胡祉懿,孙兆彬,张 宇,等.气传致敏花粉爆发性增长过程的气象成因分析 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):503-514.
Hu Z Y, Sun Z B, Zhang Y, et al. Analysis of meteorological drivers during the explosive growth process of airborne allergenic pollen [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):503-514.

气传致敏花粉爆发性增长过程的气象成因分析

胡祉懿[1],孙兆彬[2*],张 宇[1*],张 涵[1],马 锋[3],张 勇[4],唐 源[1] (1.广东海洋大学海洋与气象学院,广东 湛江 524090；2.中国气象科学研究院(CAMS),灾害天气科学与技术全国重点实验室(LASW),北京 100081；3.榆林市气象局,陕西 榆林 719000；4.富景天测(北京)科技有限公司,北京 100094)

摘要：气象条件对花粉浓度具有显著影响,本研究以我国花粉发病率最高的城市之一——陕西省榆林市为例,使用 2019~2021 年花粉浓度数据、气象数据,采用统计分析和天气学诊断的方法,分析了 2021 年 8 月 4~7 日榆林市一次花粉浓度爆发性增长过程的气象成因.结果表明:榆林市花粉浓度变化具有典型的季节性特征,呈现春秋两季双峰型.温度升高与低湿度环境共同触发沙蒿花药开裂,而 1.5~3.0m/s 风速区间有利于花粉扩散效率.研究时段内较大的近地面风速为花粉局地扩散提供了动力条件,但多变的风向阻碍了稳定传输通道的形成,造成花粉累积.就环流形势而言,高空槽脊转换与中低层反气旋活动是花粉累积的关键动力条件,下沉运动通过降低边界层高度及形成逆温层显著抑制大气扩散能力.总云量通过调控地表辐射收支与垂直运动,进一步影响边界层热力结构,低云量时段与边界层压缩的协同是浓度日累积高峰形成的关键气象因素.

关键词：气传花粉；爆发性；气象因素；下沉运动；逆温
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0503-12

Analysis of meteorological drivers during the explosive growth process of airborne allergenic pollen. HU Zhi-yi[1], SUN Zhao-bin[2*], ZHANG Yu[1*], ZHANG Han[1], MA Feng[3], ZHANG Yong[4], TANG Yuan[1] (1.College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524090, China；2.State Key Laboratory of Severe Weather (LASW), Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China；3.Yulin Meteorological Bureau, Yulin 719000, China；4.Future Weather(Beijing) Technology Group Ltd, Beijing 100094, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：503~514

Abstract：Meteorology is a known driver of pollen concentrations, using Yulin City in Shaanxi Province—a hotspot for pollen allergies in China—as a case study, this research integrates 2019~2021 pollen concentration data and meteorological observations. Through statistical analysis and synoptic diagnosis, we investigate the meteorological drivers of an explosive pollen surge from August 4~7, 2021. Key findings reveal:Pollen concentrations in Yulin show a clear bimodal seasonality with spring and autumn peaks. Anther dehiscence in Artemisia ordosica is triggered by rising temperature and low huidity, with winds of 1.5~3.0m/s being optimal for dispersal. Enhanced near-surface winds during the event facilitated local dispersion, but shifting wind directions impeded stable transport pathways, promoting localized accumulation. Synoptic diagnosis shows that a transition from upper-level through to a ridge, combined with mid-low-level anticyclonic activity, was critical. This pattern promoted subsidence, which suppresses atmospheric diffusion by reducing boundary-layer height and forming temperature inversions. Total cloud cover modulates surface radiation budgets and vertical motions, thereby influencing boundary-layer thermal structure. The key driver of the diurnal peaks was the synergy between periods of low cloud cover (<2oktas) and boundary-layer compression.

Key words：airborne pollen；explosive growth；meteorological factors；sinking movement；inversion temperature

气传致敏花粉是指由风媒植物产生的直径 15~30μm 的颗粒物(PM),可附着于大气气溶胶进行远距离传输,属于重要的环境空气污染物[1].这类花粉颗粒已被证实是诱发哮喘、过敏性鼻炎等呼吸道疾病的重要致敏原[2].近年来,随着气候不断变暖,气传致敏花粉的生态特征及其气候响应机制研究已成为环境健康领域的热点问题.

研究表明,我国气传致敏花粉具有明显的季节性分布规律:春季以乔木花粉(如柏科、杨柳科)为主,夏秋季则以草本植物花粉(如蒿属、豚草属)为主导[3-12].花粉浓度呈现典型的双峰型分布特征,即春季(3~5 月)和夏秋季(7~9 月)两个明显高峰[3-4,11-12].

收稿日期：2025-09-26
基金项目：中国气象局创新发展专项重点项目(CXFZ2025J074)
* 责任作者：孙兆彬，研究员，szb850804@163.com，张 宇，副教授，zhangyu2@gdou.edu.cn

这种分布格局与不同植物类群的花期物候特征密切相关.

近年观测表明,花粉浓度的爆发性增长是气候变暖与城市化协同驱动的现象:一方面,物候变化能够驱使单类群授粉趋同或发散,温度与降水导致日花粉排放峰值波动达−35%~40%,并使年花粉总排放量增加 16%~40%[13];另一方面,城市绿地扩张导致潜在的致敏性花粉种类和数量迅速增加.乔灌草等复合式植物密集群落形成冠层滞留效应,抑制花粉扩散[14-15].多项研究采用 Spearman 秩相关分析和多元回归方法,建立了花粉浓度与气象要素的定量关系.结果表明,气温和气压是影响花粉浓度的关键气象因子,其次为降水和风速[4-5].从天气尺度来看,高压控制下的静稳天气条件最有利于包括花粉在内的气溶胶粒子积累.当高压系统持续影响时,大气垂直扩散能力减弱,可导致花粉浓度呈爆发性增长[6].植物物候学研究揭示了花粉季节变化的驱动机制.研究发现,授粉前 1 个月高于 5℃和 7℃阈值的积温是决定花粉季节开始时间的关键指标,而累积降水量和累积日照时数与花粉浓度峰值出现时间的相关性较弱[7-9].气候变暖背景下,授粉前期的升温促使花粉季节提前,而授粉期间的升温则会缩短花粉季节持续时间[8].这种物候变化对花粉过敏的流行病学特征产生了深远影响.

在全球气候变化背景下,我国秋冬季频发的复合型大气污染问题日益凸显.然而,现有研究多聚焦于 $PM_{2.5}$ 等常规污染物的气象成因[16-18],对于重要的生物气溶胶——花粉浓度爆发性增长现象的研究极少.陕西省榆林市是我国花粉过敏症发病率最高地区之一.1958~2014 年间实施的沙蒿飞播造林工程显著改变了北方生态格局.监测数据显示,5000km^2 的造林面积中已约有 2666.7km^2 形成稳定群落,导致沙蒿花粉成为当地主导性过敏原[19].流行病学调查表明,儿童患者中沙蒿花粉致敏比例高达 59.8%,且呈现持续上升趋势[20].榆林市经济发展主要依赖以煤炭为首的能源开采和利用[21],可能会加剧花粉对居民健康的影响.因此本研究选择榆林市榆阳区作为研究区域.当前花粉过敏防治主要依赖三级预防策略:初级预防强调过敏原回避,二级预防采用特异性免疫治疗,三级预防则通过药物干预缓解症状[22].然而,这些措施的有效实施亟需精准的花粉预报系统作为支撑.因此,解析花粉爆发性增长的气象驱动机制,不仅能为建立预警模型提供理论基础,更能为区域公共卫生决策提供科学依据.

本研究通过分析陕西省榆林市榆阳区 2019~2021 年花粉数据,参考 $PM_{2.5}$ 爆发性增长定义原则[23-24],将在 3d 内花粉数量迅速升至原来的 1.8 倍及以上,最高值超过全年花粉数量排序的 97%的过程定义为一次花粉爆发性增长过程.通过分析爆发性增长过程及临近日期的各气象因素的变化特征探究利于花粉释放的气象条件,并结合高低空环流形势归纳爆发性增长过程的天气形势以及边界层结构,以期揭示花粉浓度爆发增长的气象学成因.

1 研究方法

1.1 榆阳区概况

如图 1 所示,榆林市(37°45′~38°40′N,109°12′~110°03′E)地处陕西省北部,位于毛乌素沙漠南缘与黄土高原北端的地理过渡带,是我国北方典型的生态脆弱区与治理示范区.该区域属温带大陆性季风气候,对气候变化响应明显.榆林市呈现“北沙−中川−南丘”三级地貌梯度:北部风沙草滩区面积占比 45%,作为国家防沙治沙综合示范区,其沙地植被以黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)为建群种[28],形成独特的灌草复合生态系统;中部河谷川道区沿无定河呈带状分布,平均海拔 900~1100m,耕地垦殖率达 62%,承载着全区 78.3%的常住人口及 83%的经济产出;南部黄土丘陵沟壑区植被覆盖度不足 30%,被列入黄河粗泥沙集中来源区国家级重点治理工程.

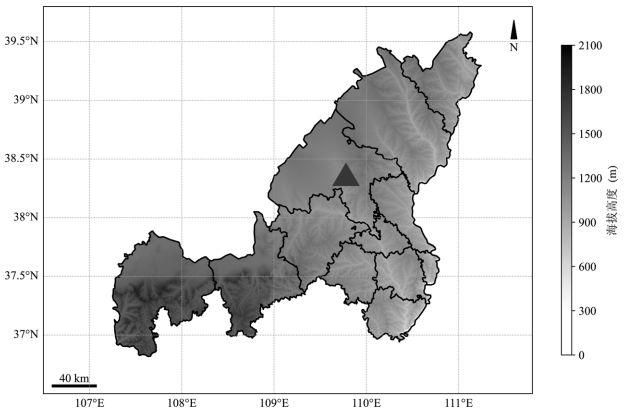


图 1 榆林市行政区划与地形示意

Fig.1 Schematic map of administrative divisions and topography in Yulin City

三角代表榆阳区

1.2　花粉浓度数据

本研究采用重力沉降法(Gravitational Sedimentation Method)进行气传花粉监测,基于花粉颗粒密度显著高于空气的物理特性,通过统计 24h 内花粉颗粒的累积沉降量进行分析,过程如下:由经验丰富的实验人员取洁净载玻片,在中心涂抹一层凡士林胶粘剂,用于固定空气中的沉降颗粒.在标注日期和位置后,将载玻片置于观测点,暴露于空气中 24h.为确保数据有效性,实验人员需每日定时放置并回收载玻片.玻璃载玻片每 24h 更换一次.花粉载玻片经染色固定处理后,使用琼脂甘油碱性品红染色法进行染色,经专业培训的观测员在光学显微镜下进行分类计数.使用 10 倍物镜判断是否为花粉或其他颗粒,采用 20 倍物镜确认具体花粉类型.若花粉破碎或因其他条件导致难以通过 10×倍目镜清晰观察时,需将样本归类至相应科属.采用首位观测员完成全样本计数与分类,次位观测员独立复检并补充遗漏颗粒的方法确保数据质量.数据获取自榆阳区花粉监测站点,位置如图 1 三角所示.有效观测时段为:2019 年 8 月 26 日~12 月 31 日,2020 年全年, 2021 年 1 月 1 日~10 月 31 日.

1.3　气象数据

地面气象数据获取自榆林市气象局,涵盖平均气压、最低气压、平均温度、最低温度、平均相对湿度等基础气象要素,以及分段降水量观测数据(20:00~08:00、08:00~20:00、20:00~20:00、08:00~08:00)和平均 2min 风速记录.

大尺度气象场数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析资料,包含:(1)6h 间隔的 500 和 850hPa 位势高度场数据(0.25°×0.25°),用于构建大气环流背景场(2)日平均边界层高度和总云量数据(0.5°×0.5°)(3)UTC 00:00 时、06:00 时、12:00 时地面海平面气压场及 10m 风速场(0.25°×0.25°),用于分析近地面环流特征(4)700hPa 以下小时分辨率的三维气象要素(温度、相对湿度、垂直速度)(0.25°× 0.25°),用于构建风廓线模型(5)700hPa 以下小时分辨率的风的 u、v 分量(0.25°×0.25°),用于计算散度场和温度平流.

1.4　数据预处理方法

通过数据清洗剔除榆阳区气象日数据清单和近 3 年花粉浓度汇总中的缺失值后,使用格拉布斯准则排除统计异常值,其公式如下:

$$G=\frac{(x_i-\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i)}{n})}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}} \tag{1}$$

式中:n 为样本量.当 $G<G(n)$时,可疑值无需剔除.

对处理后的花粉数据进行排序,筛选全年花粉浓度分布的 90th、95th 及 97th 百分位阈值.并根据数据特征界定花粉浓度爆发性增长事件.

对于全部爆发性增长过程计算各地面气象数据与花粉浓度的相关性,其表达式为:

Pearson 相关系数公式:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{2}$$

双尾 t 检验公式:

$$t=\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}},df=n-2 \tag{3}$$

式中:n 为样本量,df 为自由度.显著性检验以 a=0.01 为阈值,通过计算 P 值评估相关性统计显著性.

温度、相对湿度、垂直速度等要素的时空特征与大气环流场分析采用 python(3.11.9)进行可视化绘图.

2　结果与分析

2.1　榆阳区花粉浓度年内变化特征及爆发性过程筛选

由图 2 可知,榆阳区花粉释放开始于 2 月下旬,结束于 10 月底.全年花粉浓度呈春秋两季双峰型,夏季花粉浓度很低.在观测期间,秋季花粉数量峰值为春季峰值的 2.48~2.88 倍.具体而言,2019~2021 年秋季峰值事件表现为:因 2019 年秋季花粉数据由 9 月 1 日开始,当年只于 9 月 9 日观察到一个极值(1018 粒/kmm^2);2020 年观测到双峰结构,分别于 9 月 5 日(828 粒/kmm^2)和 9 月 21 日(825 粒/kmm^2)达到极大值;2021 年则呈现前移趋势,峰值发生于 8 月 7 日(986 粒/kmm^2)和 9 月 8 日(1097 粒/kmm^2).

结合区域植被调查与地形特征分析,沙蒿(*Artemisia desertorum*)被确认为秋季花粉优势种源.该多年生草本植物具有显著物候特征:3 月下旬至 4 月上旬萌发,7~9 月进入生殖生长期,通过风媒传

粉机制实现高效繁殖.其“集中开花模式”(Mass-flowering strategy)表现为种群级同步开花行为,在适宜气象条件下可引发大气花粉浓度指数级增长[29].基于此生物学属性,本研究确立的爆发事件量化标准包含两项核心指标:其一为时间维度,要求花粉数量在 3 日内增至初始值的 1.8 倍及以上;其二为量级维度,要求增长后的峰值超过全年花粉数量排序的 97%.上述两项指标需同时满足,方可判定为一次爆发过程.依据该标准,共识别出 5 次典型爆发过程(表 1).

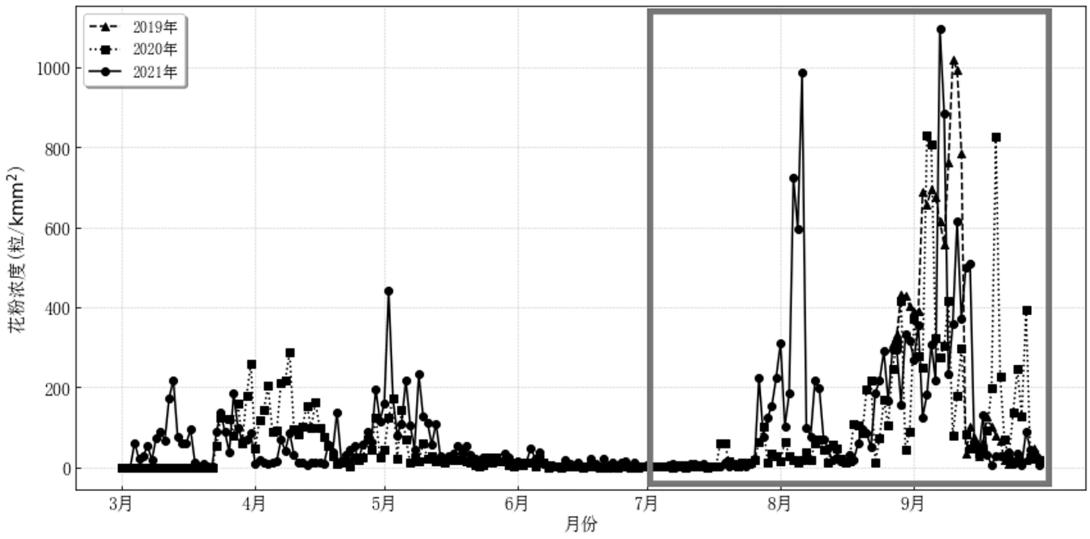


图 2 2019~2021 年榆阳区花粉浓度时间序列图

Fig.2 Time series of pollen concentration in Yuyang from 2019 to 2021

因其余 4 次爆发性增长过程持续时间相对短暂,本研究仅选取一次时间最长的过程——2021 年 8 月 4~7 日的爆发性增长过程(简称“事件 4”)进行详细分析.

表 1 五次花粉浓度爆发性增长过程

Table 1 Data table of five pollen concentration surge events

爆发性增长过程	日期	起始花粉浓度(粒/kmm²)	终止花粉浓度(粒/kmm²)	增长百分比(%)
1	2019-09-07~09-09	557	1018	183
2	2020-09-04~09-05	251	828	330
3	2020-09-20~09-21	199	825	415
4	2021-08-04~08-07	184	986	536
5	2021-09-07~09-08	217	1097	506

2.2 花粉浓度爆发性增长的气象成因分析

2.2.1 地面气象因子分析 本研究统计、筛选、分析全部事件中各气象因子与花粉浓度的变化趋势得出以下结论:在花粉浓度爆发性增长过程中(1)首日 24h 变温均为正值,即日平均温度呈上升趋势,推测由日照时数增长导致;(2)日平均相对湿度较低,均在 70%以下;(3)平均 2min 风速均在 1.5~3m/s 之间;(4)91.7%日数无降水.其余的气象因子与花粉数量的关系较为复杂,未见明显规律.

对于事件 4,如图 3 所示,2021 年 8 月 4~7 日,榆阳区花粉浓度呈现“指数激增-短暂下降-达到峰值”的阶段性演变特征.8 月 4 日初始阶段,花粉浓度处于基础水平,为 184 粒/kmm².当日日平均温度为 24.6℃,平均相对湿度为 46.3%,平均 2min 风速为 1.9m/s.次日出现首次爆发式增长,浓度跃升至 723 粒/kmm²,单日增幅达 293%.日平均温度小幅上升至 25.2℃,平均相对湿度降至 33.5%,平均 2min 风速上升至 2.5m/s.8 月 6 日经历短暂下降,浓度回落至 595 粒/kmm²,降幅为 17.7%.在此期间,日平均温度降至 23.7℃,平均相对湿度持续上升至 35.3%,平均 2min 风速达到最低值 1.6m/s.至 8 月 7 日进入二次爆发期,浓度飙升至 986 粒/kmm²,较初始值增长 436%,达到观测期内最高峰值.此时日平均温度快速上升至 28.2℃,平均相对湿度降至 27.8%,平均 2min 风速恢复到 2.9m/s.

在事件 4 中,热力与动力因子呈现差异化影响特征:花粉浓度随平均温度、2min 风速的上升而上升,随平均相对湿度的上升而下降.全过程均发生在无降水的气象条件下.

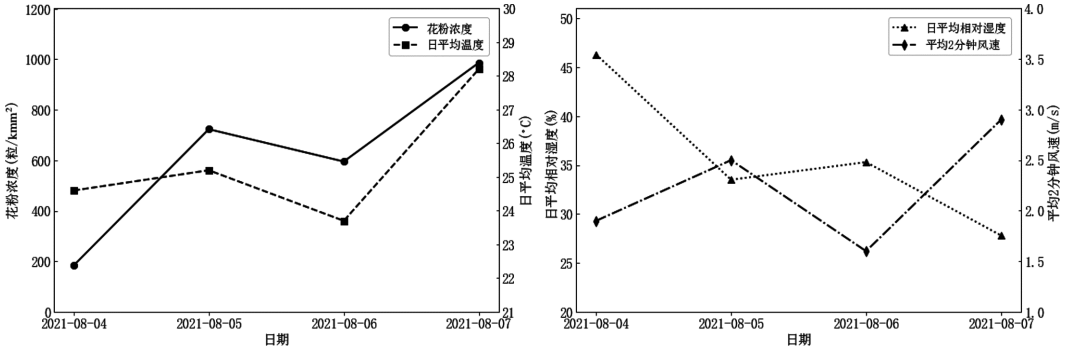


图 3　2021 年 8 月 4~7 日气象因子与花粉浓度时序

Fig.3　Time series of meteorological factors and pollen concentration from August 4 to 7, 2021

花粉浓度累积过程可分为两个关键阶段:花粉释放阶段与大气传播阶段.在花粉释放阶段,植物生殖器官释放花粉至近地层.沙蒿头状花序的开放机制受湿热条件调控.温度是花粉释放阶段最敏感的指标之一,温度升高有利于唤醒沙蒿植株头状花序开放释放花粉.而较高的湿度往往会抑制花药开裂[28].此外,降水发生时也常伴随着温度下降,相对湿度上升,以此间接影响花粉释放.事件 4 过程期间,日平均相对湿度持续低于 50%,结合无降水情况,形成理想的花粉释放条件.

在花粉传播阶段,大气中的花粉数量主要受湿度、风速与降水影响.过高的相对湿度易使花粉粒子吸水增重,导致空气动力学直径增大,沉降速率提升.沙蒿花粉的直径通常在 19~25μm 之间,1.5~3.0m/s 的风速区间可产生最优传输效率,既克服重力沉降,又避免湍流稀释效应.且在风速较大时,风的振荡能够使花粉粒子重叠的部分分散开[30],有利于增加大气中的花粉浓度.发生降水时,雨水往往能够通过物理冲刷的方式使大气中的花粉浓度下降,同时也通过提高相对湿度间接影响花粉传播.

2.2.2　环流形势特征　2019~2021 年间的 5 次花粉爆发性增长过程 500hPa 高度的环流形势存在显著共性:榆阳区上空均处于槽后脊前或高压脊控制区,这种配置通过正涡度平流激发高层辐合作用,驱使中低层产生下沉气流抑制边界层湍流发展,显著削弱花粉垂直扩散能力,同时低层产生辐散导致水平风速减小.850hPa 环流处于多尺度系统相互作用形成鞍型弱气压梯度区.所有过程在花粉浓度达到峰值的当日或前一日,榆阳区 850hPa 的气流均有显著减小的特征.下面以事件 4 为例,具体分析一次爆发性增长过程的环流形势特征:

500hPa 位势高度场演变显示(图 4),榆阳区花粉爆发过程初期处于东亚槽控制下.中高纬度呈两槽一脊型,北半球极涡呈单极型分布.此时副高脊线位于 32°N 附近,位置偏北.西欧槽北部存在一低压中心,东亚槽北部的东北冷涡分裂出两个中心.8 月 5 日,极涡向西南方向移动,降低强度减弱,东北冷涡中心由南北分布转向东西分布.至 6 日,极涡持续南压,脊的强度进一步减弱,榆阳区由槽后脊前过渡到受弱脊控制.此时低压中心东移,分裂的东北冷涡中心北抬,迫使极涡在南压时向西偏移.7 日,榆阳区上空为较平直的偏西风.前期西北风输送的正地转涡度平流促使局地涡度显著增强,高层气流辐合,低层辐散,导致空气在高层堆积后形成下沉补偿气流.后期高压脊主导的下沉运动进一步加剧近地层大气压缩效应,使其绝热增温.

850hPa 环流场分析表明(图 5),本次过程主要受一持续向西南移动的反气旋系统主导.该反气旋 8 月 4 日位于新疆地区,受南亚高压动力调整影响转为显著西北风影响榆阳区.5 日随高空脊区西移,反气旋向西南方向移动,此时榆阳区受到较强的偏北风影响.6 日榆阳区处于反气旋底部,盛行偏东风.7 日,伴随副热带高压东撤及台风“卢碧”东移,反气旋系统继续南压,榆阳区转为受偏南风影响.值得注意的是,25°~35°N、105°~115°E 区域内蒙古气旋、南亚高压、副高及台风等多尺度系统形成动力平衡,导致该区域整体呈现弱风速特征.反气旋的快速位移使其外围气压梯度持续调整,致使榆阳区风向频繁改变.这种不稳定的环流结构阻碍了跨区域花粉传输通道的建立,既减少了外来花粉源输入的影响,又阻碍了榆阳区本地产生的花粉向外传输.反气旋与 500hPa 下沉运动共同作用,最终使花粉累积过程呈现典型的本地源主导特征.

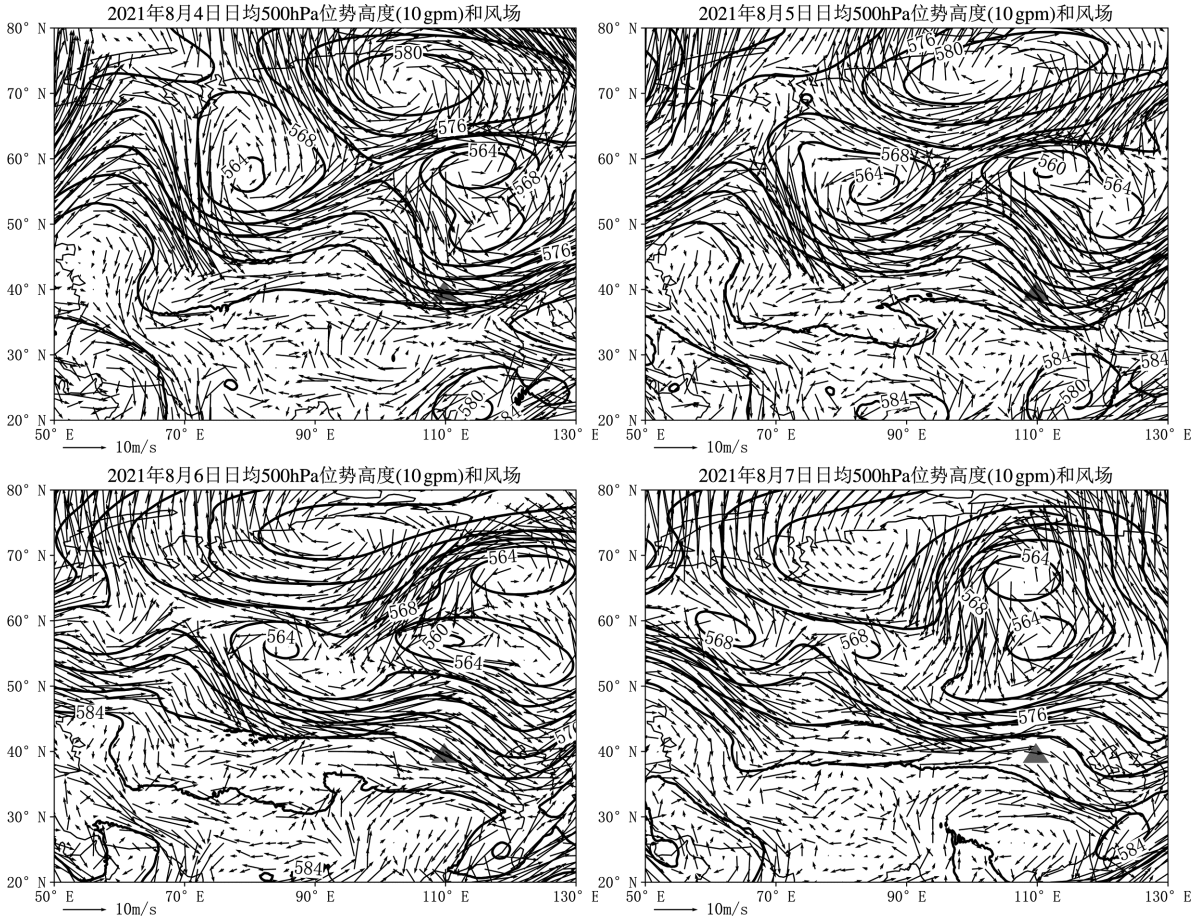


图 4 500hPa 环流形势图

Fig.4 Weather charts of 500hPa

黑色粗线代表位势高度,箭头代表风场,三角代表榆阳区

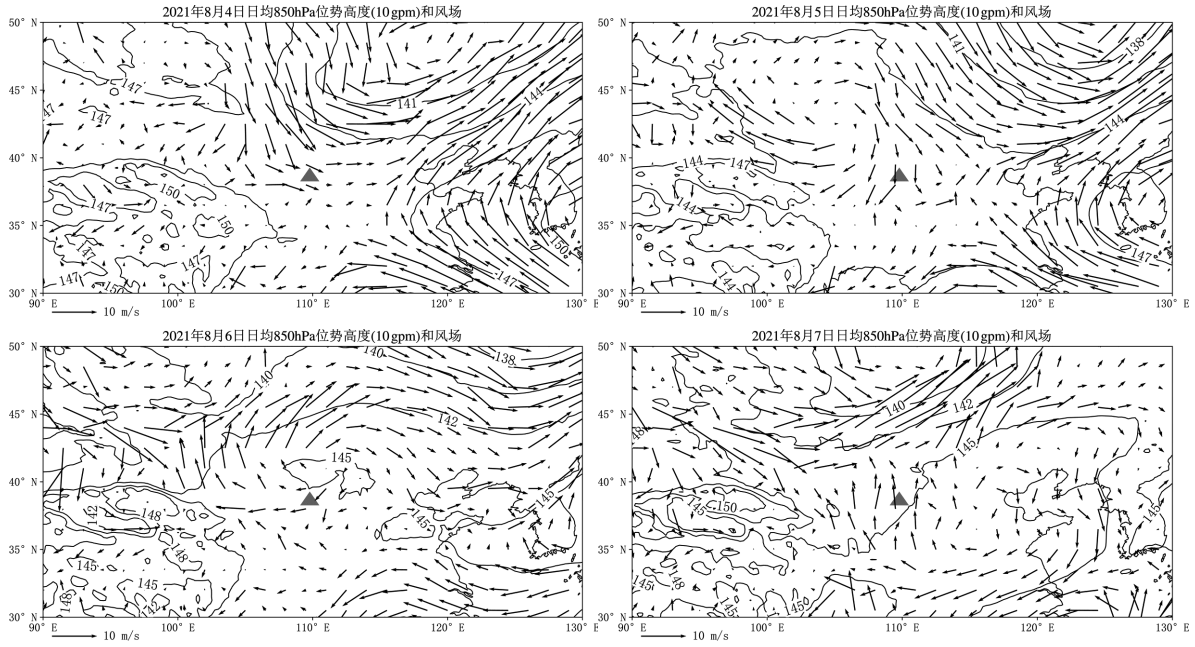


图 5 850hPa 环流形势图

Fig.5 Weather charts of 850hPa

黑色粗线代表位势高度,箭头代表风场,三角代表榆阳区

地面气象场演变显示(图 6),8 月 4~5 日榆阳区处于南亚高压边缘区,近地面风速日变化显著.清晨风速较弱,午后至夜间受热力环流驱动增强至 3.57~4.35m/s.6 日反气旋与高压带连接后,全天气流趋于平缓,风速最小值出现在 7 日 08:00 时,为 0.94m/s.7 日下午高压带南移重建风速日变化规律,日间最大风速回升至2.83m/s.综合分析表明,除6日外,研究时段内较大的近地面风速为沙蒿花粉局地扩散提供了动力条件.结合事件 4 花粉浓度 4~5 日急速上升,6 日短暂下降,7 日恢复快速上升的特征判断,近地面风速大小是此次事件中导致花粉浓度曲折上升的最重要的影响因素.8 月 6 日偏小的风速未能使释放的花粉与空气充分混合,导致其在源地附近沉降,致使当日载玻片上收集到的花粉数量低于前一日.气流在本地出现辐散,有利于花粉在区域内扩散,使其在空气中均匀分布,最终能够在采样点的载玻片上收集到较多花粉粒子.

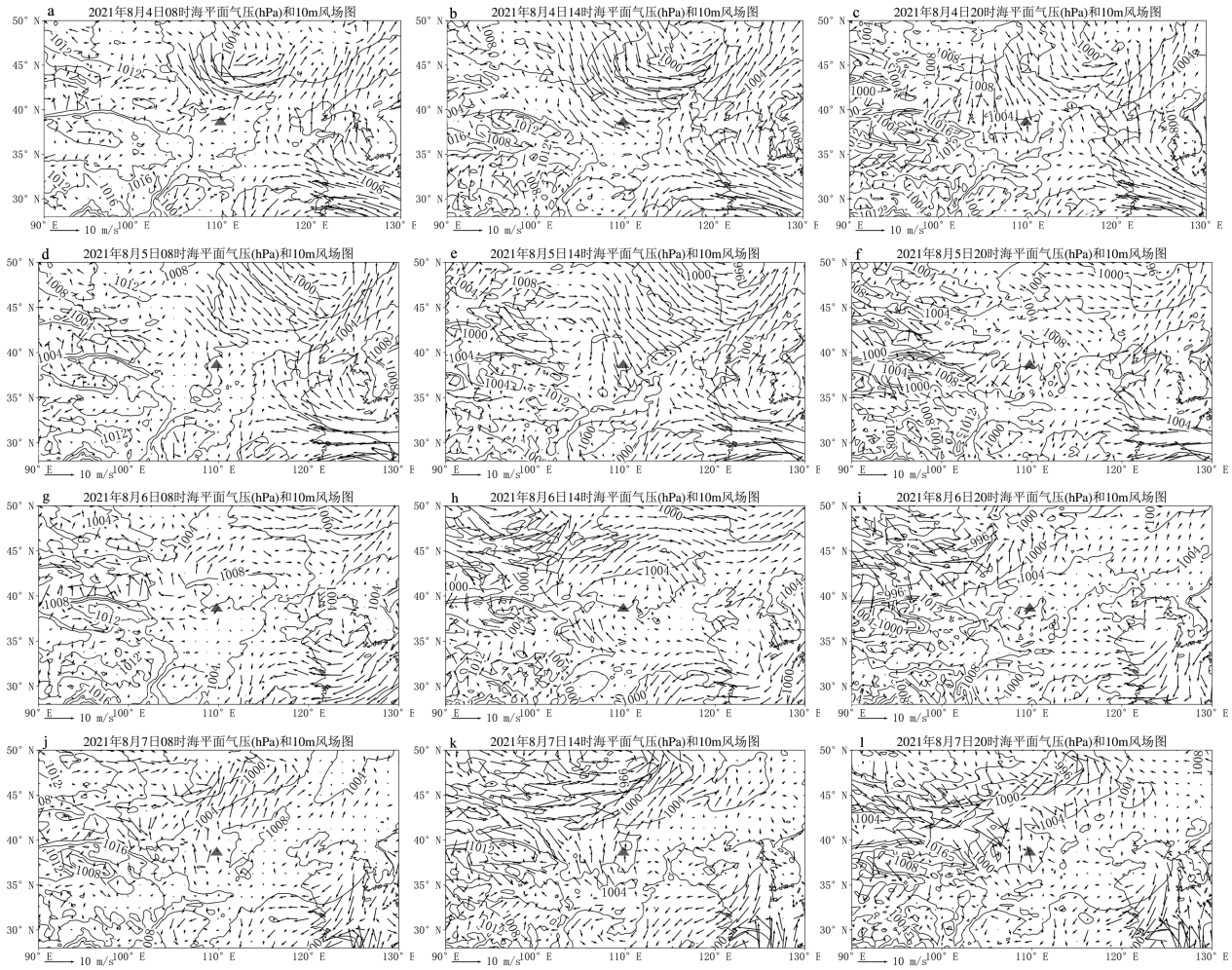


图 6　海平面气压

Fig.6　Weather charts of sea level pressure

黑色粗线代表等压线,箭头代表风场,三角代表榆阳区

2.2.3　大气层结垂直结构特征　如图 7 所示,8 月 3~7 日榆阳区 850~900hPa 持续存在逆温层,其生消时段呈现显著日变化规律.有研究发现边界层的高度变化与地面温度的日变化密切相关[31],在此次过程中也呈现显著日变化规律.8 月 3~4 日,逆温层自 16:00 时持续至次日 06:00 时,覆盖午后至清晨时段;而 4 日夜间至 7 日,逆温层转为 23:00 时至次日 12:00 时存在,覆盖夜间至正午时段.根据图 8、图 10 可知,3 日白天云量接近 10 成,10:00 时左右存在的强垂直下沉运动触发深厚下沉逆温,此时逆温层厚度较低,但持续时间长达 14h,对应边界层高度较后三日高约 1000m.图 9 表明,4 日 00:00 时至 18:00 时低层暖平

流的垂直配置不利于逆温层增厚.对应图 8 表现为低层弱上升运动使边界层抬升,大气扩散能力增强,此时花粉浓度为 184 粒/kmm^2,维持在较低水平.

自 4 日起,系统动力与局地辐射过程共同调控逆温层发展.根据图 9 显示,4 日 18:00 时至 7 日 00:00 时,榆阳区 750~850hPa 高度存在强冷平流,高压脊前弱冷空气引发中层下沉运动,导致高层降温,气团下沉.但从图 10 来看,900hPa 以下冷平流偏弱,导致下沉运动在 850hPa 以下作用减弱,空气压缩加热加剧逆温强度.同时低层弱下沉运动持续压缩大气,边界层高度降至 2500~3000m,大气环境容量减少,形成花粉累积的有利条件.同时,夜间地表温度迅速下降导致近地面温度随高度升高形成辐射逆温,其厚度与云量呈负相关.5 日云量小于 1 成时,6 日清晨逆温层最厚;而 4 日、6 日云量大于 5 成时,逆温层相对较薄.辐射逆温夜间建立,白天随太阳辐射加热消散.同时夜间边界层因地面辐射降温而降低,白天随地表升温而升高.这种日循环使花粉浓度在清晨出现累积高峰.

7 日 00:00 时后,榆阳区中低层以暖平流为主.暖平流加热低层大气,产生弱上升运动,边界层高度也有所回升.但 850~900hPa 仍存在逆温层阻碍气团在垂直方向上的交换.8 日,等温线在垂直方向上随高度增加而逐渐降低,大气层结稳定.因此 8 月 6~7 日花粉浓度增速与 4~5 相比较缓,至 7 日达到峰值.

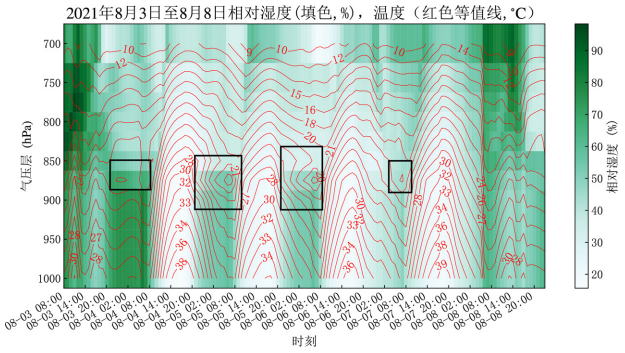


图 7 相对湿度与温度的时间剖面

Fig.7 Time-height cross section of relative humidity and temperature

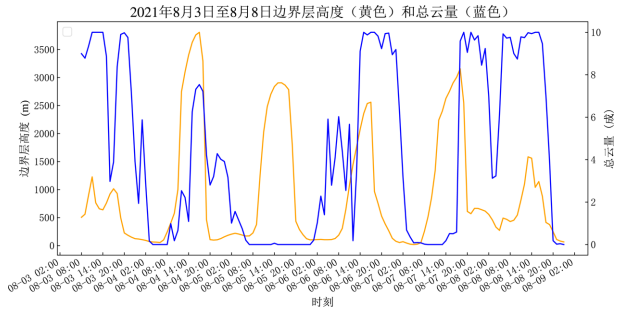


图 8 边界层高度与总云量的时间序列

Fig.8 Time series of boundary layer height and total cloud cover

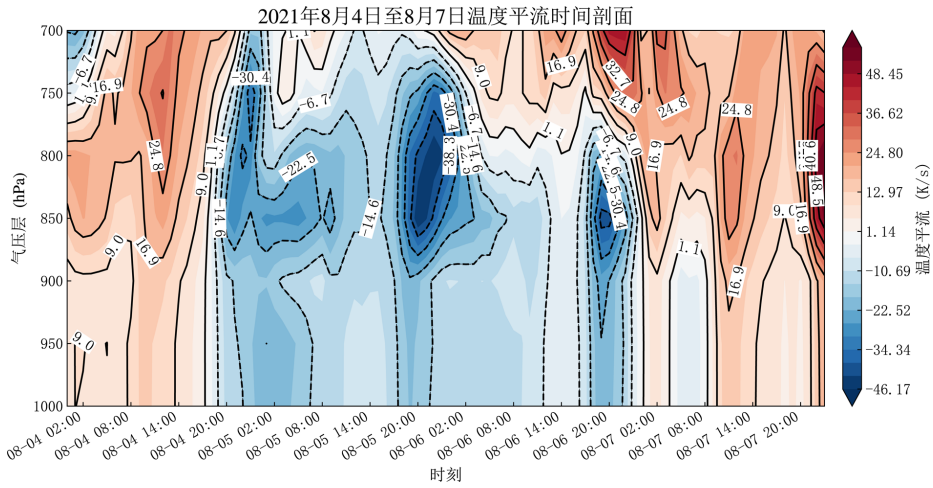


图 9 温度平流时间剖面

Fig.9 Time-height cross section of temperature advection

如图 11 所示,8 月 4~5 日云量分布呈现显著空间分异特征,榆阳区东侧受槽前暖湿平流影响形成云量辐合区,而西、南侧受槽后干冷气流控制维持少云状态.这种分布格局印证了榆阳区处于槽前脊后的典型环流配置,其西北侧的大片晴空区清晰指示了强冷空气团的空间定位.然而据图 9、图 10 所示,该冷气团到达地面的冷平流强度偏弱,未能有效清除花粉积累,反因弱下沉运动加剧近地层大气压缩,

同时导致日平均温度微弱上升 0.6℃,相对湿度下降　　−12.8%.

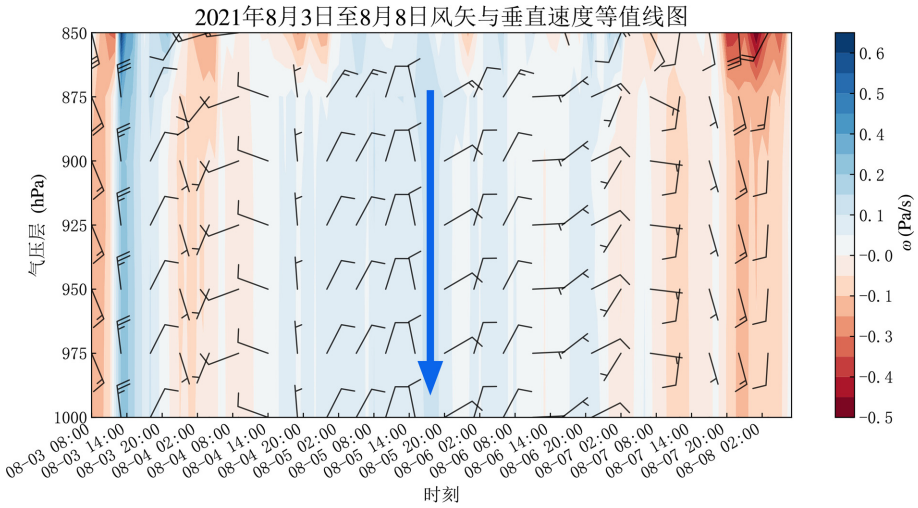


图 10　风矢与垂直速度的时间垂直剖面

Fig.10　Time−height cross section of wind vectors and vertical velocity

至 8 月 6 日,随着冷气团东移出境,榆阳区转为系统性云覆盖,上方云量超过 6 成,太阳辐射通量减少,日平均温度下降 1.5℃.7 日东北回流气流侵入后,榆阳区云量锐减至 2 成,太阳辐射恢复,地表温度回升,日平均温度较前日升高 4.5℃,提供沙蒿花粉释放的有利温度.

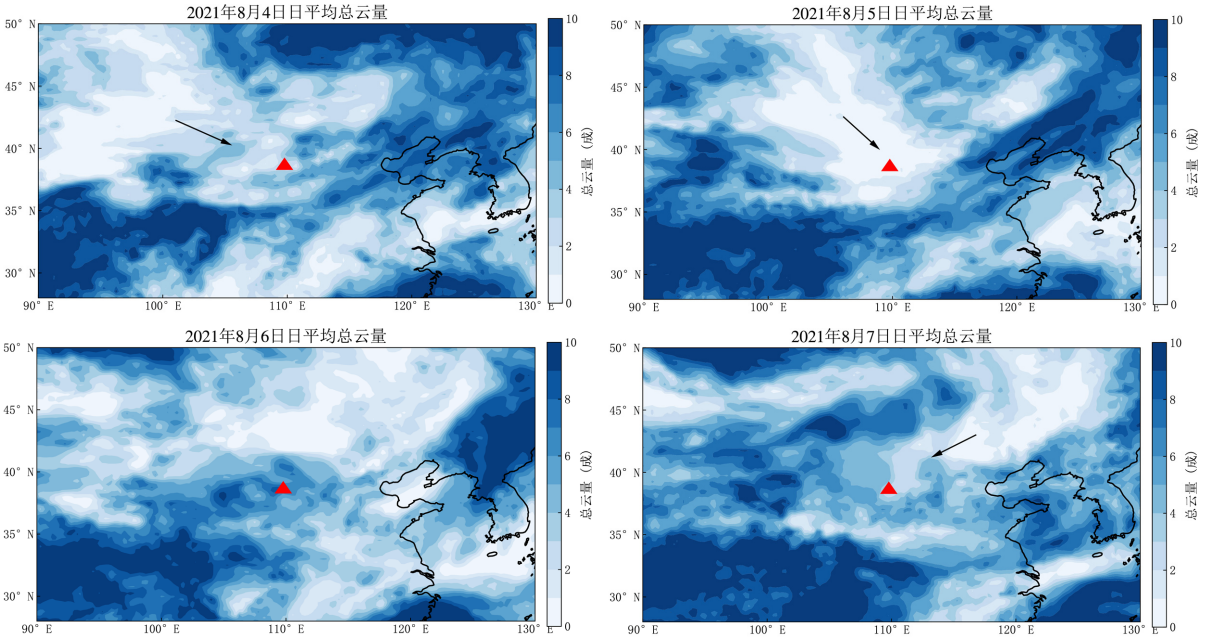


图 11　日平均总云量分布

Fig.11　Spatial distribution of daily mean total cloud cover

2.3　一次花粉浓度爆发性增长过程的概念模型

根据上述分析构建的花粉浓度爆发性增长机制概念模型(图 13)表明:500hPa 高压脊的动力作用触发高层辐合与低层辐散的垂直耦合结构,其下沉气流抑制花粉垂直扩散.一般来说,花粉在近地面释放后由自地面上升的气流送至空中,地面花粉浓度减少.但当下沉气流存在时,榆阳区释放的花粉被抑制在本地低层.由图 12 可知,榆阳区 700~850hPa 为强辐合区,850~950hPa 存在较强的辐散.在 700~ 900hPa 的强冷平流影响下,榆阳区云量较少,有利于辐射逆温形成.

强冷平流使中低层大气降温下沉,但该冷气团到达地面的冷平流强度偏弱,且下沉运动在 850hPa 以下逐渐减弱,导致空气压缩绝热增温并加强逆温层强度,同时伴随着相对湿度的下降,促进沙蒿释放花粉.下沉运动压缩大气后使边界层高度降低,环境容量下降,令相同数量的花粉达到更高的浓度.辐射作用及下沉运动在 850~900hPa 形成逆温层.在温度层结稳定时,气团在上升过程中体积膨胀、温度下降.当逆温层存在时,上升至逆温层高度的气团会由于上方温度更高而下沉或停滞,致使花粉在近地面持续累积.

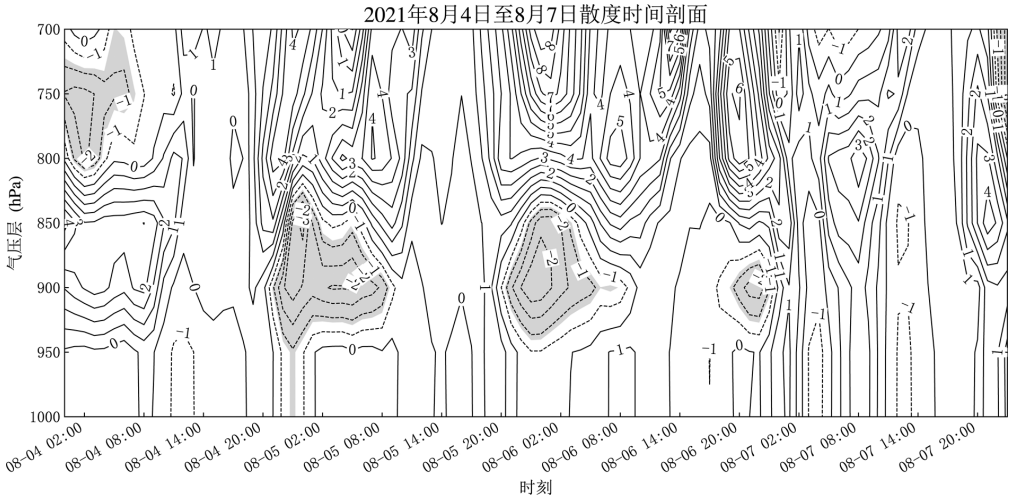


图 12 散度时间序列图

Fig.12 Time series of divergence

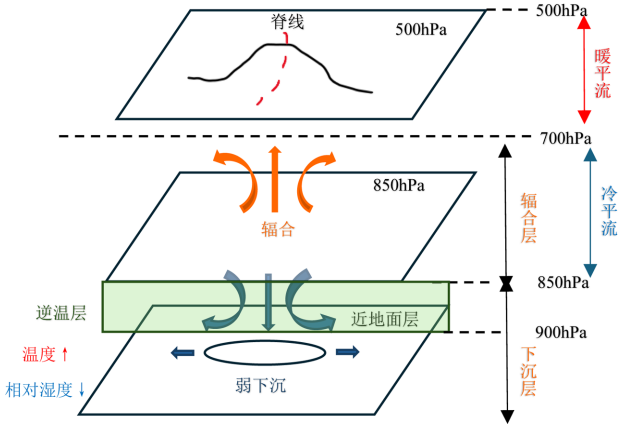


图 13 花粉浓度爆发性增长气象机制概念模型

Fig.13 Conceptual model of the explosive growth mechanism for airborne pollen concentration

本研究虽然取得了一定成果,但仍存在不足.如花粉样本量有限、气象因素与花粉浓度的关系复杂等.另有研究指出,气传致敏花粉在受到空气污染物胁迫时,能够通过快速变化基因表达合成特定的蛋白质来适应环境变化,导致自身致敏性增强.空气污染物也能破坏花粉粒子表面,使其释放更多的过敏原[32].榆阳区及其相邻的神木市、府谷县拥有众多化工企业,未来可结合榆林市工业污染情况针对此方面深入研究.

3 结论

3.1 榆林市榆阳区花粉浓度变化具有典型的季节性特征,呈现春秋两季双峰型.秋季花粉峰值是春季峰值的 2 倍以上,每年秋季存在 1~2 个峰值.

3.2 气温、相对湿度、风速及降水对花粉浓度具有显著调控作用.温度升高、低湿度与 1.5~3.0m/s 风速有利于花粉浓度升高.研究时段内较大的近地面风速为沙蒿花粉局地扩散提供了动力条件,但低层气流辐散阻碍了稳定花粉传输通道的形成.研究证实,花粉爆发性增长过程多发生于无降水条件.

3.3 高空脊控制与中低层反气旋活动是花粉累积的关键天气动力条件.下沉运动显著抑制大气垂直交换,同时通过降低边界层高度减少大气环境容量,使得大气中的花粉浓度进一步上升.

3.4 总云量和温度平流通过改变地表辐射收支及垂直运动直接调控边界层热力结构与高度变化,进而影响污染物扩散条件.低云量(<2 成)时段与边界层高度压缩耦合形成逆温层,是榆阳区花粉浓度日累积高峰形成的核心机制之一.

参考文献:

[1] Zhou S M, Zhang L Y, Lu S L, et al. Ambient particulate

matter-associated autophagy alleviates pulmonary inflammation induced by Platanus pollen protein 3 (Pla3) [J]. Science of the Total Environment, 2021,758:143696.

[2] Ambrose Wong Y Q, Lim J J, Ng Y J, et al. Allergic rhinitis in Chinese young adults from the Singapore/Malaysia cross-sectional genetics epidemiology study (SMCGES) cohort: Prevalence, patterns, and epidemiology of allergic rhinitis [J]. World Allergy Organization Journal, 2022,15(10):100704-100704.

[3] 孟　龄,杨　磊,王巧环,等.致敏性气传花粉的分布、危害评价及防治措施 [J]. 应用生态学报, 2023,34(10):2845-2853.
Meng L, Yang L, Wang Q H, et al. Distribution, hazard assessment, and prevention measures of allergenic airborne pollen [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(10):2845-2853.

[4] 王　佳,郭春燕,王　鹏.呼和浩特气传花粉气象因子影响分析及预测研究 [J]. 科技通报, 2024,40(11):33-41.
Wang J, Guo C Y, Wang P. Analysis and prediction of the impact of meteorological factors on airborne pollen in Hohhot [J]. Bulletin of Science and Technology, 2024,40(11):33-41.

[5] 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 [J]. 农技服务, 2021,38(6):93-98.
Guan L, Gao Q Y, Li H X, et al. Variation characteristics of airborne pollen and its relationship with meteorological elements in Langfang City [J]. Agricultural Technology Service, 2021,38(6):93-98.

[6] Malkiewicz M, Dezeniecka-Osiadacz A, Krynicka J, et al. The dynamics of the Corylus, Alnus, and Betula pollen seasons in the context of climate change (SW Poland) [J]. Science of the Total Environment, 2016,573:740-750.

[7] 郝玉珠,郭春燕,王　佳.鄂尔多斯地区气传花粉与过敏性鼻炎特征分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2766-2776.
Hao Y Z, Guo C Y, Wang J. Characteristics analysis of airborne pollen and allergic rhinitis in Ordos area [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2766-2776.

[8] Marta Alarcón, Raül Rodríguez-Solà, CasasCastillo M Carmen, et al. Influence of synoptic meteorology on airborne allergenic pollen and spores in an urban environment in Northeastern Iberian Peninsula [J]. Science of the Total Environment, 2023,896:165337.

[9] 齐　晨,姜　江,叶彩华,等.北京主要气传致敏花粉年浓度峰值日期预测 [J]. 生态学报, 2023,43(7):2650-2662.
Qi C, Jiang J, Ye C H, et al. Prediction of the annual peak concentration dates of major allergenic airborne pollen in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2650-2662.

[10] OuyangY H, YinZ Y, Li Y, et al. Associations among air pollutants, grass pollens, and daily number of grass pollen allergen-positive patients: a longitudinal study from 2012 to 2016. [J]. International Forum of Allergy & Rhinology, 2019,9(11):1297-1303.

[11] D'Amato G, Chong-Neto H J, Monge-Ortega O P, et al. The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens [J]. Allergy, 2020,75(9):2219-2228.

[12] Galán J, Morte J M, Cascón Á, et al. Different phenological behaviour of native and exotic grasses extends the period of pollen exposure with clinical implications in the Madrid Region, Spain. [J]. Biological Invasions, 2024,26:2171-2182.

[13] Zhang Y X, Steiner L A. Projected climate-driven changes in pollen emission season length and magnitude over the continental United States [J]. Nature communications, 2022,13(1):1234-1234.

[14] 陈怡美.基于花粉致敏控制的城市街道绿化优化研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
Chen Y M. Research on the optimization of urban street greening based on pollen allergen control [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.

[15] 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 [J]. 中国城市林业, 2022,20(6):159-167.
Xiao L, Wang C Y, Song T Y, et al. Research progress on pollen exposure characteristics and allergen risk assessment in urban green spaces [J]. Chinese Journal of Urban Forestry, 2022,20(6):159- 167.

[16] 索　爽,马婷婷,王洪田,等.北京地区豚草花粉致敏的特征分析 [J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2023,37(5):380-386.
Suo S, Ma T T, Wang H T, et al. Characteristic analysis of ragweed pollen allergy in Beijing [J]. Journal of Clinical Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, 2023,37(5):380-386.

[17] Wu P, Ding Y H, Liu Y J. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing–Tianjin–Hebei region. [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017,34(4):429-440.

[18] 郝玉璇,王　莹,李　伟,等.后疫情时期兰州冬季空气质量特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):4837-4850.
Hao Y X, Wang Y, Li W, et al. Characteristics and influencing factors of air quality in winter in Lanzhou during the post-pandemic period [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):4837-4850.

[19] 仲峻霆.北京冬季重污染事件中 $PM_{2.5}$ 爆发性增长与边界层气象要素的反馈机制研究 [D]. 北京:中国气象科学研究院, 2018.
Zhong J T. Research on the feedback mechanism between explosive growth of $PM_{2.5}$ and boundary layer meteorological factors during severe pollution events in Winter in Beijing [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2018.

[20] 崔　乐,王子熹,尹　佳.榆林花粉症流行病学调查纪实(2019~2023) [J]. 中华临床免疫和变态反应杂志, 2023,17(6):524-526.
Cui L, Wang Z X, Yin J. Epidemiological Investigation Record of Pollinosis in Yulin (2019~2023) [J]. Chinese Journal of Clinical Immunology and Allergy, 2023,17(6):524-526.

[21] 彭裕萍,康全清,柳林整.过敏性鼻炎儿童过敏原致敏性的相关因素研究 [J]. 延安大学学报(医学科学版), 2015,13(2):27-29.
Peng Y P, Kang Q Q, Liu L Z. Research on related factors of allergen sensitivity in children with allergic rhinitis [J]. Journal of Yan'an University (Medical Science Edition), 2015,13(2):27-29.

[22] 王　琴.基于MM5/CALPUFF研究榆林市大气扩散条件及环境容量 [D]. 西安:长安大学, 2013.
Wang Q. Research on atmospheric diffusion conditions and environmental capacity of Yulin city based on MM5/CALPUFF [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

[23] 萨日娜.内蒙古地区过敏性鼻炎流行病学调查研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古医科大学, 2020.
Sa R N. Epidemiological investigation of allergic rhinitis in inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Medical University, 2020.

[24] 隋利萍,李　健,李清华,等.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.
Sui L P, Li J, Li Q H, et al. The role of allergenic pollen monitoring

and concentration reporting in the prevention and treatment of pollinosis [J]. Chinese Archives of Otolaryngology Head and Neck Surgery, 2022,29(10):641−644.

[25] Sasaki Keita, Okamoto Yoshitaka, et al. Cedar and cypress pollinosis and allergic rhinitis: quality of life effects of early intervention with leukotriene receptor antagonists [J]. International Archives of Allergy And Immunology, 2009,149(4):350−358.

[26] 王秀玲,王 冠,张晓东,等.唐山市两次爆发性重污染天气过程对比分析 [J]. 河南科学, 2022,40(3):427−432.
Wang X L, Wang G, Zhang X D, et al. Comparative analysis of two explosive heavy pollution weather processes in Tangshan [J]. Henan Science, 2022,40(3):427−432.

[27] 尤 媛,张碧辉,李思腾,等.2016~2020 年北京城区和郊区 $PM_{2.5}$ 爆发性增长特征对比研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(4):1489−1498.
You Y, Zhang B H, Li S T, et al. Comparative study on the characteristics of explosive growth of $PM_{2.5}$ in urban and suburban areas of Beijing from 2016 to 2020 [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1489−1498.

[28] 徐瑞瑞.陕西榆阳区野生种子植物多样性与黑沙蒿的化感作用 [D]. 北京:北京林业大学, 2022.
Xu R R. Diversity of wild seed plants and allelopathy of artemisia ordosica in Yuyang District, Shaanxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[29] 乔占国,汪 芳,张泽宁,等.毛乌素沙地黑沙蒿花粉传播动态及其与气象要素的关系研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023,43(6):72−78.
Qiao Z G, Wang F, Zhang Z N, et al. Research on the pollen dispersal dynamics of artemisia ordosica in Mu Us Sandy Land and its relationship with meteorological factors [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2023,43(6):72−78.

[30] 叶世泰,张金谈,乔秉善,等.中国气传和致敏花粉 [M]. 北京:科学出版社, 1988:1−5.
Ye S T, Zhang J T, Qiao B S, et al. Airborne and allergenic pollens in China [M]. Beijing: Science Press, 1988:1−5.

[31] Tan Y, Xin J, Qin X, et al. Differences among thermal, dynamic, and material boundary layers over complex terrain [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2025,130(9):e2024JD043043.

[32] Cecchi L, D'amato G, Ayres J G, et al. Projections of the effects of climate change on allergic asthma: The contribution of aerobiology [J]. Allergy, 2010,65(9):1073−1081.

作者简介：胡祉懿(2003−),女,江西南昌人,香港城市大学硕士研究生,主要从事花粉扩散研究.发表论文 1 篇.huzhiiyi@163.com.