖度
		致敏树种比例	致敏树种数量	致敏强度等级 1	致敏强度等级 2	致敏强度等级 3	致敏强度等级 4	乔木花粉总致敏强度	花粉量等级 1	花粉量等级 2	花粉量等级 3	乔木花粉总量	
社区年代	斯皮尔曼相关性	−0. 20	0. 16	0. 131	−0. 285	0. 297	0. 548	0. 044	0. 264	−0. 173	0. 520*	0. 127	−0. 214
	Sig.（双尾）	0. 41	0. 51	0. 594	0. 223	0. 231	0. 081	0. 852	0. 29	0. 466	0. 039	0. 593	0. 365
	N	20	20	20	18	11	20	20	18	20	16	20	20
距北京市中心距离/km	斯皮尔曼相关性	−0. 25	−0. 44	−0. 085	−0. 242	−0. 273	−0. 351	−0. 249	−0. 180	−0. 300	−0. 243	−0. 364	0. 232
	Sig.（双尾）	0. 29	0. 06	0. 730	0. 305	0. 273	0. 290	0. 289	0. 474	0. 199	0. 364	0. 114	0. 326
	N	20	20	19	20	18	11	20	18	20	16	20	20
风向上距风口距离	斯皮尔曼相关性	0. 352	0. 326										−0. 164
	Sig.（双尾）	0. 128	0. 161										0. 490
	N	20	20										20

注：* 表示在 0. 05 级别（双尾）相关性显著。

4 讨论

4.1 分布格局的形成机制

与欧洲城市普遍采用的集中式绿地布局相比[25]，昌平社区的分散式组团布局可能加剧了居民接触致敏植物的频率。社区中的动态活动区（如公园、广场等）通常采用速生树种（如白蜡、油松等），这类树种的花粉扩散特性容易增加致敏风险。这一发现与闫珂等[26]的研究结果一致，后者指出，虽然速生树种能够快速成型，但忽略了这些植物的花粉扩散特性，可能对居民健康产生长期影响。

4.2 社区绿化的实践启示

本研究发现的社区建成年代与致敏植物丰度之间无显著相关性，反映了我国城市绿化评价体系的阶段性特征。之前的“绿化覆盖率优先”阶段和近年倡导的“生物多样性导向”阶段均未将致敏风险纳入考核指标[27]。评估花粉致敏风险需要综合考虑植物本体因素（如花粉产量、过敏原蛋白表达量）和环境因素（如物候特征、气象条件等），未来的研究方向可能包括建立包含三维特征的模型，模拟社区花粉分布及扩散规律[28]。因此，建议在未来城市绿化过程中，应整合花粉致敏风险与生态服务的平衡，建立一个更为精确的绿色空间规划与致敏风险管理体系。

4.3 展望

尽管本研究为社区绿地中致敏植物的空间分布提供了有价值的初步数据，但仍存在一些局限性。当前使用的花粉致敏评级体系可能低估了微生境对植物分布的影响。未来应利用可视化技术建立包含社区三维特征的模型来模拟社区花粉分布及扩散规律，从而为城市社区致敏性花粉的预测和防治提供科学依据[29]。此外，气象因子的时间异质性（如降水对花粉沉降的脉冲效应）需要通过连续的长时间监测来完善。为此，建议参考欧洲 Aerobiology 监测网络的标准[28]，建立多尺度观测体系，以提升致敏植物风险预警的时空精度。

5 结论

1）社区绿地致敏植物呈现显著的类群分异特征，木本植物在科属多样性和群落占比方面均超过草本植物，形成以白蜡、油松等乔木为主导的立体致敏源结构，与草本植物形成季节互补效应。

2）空间分布呈现出高停留强度区域的致敏风险与景观设计中的功能定位显著相关，动态活动区与静态休憩区的植物选择差异导致致敏强度梯度分布。

3）地理空间要素中，局地微气候的调控作用强于宏观区位因素，盛行风场对木本植物花粉扩散具有显著空间分异效应，但未观测到对草本植物的显著影响。

4）社区建成年代与致敏植物丰度无显著相关性，折射出城市绿化实践中致敏风险防控意识的历时性缺失。本研究成果为城市绿地致敏风险管理提供了空间优化路径和植物配置范式。

参考文献

[1] PORT A, HEIN J, WOLFF A, et al. Aeroallergen prevalence in the northern New Jersey-New York City metropolitan area: a 15-year summary[J]. Annals of Allergy, Asthma & Immunology, 2006, 96(5): 687-691.

[2] PRIGIONIERO A, ZUZOLO D, SCIARRILLO R, et al. Assessing pollinosis risk in the Vesuvius National Park: a novel approach for index of urban green zones allergenicity [J]. Environmental Research, 2021, 197: 111063.

[3] ZISKA L H, MAKRA L, HARRY S K, et al. Temperature-related changes in airborne allergenic pollen abundance and seasonality across the Northern Hemisphere: a retrospective data analysis[J]. The Lancet Planetary Health, 2019, 3(3): e124-e131.

[4] LAKE I R, JONES N R, AGNEW M, et al. Climate change and future pollen allergy in Europe [J]. Environmental Health Perspectives, 2017, 125(3): 385-391.

[5] CARIÑANOS P, CALAZA-MARTÍNEZ P, O'BRIEN L, et al. The cost of greening: disservices of urban trees [M]//The Urban Forest. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[6] CARIÑANOS P, CASARES-PORCEL M, DÍAZ DE LA GUARDIA C, et al. Assessing allergenicity in urban parks: a nature-based solution to reduce the impact on public health[J]. Environmental Research, 2017, 155: 219-227.

[7] 叶彩华，刘勇洪，崔文杰，等.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[J].气象科技，2023，51(1)：157-166.

[8] 张曼琳，潘妮，赵娟娟，等.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[J].生态学报，2021，41(22)：8746-8757.

[9] 唐文韬.针对花粉致敏现象的城市公园空间优化研究：以南京

市玄武湖公园为例[D].南京:南京林业大学,2020.

[10]WEINBERGER K R.Spatial and temporal distribution of tree pollen in New York City:linking aeroallergen measurements to health[D].New York:Columbia University,2015.

[11]MAYA-MANZANO J M,FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ S,MONROY-COLÍN A,et al.Allergenic pollen of ornamental plane trees in a Mediterranean environment and urban planning as a prevention tool[J].Urban Forestry & Urban Greening,2017,27:352-362.

[12]AGATA Ć, KASPRZYK I, WÓJCIK T, et al. Attractiveness of urban parks for visitors versus their potential allergenic hazard:a case study in Rzeszów, Poland[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2018,35:221-229.

[13]WANG X Y,MA TT,WANG X Y,et al.Prevalence of pollen-induced allergic rhinitis with high pollen exposure in grasslands of northern China[J].Allergy,2018,73(6):1232-1243.

[14]吴晓奕,黄晓娇,宗桦,等.成都市人民公园树木花粉致敏风险研究[J].中国城市林业,2023,21(3):17-23.

[15]王成,金佳莉,孙睿霖,等.城市植源性污染及其防治[M].北京:中国林业出版社,2020.

[16]秦玲,刘丽丽.园林绿化设计对花粉过敏的影响分析[J].城市建筑,2019,16(18):141-142,161.

[17]李超,杨鑫.基于数值模拟的社区建筑排布对小气候环境影响研究[J].城市建筑,2021,18(11):56-59.

[18]孟龄,王效科,欧阳志云,等.北京城区气传花粉季节分布特征[J].生态学报,2013,33(8):2381-2387.

[19]COLLIER M H,VANKAT J L,HUGHES M R.Diminished plant richness and abundance below lonicera maackii,an invasive shrub[J].The American Midland Naturalist,2002,147(1):60-71.

[20]STEWART G H,IGNATIEVA M E,MEURK C D,et al.Urban biotopes of Aotearoa New Zealand (URBANZ) II:Floristics,biodiversity and conservation values of urban residential and public woodlands,Christchurch[J].Urban Forestry & Urban Greening,2009,8(3),149-162.

[21]JIM C Y,CHEN W Y.Ecosystem services and valuation of urban forests in China[J].Cities,2009,26(4):187-194.

[22]RAO M,GEORGE L A,ROSENSTIEL T N,et al.Assessing the relationship among urban trees,nitrogen dioxide,and respiratory health[J].Environmental Pollution,2014,194:96-104.

[23]GILL S E,HANDLEY J F,ENNOS A R,et al.Adapting cities for climate change:the role of the green infrastructure[J].Built Environment,2007,33(1):115-133.

[24]HAHS A K,MCDONNELL M J.Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban-rural gradient[J].Landscape and Urban Planning,2006,78(4):435-448.

[25]CARIÑANOS P,CASARES-PORCEL M,DÍAZ DE LA GUARDIA C,et al. Assessing allergenicity in urban parks:a nature-based solution to reduce the impact on public health[J].Environmental Research,2017,155:219-227.

[26]闫珂,杨华,李文芳,等.城市绿地致敏指数的改进研究及应用[J].北京林业大学学报,2020,42(5):96-105.

[27]肖兰,王晨钰,宋天园,等.城市绿地花粉暴露特征与致敏风险评估研究进展[J].中国城市林业,2022,20(6):159-167.

[28]刘明欣,王彤,闫甲祺,等.城市社区尺度花粉致敏风险评估方法研究进展[J].生态学报,2024,44(11):4449-4464.

[29]BASTL M,BASTL K,DIRR L,et al.Methods and standards of pollen monitoring:significance of pollen measurements at different altitudes[J].Allergo Journal International,2023,32(6):162-166.