

DOI: 10.20103/j.stxb.202401110097

周伟奇, 邓文萱, 秦海明. 城市绿地花粉致敏研究进展. 生态学报, 2024, 44(23): 10936-10952.

Zhou W Q, Deng W X, Qin H M. Research progress on pollen allergy in urban green spaces. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10936-10952.

城市绿地花粉致敏研究进展

周伟奇^{1, 2, *}, 邓文萱^{1, 2}, 秦海明¹

1 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

2 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 城市绿地中部分植物产生的气传花粉具有致敏性, 可引发城市居民的花粉过敏症, 因而城市绿地成为城市花粉致敏问题的主要来源和研究区域。随着城市化进程的推进, 花粉过敏症越来越普遍, 且存在长期致敏隐患, 成为一个广受关注的城市居民健康问题。基于 20 世纪以来的花粉致敏研究热点和发展趋势, 综述了城市绿地致敏花粉的监测、花粉致敏性的评价方法、花粉致敏的影响因素, 以及花粉致敏风险预测。针对花粉致敏现象的成因、地区差异、危害与风险等分析评价不明朗, 以及研究主题之间联系性不强等问题, 系统归纳了致敏花粉的采集方法、种类与时空分布规律, 阐明了评价花粉致敏性的各类方法与适用性条件, 分析了影响花粉致敏的城市生态因子, 提出了花粉致敏风险预警与防范措施, 并指出了未来的发展方向。可为缓解花粉致敏问题提供研判基础、为防控致敏风险提供优化方案、为建立花粉致敏研究体系提供科学依据, 进而降低花粉致敏对城市宜居性带来的不良影响。

关键词: 花粉过敏; 致敏花粉; 花粉监测; 花粉致敏影响因素; 花粉致敏性评价

Research progress on pollen allergy in urban green spaces

ZHOU Weiqi^{1, 2, *}, DENG Wenxuan^{1, 2}, QIN Haiming¹

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

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The airborne pollen produced by some plants in urban green spaces has allergenicity, which can cause pollen allergy among urban residents. Therefore, urban green spaces have become the main source and research area of urban pollen allergy problems. With the advancement of urbanization, pollen allergy is becoming increasingly common and poses a long-term risk, becoming a widely concerned health issue for urban residents. This article is based on the research hot spots and development trends of pollen allergy since the 20th century, summarizing the monitoring of urban green space allergenic pollen, evaluation methods of pollen allergy, influencing factors of pollen allergy, and prediction of pollen allergy risk. Regarding the unclear analysis and evaluation of the causes, regional differences, hazards and risks of pollen allergy, as well as the weak connection between research topics, the article systematically summarizes the collection methods, species and spatiotemporal distribution patterns of allergenic pollen, elucidates various methods and applicability conditions for evaluating pollen allergy, analyzes the urban ecological factors that affect pollen allergy, proposes pollen allergy risk warning and prevention measures, and points out the future development direction. The article can provide a basis for alleviating pollen allergy problems, optimizing solutions for preventing and controlling allergy risks, and providing scientific basis for establishing a pollen allergy research system, thereby reducing the adverse effects of pollen allergy on urban livability.

基金项目: 城市格局演变的生态环境效应与调控技术(2022YFF1301100); 城市景观格局与生态过程(42225104); 深圳市生态环境局深圳市陆域生态调查评估(2021—2025 年)(SZCC2023000545)

收稿日期: 2024-01-11; **网络出版日期:** 2024-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

Key Words: pollen allergy; allergenic pollen; pollen monitoring; factors of pollen allergy; evaluation of pollen allergy

城市绿地是城市生态环境建设的必要内容,在城市景观价值、生态功能、居民生活及公众健康等方面有多重影响。绿地植物对于改善城市环境、调节生态平衡有重要作用,但气传致敏植物花粉容易引起人体过敏症^[1],轻则喷嚏咳嗽流涕、肌肤痒疹,重则引发哮喘、气管炎与肺心病,甚至威胁生命。现有城市花粉致敏研究通常围绕城市区域内部的绿地展开,并以监测站点所在地附近划分研究范围,而监测站点大多设置在城市内部,监测到的致敏花粉主要来自于绿地中的植物,加之花粉过敏人数及过敏原统计数据来源于城市中的医院检测结果^[2-3],故花粉致敏本质上产生于城市内部植被环境及其与城市居民的相互作用。根据城市典型建筑布局、植物种类与配置、风场变化的不同,花粉的传播距离不同,在 20—75m 之间有飞散和聚集的明显现象^[4]。花粉的数量随着传播距离的增加而减少,在传播距离达到 500m 时,花粉浓度已低于 0.02 粒/m²^[5],致敏性较低。且花粉过敏症在较短的传播距离内发作得更为迅速^[6],传播距离的增加降低了花粉的聚集性,从而减少因花粉浓度急剧升高而快速引发居民过敏症的可能。因此,城市内部花粉过敏症的出现受城市外围花粉的影响较弱,主要与城市内部花粉的传播距离短、聚集程度高有直接关系。此外,有研究表明,城区和郊区致敏花粉的优势种一致,仅个别种为独有,城郊致敏花粉种类区别较小,且城区明显比郊区花粉季节长、花粉总量多^[7],城区花粉致敏问题更为突出,该差异由城郊不同的植被状况和气象条件所致,也揭示了花粉致敏问题主要源自城市内部的特定环境,城区适合作为花粉致敏研究的主要范围。在城市发展进程中,绿地建设水平不断提高,如绿地面积增加、植物多样性提升,致使花粉种类和数量越来越多,致敏花粉也迅速增多^[8],几乎所有工业化国家的花粉过敏患者都在剧增^[9]。研究指出,花粉过敏发病率在美国约为 5%,高发区可至 15%^[10],在欧洲则高达 40%^[11],在日本甚至达到 42.5%^[12]。中国的花粉过敏率为 5%—10%,高发区接近 20%,且在不断提高^[13]。因此,随着城市化进程的推进,中国城市居民花粉过敏率总体呈上升趋势,花粉致敏问题亟待解决。

日益突出的城市花粉致敏问题得到了不同学科诸多学者的广泛关注,相关领域不断拓宽,研究涉及致敏植物种类及分布、致敏花粉浓度的监测、花粉致敏性成因与评价、致敏风险预报等多个方面。但总体而言,城市花粉致敏的研究还有诸多亟需加强的内容,比如研究主题相对分散,范式不一,对致敏性、成因、评价、预报等还需严谨界定、丰富关联性、系统性研究;对地区之间致敏花粉种类、数量和致敏性的变化规律异同的剖析不够深入,以及对致敏风险的时空分布和模拟预警不完善,还需提高研究方法和技术手段应用的适配度和精准度。且花粉致敏新问题层出不穷,如花粉散播量变多,致敏时间变长;花粉暴露模式更分散,致敏风险增加;致敏人群占比提高,公共认知不足等^[14-15]。为应对花粉致敏性评测不明确、花粉致敏成因和联系分析不深入、花粉致敏风险评估不成熟等问题的日趋严重性和动态变化性,须以“城市花粉致敏问题从何而来、因何改变、如何应对”的思路为切入点,围绕绿地中致敏花粉如何产生和散布、花粉致敏性如何评价、花粉致敏成因如何总结、花粉致敏风险如何预警预报等一系列花粉致敏问题开展系统分析,从而提供消解城市绿地花粉致敏威胁的科学参考。鉴于此,本文针对致敏花粉监测、致敏性评价、影响因素、风险预警与防范四个重要主题进行综述,搭建“从现象发现问题-探究驱动因素-预报风险”的完整评述逻辑。以城市绿地致敏花粉监测结果为基础,归纳致敏花粉的种类和时空分布规律,总结花粉致敏性的评价方法,分析城市绿地花粉致敏的影响因素,进而归纳花粉致敏风险预警与防范措施。本文有助于加强对花粉致敏问题的系统认知,为花粉致敏研究夯实理论根基,以期有的放矢地降低花粉致敏风险,助力绿色城市发展。

1 花粉致敏研究的发展

为了解花粉致敏研究的发展情况,本文分别检索了中英文核心期刊文献数据库,时间范围为 2000 年 1 月至 2023 年 9 月,并对分析了花粉致敏研究进展及趋势。以“花粉过敏”或“花粉致敏”为关键词检索中国知网上的中文文献,共 160 篇,总被引数 1799 次。2006—2011 年、2016—2018 年、2020—2021 年为三个发表高峰

期,年发表数量最高为 13 篇(图 1)。国内花粉致敏研究相对新兴,还需深入现有主题和探索新主题。以“pollen allergy”或“allergenic pollen”为关键词检索 Web of Science 上的英文文献,共 8671 篇,总被引数 268633 次,h 指数达 180。2009—2013 年、2015—2017 年、2019—2022 年为三个发表高峰期,年发表数量均超过 375 篇,最高为 429 篇(图 2)。国外花粉致敏研究相对成熟,在持续投入和成果延续方面有良好动力,还需提高话题热度和更新频率。

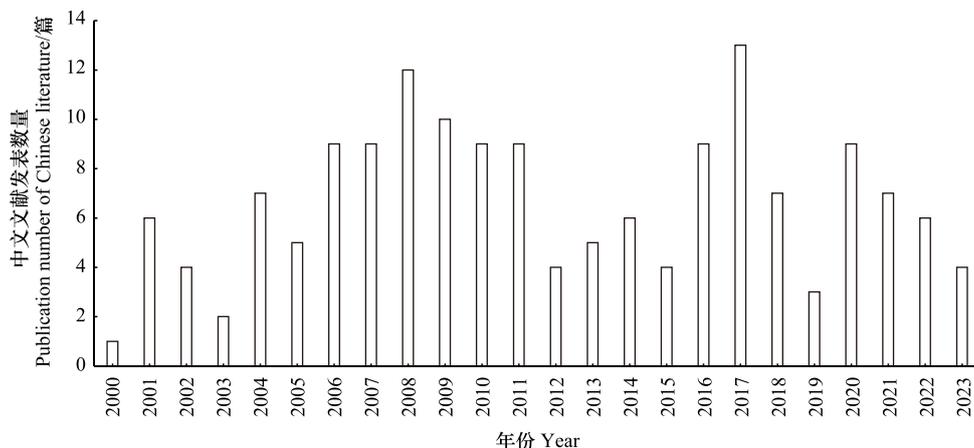


图 1 花粉致敏研究的中文文献发表数量

Fig.1 Number of papers on pollen allergy research published in Chinese

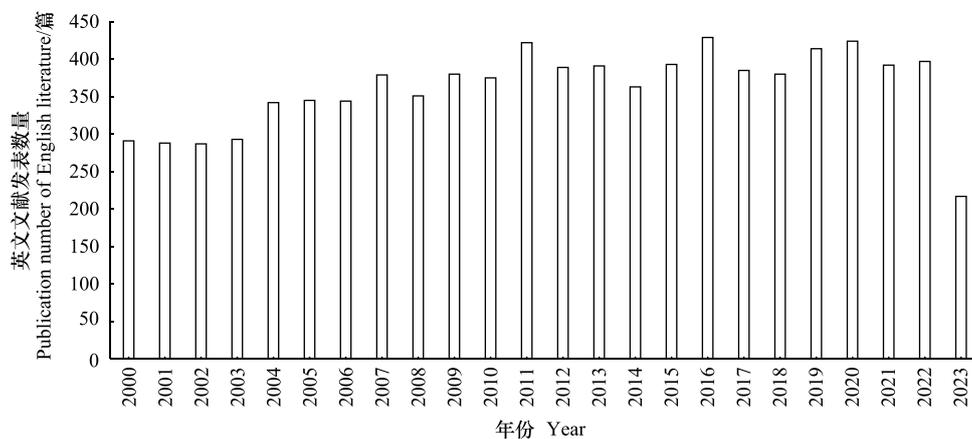


图 2 花粉致敏研究的英文文献发表数量

Fig.2 Number of papers on pollen allergy research published in English

对中英文关键词进行聚类,分别得到 9 个和 4 个热点。中文文献热点按热度从高到低为气传花粉、鼻炎、花粉过敏、豚草花粉、过敏原、过敏反应、致敏花粉、发病率等(图 3)。这些热点贯穿花粉致敏研究,包括致敏花粉过敏原、致敏过程和致敏结果三个环节。英文文献主要热点按热度从高到低为食物过敏(food allergy)、舌下免疫治疗(sublingual immunotherapy)、气候变化(climate change)等(图 4)。因英文文献较多,继续统计关键词频次后发现还有过敏性鼻炎(allergic rhinitis)、哮喘(asthma)、过敏原(allergen)、交叉过敏反应(cross-reactivity)、空气生物学(aerobiology)等其他热点(图 5)。可见,国外花粉致敏研究主要涉及医学病理、环境条件、传播过程、风险预测四个主题。综合国内外研究热点和发展趋势,城市绿地花粉致敏研究聚焦在致敏花粉种类数量和传播特征、影响因素、致敏性评价和风险评估四个方向上。

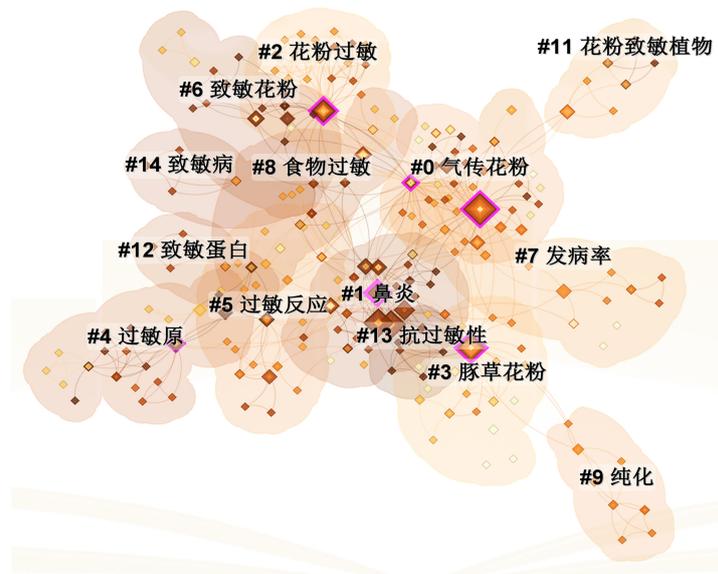


图 3 花粉致敏研究的国内热点

Fig.3 Hot spots of pollen allergy research published in Chinese

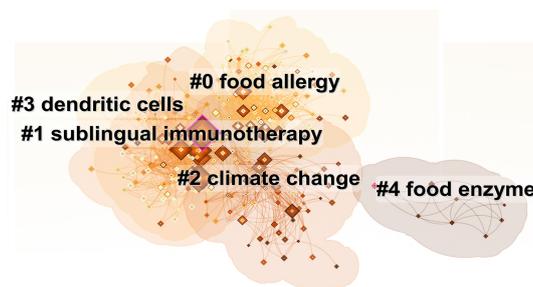


图 4 花粉致敏研究的主要国外热点

Fig.4 Main hot spots of pollen allergy research published in English

2 城市绿地致敏花粉监测

致敏花粉的种类和数量是解析花粉致敏问题的数据来源与基础,故致敏花粉种类和数量的监测在城市绿地花粉致敏研究中必不可少。致敏花粉的监测主要包括监测方法和监测结果两部分内容,基于致敏花粉的采集鉴别结果,分析其在空间和时间上的分布规律,为花粉致敏研究提供基本依据。

2.1 致敏花粉监测方法

花粉监测的主要内容在于正确、有效采集到空气颗粒物中的花粉,一般有被动式和主动式两种方法^[16]。被动式花粉采集法基于花粉因自身重力作用而沉降的自然现象,通过采样器收集样品,是比较早开始使用的传统方法^[17],如美国学者发明的 Durham 采样器,此仪器受气流影响较大,但胜在简便、易行、经济。主动式花粉采集法则基于机械和电能的动力供给,应用较多的有英国 Burkard 公司制造的 Burkard 采样器。此仪器虽便携性不足,但分辨率高,能精准按花期收集花粉,是目前花粉研究最常用的仪器^[18]。国内外对提高花粉监测效率也各有改良措施。例如,日本大和公司推出 KH3000-1 自动花粉采样器能快速准确分辨花粉粒,北京朗净时代环境科技公司的 LJHF3000 全自动花粉监测仪能实时监测花粉并传输浓度数据。

花粉监测的主要流程^[19]如下:首先将采样器置于四周通风良好、无高层建筑物遮挡的环境中,其次利用

涂抹黏附剂的载玻片或胶带收集暴露在空气中的花粉,而后在采样周期结束后将花粉样品制成染色玻片,最后参考花粉形态图谱和名录,在光学显微镜下鉴定花粉种类并统计花粉数量,进而计算花粉浓度,常见单位为粒/ m^2 或粒/ m^3 。

2.2 常见致敏花粉种类与花粉浓度特征

致敏花粉监测结果显示,国内外各地区主要致敏花粉的种类存在异同性。杨柳科、松科、柏科、榆科、悬铃木科、苋科、菊科、禾本科等为中国主要致敏花粉^[20-50](表1),在北方多为榆科、壳斗科、杨柳科、松科、柏科、胡桃科、菊科、苋科,南方多为松科、柏科、桑科、杨柳科、菊科、禾本科,东部多为杨柳科、柏科、桑科、榆科、梧桐科、菊科、大麻科,西部多为杨柳科、松科、柏科、榆科、禾本科、菊科、苋科,中部多为柏科、杨柳科、壳斗科、桦木科、胡桃科、悬铃木科、菊科、大麻科、十字花科。桦木科、蕈树科、杨柳科、松科、柏科、木犀科、壳斗科、菊科、禾本科等为国外主要致敏花粉^[51-75](表2)。综合来看,菊科中的豚草属、蒿属及大部分杨柳科、松科、柏科、禾本科植物花粉为全球范围中的强致敏性花粉。

全球各地区气传花粉组成及浓度的变化模式不尽相同。欧洲的草本花粉浓度在8月中旬至9月中旬达到峰值^[5],北美洲花粉季节一般为2—10月,且乔木花粉在春季出现最大增长量^[76],在南美洲,10月至次年3月为草本花粉高峰期,乔木花粉季节较短,出现在8—10月^[73]。中国一年四季中有春、秋季两个明显的气传花粉含量高峰,春季以乔木花粉为主,秋季以草本花粉为主^[77]。木本植物的花粉一般比草本植物更多、播粉期更短,因而春季花粉量通常更大,在乔木花粉较多的南方尤为突出,秋季则是花粉症发病的旺季,在草本花粉盛行的北方尤为突出^[78]。

3 花粉致敏性的评价方法

定量评价花粉致敏性是评估和缓解花粉致敏风险的重要前提。根据适用主体从微观到宏观的顺序,将现有的花粉致敏性评价方法归为以下四类,分别是花粉过敏原实验测定法、花粉过敏原含量测定法、花粉浓度等级划分法、花粉致敏指数法。其中,花粉过敏原实验测定法和花粉过敏原含量测定法是针对花粉过敏原进行致敏性评价,花粉浓度等级划分法和花粉致敏指数法是针对致敏花粉进行致敏性评价,它们都能指出花粉致敏性强弱,但各有侧重和优劣势。

3.1 花粉过敏原实验测定法

过敏发病率是医学上的花粉致敏性衡量依据。如果医学上的变应原点刺试验或血清特异性抗体测试呈阳性,则表示人体内有花粉过敏原抗体,为花粉过敏,还可以准确诊断出致敏花粉的种类^[79]。医学实验测定法可以同时获取花粉过敏发病率与花粉种类数据,有助于揭示二者之间的关系,从而探究不同地区的致敏特点和机制^[19],但病例数据难获取、个体差异较大,还易受其他过敏原干扰。

3.2 花粉过敏原含量测定法

花粉过敏原含量测定法是以每个花粉粒的过敏原含量的多少来区分致敏性的强弱。通过检测大气环境DNA样品中的所有过敏原,利用分子生物学技术分离出优势花粉过敏原,再与花粉图谱比较,得到各种类型花粉过敏原含量^[80],以此判定致敏性。该方法能准确鉴别花粉致敏种,但在技术和经济适用方面存在局限,对样本精度和数量依赖较高。

3.3 花粉浓度等级划分法

花粉浓度越高,引发人体过敏反应的概率越高,致敏性越强。因此,花粉浓度可用于表征花粉致敏风险。

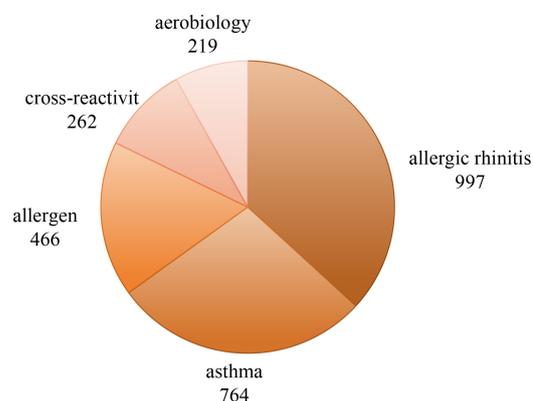


图5 花粉致敏研究的其他国外热点

Fig.5 Other hot spots of pollen allergy research published in English

图中数字代表文献关键词频数

表 2 一些国家主要致敏花粉种类

Table 2 Main types of allergenic pollen in other countries		主要致敏花粉种类 Main types of allergenic pollen																																				
地区 Area	国家 Countries	松科	杉科	柏科	桑科	豆科	榆科	槭科	葎树科	壳斗科	木犀科	杨柳科	桦木科	槭树科	橄榄科	银杏科	胡桃科	棕榈科	大戟科	梧桐科	木麻黄科	山毛榉科	桃金娘科	悬铃木科	菊科	苋科	禾本科	车前科	莎草科	大麻科	荨麻科							
北美洲	美国 ^[51]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√						
	加拿大 ^[52]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√						
欧洲	英国 ^[53]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√						
	法国 ^[54]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√					
	德国 ^[55]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√				
	奥地利 ^[56]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√				
	比利时 ^[57]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
	波兰 ^[58]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
	挪威 ^[59]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
	希腊 ^[60]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
	瑞士 ^[61]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
	西班牙 ^[62]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
亚洲	意大利 ^[63]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
	日本 ^[64]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
	韩国 ^[65]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	土耳其 ^[66]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
大洋洲	印度 ^[67]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	澳大利亚 ^[68]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
南美洲	新西兰 ^[69]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	巴西 ^[70]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
非洲	哥伦比亚 ^[71]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	阿根廷 ^[72]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	开普敦 ^[73]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	摩洛哥 ^[74]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	尼日利亚 ^[75]	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

不同研究的花粉浓度临界值不同,常见的划分标准以木本植物花粉浓度 ≥ 400 粒/ m^3 、草本植物花粉浓度 ≥ 150 粒/ m^3 为高等级及以上花粉浓度,若其过敏发病率约为3%—6%^[81]。木本植物花粉量相对草本植物更多,若其花粉浓度超过1500粒/ m^3 ,将会带来极高的花粉致敏风险^[82]。综合现有研究来看,令人体出现花粉过敏不适反应的总花粉浓度约为25—50粒/ m^3 ,100粒/ m^3 以上会引发较为严重的花粉过敏症。花粉浓度评价法是直观、普遍、可靠的致敏性评价方法,且与花粉过敏率直接相关,但受花粉采集过程影响较大,存在一定的系统误差和测量误差。

3.4 花粉致敏指数法

目前已有一些研究设计了花粉致敏相关指数来量化城市绿地的花粉致敏性。常见指数有特定致敏指数(Specific Allergenic Index, SAI)、城市绿地过敏原指数(Urban Green Zones Allergenicity Index, I_{UGZA})和观赏树木风险生物学指数(Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees, AIROT)。

SAI利用致敏植物的生态特点和花粉过敏原反应特点^[83],来量化城市绿地的花粉致敏性,将致敏植物数量、物候、交叉反应性等作为参数,计算公式见式(1)。该指数考虑了交叉过敏性和非多年生物种对空气花粉量的影响,但认为所有植物的物候期重叠,因而还须关联具体植物的物候变化来探讨。

$$SAI = \frac{\sum_{i=1}^n lc_i \times pp_i \times cr_i \times a_i}{n} \quad (1)$$

式中: n 为致敏植物数量, lc 为生命周期, pp 为物候期, cr 为交叉反应性, a 为丰度值。

I_{UGZA} 以绿地空间为场源模型^[62],根据植物的生物和形态特性,来量化城市绿地的花粉致敏性,将植物潜在致敏性、花粉释放量、授粉期时长、大小和数量等作为参数,计算公式见式(2)。该指数可估计城市绿地的致敏性和对比相似植物的致敏性,但无法表明城市绿地对花粉症患者造成的实际危害,故还应结合监测到的花粉浓度以说明。

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

式中:378为场源模型尺寸常数; S_T 为绿地总面积; n 为植物数量, ap 为潜在致敏性; pe 为花粉释放量; ppp 为授粉期持续时间; S 为植物覆盖面积; H 为植物高度。

AIROT结合植物的生物因素与城市景观、地理特征等非生物因素^[84],来量化城市中的花粉致敏性,将城市绿地面积、致敏植物分布、植物生长状态及花粉产量、花粉传播物理障碍物等作为参数,计算公式见式(3)。该指数能得出基于花粉浓度的城市绿地花粉致敏风险地图,但其评价精度的不确定性较大,故须与实际花粉浓度比较,以增强可靠性。

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

式中: PD 为潜在分散性; N 为树种密度; M 为树龄成熟度; SH 为非生物因素的阻碍程度; H 为海拔高度; ST 为总面积。

近年来,还有学者提出了一些创新性的花粉致敏指数,比如花粉过敏百度指数、花粉浓度潜力评估指数、城市绿地致敏改进指数等。花粉过敏百度指数从社会舆情层面分析花粉致敏情况^[85],计算百度网页中关键词搜索频次的加权和,反映花粉致敏话题的关注度和用户群像。花粉浓度潜力评估指数根据花粉飘散和降落情况、植物的种类和数量^[86],估算潜在花粉浓度和致敏植物危害等级。城市绿地致敏改进指数用空间球坐标替换场源模型,反映绿地空间内及对周边环境的致敏潜力^[87]。这些指数还要融合实际花粉浓度数据,才能完整地阐释致敏性。

4 花粉致敏的影响因素

城市绿地花粉致敏现象多与植物生长和城市居民有关,主要体现在城市绿化、环境条件、居民活动三个方

面。城市绿化对花粉致敏的影响体现在植物释放的花粉种类和数量上,环境要素的影响体现在环境条件对花粉产生和传播的作用上,居民活动对花粉致敏的影响则体现在人于花粉传播过程中被诱发过敏的可能性上。

4.1 绿化规划

因城市绿化规划对花粉致敏植物的不利影响考虑不足,导致花粉致敏植物和致敏花粉的种类和数量增多,从而诱发人体出现花粉过敏症。绿化规划涉及植物选种、绿地分布和绿地管理。植物选种引入花粉致敏植物,则引入了致敏花粉的源头,其在城市中的空间分布会造就不同绿地类型的致敏风险差异,而绿地管理可以调节致敏风险的程度。

4.1.1 植物选种

很多绿地景观设计在选择绿化植物物种时仅考虑节约成本和追求美观,忽略植物花粉的致敏性,导致城市绿化中有大量花粉产量高、致敏性强、传播速度快、传播范围广的致敏植物^[88],从而埋下花粉致敏隐患。且外来致敏植物的引入会诱发新的过敏^[89],如蒿草、豚草等入侵物种成为除本地植物外新的花粉过敏原。此外,亲缘关系较近的花粉过敏原因某些蛋白质序列和结构高度相似,可能有免疫学交叉关系^[90],如柏属花粉之间、柏属和松属花粉之间的反应,若同时选用此类植物,花粉致敏性会增强。

4.1.2 绿地分布

城市绿地的空间分布与功能区划分有关,不同功能属性的绿地致敏风险不一,其中公园、居住区和道路绿地中的花粉致敏问题相对突出。公园内植物的种类和数量都很丰富,且被密集建筑包围,花粉分布相对集中,是致敏花粉的主要来源地,其花粉浓度和致敏潜力都是最高的^[91]。居住区绿地中也存在不少致敏植物,半径1公里内的居住区绿地可能通过释放较多致敏花粉,从而加剧过敏症的流行^[92]。当住宅布局出现围合形态时,很可能形成小气候,导致花粉在局部居住区绿地中汇集浓度很高^[93],致敏风险上升。道路绿地以种植行道树为主,散布大量乔木致敏花粉^[94],且若单一的致敏树种居多、树种间距窄,更会加重花粉致敏风险的危害。

4.1.3 绿地管理

影响花粉致敏的绿地管理模式主要体现在植物种植和维护方式上。合适的绿化管理能弱化花粉致敏风险。针对必用或已用的致敏植物,在绿化配置、花粉传播途径中加以控制^[95]。比如,通过减小栽培密度、加大修剪频率和强度、改良水肥条件等,可以减少致敏植物开花数量;通过喷洒水雾、及时清理落花等,可以加速致敏花粉沉降并抑制其飘散;改进植物搭配,混合栽种花粉致敏和非致敏植物,维持乔木、灌木、草本植物群落层次丰富度,增强安全性和观赏性。反之,不当的绿地管理会促使致敏植物生长开花、花粉增多。木本植物栽种数量多、种植密度大以及草本植物大面积厚叠铺地^[88],都会埋下花粉致敏隐患。将致敏植物种植在上风区和面积较大、热量汇聚的不透水地面周围时,空气对流会加速致敏花粉传播^[96]。单一物种片植、丛植不仅会提高花粉致敏风险,还会导致生物多样性低、生境不稳定,从而造成致敏植物生长失控。

4.2 环境条件

致敏花粉的产生与传播离不开致敏植物所处环境的影响。气候条件、空气污染、自然灾害等环境因素作用于致敏花粉的成熟和释放、传播和聚集等过程,影响致敏花粉的种类、质量、产量及浓度,从而影响其致敏性。

4.2.1 气象因子

气象因子主要包括温度、降水、湿度和风速,对花粉的产生和传输影响很大。一方面,气象因子影响致敏植物的开花,从而影响空气中的致敏花粉含量。另一方面,气候条件给予致敏花粉运力,从而影响其传播过程。

温度制约花粉生产量和生产周期。过高过低的温度都不利于花药成熟开裂,而适度高温有利于其释放更多花粉^[97],导致花粉量增加、致敏性增强。降水量和降水时期对花粉的影响程度不同,适中的降雨量有利于植物开花和花粉传播^[98],过多雨水则使花粉被冲刷而流失。花粉形成和释放之前的降水有利于花粉量增加,

但释放周期内的降水会稀释花粉浓度^[99]。湿度与花药发育和花粉发散有关。高湿度促进花粉发育,并让花粉吸收更多水分,沉降性变强,飘散减缓,低湿度则助于花药破裂,增加花粉量^[48]。风速在花粉传播过程中不可忽略。风速变大利于花粉传播,但过大风速令花朵易被吹落到下风向,局部花粉浓度降低,且不同花粉借风散播情况不同,如多数乔木花粉与风速正相关,草本花粉则相反^[19]。受气候影响,花粉聚集期有明显的季节特征,春季花粉种类和数量全年最多,而秋季开花植物花期更长、致敏性更强^[100]。

4.2.2 空气污染

城市空气污染物作为花粉的载体,通过改变致敏花粉的化学成分和物理形态^[96],或通过温室效应的协同作用,增强花粉的致敏性。比如,CO₂浓度增高使植物单株花粉量增加和花期提前,O₃浓度增高使花粉中的过敏原含量变多,CO、NO_x、SO₂等通过影响致敏花粉的吸附、传播途径或改变其基因组,促进过敏原释放和引发更强的过敏反应^[101-102]。温室效应使得城市温度升高,花粉传播高峰期延续,同时造成空气污染物在大气流动变缓的过程中消散速度降低而汇集浓度上升,从而使花粉过敏原数量变多、花粉致敏性变强^[103]。近年来城市空气污染的人为来源不断,交通和工业污染物排放量显著增多,空气污染的强度和频度明显变高,导致花粉量变多、花粉季节变长等,进一步加剧了花粉过敏现象^[104]。

4.2.3 自然灾害

自然灾害事件发生频次和强度的增高,给花粉过敏症带来更多挑战。研究表明,花粉含量高时,雷暴的发生与急性严重哮喘就诊率的增加呈正相关,雷暴诱发的哮喘症也集中在花粉季节^[105]。雷暴条件下,花粉粒会快速破裂并释放出大量过敏原,导致致敏花粉含量急增,而这些致敏花粉又在雷暴的强对流中迅速传播,很容易进入人体肺部深处,引起过敏反应。沙尘暴混杂的大量致敏花粉借风力向远处飘散,造成哮喘呼吸困难、鼻炎皮炎等过敏症状显著增多^[106]。干旱和洪涝促使气象因子骤变,从而影响花粉致敏性。干旱前期,高温迫使植物提前开花释放花粉和致敏性加强^[107],持续干燥又加速花粉传播,但后期水分不足导致植物失活或花粉囊发育不良,阻断致敏花粉继续产生。洪涝前期雨量骤增、流速变大,对花粉的冲刷作用强,致敏风险降低,但后期降雨变少、冲刷作用减弱,则有利于致敏花粉形成和聚集,且随着湿度下降,水汽凝滞花粉的效果变弱^[108],花粉散播速度加快。

4.3 居民活动

从居民自身角度来看,个人体质决定花粉过敏反应的强弱,个人行为策略与偏好、建筑排布与人口密度决定接触致敏花粉的概率。居民活动的不同,造成致敏花粉诱发过敏现象的差异。

4.3.1 个人体质与免疫力

花粉过敏症的出现与人的身体素质及免疫系统有关^[109]。一方面,随着生物多样性的演变,人体所接触的抗原种类和数量改变,机体长期以来建立的免疫耐受力被破坏、免疫功能障碍出现,导致过敏类疾病增多和变复杂,花粉过敏症也更容易发生。另一方面,人体接种疫苗次数和使用抗生素量增加,免疫细胞功能发挥受限,机体抵抗力降低,使花粉过敏症更为常见。已有研究表明,从性别和年龄上看,男性花粉过敏率远高于女性,老年人花粉过敏率较普通人低,幼年较少接触过敏原的人,会产生较强花粉过敏反应^[110]。花粉过敏是比较复杂的病症,因个人体质与免疫力的差异,同种致敏花粉不一定让所有人都过敏,即便过敏,发病程度也不一。

4.3.2 个人行为策略与偏好

起居、饮食、习惯等个人行为策略与偏好的不同,也会导致花粉过敏结果的不同。起居方面,空气中的花粉在垂直方向上并非均匀分布,其致敏情况也有区别。起居方面,住宅高层的花粉含量和种类较中低层明显减少^[111]。饮食方面,肥胖、高脂和高蛋白的饮食结构易使呼吸道过敏症状被诱发^[112]。习惯方面,居民长时间靠近花粉致敏植物,过敏概率增加。近地表花粉浓度峰值与居民出行时间重合^[107],集中在晨练、午休和下班三个户外活动高峰期,加上居民在绿地中散步、游玩,或喜欢种植花草,难免会接触到不少花粉,也更容易花粉过敏。

4.3.3 建筑排布与人口密度

城市建筑排布方式和人口密集程度影响花粉过敏症的发生。建筑群的布局会改变风向,从而改变花粉飘散的方向,进而影响花粉浓度。建筑与风向平行,形成流畅的通道,花粉含量会降低,反之会升高^[113]。人口密集的地方,空气流通性较差,花粉过敏发生率较高,反之较低^[96]。城市的商圈、景区、商务区、科技产业园等热门地带,吸引着更多人潮,人流量剧增又带动建筑扩增需求,最终形成建筑和人口聚集的交汇圈。因此,在城市中建筑紧凑、人流量大的交汇核心,花粉过敏率相对较高。

5 花粉致敏风险预警与防范

将不同研究区致敏花粉的散播规律与影响因素联系起来,是减缓花粉致敏风险的有效思路。精准预报致敏花粉种类和浓度,预警花粉致敏风险,并采取合理的防范措施,能有效缓解致敏花粉对居民健康的威胁。

5.1 花粉致敏风险的预警

已有研究主要利用花粉种类和浓度监测数据、遥感数据、气象数据等,通过统计分析、神经网络算法等方法建立花粉浓度预测模型,进一步结合季节、花粉传播轨迹、过敏发病率、居民活动等的影响,构建花粉致敏风险预警模型。例如,探究花粉量的变化特征,综合花粉种类和浓度、过敏率、节气等数据^[92,114],构设季节性花粉致敏预报所需条件。通过建立花粉浓度和气象因子、物候期等的统计学关系^[115-116],构建花粉浓度预报模型。通过制作标明花粉种类、传播时段和地区的花粉地图^[117],预警致敏风险高发区。使用概率分布模型估算花粉浓度和风险等级^[118],制成花粉预报日历。基于深度神经网络优化的集成估算模型^[119]开发花粉监测网络和预测服务。通过计算流体力学的多物理场^[120],模拟不同天气条件下花粉的散播状态。

还可以结合关于花粉的其他信息,令花粉致敏风险预警的建模更有针对性。例如,纳入社交平台上居民对花粉过敏的反馈数据和过敏患者人数数据^[121],作为致敏风险分级预警的补充依据。利用网页爬虫、信息可视化等技术,构建花粉症知识图谱和花粉致敏预警分析系统^[64,122],为居民提供预防花粉过敏的建议。提取遥感数据产品中的叶面积指数、增强型植被指数表征花粉浓度,再结合气象数据,构造花粉监测和预报的非线性自回归神经网络模型^[123-124],应用于较大尺度的花粉致敏风险评估。

5.2 花粉致敏风险的防范

为了防范花粉致敏风险,可以从绿化规划、环境条件和居民活动三类影响因素切入,有的放矢地降低花粉致敏性、缩小致敏花粉传播范围和诱发人体过敏的概率。

针对绿化规划,通过调整致敏植物种类构成与布局、公布花粉致敏信息等举措,控制致敏花粉在小范围散布,并减少人与其的接触。避免选用高致敏植物,降低现有致敏植物的栽培密度,选择非致敏或弱致敏性的植物分隔景观空间,或遵循现有植物配置模式重设非致敏植物替代方案^[125],阻隔致敏花粉大量传播,以降低花粉过敏率。此外,在绿地区域设置一些风险提示^[126],引导居民回避花粉密集区的绿地管理措施也有助于缓解花粉致敏风险。

针对环境条件,一方面,可以通过改变植物生长环境中的气象因子,调控致敏植物的物候,使其花期变短、花粉产量降低,还可以通过改变致敏花粉传播过程中的气象因子,降低花粉传输效率和汇集浓度^[127]。另一方面,减少空气污染物的排放和减缓温室效应的扩散,以弱化大气中的污染物对致敏花粉的运载作用和对致敏性的加剧作用,并与自然灾害事件的预报形成关联响应,同时防范二者的危害。

针对居民活动,就群体预防而言,利用展板、专栏、媒体等加大科普力度,传达常见花粉致敏植物形态特征、分布地区、物候和花期、致敏危害、预防方法等信息^[128],帮助居民快速了解并关注花粉致敏问题。以致敏植物的主要传粉周期划分花粉季节,形成花粉过敏症的季节性疾病诊断、治疗方案及预后评估等^[129],完善花粉过敏症的医学防御对策。就个体预防而言,个人主动阻隔花粉,如花粉季节少开窗、多戴口罩和护目镜,出门避开花粉飘散高峰时间段和建筑、人流密度较大的区域,并及时清洗身上沾染的花粉、备抗过敏药等,同时勤于锻炼、健康膳食以提高免疫力,是防止过敏的直接高效手段^[130]。

6 讨论与展望

2000 年以来,城市绿地花粉致敏研究内容逐渐丰富,引起的关注度和讨论度逐渐上升。现有研究在致敏花粉种类和致敏影响因素两个方面进展可观,且能追根溯源,提出相应的花粉致敏风险防控措施。而且在这两个方面的研究呈现显著的创新趋势,通过医学、园林、遥感、大数据、人文社科等多学科交叉,建立花粉致敏性评价指数、模型等对花粉致敏性进行评价。然而,花粉数据的收集、评估分析、风险预警等技术手段仍存在不确定性,实际运用存在时空局限性,花粉传播和致敏的复杂过程易被忽略或简化,还需充分了解不同地区致敏花粉的分布规律,结合城市绿地植物生长情况、植被组成与结构,探索改善致敏问题的方法,做好致敏花粉防治工作。

6.1 提升致敏花粉监测的效率

目前的研究对花粉致敏现象和危害已经有了科学性的剖析,也能基于花粉致敏现状,继续花粉致敏新问题的延展性研究。但针对花粉种类鉴别和数量统计,目前仍以人工识别为主,存在误差,滞后性且效率不高。将来可以强化深度学习、散射成像、激光雷达技术,继续精进花粉自动识别和分类模型^[131],实现花粉监测仪器和程序的联网自动运行与智能校准,从而精确、高效地开展致敏花粉种类汇总与花粉浓度计算等工作。还可以通过遥感技术监测到致敏植物的物候特征、光谱特征、植被指数的变化^[132],使花粉致敏植物种类和特性分析等研究变得更为便捷和有时效性。

6.2 改进花粉致敏性的评价方法

目前评价花粉致敏性的方法有诸多开创性尝试,能够结合植物本身和环境条件解释花粉致敏的量化结果,但还需要根据绿地管理、大气污染物、居民活动等影响因素增添多项指标,综合反映花粉致敏性与城市建设以及居民活动的相关性。可以根据在实际计算使用中发现的问题,有针对性地增强参数来源的可靠性,如从花粉过敏率有关文献中整合不同花粉的致敏范围和致敏强度参数,作为致敏潜能赋值^[133]。或重新创立研究所需的评价体系,并对照花粉的实地监测结果,调整指标类型、权重、运算方式等,减小评价方法的误差。此外,大尺度长时序花粉致敏性的现状和变化趋势的分析与预测水平有待提高,尤其在花粉致敏性模型模拟、监测预报等方面,样本精准性、方法有效性和推演可行性需重点提升。同时,目前的研究对致敏花粉和致敏植物空间分布格局上的探讨较少。因而需要结合遥感空间识别与特征提取技术、流体力学风环境分析技术^[121,134],发展基于局地尺度的致敏植物树种数据推广至全域分布、致敏花粉飘散规律推广至全域致敏花粉扩散模式及聚集密度的建模研究,补充目前评价方法缺失的内容。

6.3 全面探究花粉致敏性的影响因素和驱动机制

目前关于气象因子与花粉数量和浓度的关系探讨较成熟,根据全球气候变化和区域气象特征评估致敏风险、预测致敏变化趋势的研究常见且可行^[135]。但关于植物物候、社会经济、居民活动以及特定场景中的环境条件等对花粉致敏性的影响探讨较少。例如,居民区的致敏植物种类、数量及空间分布可能受到种植成本、景观主题、建筑排布、居民心理健康等的影响^[136-137],在公园里则更可能受到微地形微气候、绿地大小、植物配置、空间和游线设计、树冠密度与通风廊道、人群高度等的影响^[138-139]。因此,还需探讨不同绿地场景条件中花粉致敏性的区别与联系,并结合花粉传播过程、人群暴露风险、过敏症机理等方面研究花粉致敏性的影响因素。此外,还需关注致敏花粉种类和浓度在不同区域中的梯度变化,并从社会经济要素、人口流动等方面探究花粉致敏性的驱动机制。

6.4 增强花粉致敏风险预警与防范的精准度

目前的研究对花粉致敏风险预测研究有了一些实践,但整体处于起步阶段,应用较不完善,还有较多需要补充的预测内容,且重在提高预警模型的精度和防控范围的准确性。对花粉致敏风险预警的精度做出以下四步改良。首先,应全面考虑花粉致敏的各类影响因素,综合纳入致敏风险建模体系。其次,优化现有数据来源,如扩大致敏花粉种类与浓度监测时空范围、使用更新改进的商业化监测设备^[140]等获取完备的数据。再

者,以详实的致敏花粉、自然和社会环境、居民活动监测数据分析为基础,做好致敏花粉种类和浓度推测、致敏花粉传播过程还原与推演工作的动态追踪与实时调整。最后,结合深度学习、参数优化等算法改进花粉预警模型,得到预警数值和等级,以及对居民致敏作用的量化结果。

还需将花粉致敏风险预警结果与科学合理的防范措施综合起来。集成致敏风险预警与智能设备,如气象观测、花粉监测、遥感识别、人工智能模拟等自动运行程序,生成决策辅助工具,以更好地防范花粉过敏问题。将致敏风险预警与实地花粉致敏情况和居民的真实感受相结合,考虑理论与实际、地理位置以及个体之间等的差异,因地制宜设置花粉致敏风险防范预案。将致敏风险预警系统、网页、图谱等的设计方案投入划分风险防控范围的应用与推广,尤其需要在流感期间谨防花粉过敏率的快速增加^[14]。如自动呈现精准到各绿地类型中致敏花粉种类及浓度、致敏时期、致敏风险等级及主导因素、防护提示、与其他流行疾病的互作等,体现出致敏风险预警理论研究在实际防控中的应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 叶世泰. 中国气传和致敏花粉. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] 王晓艳, 田宗梅, 宁慧宇, 王学艳. 北京城区气传花粉分布与过敏性疾病就诊关系分析. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2017, 31(10): 757-761.
- [3] 张宇晗, 李英. 石家庄中心城区空气花粉组成及其对环境的影响. 河北林业科技, 2013(2): 1-4, 9.
- [4] 乔媛, 尹焰寅, 党冰, 姜江, 范进进. 北京城郊致敏性气传花粉分布差异的对比研究. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第四卷). 厦门, 2017: 256-263.
- [5] 陈颖, 于森, 马嘉, 李运远. 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. 生态学报, 2024, 44(1): 256-270.
- [6] 谢焰锋, 张卓文, 高大雄, 许林, 梅莉, 邹杰, 胡文君, 孙敏, 邹庆琳, 魏健生. 马尾松种子园花粉散发及其空间分布特征. 华中农业大学学报, 2013, 32(6): 32-37.
- [7] Lucas R, Bunderson L, Dan D L. Using hourly pollen data to quantify relevant distance and response times of hay fever symptoms following exposure to local pollen peaks. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2021, 147(2): AB85.
- [8] 辛嘉楠, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 城市化加剧花粉过敏症的机制研究进展. 环境与健康杂志, 2007, 24(10): 833-836.
- [9] 魏庆宇. 花粉症的诊治及预防. 中国实用内科杂志, 2012, 32(2): 89-91.
- [10] 江伟明, 潘睿聪, 罗传秀, 林媚珍. 城市空气花粉的研究进展. 生态科学, 2018, 37(6): 199-208.
- [11] Lake I R, Jones N R, Agnew M, Goodess C M, Giorgi F, Hamaoui-Laguel L, Semenov M A, Solmon F, Storkey J, Vautard R, Epstein M M. Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(3): 385-391.
- [12] Osada T, Okano M. Japanese cedar and cypress pollinosis updated: new allergens, cross-reactivity, and treatment. *Allergology International: Official Journal of the Japanese Society of Allergology*, 2021, 70(3): 281-290.
- [13] Wang X Y, Ma T T, Wang X Y, Zhuang Y, Wang X D, Ning H Y, Shi H Y, Yu R L, Yan D, Huang H D, Bai Y F, Shan G L, Zhang B, Song Q K, Zhang Y F, Zhang T J, Jia D Z, Liu X L, Kang Z X, Yan W J, Yang B T, Bao X Z, Sun S H, Zhang F F, Yu W H, Bai C L, Wei T, Yang T, Ma T Q, Wu X B, Liu J G, Du H, Zhang L, Yan Y, Wang D Y. Prevalence of pollen-induced allergic rhinitis with high pollen exposure in grasslands of Northern China. *Allergy*, 2018, 73(6): 1232-1243.
- [14] Oh J W. Pollen allergy in a changing planetary environment. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 2022, 14(2): 168-181.
- [15] Seth D, Bielory L. Allergenic pollen season variations in the past two decades under changing climate in the United States. *Immunology and Allergy Clinics of North America*, 2021, 41(1): 17-31.
- [16] 张小利, 丁建云, 崔建臣, 孙国强, 段永恒, 杨得草, 赵振霞, 潘洪吉. 豚草花粉监测与花粉过敏的研究进展. 植物检疫, 2020, 34(4): 47-52.
- [17] Kishikawa R, Saito A, Nanba H, Sahashi N, Higaki Y, Koto E, Shimoda T, Akiyama K, Iwanaga T. Monitoring Japanese allergenic pollen using durham's and burkard sampler for Asia pollen allergy network. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2013, 131(2): AB81.
- [18] Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, Del Duca S. Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment. *Environmental Research*, 2021, 197: 111109.
- [19] 高清泉, 高清泉, 李敬海, 沈芳, 纪诗璇, 管林. 廊坊地区春季花粉浓度变化特征及花粉过敏等级的初步研究. 农业灾害研究, 2022, 12(10): 16-18.
- [20] 欧阳志云, 嘉楠, 郑华, 孟雪松, 王效科. 北京城区花粉致敏植物种类、分布及物候特征. 应用生态学报, 2007, 18(9): 1953-1958.
- [21] 张嘉懿, 沈永明, 李军普, 娜仁, 崔小健, 曲利亚, 李会强, 司萍. 天津地区 2013—2018 年儿童过敏性鼻炎患病情况及吸入物致敏谱特征分析. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2023, 30(3): 169-172.
- [22] 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.

- [23] 郝建利,于东东,谢百灵,张婧,高露,张敏,何婵,冯彦. 太原市夏秋季气传花粉监测及其与变应性鼻炎就诊情况的研究. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2023, 37(6): 452-456.
- [24] 徐海侠,崔晓波,刘佳荣,李欣,刘佳宜,刘晓玲. 内蒙古呼和浩特城区气传致敏花粉流行情况调查. 山东大学耳鼻喉眼学报, 2020, 34(2): 106-109.
- [25] 解亚玲,海英,刘江涛,刘晓磊,李慧军. 哈尔滨地区 518 例变应性鼻炎患者的临床特点和变应原谱分析. 中华临床医师杂志: 电子版, 2012, 6(5): 1198-1201.
- [26] 王云梦,方宏艳,刘敦,王晶,王宗贵,杨景朴. 长春及周边地区秋季变应性鼻炎变应原分布特点及临床特征分析. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2021, 35(12): 1124-1129.
- [27] 朱晓明,魏庆宇,薛丹,王磊,叶晶,关卫平. 沈阳地区花粉过敏症患者情况分析. 第五届全国中西医结合变态反应学术会议论文集. 乌鲁木齐, 2011: 163-164.
- [28] 陈怡美. 基于花粉致敏控制的街道绿化优化研究——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.
- [29] 蒋素雪,李月丛,许清海,李育,梁剑. 兰州郊区空气孢粉组合及特殊天气的影响. 古地理学报, 2010, 12(5): 629-638.
- [30] 杨波,褚以德. 西宁地区花粉症患者致敏花粉和季节分析. 青海医药杂志, 2001, 31(2): 6-7.
- [31] 褚琦琦. 宁夏地区儿童常见气道过敏性疾病吸入性变应原谱分析[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2022.
- [32] 马婷婷,马晓霞,宁慧宇,索爽,刘甚红,王学艳. 新疆乌鲁木齐地区气传致敏花粉调查. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2023, 30(9): 570-573.
- [33] 杜文锦,张秋兴,张文超,王思勤. 郑州地区成人自报过敏性鼻炎患者吸入过敏原分析. 中华全科医学, 2022, 20(10): 1675-1677, 1804.
- [34] 李文静. 武汉市气传花粉与花粉过敏调查. 华中医杂志, 2007, 31(6): 493-494, 496.
- [35] 申黎黎. 长沙地区成人过敏性鼻炎伴 AIDS 患者变应原谱及相关因素研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2022.
- [36] 刘丽萍. 不同变应原哮喘患者临床特征分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [37] 张雨辰. 2015-2016 年南京地区空气花粉传播及其与气象要素关系研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [38] 盛亚玲,张虹亚. 325 例过敏性疾病患者血清过敏原检测结果分析. 中医药临床杂志, 2017, 29(2): 199-202.
- [39] 黄建花,王幼芳,沈春琳,吕森林. 上海地区气传花粉的监测. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2013(2): 56-62.
- [40] 钱燕静,王媛,李晓娟. 29902 例过敏性疾病患者血清过敏原特异性免疫球蛋白 E 的检测结果. 上海预防医学, 2021, 33(12): 1201-1205.
- [41] 谢水祥,刘建新,刘志刚,万文豪,陈玲. 南昌城区大气气传致敏花粉调查. 环境与健康杂志, 2004, 21(6): 381-383.
- [42] 周美钦. 3681 例过敏性皮肤病过敏原检测结果分析. 国际检验医学杂志, 2016, 37(13): 1850-1851.
- [43] 肖浩,张虹婷,贾巧茹,杨凤娟,孟娟. 四川省成都市城区气传花粉监测. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2020, 14(2): 99-104.
- [44] 宋庆均. 贵阳地区 318 例变应性鼻炎患者过敏原谱及相关危险因素分析[D]. 遵义: 遵义医学院, 2017.
- [45] 李爱林,余咏梅,徐学梅,邱吉蔚. 昆明地区致敏花粉的调查分析. 云南医药, 2017, 38(1): 71-74.
- [46] 洪苏玲,黄菊菊,白燕. 重庆地区气传致敏花粉调查. 临床耳鼻咽喉科杂志, 2001, 15(12): 558-560.
- [47] 尼玛顿珠,支张卓玛,边珍,益西措姆,扎西央宗,詹明君,巴桑央吉,秦绪珍. 拉萨市 735 例过敏原特异性 IgE 检测结果分析. 标记免疫分析与临床, 2023, 30(3): 409-415.
- [48] 肖小军,胡东生,刘志刚,龚苗,刘晓宇. 深圳市气传致敏花粉调查及其与气候条件相关性研究. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2015, 39(6): 580-583.
- [49] 张金谈,陈克,莫广友,陈祥焘. 广西南宁空气中孢粉及其致敏性研究. Journal of Integrative Plant Biology, 1984, 26(6): 567-573, 679.
- [50] 谢伟伟,孟光,刘硕,蔡琼香,龙绮,林秀联. 海口市花粉变应原与变应性鼻炎关系的研究. 中国病原生物学杂志, 2013, 8(5): 436-438, 441.
- [51] Zhang Y, Bielory L, Cai T, Mi Z Y, Georgopoulos P. Predicting onset and duration of airborne allergenic pollen season in the United States. Atmospheric Environment, 2015, 103: 297-306.
- [52] Zapata-Marin S, Schmidt A M, Weichenthal S, Katz D S W, Takaro T, Brook J, Lavigne E. Within city spatiotemporal variation of pollen concentration in the city of Toronto, Canada. Environmental Research, 2022, 206: 112566.
- [53] Adams-Groom B, Ambelas Skjøth C, Selby K, Pashley C, Satchwell J, Head K, Ramsay G. Regional calendars and seasonal statistics for the United Kingdom's main pollen allergens. Allergy, 2020, 75(6): 1492-1494.
- [54] Bousquet J, Onorato G L, Oliver G, Basagana X, Annesi-Maesano I, Arnavielhe S, Besancenot J P, Bosse I, Bousquet P J, André Charpin D, Caillaud D, Demoly P, Devillier P, Mathieu-Dupas E, Fontaine J F M, Just J, Anto J M, Fonseca J, Berger U, Thibaudon M. Google Trends and pollen concentrations in allergy and airway diseases in France. Allergy, 2019, 74(10): 1910-1919.
- [55] Werchan M, Werchan B, Bergmann K C. German pollen calendar 4.0: update of the regional pollen calendars 4.0 with measurement data for the period 2011-2016. Allergo Journal International, 2019, 28(5): 160-162.
- [56] Vicendese D, Erbas B. Impact of air pollution on symptom severity during the birch, grass and ragweed pollen period in Vienna, Austria: importance of O₃ in 2010-2018. Environmental Pollution, 2021, 271: 115790.
- [57] Aerts R, Bruffaerts N, Somers B, Demoury C, Plusquin M, Nawrot T S, Hendrickx M. Tree pollen allergy risks and changes across scenarios in

- urban green spaces in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 207: 104001.
- [58] Kubik-Komar A, Piotrowska-Weryszko K, Weryszko-Chmielewska E, Kuna-Broniowska I, Chłopek K, Myszkowska D, Puc M, Rapiejko P, Ziemianin M, Dąbrowska-Zapart K, Lipiec A. A study on the spatial and temporal variability in airborne *Betula* pollen concentration in five cities in Poland using multivariate analyses. *The Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1070-1078.
- [59] Eidet J R, Tashbayev B, Chen X, Ræder S, Badian R, Utheim, Fostad I G, Dartt D A, Utheim T P. Pollen count compared with severity of symptoms and signs of dry eye disease in Norway. *Acta Ophthalmologica*, 2016, 94: 256.
- [60] Nikolaidis C, Katotomichelakis M, Nena E, Makris M, Tsakas M, Michopoulos I, Constantinidis T C, Danielides V. Seasonal variations of allergenic pollen in a Mediterranean region-Alexandroupolis, north-east Greece. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine: AAEM*, 2015, 22(4): 685-689.
- [61] Frei T. Climate change in Switzerland; impact on hazel, birch, and grass pollen on the basis of half a century of pollen records (1969-2018). *Allergologie Select*, 2020, 4: 69-75.
- [62] Cariñanos P, Casares-Porcel M, Quesada-Rubio J M. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: a case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 134-144.
- [63] Hruska K, Staffolani L. The importance of cultivated land for spreading of allergenic plants in Italy. *Aerobiologia*, 2010, 26(4): 289-300.
- [64] 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.
- [65] Lee K S, Kim K, Choi Y J, Yang S, Kim C R, Moon J H, Kim K R, Lee Y S, Oh J W. Increased sensitization rates to tree pollens in allergic children and adolescents and a change in the pollen season in the metropolitan area of Seoul, Korea. *Pediatric Allergy and Immunology: Official Publication of the European Society of Pediatric Allergy and Immunology*, 2021, 32(5): 872-879.
- [66] Tosunoglu A, Saatcioglu G, Bekil S, Malyer H, Bicakci A. Atmospheric pollen spectrum in Stone City, Mardin; the northern border of Mesopotamia/SE-Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(11): 635.
- [67] Singh A B, Mathur C. Climate change and pollen allergy in India and South Asia. *Immunology and Allergy Clinics of North America*, 2021, 41(1): 33-52.
- [68] Steckling-Muschack N, Mertes H, Mittermeier I, Schutzmeier P, Becker J, Bergmann K C, Böse-O'Reilly S, Buters J, Damialis A, Heinrich J, Kabesch M, Nowak D, Walser-Reichenbach S, Weinberger A, Zamfir M, Herr C, Kutzora S, Heinze S. A systematic review of threshold values of pollen concentrations for symptoms of allergy. *Aerobiologia*, 2021, 37(3): 395-424.
- [69] Haberle S G, Bowman D M J S, Newnham R M, Johnston F H, Beggs P J, Buters J, Campbell B, Erbas B, Godwin I, Green B J, Huete A, Jaggard A K, Medek D, Murray F, Newbiggin E, Thibaudon M, Vicendese D, Williamson G J, Davies J M. The macroecology of airborne pollen in Australian and New Zealand urban areas. *PLoS One*, 2014, 9(5): e97925.
- [70] Vergamini S M, Valencia-Barrera R M, de Antoni Zoppas B C, Pérez Morales C, Fernández-González D. Pollen from tree and shrub taxa in the atmosphere of Caxias do Sul (Rio Grande do Sul, Brazil). *Aerobiologia*, 2006, 22(2): 141-148.
- [71] Siska P, Bryant V, Hung I K, Goovaerts P. Matching the spatial distribution of upland and lowland pollen grains with the temperature and humidity in the Columbia Basin. *ATHENS JOURNAL OF SCIENCES*, 2019, 6(1): 1-18.
- [72] Fueyo G, Barrionuevo L, Ramon G. Airborne pollen analysis during one year in the city of Trelew, Argentina. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2021, 147(2): AB85.
- [73] Berman D. Regional-specific pollen and fungal spore allergens in South Africa. *Current Allergy & Clinical Immunology*, 2013, 26(4): 196-201.
- [74] Bell B A, Fletcher W J. Modern surface pollen assemblages from the Middle and High Atlas, Morocco: insights into pollen representation and transport. *Grana*, 2016, 55(4): 286-301.
- [75] Ezikanyi N D, Sakwari G, Burt P. Weather variability in a decade and its current impact on airborne pollen and spores in Nsukka, Nigeria. *Advances in Environmental Biology*, 2019, 13(1): 29-38.
- [76] Anderegg W R L, Abatzoglou J T, Anderegg L D L, Bielory L, Kinney P L, Ziska L. Anthropogenic climate change is worsening North American pollen seasons. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(7): e2013284118.
- [77] 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.
- [78] 李全生, 江盛学, 李欣泽, 朱晓明, 魏庆宇. 中国气传致敏花粉的季节和地理播散规律. *解放军医学杂志*, 2017, 42(11): 951-955.
- [79] 马婷婷, 王洪田, 陈艳蕾, 庄严, 石海云, 于睿莉, 郭森颖, 尹佳, 王学艳. 北京地区门诊患者常见吸入过敏原致敏谱. *中华临床免疫和变态反应杂志*, 2021, 15(2): 136-143.
- [80] Beatriz S P, Andrés N, García Ana M, Pascual C, Moreno Diego A. Distribution of airborne pollen, fungi and bacteria at four altitudes using high-throughput DNA sequencing. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105306-.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] Hruska K. Assessment of urban allergophytes using an allergen index. *Aerobiologia*, 2003, 19(2): 107-111.
- [84] Pecero-Casimiro R, Fernández-Rodríguez S, Tormo-Molina R, Monroy-Colín A, Silva-Palacios I, Cortés-Pérez J P, Gonzalo-Garijo Á, Maya-

- Manzano J M. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging; a case study of plane trees. *The Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133576.
- [85] 林枫, 庞冲, 谷庆隆. 基于百度指数的北京地区儿童过敏性鼻炎关注度研究. *中国实用儿科杂志*, 2021, 36(2): 130-135.
- [86] 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.
- [87] 闫珂, 杨华, 李文芳, 李云. 城市绿地致敏指数的改进研究及应用. *北京林业大学学报*, 2020, 42(5): 96-105.
- [88] 汪永华. 花粉过敏与城市绿化植物设计. *中国城市林业*, 2005, 3(3): 53-55.
- [89] 宗桦, 姚鳗卿, 吴晓奕. 国内外城市树木孢粉致敏研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(3): 38-45.
- [90] Ellis A K, Gagnon R, Hammerby E, Shen J L, Gosain S. Sublingual immunotherapy tablet; a cost-minimizing alternative in the treatment of tree pollen-induced seasonal allergic rhinitis in Canada. *Allergy, Asthma, and Clinical Immunology: Official Journal of the Canadian Society of Allergy and Clinical Immunology*, 2021, 17(1): 66.
- [91] Sabariego S, García-Ventura C, Cariñanos P. Estimating the allergenic potential of urban green areas in the city of Madrid (Spain). *Aerobiologia*, 2021, 37(3): 561-573.
- [92] Aerts R, Stas M, Vanlessen N, Hendrickx M, Bruffaerts N, Hoebeke L, Dendoncker N, Dujardin S, Saenen N D, Van Nieuwenhuysse A, Aerts J M, Van Orshoven J, Nawrot T S, Somers B. Residential green space and seasonal distress in a cohort of tree pollen allergy patients. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2020, 223(1): 71-79.
- [93] 徐丽丽, 张磊. 南京居住区绿化中致敏植物应用状况研究. *林业科技开发*, 2011, 25(2): 75-78.
- [94] 唐雨倩, 吴晓奕, 宗桦. 成都青羊区背街小巷行道树孢粉致敏风险分析. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1615-1621.
- [95] 辛嘉楠, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 城市中的花粉致敏植物及其影响因素. *生态学报*, 2007, 27(9): 3820-3827.
- [96] 秦玲, 刘丽丽. 园林绿化设计对花粉过敏的影响分析. *城市建筑*, 2019, 16(18): 141-142, 161.
- [97] Qin X X, Li Y Y. Influence of environmental factors on spatial and temporal variability of allergenic *Artemisia* pollen in Beijing, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 313: 108690.
- [98] Bruffaerts N, De Smedt T, Delcloo A, Simons K, Hoebeke L, Verstraeten C, Van Nieuwenhuysse A, Packeu A, Hendrickx M. Comparative long-term trend analysis of daily weather conditions with daily pollen concentrations in Brussels, Belgium. *International Journal of Biometeorology*, 2018, 62(3): 483-491.
- [99] 陈立欣, 张芸, 孔昭宸. 新疆艾比湖小叶桦湿地空气花粉散布特征及其与气象因子的关系. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1935-1949.
- [100] Choi Y J, Lee K S, Oh J W. The impact of climate change on pollen season and allergic sensitization to pollens. *Immunology and Allergy Clinics of North America*, 2021, 41(1): 97-109.
- [101] Depciuch J, Kasprzyk I, Sadik O, Parlińska-Wojtan M. FTIR analysis of molecular composition changes in hazel pollen from unpolluted and urbanized areas. *Aerobiologia*, 2017, 33(1): 1-12.
- [102] Verscheure P, Honnay O, Speybroeck N, Daelemans R, Bruffaerts N, Devleeschauwer B, Ceulemans T, Van Gerven L, Aerts R, Schrijvers R. Impact of environmental nitrogen pollution on pollen allergy: a scoping review. *The Science of the Total Environment*, 2023, 893: 164801.
- [103] Lam H C Y, Jarvis D, Fuertes E. Interactive effects of allergens and air pollution on respiratory health: a systematic review. *The Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143924.
- [104] Chico-Fernández J, Ayuga-Téllez E. Analysis of pollen concentrations from various tree pollen types and their interrelation with different airborne pollutants in the Madrid region (Spain). *Sustainability*, 2022, 14(9): 5259.
- [105] Smith M L, MacLehose R F, Chandler J W, Berman J D. Thunderstorms, pollen, and severe asthma in a Midwestern, USA, urban environment, 2007-2018. *Epidemiology*, 2022, 33(5): 624-632.
- [106] D'Amato G, Maesano A I, Biagioni B, et al. New Developments in Climate Change, Air Pollution, Pollen Allergy, and Interaction with SARS-CoV-2. *Atmosphere*, 2023, 14(5): 848.
- [107] 向明珠, 张国明, 孙煦然, 栾庆祖, 贺峰, 袁定清. 花粉过敏的环境因素. *环境卫生学杂志*, 2022, 12(12): 903-908, 914.
- [108] 管林, 高清源, 李红星, 李敬海, 高清泉. 廊坊市城区气传花粉变化特征及其与气象要素的关系. *农技服务*, 2021, 38(6): 93-98.
- [109] 张玮, 王甜, 初晓艺, 于海静, 周楠, 肖兰, 唐丽. 气候变化对花粉诱发过敏性疾病的研究概述. *现代预防医学*, 2023, 50(1): 60-65, 115.
- [110] Strachan D P. Hay fever, hygiene, and household size. *BMJ*, 1989, 299(6710): 1259-1260.
- [111] 王宁, 张克军, 王斌全, 成娜莎, 刘太琴. 太原市秋季气传致敏花粉种类和含量与楼层关系分析. *山东大学学报: 医学版*, 2010, 48(1): 67-69.
- [112] Nagel G, Nieters A, Becker N, Linseisen J. The influence of the dietary intake of fatty acids and antioxidants on hay fever in adults. *Allergy*, 2003, 58(12): 1277-1284.
- [113] 侯晓静, 王成, 李伟, 陈玉娟, 郭二果. 城市居民区圆柏花粉浓度的时空变化及其影响因素. *城市环境与城市生态*, 2008, 21(4): 33-36.
- [114] 苏恺, 程甜甜, 田露芳, 郑青, 张逸伦, 林海韵, 王班, 吴谦, 冷蓓峥, 王莲芸. 二十四节气与气传致敏花粉及呼吸道过敏相关性研究. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2019, 37(5): 47-52.

- [115] Kim K R, Han M J, Oh J W. Forecast for pollen allergy: a review from field observation to modeling and services in Korea. *Immunology and Allergy Clinics of North America*, 2021, 41(1): 127-141.
- [116] 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.
- [117] 关凯, 王良录. 从花粉症看过敏性疾病的整体诊疗策略. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2019, 33(1): 13-19.
- [118] Shin J Y, Han M J, Cho C, Kim K R, Ha J C, Oh J W. Allergenic pollen calendar in Korea based on probability distribution models and up-to-date observations. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 2020, 12(2): 259-273.
- [119] Seo Y A, Kim K R, Cho C, Oh J W, Kim T H. Deep neural network-based concentration model for oak pollen allergy warning in South Korea. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 2020, 12(1): 149-163.
- [120] Dbouk T, Visez N, Ali S, Shahrour I, Drikakis D. Risk assessment of pollen allergy in urban environments. *Scientific Reports*, 2022, 12: 21076.
- [121] Bastl K, Bastl M, Bergmann K C, Berger M, Berger U. Translating the burden of pollen allergy into numbers using electronically generated symptom data from the patient's hayfever diary in Austria and Germany: 10-year observational study. *Journal of Medical Internet Research*, 2020, 22(2): e16767.
- [122] 修晓蕾, 吴思竹, 孙小康, 崔佳伟, 钱庆. 花粉症知识图谱与过敏预警分析系统的设计与实现. *中华医学图书情报杂志*, 2018, 27(8): 23-30.
- [123] 卞萌, 郭树毅, 王威, 欧阳昱晖, 黄颖菁, 费腾. 融合植被遥感数据的北京市次日花粉浓度预测. *地球信息科学学报*, 2021, 23(9): 1705-1713.
- [124] 刘宇通, 王汶. 结合百度指数和遥感数据的花粉过敏研究. *遥感信息*, 2021, 36(6): 113-119.
- [125] Cariñanos P, Casares-Porcel M. Urban green zones and related pollen allergy: a review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(3): 205-214.
- [126] 吴晓奕, 黄晓娇, 宗桦, 唐雨倩. 成都市人民公园树木花粉致敏风险研究. *中国城市林业*, 2023, 21(3): 17-23.
- [127] Ćwik A, Kasprzyk I, Wójcik T, Borycka K, Cariñanos P. Attractiveness of urban parks for visitors versus their potential allergenic hazard: a case study in rzeszów, Poland. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35: 221-229.
- [128] 曹歌. 致敏植物的信息可视化设计研究——以北方常见风媒花粉植物为例[D]. 长春: 吉林艺术学院, 2022.
- [129] Bergmann K C, Buters J, Karatzas K, Tasioulis T, Werchan B, Werchan M, Pfaar O. The development of birch pollen seasons over 30 years in Munich, Germany-An EAACI Task Force report. *Allergy*, 2020, 75(12): 3024-3026.
- [130] Brown J C. Pollen allergies and its treatments and remedies. *Journal of Allergy & Therapy*, 2021, 12(5): 1.
- [131] Grant-Jacob James A, Matthew P, Eason Robert W, Ben M. In-flight sensing of pollen grains via laser scattering and deep learning. *Engineering Research Express*, 2021, 3(2): 025021.
- [132] Yang X Y, Zhu W Q, Zhao C L. A prediction model for the outbreak date of spring pollen allergy in Beijing based on satellite-derived phenological characteristics of vegetation greenness. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5891.
- [133] 姚亚男, 李树华, 王玥, 金洋, 王羽. 中国花粉致敏树种分级研究. *中国园林*, 2023, 39(6): 114-119.
- [134] 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.
- [135] Zhang Y X, Steiner A L. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States. *Nature Communications*, 2022, 13: 1234.
- [136] Lambert K A, Lodge C, Lowe A J, Prendergast L A, Thomas P S, Bennett C M, Abramson M J, Dharmage S C, Erbas B. Pollen exposure at birth and adolescent lung function, and modification by residential greenness. *Allergy*, 2019, 74(10): 1977-1984.
- [137] Stas M, Aerts R, Hendrickx M, Dendoncker N, Dujardin S, Linard C, Nawrot T, van Nieuwenhuyse A, Aerts J, Van Orshoven J, Somers B. Residential green space types, allergy symptoms and mental health in a cohort of tree pollen allergy patients. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 210: 104070.
- [138] Ciani F, Dell'Olmo L, Foggi B, Mariotti Lippi M. The effect of urban green areas on pollen concentrations at ground level: a study in the city of Florence (Italy). *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 60: 127045.
- [139] Kasprzyk I, Ćwik A, Kluska K, Wójcik T, Cariñanos P. Allergenic pollen concentrations in the air of urban parks in relation to their vegetation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 46: 126486.
- [140] Schaefer J, Milling M, Schuller B W, Bauer B, Brunner J O, Traidl-Hoffmann C, Damialis A. Towards automatic airborne pollen monitoring: from commercial devices to operational by mitigating class-imbalance in a deep learning approach. *The Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148932.
- [141] Damialis A, Gilles S, Sofiev M, Sofieva V, Kolek F, Bayr D, Plaza M P, Leier-Wirtz V, Kaschuba S, Ziska L H, Bielory L, Makra L, Del Mar Trigo M, Group C I S, Traidl-Hoffmann C. Higher airborne pollen concentrations correlated with increased SARS-CoV-2 infection rates, as evidenced from 31 countries across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(12): e2019034118.