

DOI: 10.5846/stxb202202220416

齐晨, 姜江, 叶彩华, 尤焕苓, 乔媛, 沙祎, 白帆. 北京主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测. 生态学报, 2023, 43(7): 2650-2662.

Qi C, Jiang J, Ye C H, You H L, Qiao Y, Sha Y, Bai F. Prediction of date of annual maximum concentration of main airborne allergenic pollen in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2650-2662.

北京主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测

齐 晨, 姜 江, 叶彩华*, 尤焕苓, 乔 媛, 沙 祎, 白 帆

北京市气象服务中心, 北京 100089

摘要: 花粉是我国北方引发过敏性鼻炎最主要过敏原, 花粉症发病期与花粉浓度高峰期吻合。基于北京地区 2012 至 2020 年花粉季多站、逐日分类花粉浓度观测数据分析, 得出北京地区花粉浓度在 3 月上旬至 5 月中旬(可进一步划分为 3 月中旬至 4 月上旬和 4 月下旬至 5 月上旬两个高峰期)和 8 月中旬至 9 月中旬分别存在两个高峰期, 第一个高峰期内优势致敏花粉种类为柏科、杨柳科和松科, 第二个高峰期内优势致敏花粉种类为桑科、菊科蒿属和藜科。根据优势致敏花粉年浓度峰值日期观测数据, 使用与花粉采样站点位置相匹配的逐日气象观测数据累积值, 基于作物模型概念和模糊逻辑原理建立了北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型。经检验, 柏科、杨柳科、松科、桑科、菊科蒿属和藜科花粉模型预测准确率分别为 87.8%、80.0%、64.4%、86.7%、78.8% 和 81.8%。基于北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型可为本地花粉症防治提供理论参考。

关键词: 北京地区; 气传致敏花粉; 年浓度峰值日期; 预测

Prediction of date of annual maximum concentration of main airborne allergenic pollen in Beijing

QI Chen, JIANG Jiang, YE Caihua*, YOU Huanling, QIAO Yuan, SHA Yi, BAI Fan

Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China

Abstract: The prevalence and severity of pollen-induced pollinosis has been increasing yearly worldwide in recent years. Pollen is the main allergen causing allergic rhinitis in North China and the onset period of airborne allergenic pollen-induced pollinosis coincides with the peak period of pollen concentration. As one of the mega-cities in the northern region of China, Beijing is becoming increasingly aware of the problems caused by allergenic pollen. Based on the analysis of 12 pollen sampling stations daily classified pollen concentration observation data during pollen season in Beijing from 2012 to 2020, there were two peak periods of pollen concentration in Beijing from early March to mid-May (it could be further divided into two peak periods from mid-March to early April and from late April to early May) and from mid-August to mid-September, respectively. The dominant allergenic pollen species in the first peak period were Cupressaceae, Salicaceae (from early March to mid-April, the annual average concentration accounted for 39.1% and 18.2% respectively) and Pinaceae (from mid-April to early May, the annual average concentration accounted for 18.2%), and the dominant allergenic pollen species in the second peak period were Moraceae, *Artemisia* and Chenopodiaceae (from mid-August to mid-September, the annual average concentration accounted for 34.4%, 30.4% and 12.7% respectively). The annual maximum concentration of dominant airborne allergenic pollen in Beijing varied significantly among stations and pollen seasons, and fluctuated significantly. In contrast, the variation of the dates of annual maximum pollen concentration of the same species is relatively

基金项目: 北京市科技计划课题(Z191100009119013)

收稿日期: 2022-02-22; **网络出版日期:** 2022-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ych681012@126.com

stable, and its prediction research work is more meaningful for pollen-induced pollinosis control. Based on the observation data of annual maximum concentration of dominant airborne allergenic pollen and the cumulative value of daily meteorological observation data matched with the location of pollen sampling stations, a prediction model of date of annual maximum concentration of main airborne allergenic pollen in Beijing is established based on the principle of crop growth model and fuzzy logic. The results showed that the prediction accuracy of pollen models of Cupressaceae, Salicaceae, Pinaceae, Moraceae, *Artemisia* and Chenopodiaceae were 87.8%, 80.0%, 64.4%, 86.7%, 78.8% and 81.8%, respectively. Using a model based on fuzzy logic principle and driven by the cumulative values of daily meteorological elements for pollen annual maximum concentration date, combined with the high-resolution regional numerical weather prediction model in Beijing, we can make a reasonable prediction of the time of maximum pollen concentration of different airborne allergenic pollens and provide a theoretical reference for the prevention and control of local airborne allergenic pollen-induced pollinosis.

Key Words: Beijing; airborne allergenic pollen; date of annual maximum concentration; prediction

花粉症是由致敏花粉导致的过敏性鼻炎,近年来全球范围花粉症患病率和严重性均呈逐年增加态势^[1]。我国多中心流行病学研究显示,花粉过敏源是北方引发过敏性鼻炎最主要的过敏原,发病人口数达 7500 万^[2]。大量研究表明花粉症发病季节与气传花粉浓度高峰期吻合,且患者就诊人次与致敏花粉浓度呈高度相关^[3-5]。北京作为我国北方地区超大城市之一,常住人口数量大、人员居住密集,伴随绿色生态建设推进带来植被状况改善,致敏花粉引发的问题也日趋明显^[6-7]。

北京地区植物资源丰富,花粉致敏植物种类繁多,前人已开展大量研究工作探讨北京地区花粉致敏植物种类、分布及变化等特征,结果显示北京地区花粉总量年变化呈双峰型,春季高峰期以乔木植物为主,秋季高峰期以草本植物居多^[8-11]。研究表明不同时段内的气象条件是影响不同种类花粉散粉期和散粉量的主要自然因素之一^[12-15],基于气象条件对花粉浓度影响分析,国内外大量学者开展了致敏植物生育期、花期以及不同时间尺度花粉浓度预测的研究工作^[16-18]。针对北京地区:张德山等^[19]应用正交筛选回归方法,使用多气象因子建立了基于站点的北京地区未来 1—4 天花粉浓度预报模式;赵文芳等^[20]提出了基于粒子群优化算法和支持向量机、使用多种气象要素提升花粉未来 24 小时浓度预测精度的方法;卞萌等^[21]利用具有外部输入的非线性自回归神经网络模型,结合气候因子及叶面积指数观测,建立了北京市次日花粉浓度预测模型。

相较于不同时间尺度的花粉浓度预测工作,鲜有关于花粉浓度高峰期出现时间的预测研究。本研究使用北京地区多年分类花粉浓度和气象要素观测数据,基于花粉年浓度变化规律及年浓度高峰期内优势致敏花粉种类分析,使用模糊逻辑相关方法探讨气象条件对北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值出现时间的影响,结合北京地区高分辨率区域天气预报模式,可对北京不同地区主要气传致敏花粉年浓度峰值出现日期进行预测,为花粉过敏症预防和临床诊断工作提供参考。

1 花粉样本采集概况

本研究使用花粉浓度观测数据为北京地区 12 个花粉采样站点 2012 至 2020 年逐日花粉分类浓度观测数据。所有花粉采样站点均布设在所在区国家级地面观测站观测场内,站点分布如图 1 所示。

2012 至 2020 年花粉采样期集中在每年 3 至 10 月,各年、各站实际采样期长度如图 2 所示。花粉样本使用 Durham 花粉采样器基于叶氏重力沉降法获取,样本采样片每 24 小时更换一次,获取后使用碱性复红染色液对采样片进行染色处理,之后使用显微镜进行人工分类计数,花粉浓度计数结果为单位面积花粉数量(粒/ 500mm^2)。

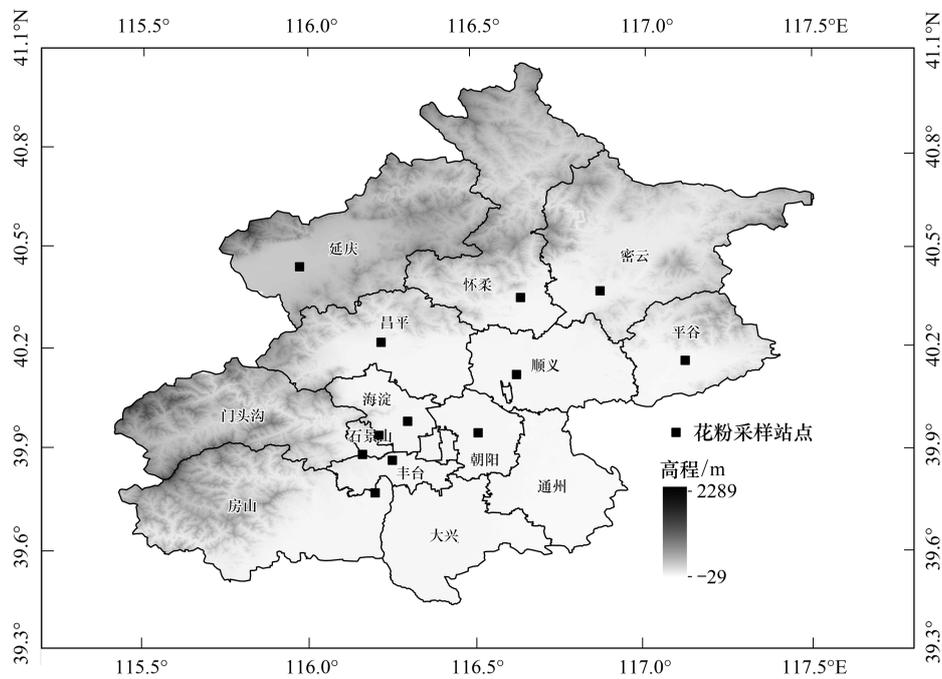


图 1 北京地区花粉采样站点分布

Fig.1 Distribution of pollen sampling sites in Beijing

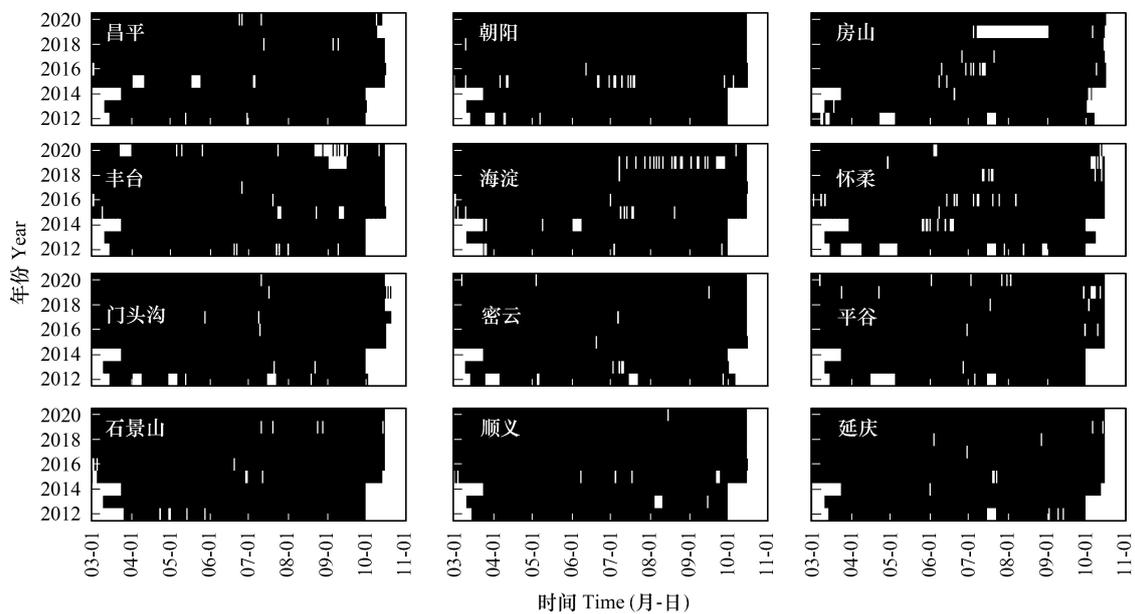


图 2 2012—2020 年各花粉采样站点实际采样期长度

Fig.2 Actual sampling period length of pollen sampling stations from 2012 to 2020

2 研究方法

2.1 花粉年浓度峰值对应日期确定方法

某类花粉年浓度峰值为该年花粉季内其逐日浓度观测值的最大值^[22], 浓度最大值出现日期即为该种类花粉年浓度峰值日期。为避免年花粉总量过少或同一花粉季存在多个浓度峰值等少数情况对建模影响, 当出现以下三种情况中的任意一种, 则认为某年度某类花粉浓度峰值存在明显不确定性, 对该年数据进行剔除处

理:(1)年采样期内某种花粉浓度最大值小于 50 粒/(500mm²);(2)年采样期内某种花粉存在多个数值接近的花粉浓度峰值,并且出现日期相差超过 1 周;(3)某年花粉浓度峰值对应日期明显偏离 2012 至 2020 年平均值,相差日期大于 30d。

2.2 气象要素累积值计算方法

本研究使用气象数据为花粉采样站点对应的国家级地面观测站 2012 至 2020 年气象要素日值观测资料,包含日平均气温、日平均地表温度、日降水量和日照时数。基于气象要素日值观测资料,统计逐年、各站不同种类花粉年浓度峰值日期对应气象要素累积值,包含有效积温(本研究所有种类花粉对应生物学下限温度均使用 0℃)、累积地表温度(大于 0℃ 日平均地表温度累积值)、累积降水量(日降水量累积值)和累积日照时数。

其中对于在 6 月 1 日之前其浓度达到峰值的花粉种类,其气象要素累积值计算起始日期为同年 1 月 1 日;在 6 月 1 日之后浓度达到峰值的花粉种类,其气象要素累积值计算起始日期为同年 6 月 1 日。花粉年浓度峰值日期对应有效积温、累积地表温度、累积降水量和累积日照时数为年浓度峰值日期当天、前三天以及后三天(共计 7 天)气象要素累积值的平均值。

2.3 模糊逻辑原理

20 世纪 60 年代,Zadeh^[23]使用了一种基于模糊集和模糊逻辑的方法来处理语言学中的模糊信息。此后这一方法不断发展并逐步形成了模糊逻辑系统理论,广泛应用于气象学、医学、计算机科学等多种领域。基于隶属度函数的概念,使用模糊逻辑可以模仿人的不确定性判断和推理方式,描述并区分模糊集合,处理模糊关系,从而对经典逻辑难以处理的非线性、不确定问题进行定量化描述^[24]。因此可应用模糊逻辑理论将界限不清晰的定性知识和经验转化为确定性定量关系。

2.4 模型建立、检验方法

本研究使用多种气象要素的模糊逻辑隶属度函数的组合,描述气象条件对不同种类花粉年浓度峰值出现时间的非线性影响,其中不同种类花粉对应有效积温、累积地表温度、累积降水量和累积日照时数的隶属度函数通过花粉年浓度峰值日期对应气象要素日值数据累积值的统计结果拟合得出。

基于逐日气象要素累积值,使用公式 $P = A \times B + (1 - A \times B) \times (C \times D)$ 预测花粉年浓度峰值出现日期。其中 P 为某一日是当年某种花粉浓度达到峰值的概率, A 、 B 、 C 、 D 分别表示 4 种气象要素隶属度函数, A 、 B 为影响某种花粉浓度峰值日期的主要隶属度函数。使用训练集通过排列组合方式筛选出年浓度峰值日期计算值与观测值绝对误差天数最小的组合形式,最终针对北京地区花粉年浓度高峰期内优势花粉种类建立相应的花粉年浓度峰值日期预测模型,并使用测试集数据验证模型预测准确率。

模型预测准确率定义为测试集中年浓度峰值日期计算值与观测值误差小于或等于 $\pm 7d$ 的样本量占测试集样本总量的比例^[25]。并选择模型预测日期与观测日期的平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)和均方根误差(Root mean square error, RMSE)等统计指标反映模型模拟误差大小和整体模拟效果。

3 结果与分析

3.1 北京地区花粉年浓度变化规律

基于 2012 至 2020 年逐日花粉分类浓度观测数据,计算北京地区 3 至 10 月逐日花粉总浓度平均值,其变化规律如图 3 灰色部分所示。北京地区年花粉浓度存在两个明显高峰期:其一为 3 月上旬至 5 月中旬,其二为 8 月中旬至 9 月中旬,该规律与前人研究成果基本一致^[8-11]。其中北京地区 3 月上旬至 5 月中旬花粉浓度高峰期可进一步划分为 3 月中旬至 4 月上旬以及 4 月下旬至 5 月上旬两个高峰期。

3.2 北京地区花粉年浓度高峰期内优势花粉种类

分别对 3 月 1 日至 4 月 15 日、4 月 15 日至 5 月 15 日、8 月 15 日至 9 月 15 日北京地区各类花粉总浓度年平均进行统计排序,结果如图 4 所示:北京地区 3 月上旬至 4 月中旬花粉浓度高峰期内柏科和杨柳科花粉

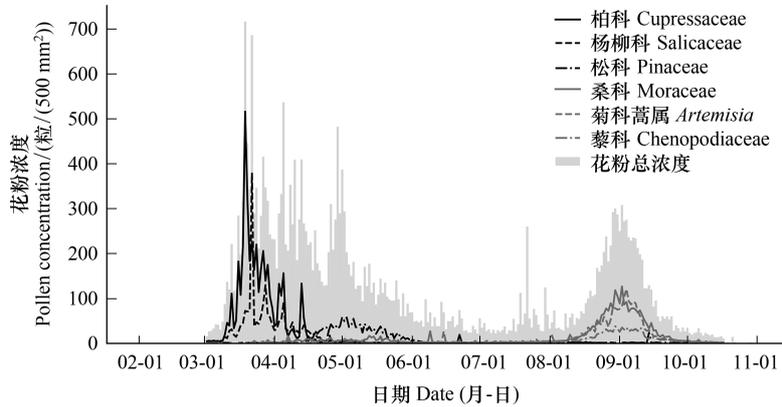


图3 北京地区花粉年总浓度和主要气传致敏花粉浓度变化规律

Fig.3 Variation of annual total pollen concentration and main airborne allergenic pollen concentration in Beijing

浓度占比为 57.4%,4 月中旬至 5 月中旬花粉浓度高峰期内优势花粉种类为豆科和松科植物花粉,8 月中旬至 9 月中旬花粉浓度高峰期内桑科、菊科蒿属和藜科植物花粉浓度占比总和为 77.7%。同时可以看到,北京地区 3 月上旬至 5 月中旬花粉浓度高峰期以木本植物为主,8 月中旬至 9 月中旬高峰期则以草本植物为主。

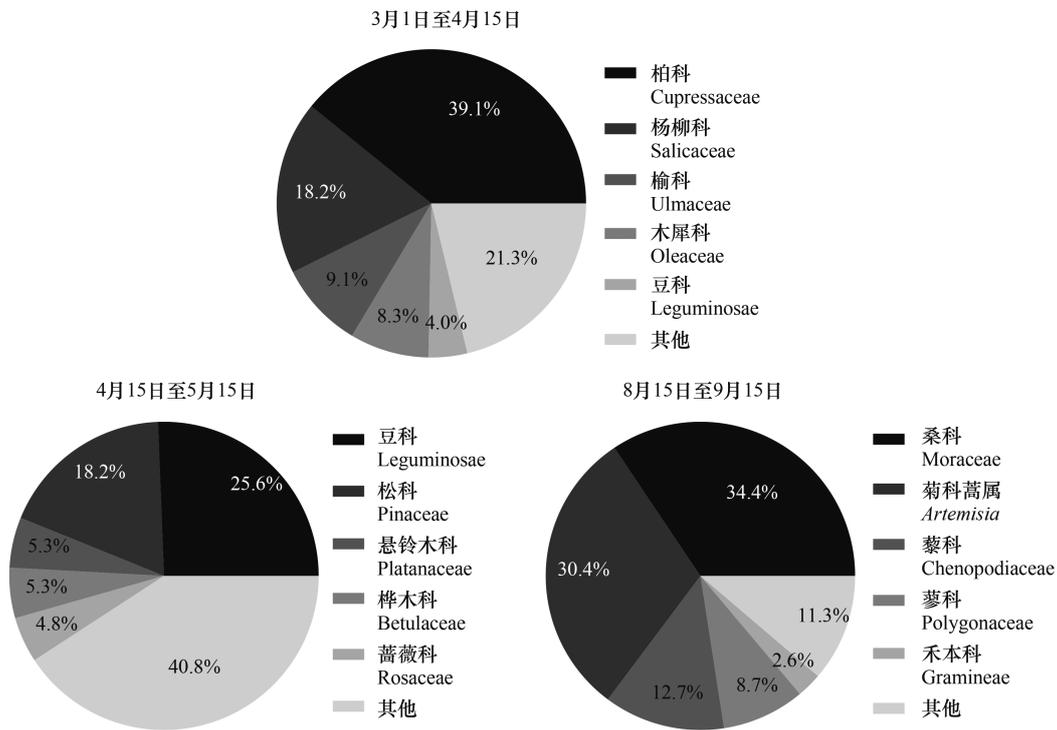


图4 北京地区 3 月 1 日至 4 月 15 日、4 月 15 日至 5 月 15 日和 8 月 15 日至 9 月 15 日不同种类花粉浓度比例

Fig.4 Concentration ratios of different kinds of pollen in Beijing from March 1 to April 15, April 15 to May 15 and August 15 to September 15

结合北京地区主要致敏花粉种类^[26-29],确定本研究以柏科、杨柳科、松科植物花粉为北京地区 3 月上旬至 5 月中旬花粉浓度高峰期内优势花粉种类,桑科、菊科蒿属、藜科植物花粉为 8 月中旬至 9 月中旬花粉浓度高峰期内优势花粉种类,其花粉浓度年变化规律如图 3 所示。

3.3 主要气传致敏花粉年浓度峰值及其对应日期年际、站间差异

对 2012 至 2020 年北京地区花粉年浓度高峰期内 6 种优势花粉种类(柏科、杨柳科、松科、桑科、菊科蒿属、藜科植物花粉)年浓度峰值存在不确定性的数据进行剔除后,分别对 6 种花粉在不同采样站点、不同年份下花粉年浓度峰值及其对应日期差异进行统计,结果如图 5 所示。

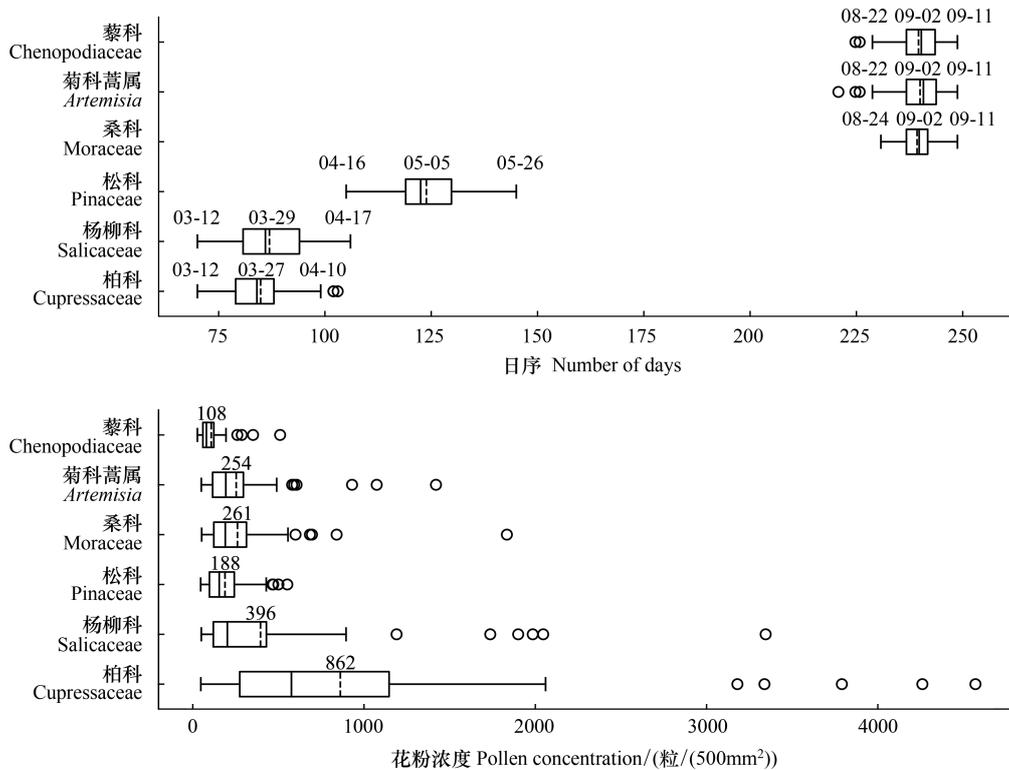


图 5 北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值及其对应日期差异情况

Fig.5 The difference of annual maximum concentration and corresponding date of main airborne allergenic pollen in Beijing

柏科和杨柳科花粉年浓度峰值主要出现在3月中旬到4月中旬,平均出现时间为3月底,松科花粉年浓度峰值对应日期波动范围较大,为4月中旬到5月下旬,平均出现时间为5月上旬。相较于3月上旬至5月中旬花粉浓度高峰期内优势花粉种类,8月中旬至9月中旬3种主要致敏花粉年浓度峰值日期波动范围较小,集中在8月下旬到9月上旬出现,平均出现时间为9月初。

对于同一种类花粉,其年浓度峰值存在采样站点间和年际间显著差异,年浓度峰值显著偏离平均值的情况普遍存在。而年浓度峰值对应日期的观测站点间和年际间差异较小,即花粉年浓度峰值出现时间的可预测性高于年浓度最大值的可预测性,因此花粉年浓度峰值对应日期的预测研究对于花粉症防治更具指导意义。

3.4 北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型

花粉浓度变化与致敏植物生育期、尤其是花期关系密切,而气象条件是直接影响植物生长发育的主要环境因素^[30]。作物模型以光、温、水、土壤等条件作为环境驱动变量,再现植物生长发育过程^[31]。基于作物模拟模型概念,采用模糊逻辑原理,可建立以气象要素为驱动数值模拟模型对致敏植物生长发育的生物学过程进行动态模拟^[32],从而实现气传致敏花粉浓度峰值出现日期的预测。针对上述北京地区花粉年浓度高峰期内优势花粉种类,本文选择可表征光、温、水等环境因素变化的气象要素累积值来描述气象条件对致敏植物生长发育的动态影响,基于多年各类花粉年浓度峰值日期对应当年多种气象要素累积值统计分析结果,建立北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型。

3.4.1 花粉年浓度峰值日期与气象要素累积值的相关性分析

使用剔除年浓度峰值存在不确定性的数据,基于北京地区 6 种主要气传致敏花粉(柏科、杨柳科、松科、桑科、菊科蒿属和藜科植物花粉)多站、多年的年浓度峰值对应日期及匹配的气象要素累积值数据,构建原始数据集。

选择有效积温、累积地表温度、累积降水量和累积日照时数表征温度、水分、光照等气象要素对致敏植物生长发育影响^[33]。使用原始数据集采用 Spearman 相关系数分别计算不同花粉年浓度峰值日期对应日序与气象条件累积值之间的相关性,结果如表 1 所示。6 种花粉年浓度峰值出现时间与不同气象要素累积值之间的相关性存在差异,有效积温、累积地表温度与花粉浓度峰值出现时间之间有较强相关性,而累积降水量和累积日照时数与花粉浓度峰值出现时间(尤其是桑科、菊科蒿属和藜科花粉)的相关性较弱,使用传统回归模型难以有效表达多种气象要素变化对花粉浓度峰值出现日期的综合影响,因此本文引入模糊逻辑原理,使用不同气象要素隶属度函数组合的形式描述光、温、水等环境条件对花粉浓度峰值出现时间的非线性影响。

表 1 气象要素累积值与花粉浓度峰值日序相关性分析

Table 1 Correlation analysis between cumulative values of meteorological elements and daily sequence of pollen maximum concentration						
气象要素累积值 Cumulative value of daily meteorological data	柏科 Cupressaceae	杨柳科 Salicaceae	松科 Pinaceae	桑科 Moraceae	菊科蒿属 Artemisia	藜科 Chenopodiaceae
有效积温/(°C·d) Effective accumulative temperature	0.43 **	0.62 **	0.79 **	0.88 **	0.87 **	0.91 **
累积地表温度/(°C·d) Accumulated surface temperature	0.69 **	0.76 **	0.83 **	0.79 **	0.87 **	0.84 **
累积降水量/mm Accumulated precipitation	0.28 **	0.52 **	0.46 **	0.18	0.21	0.32 *
累积日照时数/h Accumulated sunshine hours	0.62 **	0.67 **	0.74 **	0.32 **	0.45 **	0.32 *

* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 的水平上显著

3.4.2 隶属度函数的建立

对 6 种花粉分别随机选取原始数据集中 80% 的样本作为模型训练集,用于确定气象要素隶属度函数及其组合方式;剩余 20% 样本作为测试集,用于判断模型预测准确率。基于模型训练集,分别统计 6 种北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期对应有效积温、累积地表温度、累积降水量和累积日照时数的分布特征,具体方法如下。

以柏科花粉的有效积温隶属度函数建立为例:经统计,2012 至 2020 年北京地区 12 个花粉采样站柏科花粉年浓度峰值日期对应有效积温变化范围为 110°C·d 至 320°C·d,各区间对应个例数量如图 6 所示。将个例数最大值对应区间的隶属度设为 1,其余区间对应隶属度为本区间个例数与最大个例数的比值。最终基于划分区间与隶属度值计算结果,使用分段函数拟合气象要素分布规律,建立柏科花粉有效积温隶属度函数(图 6 虚线所示),其中分段函数拐点为个例数最大值对应区间左侧区间左端点及右侧区间右端点。

基于训练集数据统计得出北京地区 6 种主要气传致敏花粉年浓度峰值日期对应 4 种气象要素累积值分布规律(图 7、图 8)。依照上述隶属度函数拟合方式,分别建立柏科、杨柳科、松科、桑科、菊科蒿属和藜科花粉对应有效积温、累积地表温度、累积日照时数以及累积降水量的隶属度函数,函数具体表达式见附表 1。

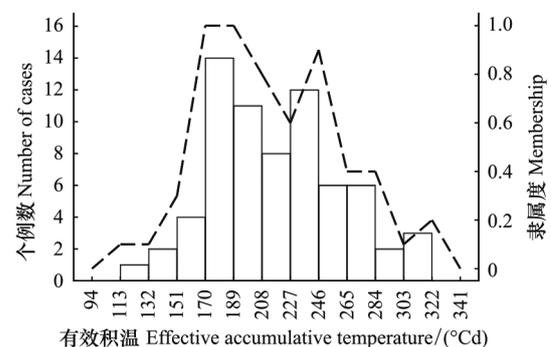


图 6 柏科植物花粉有效积温隶属度函数建立方式

Fig. 6 Establishment of effective accumulated temperature membership function of Cupressaceae pollen

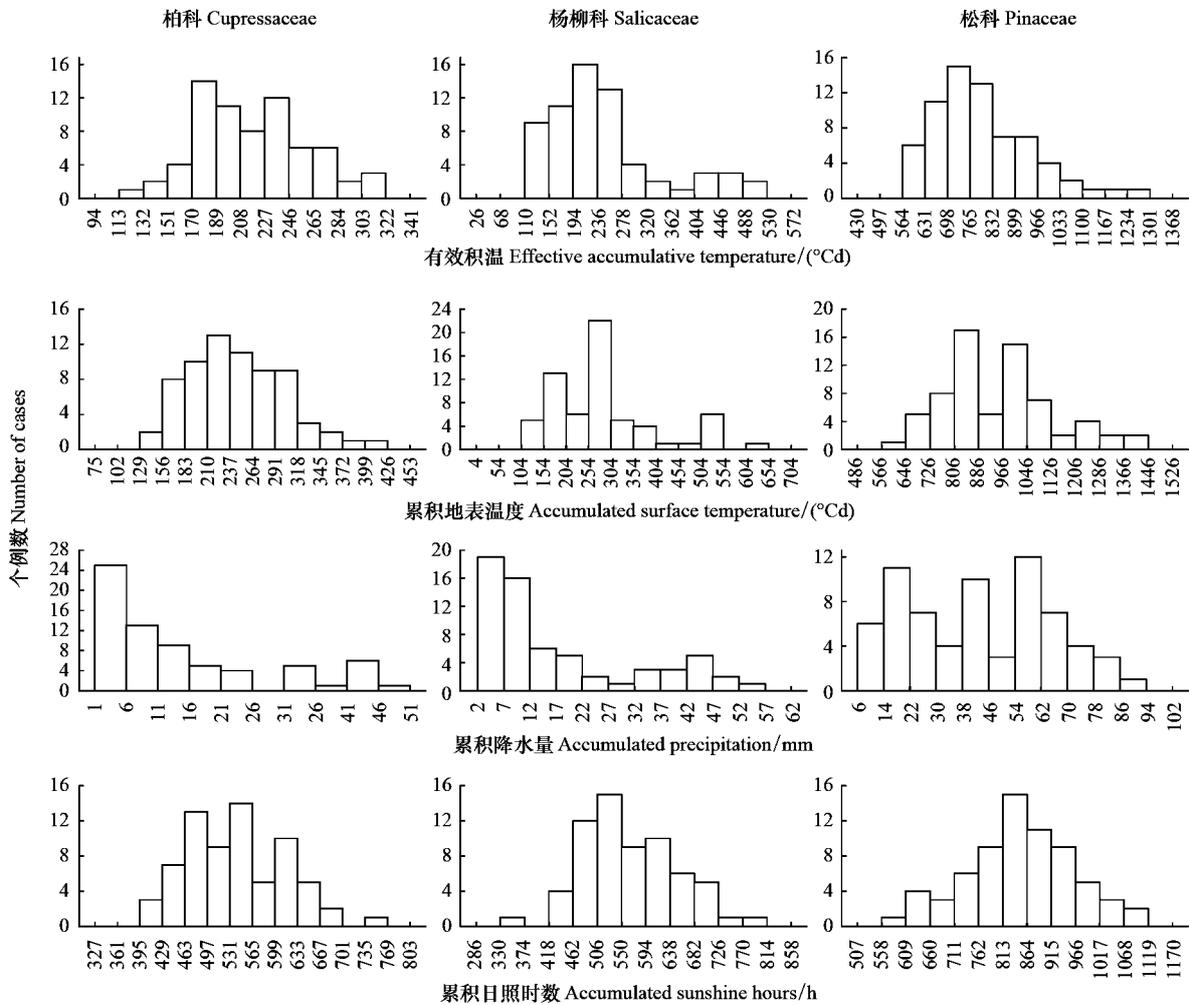


图 7 柏科、杨柳科和松科花粉年浓度峰值日期对应 4 种气象要素累积值分布规律

Fig.7 Distribution of cumulative values of four meteorological elements corresponding to the date of annual maximum concentration of Cupressaceae, Salicaceae and Pinaceae allergenic pollen in Beijing

基于上述北京地区 6 种主要气传致敏花粉隶属度函数拟合结果,使用模型训练集数据,通过排列组合方式,确定最优隶属度函数组合方式,具体筛选方法如下:

根据公式 $P = A \times B + (1 - A \times B) \times (C \times D)$, 设置 A、B、C、D 对应不同隶属度函数的全部组合方式,分别计算 6 种花粉在其每年花粉季中,逐日花粉浓度为该年浓度峰值的概率 P,选择其中最大值对应日期作为当年该种类花粉浓度达到峰值的日期。使用模型训练集计算每种花粉对应所有隶属度函数组合结果,筛选出年浓度峰值日期计算值与观测值绝对误差天数最小的组合形式,结果如表 2 所示。

表 2 主要气传致敏花粉对应气象要素隶属度函数组合形式

Table 2 Combination form of membership function of meteorological elements corresponding to main airborne allergenic pollen

花粉种类 Type of pollen	A	B	C	D
柏科 Cupressaceae	有效积温	累积日照时数	累积降水量	累积地表温度
杨柳科 Salicaceae	有效积温	累积日照时数	累积降水量	累积地表温度
松科 Pinaceae	有效积温	累积地表温度	累积日照时数	累积降水量
桑科 Moraceae	有效积温	累积日照时数	累积降水量	累积地表温度
菊科蒿属 Artemisia	有效积温	累积降水量	累积日照时数	累积地表温度
藜科 Chenopodiaceae	有效积温	累积降水量	累积日照时数	累积地表温度

A、B、C、D 分别表示公式 $P = A \times B + (1 - A \times B) \times (C \times D)$ 中对应的隶属度函数

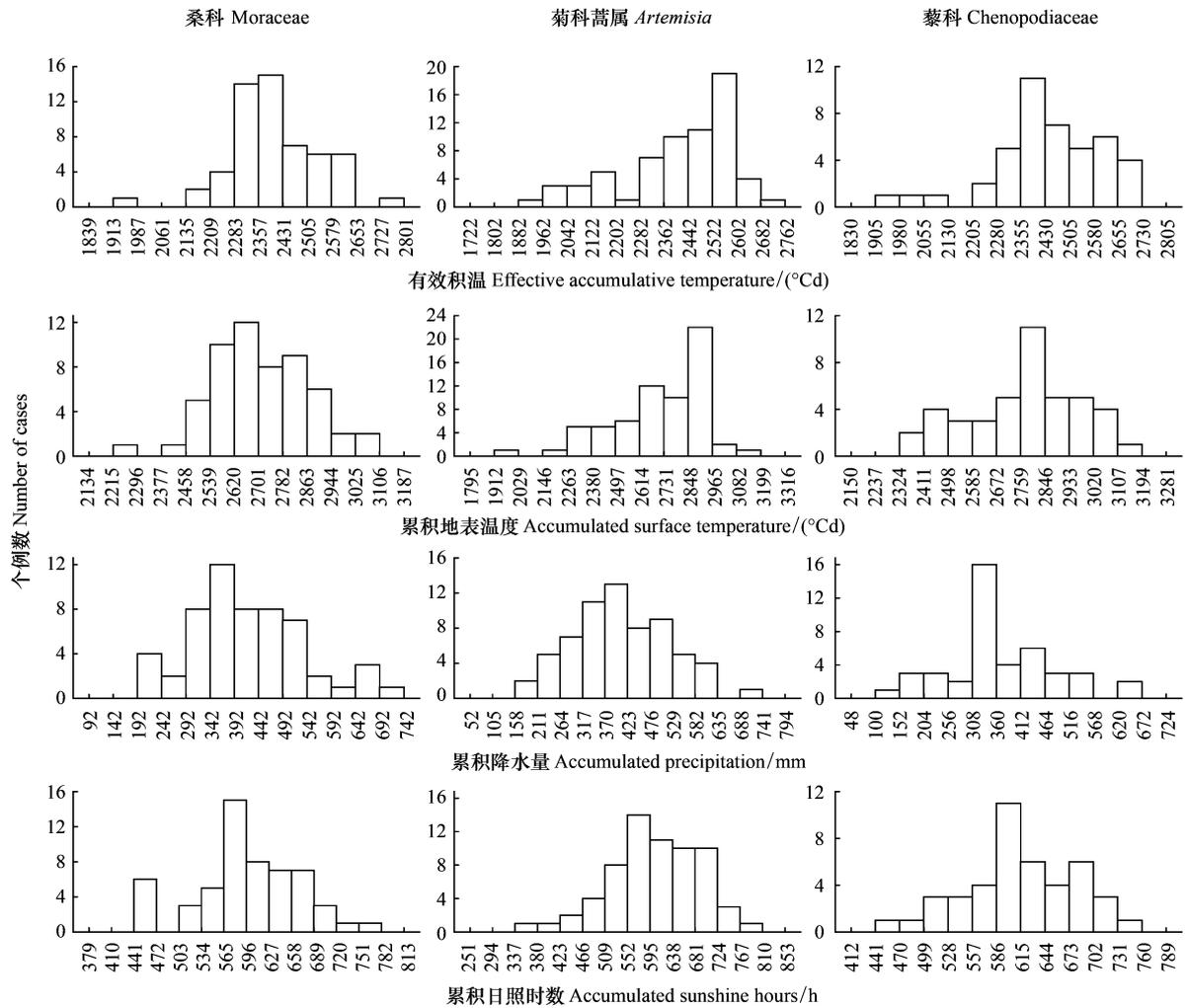


图 8 桑科、菊科蒿属和藜科花粉年浓度峰值日期对应 4 种气象要素累积值分布规律

Fig.8 Distribution of cumulative values of four meteorological elements corresponding to the date of annual maximum concentration of Moraceae, Artemisia and Chenopodiaceae pollen in Beijing

由隶属度函数组合方式筛选结果可以看到,3月上旬至5月中旬花粉浓度高峰期内主要气传致敏花粉对应的木本植物生长对气温和日照时数条件敏感,而8月中旬到9月中旬花粉浓度高峰期内优势花粉种类对应的草本植物生长对气温和降水条件更敏感。

3.4.3 模型预测效果检验

对柏科、杨柳科、松科、桑科、菊科蒿属以及藜科花粉年浓度峰值日期预测模型,分别使用对应测试集验证模型预测准确率。检验结果为 5 次随机分组检验结果的平均值,不同种类花粉对应模型检验结果如表 3 所示。

柏科和桑科花粉对应模型预测准确率较高,预测平均绝对误差值约 4d,杨柳科、菊科蒿属和藜科花粉对应模型预测准确率在 80%左右,平均绝对误差在 5d 左右,松科花粉对应模型预测准确率较其他花粉对应模型较差,预测平均误差以及预测结果波动性较大。整体看,基于模糊逻辑隶属度函数建立的北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型可以较为准确地预测出不同种类花粉年浓度峰值出现时间,从而为北京地区花粉症防治工作开展提供理论依据。

表 3 模型检验结果

Table 3 Model test results

花粉种类 Type of pollen	测试集样本量 Number of samples in test set	准确率 Accuracy/%	MAE/d	RMSE/d
柏科 Cupressaceae	18	87.8	4.07	4.86
杨柳科 Salicaceae	16	80.0	4.98	6.79
松科 Pinaceae	18	64.4	7.30	9.21
桑科 Moraceae	15	86.7	4.03	5.50
菊科蒿属 <i>Artemisia</i>	17	78.8	5.31	6.93
藜科 Chenopodiaceae	11	81.8	4.53	6.01

MAE:平均绝对误差 Mean absolute error;RMSE:均方根误差 Root mean square error

4 讨论

4.1 花粉分类精度对模型性能的影响

本研究建模使用的花粉分类原始数据,除菊科蒿属外,其余花粉采集样本均为分类到科数据。对于北京地区而言,柏科、杨柳科、松科、桑科、藜科均包含多种不同属植物^[34],其花期以及花粉年浓度峰值出现时间等均存在不同程度的差异。因此本文建立的花粉年浓度峰值日期预测模型性能在一定程度上受原始观测数据的花粉分类精度限制,柏科、杨柳科和松科花粉对应模型预测准确率的差异,可能与该科数据中所含属之间花期等因素的差异性有关,北京地区松科花粉对应植物多样性及差异性较大可能是导致模型预测准确率较低的主要原因之一。

花粉分类精度对模型性能的影响还体现在不同属植物之间在生物学下限温度、花期影响因素等生物学特性的差异不确定性上。本研究在计算不同种类花粉年浓度峰值日期对应有效积温时,生物学下限温度均采用0℃。前人研究表明不同下限温度设定对植物花期模拟有影响^[35],对于生物学下限温度等生长发育适宜气象条件明确的致敏植物,在建立对应气象条件隶属度函数的过程中应考虑其生物学特性,以增强模型机理性。本研究中同一科不同属植物间生物学下限温度的差异对有效积温隶属度函数具体形式的影响,进而对模型性能的影响有待进一步研究。同时本研究计算气象要素累积值的起始时间为固定值,研究表明不同植物在各生育期内对不同气象要素的敏感性存在差异^[36],对于种类确定植物应选取对花期影响最显著气象要素的最显著影响时段,建立对应气象要素的隶属度函数。由于原始数据分类精度限制,本研究建模过程中不同花粉对应气象要素累积值计算起始时间的确定有待进一步研究,其对模型性能的影响仍存在不确定性。

4.2 前期气候条件和临近天气条件对花粉年浓度峰值日期预测的影响

本文基于作物模型概念,使用模糊逻辑原理建立了北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型,模型以气象要素累积值为驱动,可逐日动态判断花粉季内每日不同种类花粉浓度达到峰值的可能性。前人研究表明,前期气候条件对植物花期等物候有重要影响^[37-38],同时天气条件对当日花粉浓度变化也存在显著影响^[13-14]。因此在应用本研究建立模型预测花粉年浓度峰值日期时应考虑前期气候条件与临近天气变化对模型预测结果进行合理修正。

基于本研究建模原始数据集,对柏科、杨柳科和松科花粉年浓度峰值出现日期对应日序与前一年冬季(前一年12月至当年2月)气象条件的相关性进行分析。结果表明当年花粉浓度峰值出现时间与前一年冬季平均气温和平均地表温度存在负相关关系,柏科花粉对应负相关系数大于0.7(表4)。研究表明气象条件对花粉浓度的影响存在滞后性^[39],在实际应用模型预测当年花粉浓度峰值出现日期时,应考虑前期气候条件对模型预测结果进行合理修正。

基于逐日花粉浓度观测数据,分析逐日气象要素的变化对当日花粉浓度的影响,结果如图9所示。花粉日浓度高值集中出现在5—20℃气温区间内,当气温低于5℃或高于20℃时,花粉日浓度出现高值的可能性较小。在较低气压和较高水汽压(高湿)的情况下,花粉日浓度出现高值的概率较小,同时降水对于花粉日浓

度有明显抑制作用。当日平均风速过小或大于 4 m/s 时,花粉日浓度出现高值的可能性较小,在偏西风情况下(西北或西南),花粉浓度出现高值的可能性较大。上述结论与其他研究结果相似^[12-14],即某日花粉浓度受当日气温、气压、湿度、降水和风向风速等气象要素影响明显,在特定天气条件下,花粉日浓度出现高值的可能性较大。在使用本研究建立模型预测花粉年浓度峰值日期时,除考虑前期气候条件对花粉年浓度峰值日期影响外,还应考虑预测日期前后具体天气情况,对预测结果进行修正。

表 4 花粉年浓度峰值日期与前期气候条件相关性分析

Table 4 Correlation analysis between the date of annual pollen maximum concentration and the preceding climatic conditions

前期气候条件 Climate condition	柏科 Cupressaceae	杨柳科 Salicaceae	松科 Pinaceae
冬季平均气温 Average winter temperature/°C	-0.72 **	-0.32 **	-0.43 **
冬季平均地表温度 Average winter surface temperature/°C	-0.71 **	-0.46 **	-0.43 **

** 表示在 1% 的水平上显著

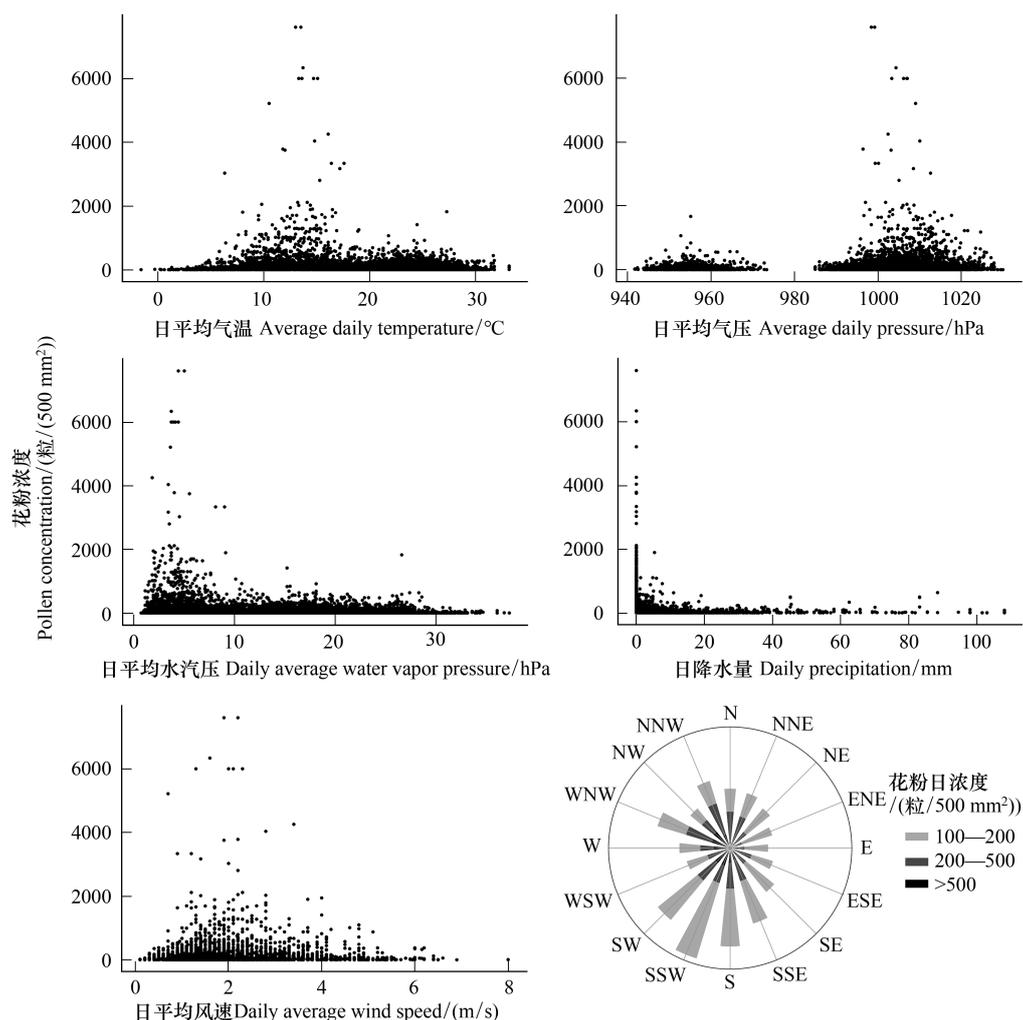


图 9 逐日花粉浓度与当日气象要素关系

Fig.9 Relationship between daily pollen concentration and meteorological elements of the day

5 结论

本文基于 2012 至 2020 年北京地区 12 个花粉采样站点花粉季逐日分类浓度观测数据,对北京地区花粉

年浓度变化规律、年浓度高峰期内优势花粉种类及其浓度峰值出现日期特征等进行分析,并基于作物模型概念和模糊逻辑原理,以花粉年浓度峰值日期对应气象要素累积值为核心,针对北京地区主要气传致敏花粉分别建立了年浓度峰值日期预测模型。本研究主要结论如下:

(1)北京地区花粉浓度年变化规律呈现双峰型,总浓度高峰期分别出现在3月上旬至5月中旬以及8月中旬至9月中旬,其中3月上旬至5月中旬花粉浓度高峰期可进一步划分为3月中旬至4月上旬以及4月下旬至5月上旬两个高峰期。

(2)北京地区3月上旬至5月中旬花粉浓度高峰期内优势致敏花粉种类为柏科、杨柳科和松科,其中3月中旬至4月上旬致敏花粉以柏科、杨柳科为主,4月下旬至5月上旬致敏花粉以松科为主;而8月中旬至9月中旬花粉浓度高峰期内优势致敏花粉种类为桑科、菊科蒿属和藜科植物花粉。

(3)基于作物模型概念和模糊逻辑原理,使用花粉年浓度峰值日期及其对应气象要素累积值(有效积温、累积地表温度、累积降水量、累积日照时数),建立北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测模型。经检验,柏科、杨柳科、桑科、菊科蒿属和藜科花粉年浓度峰值日期预测模型预测准确率分别为87.8%、80.0%、86.7%、78.8%和81.8%,松科花粉模型预测准确率较低为64.4%。使用基于模糊逻辑隶属度函数、以气象要素累积值作为驱动的花粉年浓度峰值日期预测模型,综合花粉季前期气候条件以及花粉季内天气变化,以北京区域高分辨率数值预报模式作为输入,可实现北京地区主要气传致敏花粉年浓度峰值日期分区预测,为花粉症防治提供理论参考。

参考文献(References):

- [1] Ugolotti M, Pasquarella C, Vitali P, Smith M, Albertini R. Characteristics and trends of selected pollen seasons recorded in Parma (Northern Italy) from 1994 to 2011. *Aerobiologia*, 2015, 31(3): 341-352.
- [2] Lou H, Ma S, Zhao Y, Cao F, He F, Liu Z, Bousquet J, Wang C, Zhang L, Bachert C. Sensitization patterns and minimum screening panels for aeroallergens in self-reported allergic rhinitis in China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9286.
- [3] 张静虹,石君,高月玲,侯凤玲,马海燕.气传花粉与花粉症患者就诊人次关系分析. *宁夏医学杂志*, 2016, 38(7): 604-605.
- [4] Guilbert A, Simons K, Hoebeke L, Packeu A, Hendrickx M, De Cremer K, Buyl R, Coomans D, Van Nieuwenhuysse A. Short-term effect of pollen and spore exposure on allergy morbidity in the Brussels-capital region. *EcoHealth*, 2016, 13(2): 303-315.
- [5] Caillaud D, Martin S, Segala C, Besancenot J P, Clot B, Thibaudon M, French Aerobiology Network. Effects of airborne birch pollen levels on clinical symptoms of seasonal allergic rhinoconjunctivitis. *International Archives of Allergy and Immunology*, 2014, 163(1): 43-50.
- [6] 贾宝全.基于TM卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析. *生态学报*, 2013, 33(5): 1654-1666.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,逯非.北京城区气传花粉季节分布特征. *生态学报*, 2013, 33(8): 2381-2387.
- [10] 乔媛,尹焯寅,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.
- [11] 赵德(鹤)宇,叶彩华,王宇飞,姚铁锋.京津冀地区气传花粉数据分析. *植物学报*, 2021, 56(6): 751-760.
- [12] 李英,李月丛,吕素青,许清海.石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(6): 1575-1586.
- [13] 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环.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.
- [14] 刘宜纲,吕世华,刘建忠,刘文军,黄开龙,张嘉仪,欧阳显辉,李瑛.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.
- [15] 欧阳显晖,张罗.花粉过敏的防御和治疗. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2020, 27(4): 177-179.
- [16] Adams-Groom B, Emberlin J, Corden J, Millington W, Mullins J. Predicting the start of the birch pollen season at London, Derby and Cardiff, United Kingdom, using a multiple regression model, based on data from 1987 to 1997. *Aerobiologia*, 2002, 18(2): 117-123.
- [17] 吴振玲,宛公展,白玉荣,段丽瑶,刘彬贤.72小时气传花粉预测模型研究.中国颗粒学会第六届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集(下). 上海, 2008: 14-17.
- [18] 徐景先,李耀宁,张德山.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.

- [19] 张德山, 海玉龙, 冯涛, 吴振玲, 何海娟, 张姝丽, 储伟, 宛公展. 北京地区 1—4 天花粉浓度预报的应用研究. 气象, 2010, 36(5): 128-132.
- [20] 赵文芳, 王京丽, 尚敏, 刘亚楠. 基于粒子群优化和支持向量机的花粉浓度预测模型. 计算机应用, 2019, 39(1): 98-104.
- [21] 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.
- [22] Khwarahm N R, Dash J, Skjøth C A, Newnham R M, Adams-Groom B, Head K, Caulton E, Atkinson P M. Mapping the birch and grass pollen seasons in the UK using satellite sensor time-series. The Science of the Total Environment, 2017, 578(feb.1): 586-600.
- [23] Zadeh L A. Fuzzy logic. Computer, 1988, 21(4): 83-93.
- [24] Cornelius T. Leondes. Fuzzy Logic and Expert Systems Applications. Academic Press, 1998:57-60.
- [25] 仲舒颖, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯. 中国典型观赏植物花期模型建立及过去花期变化模拟. 资源科学, 2017, 39(11): 2116-2129.
- [26] 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.
- [27] 李攀, 何海娟, 孙国强, 汤蕊, 顾建青, 孙劲旅. 北京市区与过敏相关的气传花粉. 基础医学与临床, 2015, 35(6): 734-738.
- [28] 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.
- [29] 宁慧宇, 王洪田, 陈艳蕾, 王学艳. 北京城区春季花粉与过敏性疾病就诊比例分析. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021, 28(2): 98-100, 104.
- [30] 马玉平, 王石立, 王馥棠. 作物模拟模型在农业气象业务应用中的研究初探. 应用气象学报, 2005, 16(3): 293-303.
- [31] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究进展. 气象科技, 2002, 30(4): 193-203.
- [32] 杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 张忠庆. 作物模型研究进展. 吉林农业大学学报, 2012, 34(5): 553-561.
- [33] 段若溪, 姜会飞. 农业气象学. 2 版. 北京: 气象出版社, 2013.
- [34] 周江鸿, 夏菲, 李洁, 李秋月, 王建红, 车少臣, 张国锋. 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): 117-122.
- [35] 叶彩华, 周孝煌, 姜会飞, 姜少杰, 张玉莹, 张子源, 李超. 下限温度对北京樱花盛花始期模拟效果的影响. 中国农业气象, 2018, 39(1): 1-8.
- [36] 韩小梅, 申双和. 物候模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(1): 89-95.
- [37] 陈正洪, 肖玫, 陈璇. 樱花花期变化特征及其与冬季气温变化的关系. 生态学报, 2008, 28(11): 5209-5217.
- [38] 孙明, 徐敏, 高苹, 艾文文, 张志薇. 气象条件对悬铃木始花期的影响分析及预报模型构建——以江苏兴化为例. 气象, 2021, 47(7): 862-871.
- [39] 郝日明, 张璐, 张明娟, 向其柏, 臧德奎. 影响南京地区桂花秋季开花期变化的关键气候因子研究. 植物资源与环境学报, 2006, 15(3): 31-34.