低敏城市街区：从花粉致敏风险评价到环境调控策略*

贾可欣[1]　姚亚男[1,2]

1　内蒙古工业大学　呼和浩特　010051
2　中国建筑设计研究院有限公司　北京　100044

摘要：伴随着城市化的进程，城市居民花粉症愈加多发，造成了极高的医疗负担，但花粉致敏问题的环境干预手段十分有限。为探究环境因子对花粉浓度及扩散的影响，建设低致敏性街区环境，文章基于城市街区花粉致敏风险评价研究进展，提出低敏城市街区的概念与评价指标依据；梳理花粉传播范围的既有科研证据，以及街区尺度内构建低致敏环境的原因及可操作性；归纳影响街区花粉致敏风险的环境因子包括空间布局、街区绿化、微气候以及污染物 4 个方面，并分析其对花粉的产生、扩散以及致敏物质释放形成不同程度的影响；最后提出低敏城市街区的更新策略，以营造城市多尺度低敏环境格局，保障公众的健康出行。

关键词：低敏城市街区；花粉致敏风险评价；城市街区；更新策略
DOI：10.12169/zgcsly.2025.02.18.0001

Hypoallergenic Urban Block: From Pollen Allergy Risk Assessment to Environmental Regulation Strategies

Jia Kexin[1]　Yao Yanan[1,2]

(1. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: With the progression of urbanization, pollen allergies among urban residents have become increasingly prevalent, imposing significant medical burdens, yet environmental interventions to address pollen-induced sensitivities remain limited. To explore the impact of environmental factors on pollen concentration and dispersal and to develop hypoallergenic urban block environments, this study proposes the concept and evaluation criteria for hypoallergenic urban block based on advances in pollen allergy risk assessment research. It synthesizes existing scientific evidence on pollen dispersal ranges and examines the rationale and feasibility of creating hypoallergenic environments at the block scale. The study identifies four key environmental factors influencing pollen allergy risks in urban blocks—spatial layout, block greening, microclimate, and pollutants—and analyzes their varying effects on pollen production, dispersal, and the release of allergenic substances. Finally, renewal strategies for hypoallergenic urban blocks are proposed to foster a multi-scale hypoallergenic urban framework, ensuring healthy public mobility and safeguarding community well-being.

Keywords: Hypoallergenic urban block; pollen allergy risk assessment; urban block; renewal strategy

收稿日期：2025-02-18
*基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（52408071）
第一作者：贾可欣（2000-），女，硕士生，研究方向为风景园林与公共健康。E-mail：Orange0155@163.com
通信作者：姚亚男（1991-），女，博士，高级工程师，研究方向为风景园林与公共健康。E-mail：anyu117@163.com

花粉症是花粉内的特殊蛋白引起敏感个体超敏反应的症状，即人体过敏反应，多为呼吸道、眼部、皮肤甚至全身症状，严重时可威胁生命[1]。自 1873 年 Blackley 首次提出花粉过敏的诊断名称—花粉症[2]，世界上多个国家和地区都出现花粉过敏患者持续增多的情况，且通常与城市化进程正相关[3-4]。城市建设过程中植被、气候、空气污染物等因素发生变化，影响空气中花粉的浓度及传播[5]。城市化进程中公园绿地数量增加以及路侧绿化设计带来了更多的致敏花粉，城市内花粉浓度升高，气候变化形成热岛效应会导致花粉季提前及延长，使花粉暴露时间增加[6-7]；空气污染物则会改变花粉的蛋白质结构引发炎症反应，加剧过敏症状[8]。我国多中心流行病学研究显示，花粉是北方最主要的过敏原之一，其过敏人群约占过敏性鼻炎的 30%，发病人数达 7 500 万，每年造成极高的医疗负担[9]。尤其在春季与夏秋，花粉浓度的急剧上升对过敏人群的健康造成了不同程度的威胁。

城市花粉致敏性疾病的患病率持续攀升已成为公共卫生领域的重要议题。国际学界围绕花粉暴露特征、致敏树种风险评估及评价方法等维度已形成研究体系：Cariñanos 和 Marinangeli[10]通过评估地中海城市 150 种常见园林植物的致敏性，建立了统一分类标准；Zapata-Marin 等[11]基于时间序列揭示了环境变量与花粉浓度的非线性关系；Charalampopoulos 等[12]发现了城市环境中花粉的时空分布特征；Rojo 等[13]通过气传花粉监测网络实现了西班牙瓜达哈拉市花粉致敏风险的定量评估。国内相关研究开始于 1956 年北京协和医院成立变态反应科[14]，随后学者们基于我国不同地区的地理特征和植被分布，在多个城市开展了区域性研究：施秋梅和项济生[15]通过全年气传花粉监测，得出武汉市中山公园周边花粉的分布情况以及与花粉症的相关性；杨颖[16]揭示了北京春季花粉飞散规律及影响因素；吴晓奕等[17]发现成都市人民公园树木花粉具有高致敏风险。

国内外学者对公园绿地的相关研究较为深入，但对公众活动高频发生的街区这类复合空间关注不足。基于致敏植物的环境暴露特征，其地理分布差异与物候周期变异共同作用，导致城市中致敏树种的分布并不均匀[18]，加之街区环境条件复杂，在研究中需考虑环境因子对花粉浓度及扩散的调控作用。本文提出“低敏城市街区”的概念，形成对城市街区花粉致敏风险的评价意识，分析街区内影响致敏风险的环境因子，最后提出建立多尺度低敏格局以及具体的街区更新策略。

1 低敏城市街区的概念与评定依据

低敏城市街区（Hypoallergenic urban block）概念可定义为城市中致敏性低的街区。低敏城市街区最终目标是避免诱发一般健康人群向花粉过敏发展，同时环境对花粉过敏症患者的恶性影响较小。营造低敏城市街区的前提是能够对城市不同街区的花粉致敏风险进行评价。

当前花粉致敏风险评价的方法可以归纳为 4 个技术方向：基于花粉监测[19]、基于植被信息[20]、基于空气过敏原分子[21]，以及基于混合数据源的模型预测方法[22]。

首先，在花粉监测方向，目前国际上已经具备了全自动智能化的花粉监测设备，可以识别空气花粉的种类与数量。一些国家建立了花粉观测网络[23]，但国内受限于设备价格，当前仍普遍采用重力沉降法进行人工监测[20]。北京气象部门已经率先实现了半自动的花粉监测，并根据既往的花粉监测数据，构建了基于气象数据的花粉峰值预测模型[24]：

$$P = A \times B + (1 - A \times B) \times (C \times D) \quad (1)$$

式（1）中：P 为某一日是当年某种花粉浓度达到峰值的概率，$ABCD$ 分别为日平均气温、地表温度、降水量和日照时长的隶属度函数。

其次，在植被信息方向，Cariñanos 等[25]于 2014 年提出一种针对植物群落潜在致敏风险的工具，即城市绿地致敏指数（Urban Green Zones Allergenicity Index，IUGZA），其考虑植物种类、规格、数量以及致敏性特征等因素：

$$I_{ugza} = \frac{1}{378 \times S_t} \sum_{i=1}^{k} n_i \times ap_i \times pe_i \times ppp_i \times S_i \times H_i \quad (2)$$

式（2）中：378 为场源模型尺寸常数；k 指物种数量；n_i指植物的个体数；ap_i指花粉致敏潜力；pe_i指花粉排放量；ppp_i为花粉期时间；H_i指

树木最大高度；S_i 指树木覆盖面积；S_t 指绿地的总表面积。

国内学者宗桦等[26]、闫珂等[27]进一步推动了该工具在中国的应用。虽然 IUGZA 是面向公园绿地的评价工具，但在实际应用中可以扩展到其他类型的场地[25,28]。此外，基于植被信息，考虑空间与气象因素的影响，Pecero-Casimiro 等[29]于 2019 年提出观赏树木空气生物学风险指数（Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees，AIROT）：

$$AIROT = \sum_{i=1}^{n} \frac{PD_i \times N_i \times M_i \times Sh_i \times H_i}{S_t} \quad (3)$$

式（3）中：*PDi* 为距离的潜在分散性；N_i 为按距离计算的目标树木数量；M_i 为每个样本的成熟度；SH_i 为高楼、狭窄街道和广场存在的影响；H_i 为海拔高度；*ST* 为城市总面积；i 为测量点。*AIROT* 除了考虑植物生物学特征外，还加入了对于海拔、高度、街道宽度、建筑物高度等因素的考量[29]，结合 LiDAR 的先进技术，将城市空间特征指标纳入风险评估模型中，生成详细的城市致敏风险地图[30]。

再次，在空气致敏原方向，通常是对空气采样进行分子生物学的分析，得到具体花粉致敏原物质单一分子的量，精准反应某种或某些空气致敏原的多少[21]，但其采样分析技术要求高，难以进行大范围的推广应用。

最后，基于混合数据源的模型预测，综合空气花粉监测、植被信息、建筑街道布局构建基于空气动力学的花粉散播预测模型，从而实时可视化的反映空气花粉的分布[22]。

由此，低敏城市街区的评定方法可以概况为 4 个发展方向：一是花粉浓度低于城市平均；二是单位空间致敏植物数量低于城市平均，三是空气致敏原水平低于城市平均；四是模型预测花粉分布低于城市平均。

2　低敏城市街区营建的可行性

2.1　花粉传播尺度

风媒花粉的传播距离通常为几十米到几千米，水平方向有时可达到数千千米，垂直方向可达上万米的高空，但主要影响范围是其周边一定范围内。北京一项研究表明，在顺风方向时，花粉的飘散呈单峰规律，峰值在 20 m 处出现；其他方向排除风速的影响，距离越远浓度越高，在 10～15 m 时浓度达到峰值[16]。上海一项研究表明，花粉数量随着高度的上升呈下降趋势[31]。纽约一项花粉调研显示，树木花粉数量变化的 39%可以用500 m 范围内的树冠覆盖率来解释[32]。比利时一项研究表明，相较 20～500 m 范围的小尺度土地覆盖类型，空气中的树木花粉量更多的受 1～5 km 范围内的中尺度土地覆盖类型的影响[33]。草本花粉的空间传播范围可能更加广阔[34]，可达数十公里。目前致敏花粉影响的空间尺度范围因大气环流可达国土空间尺度，但在微风或无风条件下，花粉传播的有效距离主要在中小尺度，较多证据支持了花粉的影响主要在中尺度（几公里范围）。从整体来看，应当从区域–城市–街区–住区–住宅多尺度建立低敏格局，尤其致敏源位置固定的情况下，街区尺度有望实现花粉浓度的变化预测，准确评估个体暴露风险，通过精细化干预构建局部低敏性环境[35]，切实为广大花粉过敏患者提供空间选择。

2.2　城市更新政策引导

街区是由城市道路围合形成的一个基本生活区域单元，作为人类活动的主要场所，承载了个体的生活轨迹以及与外界的互动交流。国家“十四五”规划和 2035 远景目标纲要提出，要“深入实施健康中国行动，坚持预防为主的方针，推动健康关口前移；实施城市更新行动，推进城市空间结构优化和品质提升，改造一批大型老旧街区，完善城市宜居功能”。“健康中国行动”强调预防为主，在城市更新行动中，依托街区更新建设，对街区内可干预的影响花粉致敏风险的因子进行优化调整，是建设低敏城市街区的现实路径。

3　影响城市街区花粉致敏风险的环境因子

城市街区作为城市空间结构的骨架，承载着公众日常休闲和通勤的需要[36]，影响城市街区花粉致敏风险的环境因子涉及到空间布局、街区绿化、城市微气候以及污染物等 4 个维度。

3.1　空间布局

街区要素内的空间布局影响区域风环境，涉

及到街区的高宽比、建筑布局等因素，可以改变风的流动路径，影响花粉的浓度及分布[37]。在实际研究中由于部分花粉颗粒直径接近 PM_{10}，因此针对街区污染物扩散的研究同样对于花粉的传播与扩散有重要参考意义。

3.1.1 街区高宽比

城市街区空间中建筑高度与街区宽度的尺度是影响风环境的重要因素之一，高宽比值的不同形成了不同的风场，区域内空气流动速度差异大，高宽比值过高易产生峡谷状结构，影响污染物和花粉颗粒扩散[38-39]，且风速与高宽比呈反比例关系，比值越大风速越慢[40]，花粉不易扩散易聚集。但是如果街区内道路狭窄，两侧建筑物对风的挤压作用增加，街区风速明显增加，可能产生“峡管效应”，导致花粉传播距离远。

3.1.2 街区建筑的布局

1）建筑的疏密程度。城市环境中不同区域建筑布局的密度不同，其疏密程度直接影响风环境[41]。建筑采用高密度布局时空气流动受限，花粉易局部聚集导致浓度过高；低密度布局空气流动速度快则利于花粉传播[42]。

2）建筑的布局形式。建筑的布局形式对风环境有重要影响。多样化的布局形式对风速和风向的影响程度不同。例如围合式布局气流流通缓慢，花粉容易在中央聚集导致浓度较高；行列式布局形成线性空间，气流流通较顺畅且路径清晰，利于花粉颗粒飞散，浓度居中；错列式建筑前后交错，气流路径曲折易形成局部环流，内部风速较高花粉易飞散，浓度最低[43-44]。

3）建筑间夹角。建筑之间的夹角是城市环境中研究风速和风向的重要因素之一。夹角接近0°，风向与建筑平行，此时街区内空气流动顺畅，花粉颗粒易于传播；风向位于建筑的斜风方向时气流进入建筑缝隙，局部气流流动速度加快，花粉颗粒可远距离传播，滞留时间短[45]。

4）街区贴线率。街区贴线率也就是建筑沿街的紧密程度影响风流流通路径。风速随贴线率增加呈抛物线变化，先增大后减小，贴线率接近70%时风速达到最高值，花粉颗粒传播距离远；贴线率高于70%时空间受挤压导致风速受阻[40]，花粉扩散受限。

3.2 街区绿化

街区的绿化涉及到植物种类的选取、生长状况两个方面。植物种类方面：不同植物花粉的致敏性不同，栽植过多致敏性强的树种，更易引发人体的过敏反应[46]。根据各省市公布的推荐乡土树种名录，结合姚亚男等[47]对中国致敏树种致敏性的分级可以看出，北方城市道路常用树中存在高度及严重致敏的树种，这些树种一般满足无臭、无毒、无刺激、生态效益高，但较少考虑花粉致敏的影响[48-49]。植物生长状况：街区内种植高大密集的植被会形成类似城市峡谷的结构阻碍空气流动[35]，影响花粉扩散；壮年期且生长茂盛的植物通常花粉含量更高，致敏性更强。

3.3 城市微气候

城市热岛效应是影响花粉浓度差异的重要因素之一[50]。当城市温度高于周边地区时，街区内微气候改变产生热岛效应，植被会提前开花，花粉数量增加，花粉季节持续时间增加，过敏症状提前出现，花粉过敏人群的过敏期也会延长[51]。但在极端高温的情况下，植物生长速度快花粉季节并不会延长[52]。

3.4 空气污染物

城市街区中的空气污染物与部分花粉颗粒产生化学反应引起人体过敏反应加剧。这些污染物大多来自于道路交通以及工业污染源排放出大量的颗粒物、有害气体及其他物质。污染物会使花粉表面出现裂缝，使其更易破碎从而释放过敏原，颗粒物会附着在花粉表面，人体吸入以后引发更严重的过敏反应[53]。其中悬浮颗粒物（PM）中的 PM_{10}、柴油尾气颗粒物（DEP）可以与花粉等过敏原相互作用，改变结构和成分，加剧过敏反应[6,8]。DEP的暴露还可能导致免疫球蛋白E（IgE）水平升高，促使细胞释放炎性介质，引发过敏反应，再次加剧个体过敏症状[6]。

4 城市街区低敏更新策略

4.1 区域–城市–街区–住区–住宅多尺度建立低敏格局

低敏居住环境的建设需要从多尺度、多维度共同发力，应当从区域–城市–街区–住区–住宅多尺度建立低敏格局，这需要自上而下的政策支持。

在国土空间层面，对荒山造林、区域绿廊建设等大规模、大尺度的绿化工程，应当明确生态系统健康发展的基本原则，注重物种多样性，避免单一物种纯林尤其是致敏树种及强交叉致敏树种的配置。在城市规划层面，在自然资源调查与城市公共卫生分析时，应充分调研当地是否存在广泛的花粉致敏问题，明确健康城市建设的基本原则，指导下一层级的规划。在城市绿地规划层面，对建设骨干树、基调树等广泛应用树种的选择上，充分考虑树种致敏性，避免选用当地致敏树种分级名录中的严重致敏树种，控制高、中、低度致敏树种的应用绿地类型。在城市街区绿地层面，新建街区应剔除严重致敏和高度致敏树种，避免使用或控制中度致敏树种数量，合理配植低度致敏树种，注重空间布局，增加物种多样性。在城市住区绿地层面，选择低致敏且花粉量少的树种，通过绿化设计手段使致敏树种与居民活动频繁的区域保持一定距离。在居民住宅层面，在花粉季避开花粉峰值时段开窗，使用空气净化器、过滤纱窗等减少室内花粉。

4.2　精细化干预街区内花粉致敏风险因子

在以低致敏性为目标的具体城市街区更新中，还应从绿化设计、空间布局、空气净化装置以及花粉监测预警等方面，综合考虑多因素影响，对街区内影响花粉致敏风险的因子进行精细化干预。首先，低敏街区的营建是有条件的，需要分区规划。当场地现状及其周边一定空间范围内致敏树木不占优势时，才具备低敏更新的条件。其空间尺度范围需要结合建筑、街道布局所形成的风环境来确定。第二，低敏更新的植被调整需要长期规划。需要根据街区周边即内部的具体情况，制定长期规划以实现致敏植物的逐步更替。第三，对空间布局与微气候调节，设置垂直绿化吸附现有场地内的致敏花粉颗粒，采用透水铺装或喷淋系统调节空气湿度，加速空气花粉的沉降，抑制花粉的扩散。第四，研发室外空气净化装置，降低污染物对花粉的影响。尤其是借助自然风、光照等能源形式驱动的被动式空气净化装置，是低敏更新的重要技术手段，亟待更加普惠性的产品研发。最后，需要建立室外精细化监测与预警平台，当前花粉监测预警系列产品多以城市区级尺度，需要进一步向中小尺度准确化发展，在街区设置传感器，以便实时监测浓度以及智能家居风险响应，及时向周边居民提供花粉浓度峰值预警信息。

4.3　展望

1）深化多学科交叉与综合性研究。低敏城市街区的建设涉及多学科领域，需要深化跨学科协同创新。未来研究应整合植物学、医学、生态学、环境科学及气象学等多学科理论，深化街区致敏花粉暴露水平的研究，系统解析其他潜在过敏原的环境行为，构建街区内过敏原动态监测与智能管控体系；通过精细化干预策略，有效减少街区过敏原对人体健康的危害，实现多维度、全方面的低敏街区，推动城市人居环境向健康宜居方向多维演进。

2）进一步拓展技术研发。在网络数字智能化的时代背景下，未来低敏城市街区建设的技术突破将聚焦于多源大数据融合层面。通过集成大数据分析、人工智能算法及数字孪生架构等手段实现街区过敏原智能响应系统的实施路径，具体表现为：增强环境响应仿真能力；发展数据耦合的过敏风险预警机制；建立具备自反馈机制的数字化体系，从而实现街区环境致敏因子的全周期智慧管控。

3）加快建设低敏城市街区行动路径。低敏城市街区建设的行动路径需要遵循“科学评估-动态调控-协同治理”的原则。对致敏风险进行系统准确的评估，实现街区致敏因子的定量分析；依托数字技术与模型算法实现对街区尺度过敏原的动态调控；创建多层级低敏环境框架，依托层级传导机制协同治理，从而形成从风险评估到治理优化的全链条行动路径。

4）低敏城市街区的政策指引。未来推动低敏城市街区的建设需要相应的政策支持。联合相关领域专家建立街区致敏树种数据集，指导城市绿化工程植物配置优化；制定相应的推荐性标准，或在相关标准内加入低敏性指标，将致敏风险评估纳入新建/改造项目的验收体系中；增加政府机关对街区致敏风险的监管体制，采取一定的整改措施并验收成果。总之，从公众参与到政府管控，全方位落实低敏城市街区的建设，营造城市多尺

度低敏环境格局，保障公众的健康出行。

参考文献

[1]李全生,江盛学,李欣泽,等.中国气传致敏花粉的季节和地理播散规律[J].解放军医学杂志,2017,42(11):951-955.

[2]安羽三,欧阳昱晖.季节性过敏性鼻炎的研究现状[J].中国耳鼻咽喉头颈外科,2020,27(4):199-201.

[3]NICOLAOU N,SIDDIQUE N,CUSTOVIC A.Allergic disease in urban and ruralpopulations:increasing prevalence with increasing urbanization[J].Allergy,2005,60(11):1357-1360.

[4]ROBINSON C L,BAUMANN L M,ROMERO K,et al.Effect of urbanisation on asthma,allergy and airways inflammation in a developing country setting[J].Thorax,2011,66(12):1051-1057.

[5]CARIÑANOS P,CASARES-PORCEL M.Urban green zones and related pollen allergy:a review.Some guidelines for designing spaces with low allergy impact[J].Landscape and Urban Planning,2011,101(3):205-214.

[6]D'AMATO G,LICCARDI G,D'AMATO M,et al.The role of outdoor air pollution and climatic changes on the rising trends in respiratory allergy[J].Respiratory Medicine,2001,95(7):606-611.

[7]JALBERT I,GOLEBIOWSKI B.Environmental aeroallergens and allergic rhino-conjunctivitis[J].Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology,2015,15(5):476-481.

[8]GHIANI A,AINA R,ASERO R,et al.Ragweed pollen collected along high-traffic roads shows a higher allergenicity than pollen sampled in vegetated areas[J].Allergy,2012,67(7):887-894.

[9]欧阳昱晖,张罗.花粉过敏的防御和治疗[J].中国耳鼻咽喉头颈外科,2020,27(4):177-179.

[10]CARIÑANOS P,MARINANGELI F.An updated proposal of the Potential Allergenicity of 150 ornamental Trees and shrubs in Mediterranean Cities[J].Urban Forestry & Urban Greening,2021,63:127218.

[11]ZAPATA-MARIN S,SCHMIDT A M,WEICHENTHAL S,et al.Within city spatiotemporal variation of pollen concentration in the city of Toronto,Canada[J].Environmental Research,2022,206:112566.

[12]CHARALAMPOPOULOS A,DAMIALIS A,LAZARINA M,et al.Spatiotemporal assessment of airborne pollen in the urban environment:the pollenscape of Thessaloniki as a case study[J].Atmospheric Environment,2021,247:118185.

[13]ROJO J,RAPP A,LARA B,et al.Characterisation of the airborne pollen spectrum in Guadalajara (central Spain) and estimation of the potential allergy risk[J].Environmental Monitoring and Assessment,2016,188(3):130.

[14]江伟明,潘睿聪,罗传秀,等.城市空气花粉的研究进展[J].生态科学,2018,37(6):199-208.

[15]施秋梅,项济生,舒宏.公园周边地区气传致敏花粉分布及其与花粉症的相关性[J].临床耳鼻咽喉科杂志,1997,11(7):314-316.

[16]杨颖.北京城区树木花粉飘散规律及影响因素研究[D].北京:北京林业大学,2007.

[17]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.

[18]孟龄,杨磊,王巧环,等.致敏性气传花粉的分布、危害评价及防治措施[J].应用生态学报,2023,34(10):2845-2853.

[19]尤焕苓,叶彩华,姜江,等.致敏花粉监测预测技术研究进展[J].气象科技进展,2024,14(1):8-14.

[20]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.

[21]SUANNO C,ALOISI I,FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ D,et al.Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment[J].Environmental Research,2021,197:111109.

[22]DBOUK T,VISEZ N,ALI S,et al.Risk assessment of pollen allergy in urban environments[J].Scientific Reports,2022,12(1):21076.

[23]尹炤寅,刘燕,党冰,等.气传花粉监测数据研究进展[J].科技导报,2022,40(15):49-63.

[24]齐晨,姜江,叶彩华,等.北京主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测[J].生态学报,2023,43(7):2650-2662.

[25]CARIÑANOS P,CASARES-PORCEL M,QUESADA-RUBIO J M.Estimating the allergenic potential of urban green spaces:a case-study in Granada,Spain[J].Landscape and Urban Planning,2014,123:134-144.

[26]ZONG H,YIN R,WU X Y,et al.Comparison of two methods for assessing the pollen allergy risk of urban parks in Chengdu City,China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2023,86:128014.

[27]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.

[28]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.

[29]PECERO-CASIMIRO R,FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ S,TORMO-MOLINA R,et al.Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging:a case study of plane trees[J].Science of the Total Environment,2019,693:133576.

[30]PECERO-CASIMIROR,FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ S,TORMO-MOLINA R,et al.Producing urban aerobiological risk map for Cupressaceae family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR technology[J].Remote Sensing,2020,12(10):1562.

[31]黄建花,李敏,汪岱华,等.不同高度气传花粉监测[J].免疫学杂志,2013,29(9):760-763,768.

[32] WEINBERGER K R, KINNEY P L, ROBINSON G S, et al. Levels and determinants of tree pollen in New York City[J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2018, 28(2): 119-124.

[33] STAS M, AERTS R, HENDRICKX M, et al. Residential green space types, allergy symptoms and mental health in a cohort of tree pollen allergy patients[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 210: 104070.

[34] FRISK C A, APANGU G P, PETCH G M, et al. Atmospheric transport reveals grass pollen dispersion distances[J]. Science of the Total Environment, 2022, 814: 152806.

[35] VENTER Z S, HASSANI A, STANGE E, et al. Reassessing the role of urban green space in air pollution control[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United Statesof America, 2024, 121(6): e2306200121.

[36] 张蔚，甄峰，陈文婷，等."活动-环境"交互视角下南京城市街道空间热风险评估研究[J].地理研究，2024，43(11)：2902-2919.

[37] 闫珂.北京 4 种常见树种花粉飘散规律及致敏潜力分析[D].北京：北京林业大学，2020.

[38] PEEL R G, KENNEDY R, SMITH M, et al. Do urban canyons influence street level grass pollen concentrations? [J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(6): 1317-1325.

[39] WANG X S, CHEN X P, MA B J, et al. Observed vertical dispersion patterns of particulate matter in urban street canyons and dominant influencing factors[J]. Forests, 2024, 15(8): 1319.

[40] 应小宇，阚琪.杭州商业街道空间布局形态关键要素对周边风环境的影响[J].地理科学，2018，38(12)：2093-2099.

[41] 王成刚，罗峰，王咏薇，等.高密度建筑群及超高建筑物对风环境影响的风洞试验[J].大气科学学报，2016，39(1)：133-139.

[42] YANG J Y, SHI B X, SHI Y, et al. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 54: 101941.

[43] 陈颖，于淼，马嘉，等.典型浅街峡谷布局及其植物配置模式春季花粉飞散特征模拟研究[J].生态学报，2024，44(1)：256-270.

[44] 胡一东，刘兆辉，谭洪卫.街区尺度建筑布局对通风性能的影响及评价方法研究[J].建筑科学，2017，33(6)：108-114.

[45] CUI H, MA M, LI J, ET AL. Integrated impacts of building space ratio and wind direction on pedestrian-level wind environment around high-rise buildings with equilateral triangle arrangement[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2024, 17(9): 2016-2027.

[46] 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.

[47] 姚亚男，李树华，王玥，等.中国花粉致敏树种分级研究[J].中国园林，2023，39(6)：114-119.

[48] 裴小强.北方地区行道树的选择与应用[J].现代园艺，2011(4)：39，65.

[49] 陈怡美.基于花粉致敏控制的城市街道绿化优化研究：以西安市碑林区、高新区和曲江新区为例[D].西安：西安建筑科技大学，2023.

[50] RÍOS B, TORRES-JARDÓN R, RAMÍREZ-ARRIAGA E, et al. Diurnal variations of airborne pollen concentration and the effect of ambient temperature in three sites of Mexico City[J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(5): 771-787.

[51] 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[J].内蒙古气象，2008(4)：14-17.

[52] JOCHNER S C, BECK I, BEHRENDT H, et al. Effects of extreme spring temperatures on urban phenology and pollen production: a case study in Munich and Ingolstadt[J]. Climate Research, 2011, 49(2): 101-112.

[53] CHOËL M, VISEZ N. Altérations du grain de pollen par la pollution atmosphérique[J]. Revue Française D'Allergologie, 2019, 59(8): 555-562.