

影响花粉过敏的环境因素

李国红

昆明医科大学药学院暨云南省天然药物药理重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2024年7月8日; 录用日期: 2024年8月2日; 发布日期: 2024年8月12日

摘要

花粉过敏极度容易受到外界环境的影响。本文梳理了气象因素、空气污染物、城市化进程等环境因素改变对花粉量、花粉季节持续时间、花粉致敏性强弱的影响。大气中CO₂浓度和全球温度升高导致花粉产量增加, 花粉季节延长以及花粉致敏性增强; 空气污染物吸附在花粉表面, 改变其物理结构和化学性质, 促进花粉过敏原释放; 城市化进程改变使得城市花粉过敏率比农村地区高。通过加强花粉监测, 完善花粉预报体系来更好地应对环境改变引起的花粉过敏这一公共卫生挑战。

关键词

花粉过敏, 气象因素, 空气污染物, 城市化进程

Environmental Factors Affecting Pollen Allergy

Guohong Li

School of Pharmaceutical Sciences and Yunnan Key Laboratory of Pharmacology for Natural Products, Kunming Medical University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 8th, 2024; accepted: Aug. 2nd, 2024; published: Aug. 12th, 2024

Abstract

Pollen allergy is extremely susceptible to external environmental influences. In this paper, we sort out the effects of changes in environmental factors such as meteorological factors, air pollutants, and urbanization on pollen production, pollen season duration, and the strength of pollen sensitization. The rising atmospheric CO₂ concentrations and global temperatures increased pollen production, prolonged pollen seasons, and enhanced pollen sensitization; air pollutants adsorbed on pollen surfaces, altering their physical structure and chemical properties and promoting pollen allergen release; and changes in urbanization processes have resulted in a higher rate of pollen

sensitization in cities than in rural areas. The public health challenge of pollen allergy caused by environmental change can be better addressed by strengthening pollen monitoring and improving pollen forecasting systems.

Keywords

Pollen Allergy, Meteorological Factors, Air Pollutants, Urbanization Process

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

过敏性疾病是一类免疫系统异常引起的疾病，又称变态反应性疾病，是临床上的常见病、多发病，影响了全球至少 30% 的人口和近 80% 的家庭[1]。据统计，大约有 40% 的过敏性疾病患者的发病与花粉的接触有关，花粉是引起呼吸道过敏疾病的常见原因和触发剂之一[2]。当致敏花粉接触到人体口腔、鼻腔黏膜时，位于花粉壁或者细胞质的分子量为 10~70 KDa 范围的特殊蛋白释放[3] [4]，通过免疫球蛋白介导组胺、白三烯等炎性物质释放，可引起敏感个体出现过敏性鼻炎、过敏性结膜炎、特异性皮炎及过敏性哮喘和食物过敏等一系列临床症状[5]。伴随着气候变化引起的全球气候变暖、空气污染物增多以及城市化进程(不合理城市绿化、人们生活方式改变)加快导致花粉过敏患病率逐年上升[6]-[10]，带来了巨大的经济损失和健康负担。本文系统归纳总结了环境因素如何影响花粉过敏，梳理了国内外学者有关花粉监测和预测模型等研究工作的进展，进一步揭示各环境因子之间的相互作用，在此基础上提出未来环境-花粉之间的研究关系以及对花粉过敏防治的实用建议。

2. 影响花粉过敏的环境因素

2.1. 气象因素

大气中二氧化碳(CO₂)浓度和/或温度升高是驱动植物生长与开花的关键因素，豚草、橡树、黑麦草、桦树等植物在高 CO₂ 和高温环境下具有更高的花粉量、更长的花粉季和更强的花粉致敏性[11]-[14]。英国植物数据显示，近 10 年来随着温度升高植物初花期平均提前 4.5 天，部分物种甚至提前 2 周以上开花。与 20 世纪 60 年代初相比，北半球春季事件(树木开花)提前 6 天，秋季事件(杂草开花)推迟 5 天。随着时间的推移，花粉季节持续时间平均每年增加 0.9 天[15]-[17]。预计到 2100 年，全球平均地表温度将上升 1.4℃至 5.8℃，CO₂ 浓度较工业化前浓度上升 1.9 至 3.5 倍[18]，升高的气温和 CO₂ 水平为花粉浓度的飙升以及花粉过敏原性增加提供了绝佳的环境。一般情况下，降雨量越大，短期内空气中花粉含量越低。在授粉期间，植物受潮湿空气影响，花粉会吸收水汽形成凝结核并逐渐沉降，导致花粉浓度下降，尤其对大颗粒花粉如桦树花粉、草花粉影响更为显著[19]-[21]。但另外一种观点认为适量的降水有利于植物生长和花粉传播，导致降雨后一段时间内花粉浓度升高。黄赐璇等发现，每次降雨后出现律草花粉的爆发式增长，降雨量越大，降雨后花粉量越大，开花前几个月的降雨量与年度花粉量成正比[22]-[24]。这种现象的出现是因为在植物生长发育过程中水分极大的推动致敏植物的生长并影响着花序的数量，从源头上增加花粉量[25]。此外，降雨和高湿度促使花粉发生水合作用，导致花粉破裂，释放出过敏原，形成含有花粉碎片的气溶胶，加剧过敏反应。风能加速水分蒸发，降低空气湿度，有利于花粉囊开裂释放花粉。

较低的风速由于气流凝滞使得花粉聚集, 导致短期内局部花粉浓度升高。风速过大或持续时间长时, 花瓣易被风吹落, 花粉迅速传播, 使得局部地区花粉数目急剧减少[26] [27]。风向决定花粉的传输路径与局部分布, 对花粉监测数据的解读至关重要, 大尺度风系如亚洲夏季风环流影响青藏高原地区花粉时空动态格局, 东亚冬季风携带中国北方的高属和藜科花粉至西太平洋海域, 大西洋西风带的增强则促进北欧和中欧花粉向斯堪的纳维亚半岛的迁移[28]-[32]。

气候因素对花粉的影响是复杂的。主要有以下几点原因: 一是不同季节、地区影响花粉的气候主导因子不同。多数情况下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。西班牙和澳大利亚花粉浓度主要受降雨量和温度影响, 波兰花粉浓度主要受相对湿度、平均和最高气温、降雨和日照小时数影响、法国桦树花粉主要受风, 湿度影响, 英国春季花粉产量主要受降雨和温度影响[33] [34]。二是植物对环境变化的敏感性存在差异。如木本植物比草本植物对气温的响应更敏感, 故气候变暖导致春季花粉增量更多。在开花之前, 植物生长发育主要受到温度、光的影响, 在开花期间, 花粉浓度主要受到降水、湿度的影响[35]。三是同一气象因子在植物生长发育阶段发挥不同作用。如授粉前一段时间内出现了相对较多的降水, 花粉产量便会增多因为季前降水可以缓解植物可能遇到的干旱胁迫。但授粉期内若出现较多的降水, 其沉降作用便会降低花粉浓度。因此, 根据花粉过敏情况, 花粉浓度变化在花粉监测花粉预报综合分析时考虑各气候因素的影响, 避免简单、杂糅的关联性分析, 针对特定地区开展花粉监测预报预警, 为公众提供花粉预警信息。

2.2. 空气污染

我国室外空气污染物主要有颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5}和柴油颗粒物)、臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等, 室内污染物主要有甲醛和烟草[36]。污染物可能对花粉产生以下影响: 1) 改变花粉生物学和生殖功能, 减少花粉活力和萌发。2) 改变花粉表面的理化特征, 促进过敏原的释放, 影响花粉致敏性[37]-[41]。PM₁₀、PM_{2.5}和柴油颗粒物能吸附在鸭茅、垂枝桦花粉表面, 能够改变其物理结构和化学性质, 促进花粉过敏原的释放, 增加过敏原的浓度和稳定性。O₃本身具有刺激性, 可直接破坏花粉细胞膜, 促进花粉颗粒内蛋白质如悬铃木 Pla a 3 的释放, 通过氧化和硝化作用改变过敏原的结构, 增强其免疫原性, 当携带臭氧的花粉接触到黏膜, 通过氧化应激和局部炎症加剧过敏症状[42]-[44]。采集于交通繁忙道路附近的草花粉, 与来自较清洁植被区域的花粉相比, 展现出更高的致敏性, 这一现象在 NO_x 与 SO₂ 污染严重的环境中尤为显著, NO_x 和 SO₂ 通过硝化作用, 破坏花粉颗粒完整度, 降低花粉萌发性, 增强了花粉的致敏潜力。SO₂ 相较于 NO₂ 更易诱导花粉损伤而具有更大危害性[45]-[47]。甲醛、烟草这类室内空气污染物通过活化 Th₂ 系统介导花粉过敏性反应[48]。

空气污染物的类型和气候因素、暴露对象反应性、气道致敏程度等多个因素间互相作用。高 PM_{2.5}、高气温和低空气湿度与青少年过敏性鼻炎高患病率呈正相关[49]。O₃ 和温度之间存在协同作用, 温度升高增加 O₃ 浓度[50]。臭氧对易感人群(儿童、老年人、哮喘患者和慢性阻塞性肺病患者)产生不利影响在温度升高时更为明显, 暖季 O₃ 浓度每增加 10 ppb, 慢性阻塞性肺病患者死亡风险增加 0.37%; 臭氧浓度每增加 1%, 哮喘患者住院人数就会增加 0.1% [51]-[53]。葎草花粉暴露于 O₃ 和 NO₂ 环境下之后致敏蛋白 Hum j 1 两个相邻半胱氨酸分子的巯基之间形成了新的二硫键, IgE 结合亲和力增加, 致敏性增强[54]。现目前, 关于花粉和污染物的研究仍缺乏相对应的定量评估指标, 污染物导致花粉外壁的物理降解比例、污染物影响花粉亚颗粒释放、污染物对花粉亚粒子的分散性和致敏性的影响目前没有完全阐明。为了更好的了解大气污染对花粉致敏性和呼吸道相互作用的影响需进行更多跨学科标准化研究, 如设计实验, 在相同实验条件下对不同植物花粉暴露于主要污染物的研究以及污染物——不同种花粉——对应研究, 通过实验甚至可以模拟中西方不同污染物对不同或者同种花粉的影响, 以便更清楚的阐明其机制。

2.3. 城市化进程

2.3.1. 城市绿化

城市绿化在改善城市生态环境、提升城市形象方面至关重要。但是不合理绿化树种植导致潜在的致敏性花粉种类和数量迅速增加,威胁居民健康[55]。深圳市在引入外来树种时没有考虑其致敏性导致城市内致敏花粉数量大量增加[56]。研究发现最容易产生致敏花粉的植物类群来自杨属、柏属、柳属、榆属、悬铃木属、桦木科、禾本科等,但每个城市致敏绿化树种类有所差异,北京主要是柏科、松科、杨柳科、悬铃木科、豆科、苦木科、榆科、桦木科和壳斗科等[26],承德主要是松属、白蜡树属、圆柏属、桃属、杏属、榆属、桦木属、杨属、蒿属、蕁草属[57]。各地致敏绿化树具有地域差异,因此需要因地制宜开展致敏绿化树调查,科学规划绿化种植从源头上降低花粉过敏风险。在城市绿化树种的选择上应遵从“乡土、长寿、抗逆、食源、美观”的总体原则前提,以人为本,科学布局。选择植被类型、地理位置、物种丰富度、物种密度、致敏潜力、传粉策略、传粉周期、树高、树表面积作为树种致敏的评估参数,结合基于花粉和过敏原的直接指标评估方法以及基于植被及疾病相关的间接指标评估方法得到城市绿地致敏指数来进行城市绿化致敏潜力的评估[58]-[60],了解城市绿化致敏花粉的暴露特征与影响因素、迁移规律与环境健康效应,推动城市绿地的合理规划和发展的,对于公共卫生和整体健康具有重要的科学和实践意义。

2.3.2. 人们生活方式改变

生活方式的改变,包括工作场所、卫生习惯、饮食结构和药物使用的变化都在不同程度上影响着花粉过敏的发生和发展。

工作场所改变: 农业变革对于花粉症的流行有促进作用。越来越多的人放弃了农业,融入了城市生活,城市中许多特有的工作场所,如粉尘作业相关的采矿业、进行动物试验的制药公司、清洁剂生产公司这些行业的工人分别易受粉尘、动物蛋白、酶等物质的刺激而引发呼吸系统疾病,这种工作和生活方式的诱发和加重过敏反应,这导致了花粉过敏症的发病率在发达城市地区高于不发达的农村地区[61]。

卫生习惯改变: 随着经济的发展和卫生条件的改善,越来越西方式的生活方式使花粉过敏、哮喘等过敏性疾病逐年增加,研究者对此提出了“卫生假说”概念。“卫生假说”认为经常接触农场动物的孩子比那些从不接触的孩子哮喘和花粉热发病率要低的原因是“农业效应”促进了人体屏障部位(如呼吸道、泌尿生殖系统及消化道的皮肤和黏膜)上微生物群落的高度多样性发展,个体在在幼年阶段缺乏接触到足够的微生物,失去了对免疫系统的塑造和调节,这可能导致免疫系统对其他无害物质如花粉做出过度反应[62]-[65]。

饮食结构和药物使用: 由于城市化进程的加快,人们饮食结构发生改变,摄入过量食用含脂肪酸、蛋白质、抗氧化物的食品,大规模开展的疫苗接种、抗生素的滥用、运动不足会导致体内产生抗体的能力超过正常情况,更容易发生花粉过敏症状[66]。

3. 花粉监测预报重要性

自19世纪起,研究人员以可视化图形绘制花粉日历开展花粉监测工作,提供花粉季起止时间、年花粉量、花粉峰值浓度和气象因素等关键信息指导临床花粉防治工作[67]。早期通过重力沉降法(被动式)和容量法(主动式)两种方法,采用花粉采样器收集花粉,人工根据光学显微镜计数进行花粉鉴定和监测。此种方法操作简便,易于掌握,投资较少,符合多数基层工作实际。但需要通过光学显微镜进行劳动密集和耗时的人工分类,主观性强且信息滞后,不满足临床和科研实际要求[68]。因此开发实时、自动化的花粉监测非常有必要。

随着新兴技术如荧光诱导[69]、数字全息[70]、图像识别[71]、流式细胞术和深度学习[72]等新兴技术的发展,对花粉的自动监测准确度越来越高。研究人员结合机器人技术、图像处理和神经网络技术开发花粉自动化计数仪,自动寻找花粉,捕获、分析和存储其图像,并识别其类型,其准确度比人工显微镜计数要高得多。最常用的自动监测仪有BAA500全自动花粉监测仪、Rapid-E+智能生物气溶胶监测仪等。二者除了可以统计花粉数量外,还可进行种类识别工作,就分辨准确率而言,Rapid-E+智能生物气溶胶监测仪可实现高度精确的实时物种识别,误报率创历史新低,对花粉鉴别精度达到99% [73]。依托花粉采集器还有花粉自动监测仪器,学者们开展了一系列研究。德国研究人员使用自动花粉监测仪BAA500和深度学习算法以及传统的Hirst采样器对15种常见花粉进行监测并评估了自动监测系统的可靠性、性能、准确性和可比性均良好[74]。欧洲多国使用自动花粉监测设备建立了泛欧花粉监测网络,实现了花粉浓度的实时监测和预测,满足了不同用户群体的需求,同时也为研究提供了新的机遇。在过去的几十年里,各个国家花粉监测网络的研究创造了丰富的花粉浓度时间序列。利用它来研究有关花粉数量、花粉季节和物候的监测和建模至关重要,与此同时对花粉过敏原的监测方法研究将会是未来的重点。

对各地进行长期花粉观测,详细分析区域内出现频率高,致敏性强的空气花粉类型,结合环境因素对花粉浓度、花粉季节、花粉致敏性进行时间和空间分布规律研究,科学预报预测空气中致敏花粉散布状况,对区域性的社会生产以及空气花粉过敏症的预防和临床诊断工作非常重要。虽然观察和测量的方式非常不同,但花粉过敏监测预报建模正沿着基于观测的模型和基于物候的模型发展。基于观测的模型包含回归模型、时间序列建模、人工智能。回归模型通过对因变量与一个或多个其他变量(称为独立变量或预测变量)之间的过去关系进行建模来预测未来。时间序列建模的应用较为成熟,但需要对花粉变异性的多尺度性质进行大量的工作,但到目前为止主要局限于特定的地点、分类群和时间尺度[75]。人工智能能充分模拟众多不同类型变量之间复杂的非线性现象和化学过程,在大气科学上能预测各种空气污染物及其在不同时间尺度上的浓度。基于物候的模型包含纯粹的统计经验方法和基于过程的模型。前者通常将进入日期与物候发生日期之前特定时间段的平均温度联系起来,没有考虑植物生理和环境之间关系的机械细节。后者是基于对可能机制的实验研究,这些机制被认为是控制植物生理学与环境之间关系的[75]-[78]。

要注意的是没有一个单一的模型可以精准预测花粉具体分布状况。花粉和环境的影响较为复杂,这就强调了前期在花粉过敏研究中研究分析环境因素的影响是极其重要的,在进行长期花粉监测后,利用合适的预测模型融合正在促进花粉移动应用程序支持个人、临床医生和卫生管理机构的研究来减轻环境因素对花粉过敏的不利影响。

4. 展望和建议

环境因素与花粉过敏之间的关系涉及到气候因素、空气污染、城市化进程等多个方面。气象因素对花粉过敏影响显著。二氧化碳(CO₂)浓度和/或温度升高使得致敏花粉量增加、花粉季节延长以及花粉致敏性增强。降水或者湿度对花粉的影响具有双面性,一般情况下,降雨量和/或湿度越大,短期内空气中花粉含量越低。但在开花前几个月的降雨量和/或湿度增加与年度花粉量成正比,风能促进花粉开裂释放以及远距离传播。空气污染物多数是增强花粉致敏原性,城市化进程中绿化树选择不当引起源头上致敏花粉量增多,人们生活方式的改变使得花粉过敏发病率增加。在未来的环境背景下,花粉过敏引起的人类健康问题有可能持续升级,加强花粉监测和预报是防治花粉过敏的重要途径。目前对花粉过敏和环境的研究主要围绕医学、生态学角度开展花粉浓度、种类监测、物候研究等,研究内容比较单一还需进一步深入研究。对今后环境因素和花粉过敏的关系研究提出以下几点建议:1) 多学科交叉融合:未来的花粉预测研究应更加注重多学科交叉融合,包括气象学、植物学、生态学、医学等多个领域的知识和技术通

过跨学科的合作全面提高花粉监测预测的准确性和可靠性。2) 人工智能和大数据技术的应用：人工智能和大数据技术也可以为花粉过敏的诊断和治疗提供新的思路和方法。通过使用机器学习、深度学习等技术，可以对大量的花粉监测数据和环境影响因素数据(气象数据、空气污染指数、城市绿化指数)进行分析和挖掘，提取出更有价值的信息和模式，从而提高花粉预测的准确性和可靠性。同时，人工智能和大数据技术也可以为未来环境变化背景下花粉过敏的诊断和治疗提供新的思路和方法。3) 城市化进程的绿地规划和设计：随着城市化的推进，绿地的规划和设计将变得更加关键。未来的城市规划应更加注重绿地的合理布局和植物选择，以最大限度地减少致敏植物的种植，降低花粉过敏的潜在危险。4) 综合治理和政策支持：未来应该加强跨部门的综合治理措施，包括联合环境、卫生和城市规划部门，制定针对花粉过敏的综合政策和措施。这些政策不仅应关注花粉过敏的治疗和管理，还需从源头上减少花粉过敏的发生风险。

参考文献

- [1] Sánchez-Borges, M., Martin, B.L., Muraro, A.M., Wood, R.A., Agache, I.O., Ansotegui, I.J., *et al.* (2018) The Importance of Allergic Disease in Public Health: An iCAALL Statement. *World Allergy Organization Journal*, **11**, 8. <https://doi.org/10.1186/s40413-018-0187-2>
- [2] Oh, J. (2022) Pollen Allergy in a Changing Planetary Environment. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, **14**, 168-181. <https://doi.org/10.4168/aaair.2022.14.2.168>
- [3] 贾鑫磊. 孢子/花粉壁结构、化学成分以及功能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [4] Roulston, T.H. and Cane, J.H. (2000) Pollen Nutritional Content and Digestibility for Animals. *Plant Systematics and Evolution*, **222**, 187-209. <https://doi.org/10.1007/bf00984102>
- [5] Aw, M., Penn, J., Gauvreau, G.M., Lima, H. and Sehmi, R. (2019) Atopic March: Collegium Internationale Allergologica Update 2020. *International Archives of Allergy and Immunology*, **181**, 1-10. <https://doi.org/10.1159/000502958>
- [6] Singh, A.B. and Kumar, P. (2022) Climate Change and Allergic Diseases: An Overview. *Frontiers in Allergy*, **3**, Article 964987. <https://doi.org/10.3389/falgy.2022.964987>
- [7] 沈暘. 气候变化对呼吸道过敏及花粉、霉菌所致过敏性哮喘的影响[J]. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2021, 15(3): 347.
- [8] Ziska, L.H. (2020) An Overview of Rising CO₂ and Climatic Change on Aeroallergens and Allergic Diseases. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, **12**, 771-782. <https://doi.org/10.4168/aaair.2020.12.5.771>
- [9] 陈妍, 刘爱霞, 叶凤钗, 柏杉山, 梁利君, 王春花, 高军凯, 王玉秋. 空气污染与过敏症发病的关系[J]. 环境与健康杂志, 2008(1): 81-84.
- [10] 张晓燕, 刘俊. 花粉过敏与城市绿化[J]. 扬州教育学院学报, 2007(3): 42-45.
- [11] Wayne, P., Foster, S., Connolly, J., Bazzaz, F. and Epstein, P. (2002) Production of Allergenic Pollen by Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) Is Increased in CO₂-Enriched Atmospheres. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, **88**, 279-282. [https://doi.org/10.1016/s1081-1206\(10\)62009-1](https://doi.org/10.1016/s1081-1206(10)62009-1)
- [12] Ziska, L.H. and Caulfield, F.A. (2000) Rising CO₂ and Pollen Production of Common Ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), a Known Allergy-Inducing Species: Implications for Public Health. *Functional Plant Biology*, **27**, 893-898. <https://doi.org/10.1071/pp00032>
- [13] Kim, K.R., Oh, J., Woo, S., Seo, Y.A., Choi, Y., Kim, H.S., *et al.* (2018) Does the Increase in Ambient CO₂ Concentration Elevate Allergy Risks Posed by Oak Pollen? *International Journal of Biometeorology*, **62**, 1587-1594. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1558-7>
- [14] van Ginkel, J.H., Gorissen, A. and Polci, D. (2000) Elevated Atmospheric Carbon Dioxide Concentration: Effects of Increased Carbon Input in a *Lolium perenne* Soil on Microorganisms and Decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**, 449-456. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(99\)00097-8](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(99)00097-8)
- [15] Stach, A., Emberlin, J., Smith, M., Adams-Groom, B. and Myszkowska, D. (2007) Factors That Determine the Severity of *Betula* Spp. Pollen Seasons in Poland (Poznań and Krakow) and the United Kingdom (Worcester and London). *International Journal of Biometeorology*, **52**, 311-321. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0127-2>
- [16] Zhang, Y., Bielory, L., Mi, Z., Cai, T., Robock, A. and Georgopoulos, P. (2014) Allergenic Pollen Season Variations in the Past Two Decades under Changing Climate in the United States. *Global Change Biology*, **21**, 1581-1589.

- <https://doi.org/10.1111/gcb.12755>
- [17] Barnes, C.S. (2018) Impact of Climate Change on Pollen and Respiratory Disease. *Current Allergy and Asthma Reports*, **18**, Article No. 59. <https://doi.org/10.1007/s11882-018-0813-7>
- [18] Cubasch, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., *et al.* (2001) Projections of Future Climate Change. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of WG1 to the Third Assessment Report of the IPCC (TAR). Cambridge University Press, 525-582.
- [19] Khouider, S., Borges, F., LeBlanc, C., Ungru, A., Schnittger, A., Martienssen, R., *et al.* (2021) Male Fertility in *Ara-bidopsis* Requires Active DNA Demethylation of Genes That Control Pollen Tube Function. *Nature Communications*, **12**, Article No. 410. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20606-1>
- [20] Hoebeke, L., Bruffaerts, N., Verstraeten, C., Delcloc, A., De Smedt, T., Packeu, A., *et al.* (2017) Thirty-Four Years of Pollen Monitoring: An Evaluation of the Temporal Variation of Pollen Seasons in Belgium. *Aerobiologia*, **34**, 139-155. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9503-5>
- [21] Khwarahm, N., Dash, J., Atkinson, P.M., Newnham, R.M., Skjøth, C.A., Adams-Groom, B., *et al.* (2014) Exploring the Spatio-Temporal Relationship between Two Key Aeroallergens and Meteorological Variables in the United Kingdom. *International Journal of Biometeorology*, **58**, 529-545. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0739-7>
- [22] 黄赐璇, 许清海, 阳小兰. 东北平原海伦空气孢粉分析[J]. 地理科学进展, 2001, 20(4): 371-377.
- [23] 欧祖镇. 重庆主城区葎草花粉的分布与致敏特点[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆医科大学, 2018.
- [24] Cariñanos, P., Díaz de la Guardia, C., Algarra, J.A., De Linares, C. and Irurita, J.M. (2013) The Pollen Counts as Bio-indicator of Meteorological Trends and Tool for Assessing the Status of Endangered Species: The Case of *Artemisia* in Sierra Nevada (Spain). *Climatic Change*, **119**, 799-813. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0751-2>
- [25] Jung, S., Estrella, N., Pfaffl, M.W., Hartmann, S., Ewald, F. and Menzel, A. (2021) Impact of Elevated Air Temperature and Drought on Pollen Characteristics of Major Agricultural Grass Species. *PLOS ONE*, **16**, e0248759. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248759>
- [26] 闫珂. 北京4种常见树种花粉飘散规律及致敏潜力分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [27] 谢水祥, 马廉兰, 刘志刚, 万文豪, 陈玲. 气传致敏花粉飘散与气象七要素的相关性[J]. 中国临床康复, 2006(12): 56-58.
- [28] Liu, Z., Zhang, Z., Cheng, D., Duan, Z. and Ni, J. (2023) Spatial Influence of the Asian Summer Monsoon on Pollen Assemblages of Qinghai-Xizang Plateau and Its Potential Implication for the Interpretation of Fossil Pollen Records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **625**, Article 111690. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111690>
- [29] 杨颖. 北京城区树木花粉飘散规律及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [30] Dai, L. and Weng, C. (2010) A Survey on Pollen Dispersal in the Western Pacific Ocean and Its Paleoclimatological Significance as a Proxy for Variation of the Asian Winter Monsoon. *Science China Earth Sciences*, **54**, 249-258. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4027-7>
- [31] Emberlin, J. (1994) The Effects of Patterns in Climate and Pollen Abundance on Allergy. *Allergy*, **49**, 15-20. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.1994.tb04233.x>
- [32] Bishan, C., Bing, L., Chixin, C., Junxia, S., Shulin, Z., Cailang, L., *et al.* (2020) Relationship between Airborne Pollen Assemblages and Major Meteorological Parameters in Zhanjiang, South China. *PLOS ONE*, **15**, e0240160. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240160>
- [33] 赵德鹤宇, 叶彩华, 王宇飞, 姚轶锋. 京津冀地区气传花粉数据分析[J]. 植物学报, 2021, 56(6): 751-760.
- [34] Pehkonen, E. and Rantio-Lehtimäki, A. (1994) Variations in Airborne Pollen Antigenic Particles Caused by Meteorologic Factors. *Allergy*, **49**, 472-477. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.1994.tb00842.x>
- [35] Laaidi, M. (2001) Forecasting the Start of the Pollen Season of *Poaceae*: Evaluation of Some Methods Based on Meteorological Factors. *International Journal of Biometeorology*, **45**, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s004840000079>
- [36] Aboulaich, N., Achmakh, L., Bouziane, H., Trigo, M.M., Recio, M., Kadiri, M., *et al.* (2012) Effect of Meteorological Parameters on Poaceae Pollen in the Atmosphere of Tetouan (NW Morocco). *International Journal of Biometeorology*, **57**, 197-205. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0566-2>
- [37] 高欣丽. 吸烟与大气污染对肺部疾病的影响[J]. 国际呼吸杂志, 2018, 38(5): 378-381.
- [38] Wolters, J.H.B. and Martens, M.J.M. (1987) Effects of Air Pollutants on Pollen. *The Botanical Review*, **53**, 372-414. <https://doi.org/10.1007/bf02858322>
- [39] Shahali, Y., Pourpak, Z., Moin, M., Zare, A. and Majd, A. (2009) Impacts of Air Pollution Exposure on the Allergenic Properties of Arizona Cypress Pollens. *Journal of Physics: Conference Series*, **151**, Article 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/151/1/012027>

- [40] Sénéchal, H., Visez, N., Charpin, D., Shahali, Y., Peltre, G., Biolley, J., *et al.* (2015) A Review of the Effects of Major Atmospheric Pollutants on Pollen Grains, Pollen Content, and Allergenicity. *The Scientific World Journal*, **2015**, Article ID: 940243. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
- [41] D'Amato, G., Liccardi, G., D'Amato, M. and Cazzola, M. (2001) The Role of Outdoor Air Pollution and Climatic Changes on the Rising Trends in Respiratory Allergy. *Respiratory Medicine*, **95**, 606-611. <https://doi.org/10.1053/rmed.2001.1112>
- [42] Guilbert, A., Cox, B., Bruffaerts, N., Hoebeke, L., Packeu, A., Hendrickx, M., *et al.* (2018) Relationships between Aeroallergen Levels and Hospital Admissions for Asthma in the Brussels-Capital Region: A Daily Time Series Analysis. *Environmental Health*, **17**, Article No. 35. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0378-x>
- [43] Visez, N., Hamzé, M., Vandenbossche, K., Occelli, F., de Nadaï, P., Tobon, Y., *et al.* (2023) Uptake of Ozone by Allergenic Pollen Grains. *Environmental Pollution*, **331**, Article 121793. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121793>
- [44] Berger, M., Bastl, K., Bastl, M., Dirr, L., Hutter, H., Moshhammer, H., *et al.* (2020) 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*, **263**, Article 114526. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114526>
- [45] Zhou, S., Wang, X., Lu, S., Yao, C., Zhang, L., Rao, L., *et al.* (2021) Characterization of Allergenicity of *Platanus* Pollen Allergen a 3 (Pla a 3) after Exposure to NO₂ and O₃. *Environmental Pollution*, **278**, Article 116913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116913>
- [46] Ouyang, Y., Xu, Z., Fan, E., Li, Y. and Zhang, L. (2015) Effect of Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide on Viability and Morphology of Oak Pollen. *International Forum of Allergy & Rhinology*, **6**, 95-100. <https://doi.org/10.1002/alar.21632>
- [47] Franze, T., Weller, M.G., Niessner, R. and Pöschl, U. (2003) Enzyme Immunoassays for the Investigation of Protein Nitration by Air Pollutants. *The Analyst*, **128**, 824-831. <https://doi.org/10.1039/b303132b>
- [48] Sagehashi, M., Fukuda, T., Fujii, T., Sakai, Y. and Sakoda, A. (2005) Elution and Adsorptive Concentration of Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) Pollen Allergen in Environmental Water. *Water Science and Technology*, **52**, 37-43. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0219>
- [49] 张槿, 滕尧树, 李程亮, 王梓合, 朱瑾. 气候变化、大气污染在过敏性气道疾病中的作用及机制[J]. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2020, 14(6): 599-604.
- [50] Qiu, C., Feng, W., An, X., Liu, F., Liang, F., Tang, X., *et al.* (2022) The Effect of Fine Particulate Matter Exposure on Allergic Rhinitis of Adolescents Aged 10-13 Years: A Cross-Sectional Study from Chongqing, China. *Frontiers in Public Health*, **10**, Article ID: 921089. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.921089>
- [51] 周骥, 付世华, 彭丽, 杨丹丹, 杨丝絮, 周弋, 许建明, 叶晓芳. 臭氧和 PM(2.5)对慢阻肺死亡影响及气温修饰效应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5904-5911.
- [52] Janke, K. (2014) Air Pollution, Avoidance Behaviour and Children's Respiratory Health: Evidence from England. *Journal of Health Economics*, **38**, 23-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2014.07.002>
- [53] Schwartz, J. (2005) How Sensitive Is the Association between Ozone and Daily Deaths to Control for Temperature? *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **171**, 627-631. <https://doi.org/10.1164/rccm.200407-933oc>
- [54] Ayres, J.G., Forsberg, B., Annesi-Maesano, I., Dey, R., Ebi, K.L., Helms, P.J., *et al.* (2009) Climate Change and Respiratory Disease: European Respiratory Society Position Statement. *European Respiratory Journal*, **34**, 295-302. <https://doi.org/10.1183/09031936.00003409>
- [55] Hong, Q., Zhou, S., Zhao, H., Peng, J., Li, Y., Shang, Y., *et al.* (2018) Allergenicity of Recombinant Humulus Japonicus Pollen Allergen 1 after Combined Exposure to Ozone and Nitrogen Dioxide. *Environmental Pollution*, **234**, 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.078>
- [56] 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.
- [57] 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[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8746-8757.
- [58] 隋利萍, 李健, 李清华, 赵运华, 郑家华, 郭有新, 欧阳昱晖. 致敏花粉监测及浓度播报在花粉症防治中的作用[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2022, 29(10): 641-644.
- [59] 姚亚男, 李树华, 王玥, 金洋, 王羽. 中国花粉致敏树种分级研究[J]. 中国园林, 2023, 39(6): 114-119.
- [60] Cariñanos, P., Casares-Porcel, M. and Quesada-Rubio, J. (2014) Estimating the Allergenic Potential of Urban Green Spaces: A Case-Study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, **123**, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>
- [61] Cariñanos, P., Grilo, F., Pinho, P., Casares-Porcel, M., Branquinho, C., Acil, N., *et al.* (2019) Estimation of the Aller-

- genic Potential of Urban Trees and Urban Parks: Towards the Healthy Design of Urban Green Spaces of the Future. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article 1357. <https://doi.org/10.3390/ijerph16081357>
- [62] 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[J]. 环境与健康杂志, 2007(10): 833-836.
- [63] Lambrecht, B.N. and Hammad, H. (2017) The Immunology of the Allergy Epidemic and the Hygiene Hypothesis. *Nature Immunology*, **18**, 1076-1083. <https://doi.org/10.1038/ni.3829>
- [64] Ober, C., Sperling, A.I., von Mutius, E. and Vercelli, D. (2017) Immune Development and Environment: Lessons from Amish and Hutterite Children. *Current Opinion in Immunology*, **48**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2017.08.003>
- [65] Marfortt, D.A., Josviack, D., Lozano, A., Cuestas, E., Agüero, L. and Castro-Rodriguez, J.A. (2017) Differences between Preschoolers with Asthma and Allergies in Urban and Rural Environments. *Journal of Asthma*, **55**, 470-476. <https://doi.org/10.1080/02770903.2017.1339800>
- [66] Okada, H., Kuhn, C., Feillet, H. and Bach, J. (2010) The 'Hygiene Hypothesis' for Autoimmune and Allergic Diseases: An Update. *Clinical and Experimental Immunology*, **160**, 1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2249.2010.04139.x>
- [67] 李平. 花粉过敏症增多的原因[J]. 国外医学情报, 1997(2): 5, 8.
- [68] Škoparija, B., Marko, O., Panić, M., Jakovetić, D. and Radišić, P. (2018) How to Prepare a Pollen Calendar for Forecasting Daily Pollen Concentrations of Ambrosia, Betula and Poaceae? *Aerobiologia*, **34**, 203-217. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9507-9>
- [69] Durham, O.C. (1946) The Volumetric Incidence of Atmospheric Allergens: IV. A Proposed Standard Method of Gravity Sampling, Counting, and Volumetric Interpolation of Results. *Journal of Allergy*, **17**, 79-86. [https://doi.org/10.1016/0021-8707\(46\)90025-1](https://doi.org/10.1016/0021-8707(46)90025-1)
- [70] Buters, J., Clot, B., Galán, C., Gehrig, R., Gilge, S., Hentges, F., et al. (2022) Automatic Detection of Airborne Pollen: An Overview. *Aerobiologia*, **40**, 13-37. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09750-x>
- [71] Clot, B., Gilge, S., Hajkova, L., Magyar, D., Scheifinger, H., Sofiev, M., et al. (2020) The EUMETNET Autopollen Programme: Establishing a Prototype Automatic Pollen Monitoring Network in Europe. *Aerobiologia*, **40**, 3-11. <https://doi.org/10.1007/s10453-020-09666-4>
- [72] Tummon, F., Bruffaerts, N., Celenk, S., Choël, M., Clot, B., Crouzy, B., et al. (2022) Towards Standardisation of Automatic Pollen and Fungal Spore Monitoring: Best Practises and Guidelines. *Aerobiologia*, **40**, 39-55. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09755-6>
- [73] Schaefer, J., Milling, M., Schuller, B.W., Bauer, B., Brunner, J.O., Traidl-Hoffmann, C., et al. (2021) Towards Automatic Airborne Pollen Monitoring: From Commercial Devices to Operational by Mitigating Class-Imbalance in a Deep Learning Approach. *Science of the Total Environment*, **796**, Article 148932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148932>
- [74] Maya-Manzano, J.M., Tummon, F., Abt, R., Allan, N., Bunderson, L., Clot, B., et al. (2023) Towards European Automatic Bioaerosol Monitoring: Comparison of 9 Automatic Pollen Observational Instruments with Classic Hirst-Type Traps. *Science of the Total Environment*, **866**, Article 161220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161220>
- [75] Scheifinger, H., Belmonte, J., Buters, J., Celenk, S., Damialis, A., Dechamp, C., et al. (2012) Monitoring, Modelling and Forecasting of the Pollen Season. In: Sofiev, M. and Bergmann, K.C., Eds., *Allergenic Pollen*, Springer, 71-126. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4881-1_4
- [76] Plaza, M.P., Kolek, F., Leier-Wirtz, V., Brunner, J.O., Traidl-Hoffmann, C. and Damialis, A. (2022) Detecting Airborne Pollen Using an Automatic, Real-Time Monitoring System: Evidence from Two Sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 2471. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042471>
- [77] Ito, Y., Hattori, R., Mase, H., Watanabe, M. and Shiotani, I. (2008) Forecasting Models for Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Pollen Count Showing an Alternate Dispersal Rhythm. *Allergology International*, **57**, 321-329. <https://doi.org/10.2332/allergolint.o-07-520>
- [78] Islam, M. and Shehzad, F. (2022) A Prediction Model Optimization Critiques through Centroid Clustering by Reducing the Sample Size, Integrating Statistical and Machine Learning Techniques for Wheat Productivity. *Scientifica*, **2022**, Article ID: 7271293. <https://doi.org/10.1155/2022/7271293>