

孟龄, 杨磊, 王巧环, 等. 过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

Meng L, Yang L, Wang QH, et al. Distribution, hazard evaluation, and control measures of allergenic airborne pollen. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2845-2853

过敏性气传花粉的分布、危害评价及防治措施

孟龄* 杨磊 王巧环 王俊杰

(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)

摘要 过敏性气传花粉与人体接触后会引发鼻炎、哮喘等花粉症。目前已对气传花粉过敏性污染进行了大量的研究。本文梳理相关研究,总结了气传花粉的时空分布特征及其气象影响因素,以及气传花粉过敏性的危害,并对危害等级划分的评价指标进行了综述,从源头防控、途径监控和易敏人群预防等角度阐述了气传花粉过敏性污染防治措施的研究进展。针对目前研究工作的不足,提出绿化植物的种类和致敏潜力有待进一步研究与规范,花粉的采集与浓度监测有待进一步研究与标准化。本文将作为花粉过敏性疾病的防治研究和城市绿地规划的优化提供借鉴。

关键词 气传花粉; 花粉症; 危害; 分布; 防治措施

Distribution, hazard evaluation, and control measures of allergenic airborne pollen. MENG Ling*, YANG Lei, WANG Qiaohuan, WANG Junjie (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China).

Abstract: Allergenic airborne pollen can induce hay fever such as rhinitis and asthma. Many studies have been conducted on the allergenic pollution caused by airborne pollen. We synthesized available studies to summarize the temporal and spatial distributions of airborne pollen and influencing meteorological factors. We further summarized and discussed the hazards of airborne pollen sensitization on human health and evaluation indicators for classifying hazard levels. We described the research progress of prevention and control measures of airborne pollen induced pollution from the perspectives of source control, route monitoring, and prevention of susceptible population. Considering the limitations of current studies, we proposed some research directions on allergenic airborne pollen. The types of allergenic plants needed to be clearly identified and allergenic potential should be quantitatively identified. The methods of pollen collection and concentration monitoring needed to be improved and standardized. This review could provide a scientific guidance for the study on preventing and treating pollen allergies as well as optimizing urban green space planning.

Key words: airborne pollen; pollinosis; harm; distribution; control measure.

随着城市绿化率的提升,气传花粉空气污染日益严重,花粉症的发病率呈现不断上升的趋势,影响了全球10%~30%的人口^[1],我国花粉过敏人数比例1%~5%^[2]。花期中的植物会产生花粉,花粉粒直径15~30 μm,量大且质轻,易附着于气溶胶上随空气飘散传播,一般称为气传花粉。气传花粉中的致敏性蛋白成分被人体吸入后会出现流鼻涕、眼泪、皮肤瘙痒、哮喘等花粉过敏症状。关于花粉症的研究,1819年英国医生John Bostock发现,吸入体会引发呼吸系统疾病的致敏物质是一种花草植物的花粉^[3]。1873年Blackley首次在临床上证实了花粉

可致敏的现象^[4]。1974年美国Stanley提出致敏花粉会污染空气^[5]。1991年中国贵州科学院廖凤林通过量化气传花粉浓度与过敏发病率的关系明确了“花粉污染”的概念,即大气中一定浓度的致敏花粉引起人群中花粉过敏发病率超过0.05%的大气状况^[6]。

国内外学者一直致力于气传花粉的研究,国外的研究集中于植物花粉的分类特征和基于自动成像识别技术、激光光学技术的自动监测仪器的开发与应用等,国内偏向于研究植物花粉的区域性和季节性变化规律、气象因素及与花粉症发病率的相关性等。针对气传花粉的研究现状,2005年李倩等^[7]综述了致敏花粉污染的区域性和季节性特点、花粉采集方法、致敏花粉的类型、花粉致敏蛋白及一些预防

本文由国家重点研发计划项目(2022YFF1303103)资助。

2023-06-09 收稿,2023-08-14 接受。

* 通信作者 E-mail: lingmeng@cees.ac.cn

措施的研究;2008 刘艳等^[8]对各类植物的过敏原及致敏性与临床研究进行了综述;2009 年徐景先^[9]综述了空气花粉的变化规律和预测预报的研究进展;2021 年汤蕊等^[10]从医学角度综述了花粉症流行病学、临床特征、过敏原检测及花粉症治疗的中国历程;2020 年张小利等^[11]综述了豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)花粉形态特征和豚草花粉监测现状;2021 年赵德韵宇等^[12]综述了京津冀地区气传花粉种类、含量和浓度变化规律、气象因素及大气污染物协同作用;2018 年江伟明等^[13]综述了花粉的采集方式、时间和空间上的特征、气象因子的影响及城市化对花粉症的影响等;2022 年尹焯寅等^[14]对花粉监测数据在预防医学方面的应用、时间变化和气象因素、预测模型及监测技术等研究进展进行了综述。综上,前人的综述或时效性不足,或偏于医学治疗角度,或仅针对单一类型和单一区域的植物花粉,或因文章角度问题对监测仪器的原理及应用阐述较少。为此,本文采用文献研究法和统计分析法梳理了国内外学者的研究文献,从致命性气传花粉的分布、危害评价及防治措施进行综述,以期对花粉过敏性疾病的防治和城市绿地规划的优化提供借鉴。

1 气传花粉的时空分散规律与气象因素

1.1 气传花粉的时空分散规律

1.1.1 空间分布差异性 因气候、地理等生态因素和城市绿化人为因素的影响,各城市绿化栽种的植物种类和密度不同,气传花粉的种类和浓度在空间上呈现明显的差异。在江伟明等^[13]总结的 1986—2016 年 33 个城市空气花粉种类的基础上,对未涉及的城市和近 5 年更新的监测数据进行重新梳理,统计出截止 2020 年我国 39 个城市花粉致敏植物的优势种类。致敏花粉主要来源于松属(*Pinus*)、柏科(*Cupressaceae*)、杨属(*Populus*)、柳属(*Salix*)、榆属(*Ulmus*)、悬铃木属(*Platanus*)等木本植物,以及禾本科(*Poaceae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、葎草属(*Humulus*)、菊科(*Compositae*)、蒿属(*Artemisia*)等草本植物,尤其以松属、柏科、蒿属和禾本科为最主要。比如 2020 年北京北部地区柏科花粉含量占比高达 57.3%^[15],泉州 2019 年 3、4 月松属花粉含量占比达 49.3%^[16],承德 2020 年 3—10 月松属占比 30.2%、蒿属 7.8%^[17]。东北地区、华北地区和西北地区的城市^[18-24]在绿化过程中栽种的植物多样性不如华南地区、华东地区和西南地区的城市^[25-39],例如,悬铃木属(*Platanus*)、木麻黄属(*Casuarina*)、

桦木属(*Betula*)、构属(*Broussonetia*)和杉科(*Taxodiaceae*)等主要栽种于南方城市,各地区的草本植物种类未呈现明显的差异(表 1)。城市绿化进程中引入了人工栽培的外来物种(国内和国外),致使花粉种类发生了变化,比如,深圳本地种 101 种,占 54.3%,国内外来种 16 种,占 8.6%,国外外来种 69 种,占 37.1%,来自美洲、亚洲和大洋洲的花粉致敏植物种较多。城市化进程也伴随着城区范围的扩大,野生葎草属(*Humulus*)和豚草属(*Ambrosia*)渐渐减少,城市中相应的花粉含量也在逐年降低。在世界范围内,加拿大多伦多主要草本植物有艾蒿(*Artemisia argyi*)和豚草(*Ambrosia artemisiifolia*),主要木本植物有桦树(*Betula* spp.)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、白杨(*Populus tomentosa*)、柳树(*Salix babylonica*)、枫树(*Acer* spp.)、白橡树(*Quercus alba*)、红橡树(*Quercus rubra*)、山毛榉(*Fagus longipetiolata*)、榆树(*Ulmus pumila*)和白蜡树(*Fraxinus chinensis*)等^[40]。印度昌迪加尔 2018—2020 年的优势植物有桑树(*Morus alba*) (66.7%)、禾本科(6.6%)和大麻(*Cannabis sativa*) (6.7%)^[41];爱尔兰最主要致敏花粉类型之一是桦树(*Betula*)^[42];日本东京最主要的花粉致敏原是雪松(*Cedrus deodara*)、柏科、榉树(*Zelkova serrata*)和银杏(*Ginkgo biloba*)^[43];波兰卢布林、华沙、克拉科夫、索斯诺维茨和什切青等 5 个城市最主要的春季花粉过敏原为桦木^[44]。

1.1.2 时间分布规律

1) 季节性规律。因植物物候规律和生长区域的地域性、季节性气候,气传致敏性花粉的类别和浓度呈现明显的季节性规律。一年内花粉浓度呈现明显的双高峰期,即以木本植物为主的春季高峰期和以草本植物为主的夏秋季高峰期。我国大部分城区春季花粉的浓度远大于秋季花粉浓度,这与城市绿化进程中大量栽种乔木和灌木有关;而秋季飘散的草本类花粉致敏性更强^[45],这是因为秋季气候干燥、空气湿度降低,气传花粉不易沉降易传播^[46]。受气温的影响,南方地区的春季高峰期比北方地区开始的早,秋季高峰期比北方地区延迟且持续时间长。比如,东北和华北地区花粉飘散的高峰值分别出现在春季(3—5 月)和秋季(8—9 月);西南地区全年花粉含量较高的月份呈现 2 个高峰,为 1—5 月和 8—11 月;华东地区全年均能监测到飘散传播中的花粉,高峰出现在春季(3—6 月)和秋季(9—12 月)。世界范围内,加拿大多伦多的树木花粉在 5 月中旬达到高峰,持续至 7 月中旬时基本为零,草本

表 1 我国 39 个城市致敏花粉植物的优势种类
Table 1 Dominant species of pollen-allergic plants in 39 cities of China

地区 Region	城市 City	木本植物 Woody plant											草本植物 Herbaceous plant						文献 Reference
		松属 <i>Pinus</i>	柏科 Cupres- saceae	杨属 <i>Populus</i>	柳属 <i>Salix</i>	桑科 Moraceae	榆属 <i>Ulmus</i>	悬铃 木属 <i>Platanus</i>	桦木属 <i>Betula</i>	构属 <i>Brous- sonetia</i>	木麻 黄属 <i>Casuarina</i>	杉科 diaceae	蒿属 <i>Arte- misia</i>	禾本科 Poaceae	葎草属 <i>Humu- lus</i>	藜科 Chenopo- diaceae	菊科 Compo- sitae	豚草属 <i>Amb- rosia</i>	
东北地区 Northeast China	哈尔滨 Harbin	+		+	+		+						+	+	+			+	[18]
	长春 Changchun	+		+	+								+		+			+	[13]
	沈阳 Shenyang	+		+	+		+						+		+	+	+	+	[13]
华北地区 North China	北京 Beijing	+	+	+	+	+	+						+	+		+			[19-21]
	天津 Tianjin	+											+	+		+		+	[13]
	包头 Baotou		+	+	+		+						+	+	+	+			[13]
	承德 Chengde		+				+		+				+						[17]
	石家庄 Shijiazhuang												+	+	+	+			[13]
	太原 Taiyuan												+		+	+		+	[13]
	乌海 Wuhai			+									+	+		+		+	[22]
	呼和浩特 Hohhot								+				+	+					[23]
	西北地区 Northwest China	银川 Yinchuan			+									+		+			+
西昌 Xichang		+	+									+	+	+	+		+	+	[13]
西宁 Xining				+	+								+						[13]
西安 Xi'an			+	+			+		+				+		+				[24]
兰州 Lanzhou				+	+		+						+						[13]
华中地区 Central China	武汉 Wuhan	+	+		+			+		+			+					+	[25]
华东地区 East China	青岛 Qingdao	+		+				+	+				+	+	+			+	[26]
	潍坊 Weifang		+	+			+	+											[27]
	临沂 Linyi	+	+	+			+	+											[28]
	济南 Jinan	+		+	+		+						+		+				[13]
	上海 Shanghai		+			+		+	+	+		+	+	+	+		+	+	[29]
	湛江 Zhanjiang	+											+						[30]
	南京 Nanjing	+				+		+					+	+	+				[13]
	宁波 Ningbo	+	+			+													[31]
	台州 Taizhou	+	+			+		+					+	+		+	+		[32]
	福州 Fuzhou	+	+	+	+				+					+					[13]
华南地区 South China	泉州 Quanzhou	+												+					[16]
	南昌 Nanchang		+		+	+						+	+	+	+		+	+	[33]
	南宁 Nanning	+	+			+						+	+		+				[13]
	海口 Haikou	+						+				+		+					[13]
	佛山 Foshan	+										+							[34]
	广州 Guangzhou	+				+						+	+	+		+	+		[35]
	中山 Zhongshan	+								+	+		+						[36]
	深圳 Shenzhen	+											+		+	+			[37]
西南地区 Southwest China	成都 Chengdu		+										+		+				[38]
	昆明 Kunming	+																	[39]
	重庆 Chongqing	+	+	+	+								+						[13]
	拉萨 Lhasa		+										+	+		+			[13]

植物花粉在 6 月和 9 月初出现 2 个浓度峰值, 杂草花粉在 8 月中旬至 9 月初达到峰值^[40]。印度昌迪加尔^[41]空气中花粉浓度呈现 2 个峰值, 春季为 2—4 月, 秋季为 8—10 月。

2) 日变化规律。在正常日照条件下, 气传花粉昼间浓度一般高于夜间, 尤其在 12: 00—16: 00 时间段呈现一定的峰值。闫珂^[47]研究发现, 花粉呈“单峰型”的日分布规律, 早晚致敏花粉的含量有一

定差距, 花粉浓度最高值出现在 14: 00 或 16: 00 左右, 最低值出现在 6: 00 或 20: 00 左右。周江鸿等^[48]研究发现, 昆明湖南岸和北岸的春季花粉逐时浓度高峰出现时间分别是 0: 00 和 12: 00, 可能受植物种类、气象因素、附近建筑物等多种因素影响。曾世涌等^[16]在对泉州市春季气传花粉的调查中发现, 白天花粉平均浓度比夜晚的高, 这与白天气温高、湿度低、大气气流运动强有关。

1.2 气传花粉的浓度受气象因子的影响

气温、风速、湿度等气象因素主要从植物花粉的源头形成和在空气中的传播 2 个维度对气传花粉的浓度产生影响。1) 气温。大量研究表明,在适宜的温度范围内,气温与气传花粉致敏污染的程度呈一定的正相关。例如,刘宜纲^[49]在研究北京海淀区气传花粉的形成时发现,气温在 16~18℃时,有利于植物花囊开裂释放花粉;管林等^[50]的研究也证实了这一点,同时,高温有利于花粉保持干燥状态,易扩散传播,使空气中花粉浓度增加。2) 风速。在一定的风速范围内,风速与气传花粉致敏污染程度呈正相关,而过大的风速却容易降低花粉浓度。刘克利等^[51]对呼和浩特花粉的研究发现,一定的风速下花粉容易随风传播,但过大的风速会导致植物花瓣脱落,直接降低花粉的产量。3) 湿度。适当的空气湿度有利于气传花粉的传播。一定范围的湿度有助于植物生长,从源头提升花粉含量,但持续性的湿度增加,空气中的花粉会吸水沉降,降低气传花粉浓度。孟龄等^[52]的研究明确了湿度的范围,即空气湿度在 50%~60%,气传花粉含量随着湿度的增加而增加,当空气湿度在 20%~50%或超过 70%时,不利于气传花粉的传播。赵德鹂宇等^[12]认为,不同的季节,主导影响气传花粉致敏污染程度的气象因素不同,春季主要受气温影响,夏季主要受湿度影响,秋季主要受气温、风速和湿度影响。

2 气传花粉致敏性污染的危害、等级与评价指标

2.1 致敏性气传花粉的危害

致敏性气传花粉是一种室外吸入性致敏原,依靠风媒传播,花粉壁上的特殊蛋白可引起特异性个体产生 IgE,通过免疫球蛋白介导炎性物质释放,引发皮炎、眼睛发炎、鼻炎、气管炎^[53]、哮喘^[54]、慢性阻塞性肺病(COPD)^[55]等过敏性症状,还会导致消化系统(胃癌、胰腺癌等)疾病及神经系统(部分人群自杀率升高)疾病发病率的增加。这种气传花粉致敏性污染呈现季节性变化规律,在每年的春季和秋季高浓度花粉被反复吸入易敏体质内,致使各种花粉致敏引起的呼吸道疾病的发病率日渐上升,已成为全球重要的慢性疾病之一^[56],严重威胁公共健康。花粉的浓度与过敏性疾病的发病率存在较强的相关性。王玥^[53]发现,太原周边地区蒿属花粉的含量与耳鼻喉科的确诊人数呈正相关。邓卓怡^[45]研究发现,呼和浩特城区花粉浓度与过敏鼻炎患者的就诊量呈正相关。

2.2 气传花粉致敏性污染的等级划分与评价指标

评估气传花粉致敏性污染的危害程度对花粉症的防治具有重要意义。受植物的种类、种植密度、空间距离、植物花粉自身的致敏特性、在空气中的传播能力、患者个人的免疫差异等多个维度的影响,气传花粉致敏性的危害等级难以采用统一的评价指标划分。通过梳理文献,以评估城市绿地规划阶段各植物品种的致敏潜力、现阶段城市绿地存量致敏植物的致敏潜力及花粉种类和浓度的角度,归纳了 3 个致敏花粉危害等级的评价指标,分别为城市绿地致敏指数评价、区域花粉暴露评价、花粉的种类和浓度评价。

2.2.1 城市绿地致敏指数评价 闫珂^[47]采用城市绿地空间的散度值(I_{UCZA})基于城市绿化角度引出了城市绿地致敏指数的概念,将植物散发致敏花粉的程度、致敏花粉的传播方式、花期持续时间等生物学特性和植物密度、高度等空间特性赋予不同的权重构建了数学模型,反映每种植物的致敏潜力。 I_{UCZA} 一般取值范围为 0~1,以 0.3 作为划分植物花粉是否足以引发敏感人群过敏反应的临界值,指导判断绿地主要的致敏植物,从源头优化城市绿地设计和规划的不足,给予城市绿化设计以参考^[57]。

$$I_{UCZA} = \frac{1}{378S_i} \sum_{i=1}^k n_i \times ap_i \times pe_i \times ppp_i \times S_i \times H_i$$

式中: k 为物种类型; n_i 为第*i*个物种的数量; ap_i 为第*i*个物种的致敏严重程度; pe_i 为第*i*个物种为过敏源的传播方式; ppp_i 为第*i*个物种的授粉季节时长; S_i 为第*i*个物种的占地面积; H_i 为第*i*个物种的高度; S_i 为调查绿地的总面积。

2.2.2 区域花粉暴露评价 利用城市绿化中的存量致敏植物的空间散布和植被密度表征区域致敏花粉的暴露情况,有助于指导各区域对致敏花粉的预防和优化城市绿化空间布局及植被种类。叶彩华等^[58]利用欧洲哨兵 2A 号卫星对北京市域范围内松柏的空间散布和植被密度进行提取分析,发现松柏花粉浓度由植物半径 6 km 范围内的松柏植被密度决定。Picornell 等^[59]在采用土地利用指数来评估空气中花粉浓度时,认为植物半径 5 km 范围内的植物土地利用指数对花粉浓度的影响最大,也证实了相近的观点。因此,叶彩华等^[58]将像元 6 km 范围内的植被密度分别按 0.005、0.01、0.02、0.04、0.06、0.10 等分界值划分为极低、低、较低、一般、较高、高、极高等 7 个等级。

2.2.3 花粉种类和浓度评价 花粉种类和浓度是评

价致敏花粉污染等级最常用的指标。不同种类花粉的抗原致敏性强弱不同,同类型的花粉浓度越高,引起人体过敏症状的程度越高,同浓度的花粉抗原致敏性越强,致敏性污染程度越高,花粉浓度与花粉症的发病趋势呈正相关性^[60]。花粉浓度的等级划分见表 2,因秋季草本植物的抗原致敏性和花期时长均比春季木本植物高,将木本和草本植物花粉以 2 种评价标准呈现。利用 Hirst 型孢子捕捉仪作为花粉采集装置,花粉浓度计算公式如下^[62]:

$$N = 46.67 \times A$$

式中: N 为空气中花粉的总浓度; A 为单位面积内的花粉个数 ($\text{ind} \cdot \text{mm}^{-2}$)。

目前花粉预报中,花粉种类和浓度的监测是一种综合性评价指标,种类为某一区域的综合优势致敏植物类别,比如典型的蒿属、禾本科、松科和柏科等,浓度为某一区域的预测总浓度,无法体现地域的差异和时间的动态变化。

3 气传花粉致敏性污染防治措施

3.1 源头防治—城市绿化植物种类优选及空间布局优化

3.1.1 城市绿化植物种类优选 致敏人群主要聚集地为城区,城市绿化人工选栽的植物是城市气传花粉的源头,在绿化规划阶段借助 I_{UGZA} 评估每种植物的致敏潜力,将危害等级控制在低或较低,是一种在规划前期从源头防治植物致敏原的重要手段。龚惠莉等^[63]建议采用城市绿地致敏指数评估各类绿植的可致敏污染程度,减少致敏植物在城市绿化中的利用率,选择致敏性弱的绿植种类。闫珂^[47]利用改进的城市绿地致敏指数反映距离绿地空间不同位置的致敏潜力及对周边环境的致敏影响,用于量化绿色空间不同区域的气传花粉的致敏潜力。Aerts 等^[64]利用 I_{UGZA} 分析不同的树种组合、过敏潜力和花粉季节持续时间变化引起 AR(变应性鼻炎)的变

化,发现过敏潜力增加的情况下,AR 增加 11%~27%,在花粉季节持续时间延长的情况下,AR 增加 44%。预防性砍伐桦树 (*Betula*)、榛树 (*Corylus heterophylla*) 和桤木 (*Alnus cremastogyne*) 等主要致敏植物可使 AR 降低 13%。

3.1.2 城市绿化植物空间布局优化 城市绿化植物空间布局存在存量和增量 2 个维度。对于增量绿化空间,尽可能在设计阶段,根据空间的位置、功能、地形等合理设计绿化植物的品种、种植密度、空间布局等,降低城市绿化致敏植物的影响程度。欧阳志云等^[65]建议,从致敏植物栽植的相对位置入手,选择主风向的下风口处和在人群活动较少或相隔较远的绿地空间。于淼等^[66]采用 CART 决策树模型分析花粉浓度与植被中乔木和灌木的占比、高度、冠幅、三维绿量、盖度等植被空间结构因子的关系,探索其对花粉浓度的影响,发现乔木盖度是影响不同植被空间花粉浓度的主要控制指标,乔木盖度在 0.698~0.777 时花粉浓度最小,并提出上层高大、中下层低矮的最佳植被空间结构。Fernández-Rodríguez 等^[67]利用 BIM 技术对建筑物及绿化的空间布局参数建模,并纳入气候参数对花粉暴露的影响,在设计阶段就考虑新建建筑物绿植的花粉暴露风险,创建“无过敏”建筑。对于存量绿化空间,需借助卫星遥感技术提取各类致敏植物的空间散布和植物密度,评估其区域花粉暴露的危害等级,采取有计划的砍伐或修剪现有优势致敏植物或优化现有绿化植物的空间布局等方式。唐文韬^[2]建议,对致敏植物集中、空气流动性较差、致敏植物无法替代的园林布局和空间进行优化,减少近地空间的气传花粉浓度,降低与人群接触的机会,降低致敏风险。汪永华^[68]建议,适当地控制城市绿化设计植物的栽培密度,绿化管理中定期修剪致敏植物以减少其数量。

3.2 途径监控—气传花粉的采集及种类和浓度的监测

城市绿化进程中存在大量的致敏性植物,难以实现致敏性气传花粉的源头防治。通过监测一定区域范围内气传花粉的种类和浓度等级,从传播途径预防和减少气传花粉与易敏人群接触也是防治花粉病的重要手段。花粉种类和浓度的监测步骤一般为花粉采集→花粉种类鉴别和计量→各类花粉的浓度计算。

3.2.1 花粉的采集方法 致敏花粉的采集方法主要有重力沉降法和容积法。重力沉降法是指气传花粉在重力的作用下沉降在具有粘黏作用的载玻片上的花粉采集方法,代表性的采集器有 Blackely 花粉收

表 2 致敏花粉种类及浓度等级划分标准^[61]

Table 2 Classification criteria for species and concentration of allergenic pollen^[61]

等级 Grade	木本植物花粉 Arboreal pollen ($\text{ind} \cdot 1000 \text{mm}^{-2}$)	草本植物花粉 Herbaceous pollen ($\text{ind} \cdot 1000 \text{mm}^{-2}$)
低 Very low	≤100	≤50
较低 Low	101~250	51~100
中等 Intermediate	251~400	101~150
较高 High	401~800	151~300
高 Very high	>800	>300

集器(1873年)、美国 Durham 花粉采集器(1943年)、叶氏花粉收集器(1971年)及小型轻便移动式取样器等,采集方法简单,但这类方法采集时受风力影响较大且易沉积非花粉物质,给后续的花粉准确鉴别和计量提供了难度。目前,以 Durham 花粉采集器和叶氏花粉采集器应用最广。容积法是指利用花粉采集器的通风系统将一定容积气流中的气传花粉吸附于载玻片上的采集方法,代表性的采样器有 Hirst 花粉采集器、Cour 花粉采集器、Burkard 新型的体积孢粉收集器,具有采样周期长、工作量小、可克服风力和地面非花粉物质沉降对花粉采集的影响等优点^[13],应用广泛,其中 Hirst 花粉收集器为“金标准”^[69]。

除此之外, Yang 等^[70]报道了一种基于静电富集原理采集气传花粉的采集器,通过静电吸附实现对空气样本中花粉粒的连续捕获和富集,比传统的重力沉降法和容积法显著缩短了采样时间,但因缺乏标准样品进行花粉定量系统的标定,其应用推广受到限制。

3.2.2 花粉种类鉴别与计量方法 花粉种类鉴别和计量是花粉浓度监测的最关键环节。传统的花粉种类鉴别与计量一般采用镜检图谱结合人工鉴别计数法,是一种劳动密集型、对研究人员资质要求高的方法^[71],花粉的研究数据难以实时记录和更新,数据的时效性差,难以获取长序列的花粉时空动态变化规律,使得生态应用和过敏管理几乎与日常实践脱

节^[69]。为了克服气传花粉传统监测方法的数据滞后性及不连续性,研发了新型的自动花粉监测仪器。目前,已经实现商用的新型自动花粉监测仪器主要有德国 BAA500 型、日本 KH-3000 型、Poleno Jupiter 或 Neptune 型、Automated Pollen Sense(APS 型)及瑞士 Rapid-E 型^[1]等 5 种型号(表 3)。

全自动花粉监测仪器的花粉种类鉴别和计量是由硬件和算法共同实现的,硬件主要基于机器视觉的自动成像及识别技术和激光光学技术^[72]研发而成,算法主要包含机器学习和卷积神经网络等深度学习学习方法。Li 等^[73]为了探索对荨麻科(Urticaceae)花粉粒分类性能最佳的自动识别模型,采用了 2 种方法(机器学习和深度学习),层次分类模型以 94.5% 的准确率成为机器学习最优方法,ResNet50 模型以 99.4% (± 0.002) 的准确度成为 6 种成熟的深度卷积神经网络中执行分类任务最佳的算法。机器学习方法因太过于依赖从图像数据集中提取的特征质量,不如深度学习方法。关于花粉的识别特征, Chen 等^[74]研究了基于草、桦树、艾蒿等植物花粉的孔/柱头结构特征的花粉自动识别系统,识别的正确率达 97.2%; Scharring 等^[75]研究了一种基于微观样品上花粉粒位置和方向独特性的灰度不变量,从透射光的灰度图像和荧光显微镜图像中提取花粉特征的花粉自动识别系统,精度达 84%; Ronneberger 等^[76]报道了一种从花粉群体集中的三维体积数据库中提取花粉特征的花粉识别新技术,这种特征在

表 3 自动花粉监测仪器的原理、性能及价格

Table 3 Principle, performance, and price of automatic pollen monitoring instruments

仪器型号 Instrument type	原理 Principle	数据可靠性 Data availability (%)	识别范围 Identification range	价格 Cost
BAA500 型	采用容积法采集花粉,花粉颗粒沉降在样品载体的凝胶上,经加热液化后移至数码显微镜下分析、扫描和成像,采用分割图像的算法(原始分类算法和卷积神经网络)识别花粉的种类并测定浓度	99.1	花粉类群、链格孢属孢子	高
KH-3000 型	空气以 $4.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率流入光学系统,780 nm 半导体激光器的散射光击中花粉颗粒,测量前向和侧向散射脉冲信号,并记录峰值强度,根据花粉颗粒形状和表面粗糙度进行种类鉴别和计量	93.2	部分花粉类群	低
Poleno Jupiter 或 Neptune 型	空气以 $40 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒定气流速率进入仪器,检测到颗粒时拍摄 $0.595 \mu\text{m}$ 分辨率的全息图像。然后以 280、365 和 405 nm 的 LED 光源进行荧光照射,依次激发颗粒。在 333~694 nm 范围的 5 个波段进行荧光光谱和寿命测量,然后采用 3 种分类算法分别过滤非生物颗粒和其他无效颗粒	100	花粉类群、链格孢属孢子	高
APS 型	空气以 $13.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度通过进气孔,胶带以 $68 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度在进气孔下方移动,花粉颗粒撞击涂有粘合剂的胶带,350 倍放大倍率的相机每 80 s 拍摄一次图像,图像被发送到云端,采用基于 CNN 架构的 APS VT60 算法分析图像中花粉的种类和含量	99.7	花粉类群	低
Rapid-E 型	以 $2.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速对空气采样,采用 405 nm 激光产生散射信号,24 个与激光束呈 $45^\circ \sim 135^\circ$ 的探测器测量形成散射图像;337 nm 紫外激光产生的荧光,被 350~800 nm 的 32 个波段测量,以 500 ns 的间隔连续 8 次采集,以 2 ns 的分辨率将荧光寿命记录在 4 个光谱带中。基于散射图像、荧光光谱和荧光寿命的数据,应用了多模态卷积神经网络算法进行种类鉴别和计量	100	花粉类群(可过滤掉光学直径小于 $8 \mu\text{m}$ 的颗粒)	高

局部任意变形和非线性灰度值变化的情况下均保持不变,通过对 26 个物种的花粉进行识别试验,识别精度达 99.2%。

3.3 易敏人群预防-花粉预报机制及系统

建立对花粉种类和浓度的监测结果进行播报的机制和系统对有效降低花粉症易敏人群的发病率具有重要意义。目前,很多城市气象局已建立气传花粉监测及播报系统,比如,北京市气象局开发了花粉播报板块,预报每天城区的花粉种类、花粉浓度和风险等级,为花粉症患者提供及时的预警。刘晓佳^[77]构建了“呼和浩特花粉浓度播报”微信小程序,市民可查询到呼和浩特市的空气花粉浓度现状,提前预警,为市民的出行和花粉致敏性防护提供借鉴。卞萌等^[78]采用融合了植被遥感技术的非线性自回归神经网络模型,以气象因子和叶面积指数(LAI)时间序列预测次日花粉浓度,精确度为 71%。修晓蕾等^[79]设计了一套集花粉信息检索、知识、图谱、地图和预警等功能于一体的分析系统。Medek 等^[80]报道了一种 AirRater 智能手机应用程序,可以实现空气中花粉计数与呼吸道症状之间的非线性关联。

4 研究展望

4.1 绿化植物的种类、致敏潜力有待进一步研究与规范

受限于相同科或属的植物具有相似的物理特征(形状、孔/柱头结构等),目前对于各城市优势致敏植物的种类研究结果仅限于科、属级别,比如柏科、松属,未能聚焦至具体的绿化植物品种,不足以细化指导城市绿化设计与规划人员对植物品种的选择。未来可以进一步探索相同科或属不同植物的物理特征,同时,尝试探索其生物特性的差异(比如 eDNA 元条形码^[81])来提升鉴别能力。

将城市绿化致敏指数和基于卫星遥感技术的区域花粉暴露指标引入植物的致敏潜力评估体系,以评估城市未来的绿化规划,并提取城市绿化植物的致敏风险现状,需进一步研究其应用成熟度,大多满足要求的卫星并未免费开放,卫星遥感技术的广泛应用仍存在困难。未来可在城市绿化规划的规范体系中引入“无敏化”的概念,加强现有植物花粉抗原致敏性强弱的研究,建立强致敏植物种类名录,将其纳入城市绿化规划与设计评价体系和规范中,并进一步研究致敏植物的种植密度范围、与人群的相对距离等。同时,应逐步规范城市绿化致敏指数的应用模型,在设计初期即对植被的空间布局构建模型,

评估景观设计方案的致敏潜力,选择低花粉浓度的空间布局方案。

4.2 花粉的采集和浓度监测有待进一步研究与标准化

国内关于花粉的时空分布规律的研究,主要聚焦于某一城市或区域的某几个月气传花粉的种类和含量,现有的监测体系以手动花粉采集与监测为主,缺乏长序列的实时动态变化研究。国外在 2006 年就报道了全自动花粉监测仪器,为低成本、自动化、可训练的光学显微镜图像花粉自动识别系统,成本 6.45 万元以下^[82]。我国缺乏相关研究,未来可加大对低成本的全自动花粉监测仪的研发力度,有助于构建一套系统的、标准的^[83]花粉种类和浓度监测网^[84]与手机 APP 关联,给群众提供实时查询过敏原的机会。

目前,对于花粉采集器的种类选择、采集的高度和采集点布置密度均缺乏研究。我国采用的采集器标准不统一,国外普遍采用 Hirst 采集器,在我国重力沉降法和容积法均有使用,应尽快统一标准。国内仅肖小军等^[85]采用 Durham 重力采样法研究了不同高度气传致敏花粉的浓度。有研究认为,植物半径 5 km 范围内的植物土地利用指数对花粉浓度的影响最大,可针对花粉采集点的高度和布设密度进行深入研究,并建立统一的标准^[59]。

参考文献

- [1] Maya-Manzano JM, Tummon F, Abt R, et al. Towards European automatic bioaerosol monitoring: Comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic Hirst-type traps. *Science of the Total Environment*, 2023, **866**: 161220
- [2] 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. 硕士学位论文. 南京: 南京林业大学, 2020
- [3] 叶世泰, 张金谈, 乔秉善, 等. 中国气传和致敏花粉. 北京: 科学出版社, 1988
- [4] Blackley CH. Experimental researches on the nature and causes of *Catarrhus aestivus*. *The American Journal of the Medical Sciences*, 1874, **133**: 181-185
- [5] Stanley RG, Lenokens HF. Pollen: Biology Chemistry Management. New York: Springer-Verlag, 1974
- [6] 廖凤林. 城市园林绿化中的花粉污染. 城市环境与城市生态, 1992, **4**(2): 21-25
- [7] 李倩, 靳颖, 华振玲, 等. 空气致敏花粉污染研究进展. 生态学报, 2005, **25**(2): 334-338
- [8] 刘艳, 杨浩然, 谢淑琼, 等. 气传花粉过敏原的调查研究进展. 昆明医学院学报, 2008(2): 125-128
- [9] 徐景先. 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
- [10] 汤蕊, 王良录, 尹佳, 等. 花粉症的中国历程. 中国科学, 2021, **51**(8): 901-907

- [11] 张小利,丁建云,崔建臣,等. 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
- [12] 赵德鹤宇,叶彩华,王宇飞,等. 京津冀地区气传花粉数据分析. 植物学报, 2021, **56**(6): 751-760
- [13] 江伟明,潘睿聪,罗传秀,等. 城市空气花粉的研究进展. 生态科学, 2018, **37**(6): 199-208
- [14] 尹焰寅,刘燕,党冰,等. 气传花粉监测数据研究进展. 科技导报, 2022, **40**(15): 49-63
- [15] 孙爱芝,张海红,李雪银,等. 北京市北部空气花粉类型及浓度变化特征研究. 地理科学, 2023, **43**(4): 737-744
- [16] 曾世涌,张晓霞,许险艳,等. 泉州市洛江区城区春季气传花粉调查分析. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2020, **27**(4): 192-195
- [17] 郑家华,李健,李清华,等. 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**(2): 301-304
- [18] 欧阳昱晖,李颖,安羽三,等. 中国北方夏秋季致敏花粉种属和浓度分析. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2020, **27**(4): 184-187
- [19] 程波,张建丽,焦子奇,等. 2011—2020年昌平城区气传花粉特征及其与气象条件的关系. 智慧农业导刊, 2021, **1**(20): 16-18
- [20] 李翔宇,吴娟,徐柳溪,等. 北京市密云区2015—2019年空气花粉浓度特征分析. 南方农业, 2022, **16**(9): 150-152
- [21] Yu XZ, Zhao BS, Li X. Effects of pollen concentration on allergic rhinitis in children: A retrospective study from Beijing, a Chinese megacity. *Environmental Research*, 2023, **229**: 115903
- [22] 班慧,银福,王东平,等. 乌海市气传花粉调查. 中国公共卫生管理临床肺科杂志, 2018, **34**(3): 410-412
- [23] 徐海侠,崔晓波,刘佳荣,等. 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
- [24] 吴媛媛,孙秀珍,刘昀,等. 西安市城区花粉调查研究. 临床肺科杂志, 2018, **23**(4): 701-703
- [25] 申雯竹,刘晓明,陈桂兰,等. 武汉市中心城区气传花粉的近期调查研究. 湖北中医学院学报, 2005, **7**(3): 54-55
- [26] 刘杰,鹿道温,郭艳丽,等. 2012青岛地区气传花粉及其致敏性调查. 中国中西医结合耳鼻喉科杂志, 2012, **20**(6): 471-477
- [27] 肖梅,张续德,高星星,等. 2015年潍坊市春季气传花粉调查分析. 中国临床医生杂志, 2016, **44**(6): 43-45
- [28] 孙立英,孙鹏,陶蓉,等. 临沂市春季气传花粉调查分析. 科技导报, 2022, **40**(15): 49-63
- [29] 孙立英. 上海中心城区气传花粉调查. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2012, **6**(3): 186-190
- [30] 宋军霞,陈碧珊. 湛江市中心区气传花粉调查. 环境与健康杂志, 2018, **35**(6): 539-542
- [31] 陈明,李丽娟,潘红梅,等. 宁波市气传花粉研究. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2014, **8**(3): 195-199
- [32] 蒋亚萍,赵肖丽,阮荣华,等. 台州市黄岩区气传花粉调查. 医学前沿, 2020, **10**(2): 222-224
- [33] 谢水祥,李良东,刘建新,等. 南昌市中心气传花粉调查. 赣南医学院学报, 2003, **23**(1): 9-12
- [34] 王涛,刘林菁,黄澜,等. 广东省佛山地区春季空气花粉种类调查. 热带医学杂志, 2018, **18**(6): 819-821
- [35] 赖乃揆,翟月明,贺紫兰,等. 广州市部分地区空气中花粉及其致敏性的初步调查. 广州医学院学报, 1982(3): 1-11
- [36] 汪叶红,肖晓雄,詹志鹏,等. 中山市气传花粉调查. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2012, **6**(4): 261-265
- [37] 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. 生态学报, 2021, **41**(22): 8746-8757
- [38] 肖浩,张虹婷,贾巧茹,等. 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
- [39] 赵筱扬,余咏梅,邱吉蔚,等. 昆明市区气传花粉监测. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2015, **9**(2): 81-84
- [40] Zapata-Marin S, Schmidt AM, Weichenthal S, et al. Within city spatiotemporal variation of pollen concentration in the city of Toronto, Canada. *Environmental Research*, 2022, **206**: 112566
- [41] Ravindra K, Goyal A, Kumar S, et al. Pollen calendar to depict seasonal periodicities of airborne pollen species in a city situated in Indo-Gangetic plain, India. *Atmospheric Environment*, 2021, **262**: 118649
- [42] Maya-Manzano JM, Skjøth CA, Smith M, et al. Spatial and temporal variations in the distribution of birch trees and airborne *Betula* pollen in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, **298-299**: 108298
- [43] Uetake J, Tobo Y, Kobayashi S, et al. Visualization of the seasonal shift of a variety of airborne pollens in western Tokyo. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**: 147623
- [44] Kubik-Komar A, Piotrowska-Weryszko K, Weryszko-Chmielewska E, et al. A study on the spatial and temporal variability in airborne *Betula* pollen concentration in five cities in Poland using multivariate analyses. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1070-1078
- [45] 邓卓怡. 呼和浩特城区花粉及气象因素与变应性鼻炎就诊情况的相关性研究. 硕士论文. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2021
- [46] 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. 中国城市林业, 2022, **20**(6): 159-167
- [47] 闫珂. 北京4种常见树种花粉飘散规律及致敏潜力分析. 硕士论文. 北京: 北京林业大学, 2020
- [48] 周江鸿,夏菲,李洁,等. 北京颐和园春季树木花粉飞散规律研究. 安徽农业科学, 2020, **48**(5): 117-121
- [49] 刘宜纲. 2012—2016年海淀区气传花粉物候特征及其与气象要素的关系. 应用生态学报, 2019, **30**(10): 3563-3571
- [50] 管林,高清源,李红星,等. 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
- [51] 刘克利,孙红斌,王旭东,等. 呼和浩特市花粉浓度与气象因子关系的分析. 内蒙古气象, 2009, **13**(6): 22-24
- [52] 孟龄,王效科,欧阳志云,等. 北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系. 环境科学, 2016, **37**(2): 452-458

- [53] 王玥. 太原及周边地区蒿属花粉致敏的特征分析. 硕士学位论文. 太原: 山西医科大学, 2022
- [54] Al-Nesf MA, Gharbi D, Mobayed HM, *et al.* The association between airborne pollen monitoring and sensitization in the hot desert climate. *Clinical and Translational Allergy*, 2020, **10**: 35
- [55] Matsuda S, Kawashima S. Relationship between laser light scattering and physical properties of airborne pollen. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **124**: 122–132
- [56] 马婷婷, 王朝霞, 贺宁, 等. 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): 41–50
- [57] 程晟, 余咏梅, 阮标, 等. 中国主要城市气传花粉植物种类与分布. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2015, **9** (2): 136–141
- [58] 叶彩华, 刘勇洪, 崔文杰, 等. 基于哨兵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): 157–165
- [59] Picornell A, Ruiz-Mata R, Rojo J, *et al.* Applying wind patterns and land use to estimate the concentrations of airborne pollen of herbaceous taxa in a statistical framework. *Urban Climate*, 2023, **49**: 101496
- [60] 白玉荣, 段丽瑶, 吴振玲, 等. 花粉浓度等级划分探讨. 气象, 2007, **33** (9): 112–117
- [61] 中国气象局, 中国国家标准化管理委员会. 花粉过敏气象指数: QX/T 324—2016. 北京: 气象出版社, 2016
- [62] 周江鸿, 夏菲, 车少臣, 等. 花粉浓度等级划分探讨. 中国城市林业, 2022, **20** (4): 1–6
- [63] 龚惠莉, 翟俊. 生物多样性视角下的植物花粉致敏问题溯源及景观设计对策研究. 中国园林, 2022, **38** (8): 111–116
- [64] Aerts B, Bruffaerts N, Somers B, *et al.* Tree pollen allergy risks and changes across scenarios in urban green spaces in Brussels, Belgium. *Landscape and Urban Planning*, 2021, **207**: 104001
- [65] 欧阳志云, 嘉楠, 郑华, 等. 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, **16** (9): 1953–1958
- [66] 于淼, 陈颖, 丁康, 等. 基于 CART 决策树模型的北京市春季气传花粉浓度与植被空间结构关系研究. 北京林业大学学报, 2023, **45** (1): 122–131
- [67] Fernández-Rodríguez S, Cortés-Pérez JP, Muriel PP, *et al.* Environmental impact assessment of Pinaceae airborne pollen and green infrastructure using BIM. *Automation in Construction*, 2018, **96**: 494–507
- [68] 汪永华. 花粉过敏与城市绿化植物设计. 中国城市林业, 2005, **16** (3): 53–55
- [69] Plaza MP, Kolek F, Leier-Wirtz V, *et al.* Detecting airborne pollen using an automatic, real-time monitoring system: Evidence from two sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**: 2471–2487
- [70] Yang JJ, Klinkenberg C, Pan JZ, *et al.* An integrated system for automated measurement of airborne pollen based on electrostatic enrichment and image analysis with machine vision. *Talanta*, 2022, **237**: 122908
- [71] Matavulj P, Cristofori A, Cristofolini F, *et al.* Integration of reference data from different Rapid-E devices supports automatic pollen detection in more locations. *Science of the Total Environment*, 2022, **851**: 158234
- [72] Matsuda S, Kawashima S. Relationship between laser light scattering and physical properties of airborne pollen. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **124**: 122–132
- [73] Li C, Polling M, Cao L, *et al.* Analysis of automatic image classification methods for Urticaceae pollen classification. *Neurocomputing*, 2023, **522**: 181–193
- [74] Chen C, Hendriks EA, Duin RPW, *et al.* Feasibility study on automated recognition of allergenic pollen: Grass, birch and mugwort. *Aerobiologia*, 2006, **22**: 275–284
- [75] Scharring S, Schultz E, Heimann U, *et al.* Automatic pollen recognition—developments and perspectives. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 2006, **58**: 309–314
- [76] Ronneberger O, Wang Q, Burkhardt H, *et al.* 3D invariants with high robustness to local deformations for automated pollen recognition. 29th Annual Symposium of the German-Association-for-Pattern-Recognition. Heidelberg, Germany, 2007: 425–435
- [77] 刘晓佳. 气传花粉播报平台在过敏性鼻炎预防治疗中的应用研究. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2022, **29** (1): 41–44
- [78] 卞萌, 郭树毅, 王威, 等. 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, 2021, **23** (9): 1705–1713
- [79] 修晓蕾, 吴思竹, 孙小康, 等. 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
- [80] Medek DE, Beggs PJ, Erbas B, *et al.* Characterising non-linear associations between airborne pollen counts and respiratory symptoms from the AirRater smartphone app in Tasmania, Australia: A case time series approach. *Environmental Research*, 2021, **200**: 111484
- [81] Medek DE, Beggs PJ, Erbas B, *et al.* Metabarcoding airborne pollen from subtropical and temperate eastern Australia over multiple years reveals pollen aerobiome diversity and complexity. *Science of the Total Environment*, 2023, **862**: 160585
- [82] Allen GP, Hodgson RM, Marsland SR, *et al.* Automatic recognition of light-microscope pollen images [EB/OL]. *Image and Vision Computing*. [2023-06-08]. <http://hdl.handle.net/10179/9622>
- [83] Medek DE, Beggs PJ, Erbas B, *et al.* Regional and seasonal variation in airborne grass pollen levels between cities of Australia and New Zealand. *Aerobiologia*, 2016, **32**: 289–302
- [84] Haberle SG, Bowman DMJS, Newnham RM, *et al.* The macroecology of airborne pollen in Australian and New Zealand urban areas. *PLoS One*, 2014, **9** (5): e97925
- [85] 肖小军, 胡东生, 刘志刚, 等. Durham 重力采样法对不同高度气传致敏花粉的调查研究. 南昌大学学报: 医学版, 2016, **56** (3): 64–67

作者简介 孟 龄, 女, 1981 年生, 硕士研究生。主要从事仪器分析及环境监测研究。E-mail: lingmeng@rcees.ac.cn

责任编辑 孙 菊