第 51 卷 第 5 期：2468-2475 高电压技术 Vol.51, No.5: 2468-2475
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241197

# 花粉雷击后形态和特征变化及其对雷暴哮喘的解释应用

罗栋煌[1]，冯禹璇[1]，刘亚坤[1]，张义军[2]
（1. 上海交通大学电气工程学院电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240;
2. 复旦大学大气与海洋科学系，上海 200441）

**摘　要**：雷暴哮喘是雷暴天气引发的一种呼吸系统过敏性疾病，是世界性的天气气候相关健康事件。雷暴哮喘机理不明，已有环境湿度增大的猜想不能解释无雷暴活动的阴雨天气未引发哮喘的对比事实；雷电放电花粉爆裂的猜想缺乏依据和试验验证。为此，设计可悬浮花粉的雷击模拟试验与观测装置，开展花粉模拟雷击试验和变量分析，通过高速摄像、扫描电子显微镜和能量散射谱观测，分析花粉遭受放电后的形态和特征变化。发现花粉遭受雷击放电时有臭氧生成和净电荷残留，雷击后花粉颗粒尺寸变小且形状不规则度增大，花粉壁破损和裂口增多，内部物质暴露且碳、氧元素增加。研究发现的花粉遭雷击后形态和特征变化有助于认识雷暴哮喘问题。
**关键词**：雷暴哮喘；过敏；花粉；雷击；试验性分析

## Morphological and Characteristic Changes of Pollen After Lightning Strikes and Its Application to Thunderstorm Asthma

LUO Donghuang[1], FENG Yuxuan[1], LIU Yakun[1], ZHANG Yijun[2]
(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200441, China)

**Abstract**: Thunderstorm asthma is a respiratory allergic disease triggered by thunderstorms, which is a global climate-related health event. While its mechanism of thunderstorm asthma is not clear but mainly understood by conjectures up to date. One conjecture emphasizes the increased environmental humidity as a motivation. However, it cannot explain the fact that asthma is not significantly triggered on rainy days without lightning activities. The conjecture that pollen explodes due to lightning discharges lacks experimental verification. To this end, a simulation experiment for suspended pollens struck by lightning was designed with an observation system. Simulated lightning strike tests were carried out with pollens suspended in dry and wet conditions. Through the high-speed photography, scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion spectroscopy (EDS) measurements, the morphological and characteristic changes of pollens were analyzed after being exposed to lightning discharges. It is found that when pollens are struck by lightning, the ozone and net charges are generated. The particle sizes of pollens decrease, and the surface shapes become irregular. Pollen's wall is penetrated, and the internal substances are exposed. Additionally, carbon and oxygen elements increase on pollen surface after lightning strikes. These findings contribute to understanding the allergenic after struck by lightning in thunder day.
**Key words**: thunderstorm asthma; allergy; pollen; lightning discharge; experimental analysis

## 0　引言

雷暴哮喘是雷暴天气引发的一种人群聚集性呼吸系统过敏性疾病，雷暴哮喘的主要临床表现为剧烈咳嗽、气急、喘息、胸闷、双肺可闻及哮鸣音等[1]。雷暴哮喘相较于常规哮喘具有 3 个明显特点：一是临床发病于雷暴天气；二是常出现在空气潮湿且花粉浓度较高的情况；三是患者人数短期激增，对医疗服务系统产生冲击。同时，无论个体是否曾患哮喘或花粉过敏，都有患雷暴哮喘的可能[2-4]。研究雷暴哮喘产生的机理对于前期预防工作和后期治

**基金资助项目**：上海市“科技创新行动计划” 国际科技合作伙伴项目(21230780200)。
Project supported by Shanghai International Science and Technology Partnership Project (21230780200).

疗都有着积极意义。

对“雷暴哮喘”最初的报道来自 20 世纪 80 年代的澳大利亚和英国[3]，而后，世界各国对雷暴哮喘的报道逐渐增多[4-8]，其中较严重的是墨尔本雷暴哮喘事件：2016 年 11 月墨尔本在雷暴后数小时内，发生了一场影响近 8 000 人的大规模急性哮喘事件，对当地医疗服务系统产生了严重冲击，并导致至少 8 人死亡[4]。近年来，我国内蒙古、宁夏、北京等多地也发生了多起雷暴天气后哮喘就医人数激增的紧急医疗事件[8-12]，如 2023 年 9 月 2 日，内蒙古呼和浩特市遇雷雨强对流天气，咳嗽和哮喘患者激增，多家医院的急诊、儿科和哮喘相关诊室瞬间接诊人数爆满，造成了不良的健康事件和社会影响[2]。

已有研究中，Dales 对比了雷暴发生期间(151 天)和无雷暴发生期间(919 天)医院的就诊人数，发现有雷暴时平均日哮喘就诊次数较无雷暴时显著增加了 17%[5]。严梅等统计了 2022 年 9 月宁夏地区 1 次雷暴天气后患者的就诊临床资料，发现在雷暴发生 1~4 h 内就诊人数最多，占比可达 52.7%，且大部分患者为初次哮喘发作[1]。杨国华等分析了宁夏石嘴山市发生雷暴天气的时间及其对应的天气状况(包括气温，风力，湿度等因素)和花粉症患者的就医情况，发现雷暴天气时温度越低、风力越小，越易引发患病[6]。Kevat 总结分析了以往雷暴哮喘发生的流行病学数据并提出猜想：可能是由于花粉孢子被上升气流卷入云底，后被放电过程或因吸水肿胀导致花粉孢子破裂分解成更细的颗粒，而后小颗粒被下沉气流带到地面，被易感人群吸入引发哮喘[7]。

总结临床研究可知，雷暴哮喘在雷暴活动发生 4 h 内的就诊人数最多，且患者不取决于是否有哮喘病史[13-16]。现有猜想围绕雷暴天气的气象活动[17-18]，认为花粉颗粒遇水膨胀破碎，下沉气流将花粉带回近地面，颗粒更小、浓度更大的花粉引发花粉过敏、哮喘等疾病。然而，该猜想不能解释阴雨天气无雷暴活动未显著引发哮喘的对比事实。此后，出现雷电放电爆裂花粉使其颗粒粒径变小的猜想，但缺乏观测依据和试验支撑。可见，需要考虑雷电放电作用对花粉特征和形态变化的影响，进而尝试帮助理解雷暴哮喘的发生机理。

为此，设计可悬浮花粉的雷击模拟试验与观测装置，开展花粉在大气中悬浮情况下的实验室模拟雷击试验，通过放电前后高速摄像观测、电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)扫描和能量散射谱(energy dispersive spectroscopy，EDS)测量，分析雷击前后花粉壁形态、花粉颗粒团直径、元素组成变化等，研究花粉遭受雷击放电后形态和特征变化，并从花粉遭雷击后的活性、吸附能力、表面形状、裂口暴露、内部物质析出等角度探讨雷暴哮喘机理。

## 1 可悬浮花粉的雷击模拟试验与观测

在花粉的雷击模拟试验中，通过 Max 串级冲击电压发生器产生高幅值电压并击穿间隙距离可调的空气，以在实验室模拟雷电放电。为实现花粉的悬浮及其雷击模拟的试验观测，设计桶高为 85 cm、内径为 50 cm、壁厚为 1.5 cm 的透明有机玻璃桶，并在侧面开口用以连接用于鼓入空气压力、进气速率可调的鼓气装置，即在透明的有机玻璃桶侧面距离底部 20 cm 位置设计半径为 15 mm 的通风孔，导气软管通过通风孔连接鼓气装置，以此实现模拟雷雨天气并发的紊乱气流，在不影响接闪过程的基础上使花粉可随机悬浮在大气中，增加花粉遭受雷击的位置变化和动态情况。

在透明的有机玻璃桶顶部设计有机玻璃盖板，盖板中心安置与模拟雷电放电输出电极匹配的绝缘装置，用以绝缘隔离并防止沿面放电。垂直方向连接模拟雷电的 Max 串级冲击电压发生器的输出电极，在透明玻璃桶内形成竖直的长空气间隙放电。有机玻璃桶底部设计面积为 1.1 $m^2$ 的金属导电接地平板，使得透明有机玻璃桶底部平面均匀接地。此外，有机玻璃桶设计有密封措施，尽可能减少试验时花粉的泄露。

试验采用的花粉样本为油菜花粉，其每立方米的颗粒粒径平均>30 μg/$m^3$，花粉细胞呈近似长球形，赤道面观为椭圆形，极面观为三列片状。每次试验前在透明有机玻璃桶中放入 1 g 的油菜花粉，通过鼓气装置向有机玻璃桶内泵气的方式，预先将花粉扬起并使其在桶内弥漫，模拟花粉被雷暴天气紊乱气流运输到高空，散布在空气里的现象。同时，这也增加了花粉遭受雷击的概率和均匀性。

使用上海交通大学高电压实验室型号为 SJ-TU-3000 的 3 000 kV Max 串级冲击电压发生器模拟雷电，其可输出电压幅值达 3 000 kV、极性可调(正/负极性)、波形可调(如 1.2/50 μs 等)的模拟雷电冲击电压波，采用分压比为 2 000:1 的电容分压器测量试验输出波形，分压器输出电压信号经屏蔽电缆传

输至屏蔽室，采用泰克 Tek3012 示波器进行波形记录。使用遥控高速照相机(3 040 万像素，快门速度范围为 1/8 000~30 s)方式完成试验过程中的放电通道光学拍摄和图像记录。试验布置和测量等见图 1。

依照试验方案，共进行 80 次模拟雷电冲击电压试验，并开展干燥和潮湿 2 种环境下花粉遭受雷击的对比研究。其中，60 次试验选用负极性冲击电压用以模拟比例明显较高的负极性雷电放电活动，20 次试验选用正极性冲击电压用以模拟比例较低的正极性雷电放电活动[19-20]。模拟雷电放电的冲击电压输出幅值为 1 900~2 300 kV，冲击电压的试验波形选用 1.2/50 μs[17]。此外，还开展了 2 次、3 次等多次模拟雷电放电情况下花粉遭受雷击试验，以增加对放电次数影响花粉形态和特征的认识，也助于验证所得数据的一致性。

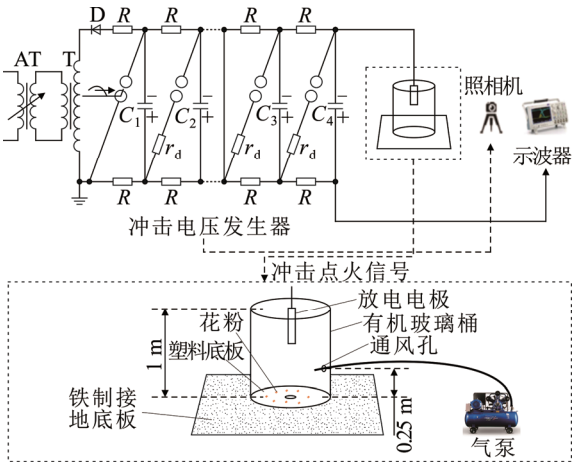
首先，在干燥环境中，利用鼓气装置向有机玻璃桶内泵气，花粉被吹起并漂浮在桶内，而后控制 Max 串级冲击电压发生器开展模拟雷电冲击电压放电。其次，使用喷嘴孔径可控喷雾瓶增加桶内湿度，喷雾瓶喷出的水滴直径约为 50~150 μm，模拟雷雨天气环境中接近 100%的空气相对湿度。继而利用鼓气装置向机玻璃桶内泵气，此时虽然部分花粉在潮湿环境下附着在有机玻璃桶壁，仍有部分花粉被吹起并悬浮在空气中。此外，额外将花粉均匀平铺在有机玻璃桶底板，以增大潮湿花粉被雷击的概率和均匀性。

每次模拟雷击放电后，采用均匀取样方法向有机玻璃桶内的多个位置提取花粉样本，用于后续 SEM 和 EDS 测量，分析雷击前后花粉壁形态、花粉颗粒团直径、元素组成变化等。部分花粉遭受雷击的试验放电图如图 2 所示。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 干燥情况下结果与分析

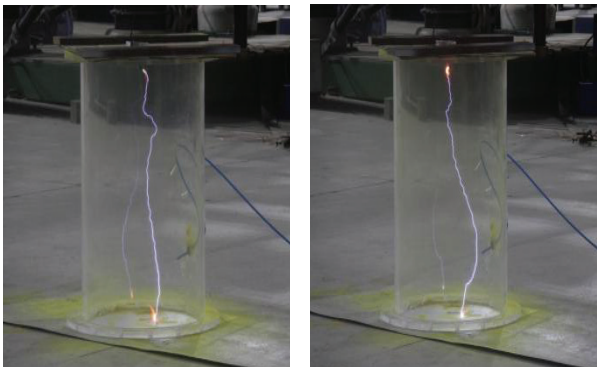
通过观测高速摄像结果，分析花粉模拟雷电放电过程可知，悬浮于空气中的花粉遭雷击时并未发生燃烧等现象，有机玻璃桶底部的花粉遭雷击时出现了瞬时燃烧的现象(如图 2 所示)，这可能是由于雷击有机玻璃桶接地位置的瞬时高温引发花粉的燃烧而形成的。同时，雷击后环境的臭氧含量明显提高，存在明显的净电荷残留现象，在收集被雷击后花粉时，发现花粉与有机玻璃桶间有明显增强的吸附力。雷击放电产生的净电荷残留可明显增强花粉



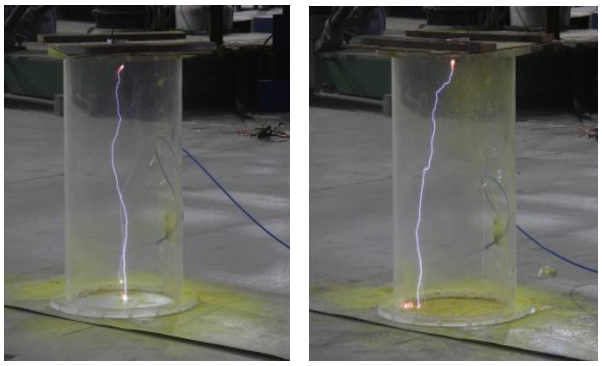

AT—自耦变压器；T—升压变压器；D—整流二极管；*R*—限流电阻；$C_1$~$C_4$—储能电容；$r_d$—触发火花隙电阻

图 1 雷击花粉试验和测量布置图

Fig.1 Diagram of lightning striking pollen experiment and its measurement setup



(a) 干燥环境，2 200 kV 负极性放电 (b) 潮湿环境，1 900 kV 负极性放电



(c) 干燥环境，2 100 kV 负极性放电 (d) 干燥环境，2 300 kV 负极性放电

图 2 部分花粉遭受雷击试验放电图

Fig.2 Pollen struck by lightning discharge in experiment

颗粒的吸附性，使之更易与气溶胶或其他微粒结合。臭氧和净电荷残留也都有助于加强花粉的活力，可能对花粉接触人体及呼吸道的概率和频次等有促进作用。

对于遭受雷击后的花粉样本，采用 SEM 观测雷击后花粉的形貌和特征变化，分析雷击前后花粉壁形态、花粉颗粒团直径变化等。对比雷击前后花粉单体的形态特征可知，相较于花粉原貌(如图 3 所示)，雷击过程使得花粉颗粒团的尺寸变小，花粉单位质量的暴露表面积明显增大，且花粉表面出现了不规则形貌和裂口现象，可能有内部物质析出(下文 EDS 测量结果证实了有元素析出)。这些现象可能是花粉颗粒在遭受雷击过程受到电、磁、热、力等作用，使得花粉颗粒分散并被击穿，出现了花粉颗粒表面形态的变化和破碎裂口等。

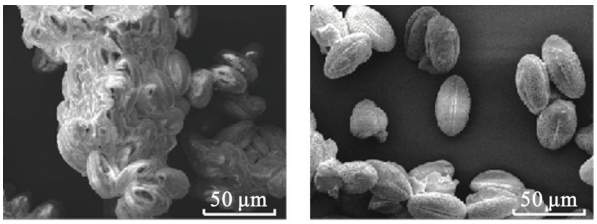
进一步分析雷击前后花粉颗粒表面形态的变化，如图 4 可知，花粉遭受雷击放电后，观察到的表面形状变得不规则、花粉壁出现破损、裂口现象等被破坏的花粉数量较多，且观测到了被雷击破损的组织从受损花粉上脱落而形成直径更小的颗粒，这些脱落组织的颗粒直径平均<25 μm，如图 5 所示，进一步证实了花粉壁破损和裂口现象。花粉遭受雷击后使得内部物质暴露出来，相应地，这也增大了花粉内部物质的暴露面积。

同时，尺寸变小的花粉组织可能在空气中的悬浮时间变长，更易通过呼吸等进入人体呼吸道，增加了花粉组织与呼吸道黏膜的接触概率和面积，结合试验过程中观测到的臭氧和净电荷残留现象，花粉遭受雷击过程可能引发新物质析出并增强其活性和暴露面积，且使得这些组织或物质更易直接接触人体的呼吸道黏膜，为解释“无论个体是否曾患哮喘或花粉过敏，都有患雷暴哮喘的可能”的临床观测事实提供了一些参考，此部分内容在第 3 章中进一步分析。

### 2.2 潮湿情况下结果与分析

雷暴天气下空气湿度会明显增大，降雨过程也是雷电活动常常伴随的天气情况之一[21-22]。为此，使用喷嘴孔径可控喷雾瓶(喷雾瓶喷出的水滴直径约为 50~150 μm)增加桶内湿度，用以模拟雷雨天气环境中接近 100%的空气相对湿度。在潮湿环境下的花粉模拟雷击试验中，同样地观测到了潮湿环境下雷击后的臭氧含量明显提高、净电荷残留的现象，雷击后花粉的吸附能力明显提高，使得花粉接触人体及呼吸道的概率和频次等有所增加。

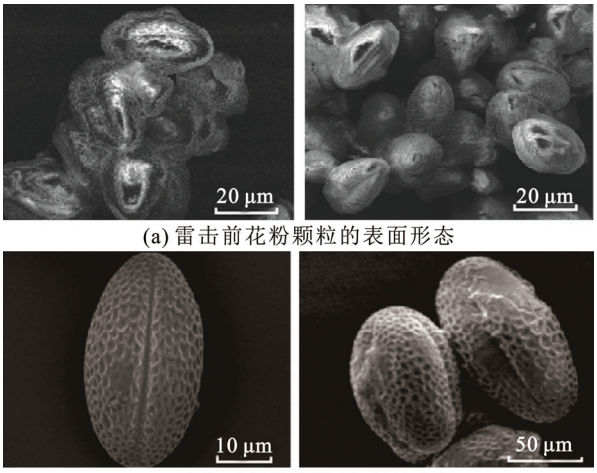
其次，观测了潮湿环境下花粉颗粒遭受雷击后的形态和特征变化，如图 6 所示。潮湿情况较干燥情况下花粉的聚集程度相比干燥情况明显增大，但花粉颗粒在遭受雷击后，仍出现了花粉颗粒团尺寸




(a) 雷击前花粉聚集 (b) 雷击后花粉分散

图 3 雷击前后花粉在 SEM 下的观测形态

Fig.3 Observation results of pollen before and after lightning strikes under SEM




(a) 雷击前花粉颗粒的表面形态

(b) 雷击后花粉颗粒的表面形态

图 4 雷击前后花粉颗粒表面形态的变化

Fig.4 Observation results of the morphology of pollen surface before and after lightning strikes

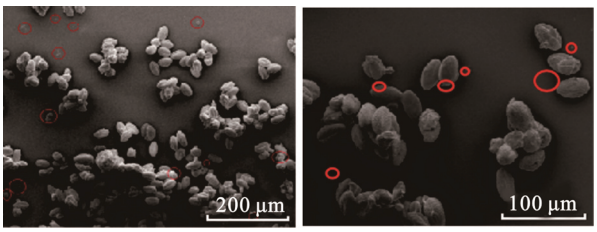



图 5 花粉被雷击破损的组织从受损花粉上脱落(圆圈标注)

Fig.5 Tissue damaged by lightning strike detaching from pollen particles (highlighted with the circle)

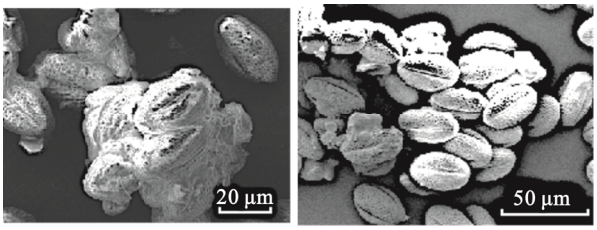



图 6 花粉在潮湿环境中遭受雷击后的形态

Fig.6 Morphology results of pollen particles after lightning strikes in the dry and moist environment

变小、花粉壁破损和裂口、花粉表面不规则且暴露面积增大、破损组织脱落等现象，且观测到的花粉数量仍然较多。

进而，采用 EDS 测定花粉遭受雷击作用前后的元素组成变化，针对选定的表面区域，整体采集该区域内所有 X 射线信号，生成对应的面总谱图，以反映区域内元素的整体分布情况，如图 7 和表 1 所示。其中图 7 所示的面总谱图横轴表示探测到的 X 射线光子的能量大小，在元素分析中，不同元素的特征 X 射线能量是固定的，因此通过能量位置可以判断出对应元素。其单位是千电子伏特，即 keV。纵轴表示在每个能量间隔(每 1 eV 范围内)探测到的信号强度，单位是每秒钟每电子伏特的计数数目。表 1 中的线类型是指 EDS 分析中所使用的谱线类型，K 线系指的是 X 射线能级中的 K 系列谱线，用来检测和定量样品中的元素。表观浓度是通过能谱分析仪器测量出的表相面某物质浓度。$k$ 比值是某种元素的 X 射线峰强度与内部标准的 X 射线峰强度之比，用于校正样品中各种元素的相对浓度，更准确地确定样品中各种元素的相对含量。$w$ 表示某种物质在样品中的质量分数。原子百分比指某种元素在样品中的百分比原子数。标准样品标签指使用的标准样品的标签或标识符，用于校正能谱分析结果。

根据表观浓度测量结果显示，相较于花粉原样的组分构成，遭受雷击后的花粉碳、氧元素均有明显增加：花粉在遭受雷击后碳元素表观浓度增加 36%，氧元素表观浓度增加 28%。碳、氧元素的表观浓度增加表明花粉遭受雷击后有新组织暴露在花粉颗粒表面，验证了 SEM 观测到的内部物质析出、尺寸更小的组织脱落的现象。此外，进行了 2 次、3 次等多次放电情况下花粉遭受雷击后的元素变化测量，多次放电后的花粉碳元素表观浓度增加 33.5%~ 37.8%，氧元素表观浓度增加 25.7%~29.1%，较单次放电结果可知，进一步验证了所测结果的一致性。

进一步分析碳、氧元素增加的位置，如图 8 所示。碳、氧元素增加位置主要为花粉颗粒表面，其中，氧元素的增多可能是由于花粉遭受雷击时与空气中的氧元素反应或花粉组织内部析出，使得花粉颗粒表面氧元素增加。对于碳元素，由于空气中含有的碳元素极少，花粉表面增加的碳元素可能主要来源于花粉内部组织析出。

综上分析可知，在干燥环境和潮湿环境下，花粉模拟雷击试验中都观测到了臭氧生成和净电荷残留现象，花粉遭受雷击后花粉壁形态、花粉颗粒团直径、元素组成变化等均出现了明显的变化，空气湿度对花粉遭受雷击后的形态和特征变化影响不大。其中，花粉颗粒团尺寸变小、花粉表面变得不规则、花粉壁破损和裂口生成、受损组织脱落等现象表明花粉遭受雷击后的暴露面积增加，增大面积一方面来自花粉壁表面积的扩大，另一方面来自于内部组织析出带来的表面积增加。

这些增加的暴露面积直接增大了与人体呼吸道黏膜接触的可能性；同时观测到的碳、氧元素增加、臭氧生成和净电荷残留等现象表明花粉遭雷击

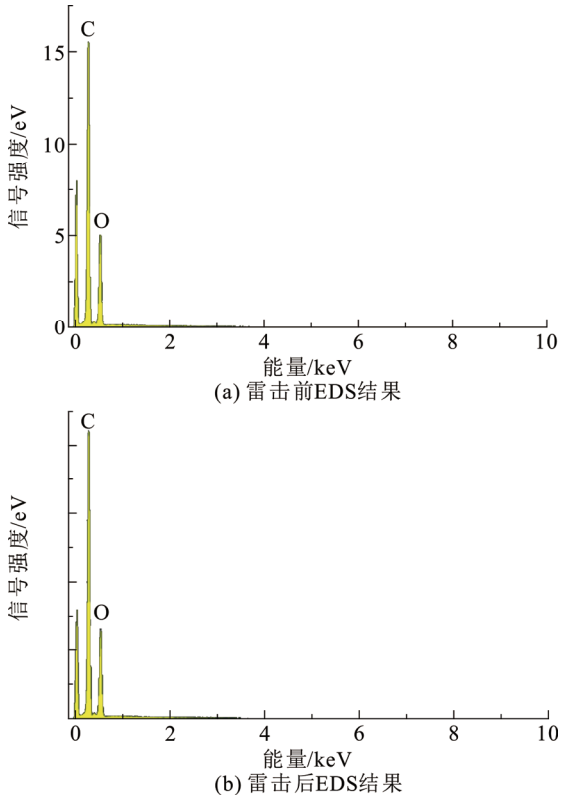


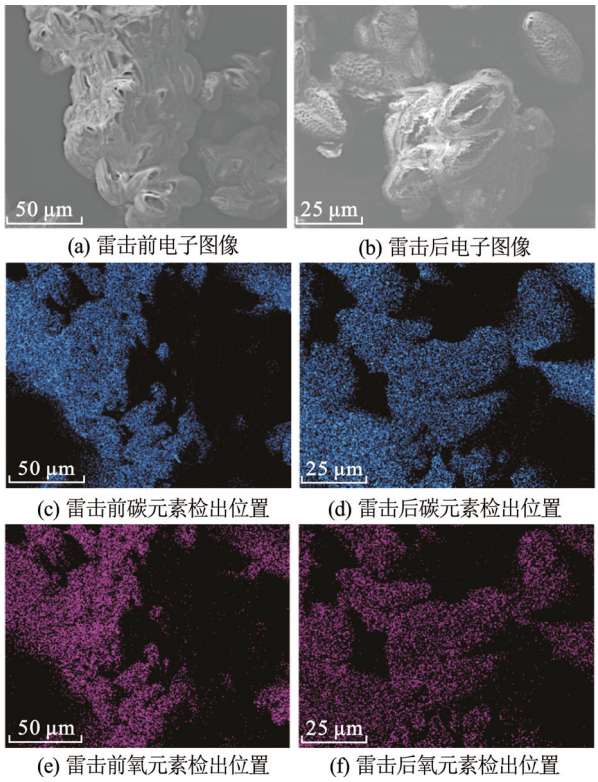

图 7 花粉遭受雷击前后的元素变化

Fig.7 Elemental changes in pollen particles before and after lightning strikes

表 1 花粉遭受雷击前后的组分

Table 1 Composition of pollen before and after lightning strikes

| 参数 | 数值/类型 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 雷击前碳元素 | 雷击前氧元素 | 雷击后碳元素 | 雷击后氧元素 |
| 线类型 | K 线系 | K 线系 | K 线系 | K 线系 |
| 表观浓度 | 6.83 | 5.86 | 9.27 | 7.52 |
| $k$ 比值 | 0.068 31 | 0.019 73 | 0.092 65 | 0.025 32 |
| $w$/% | 70.22 | 29.78 | 71.21 | 28.79 |
| 原子百分比 | 75.85 | 24.15 | 76.72 | 23.28 |
| 标准样品标签 | C Vit | $SiO_2$ | C Vit | $SiO_2$ |




(a) 雷击前电子图像 (b) 雷击后电子图像

(c) 雷击前碳元素检出位置 (d) 雷击后碳元素检出位置

(e) 雷击前氧元素检出位置 (f) 雷击后氧元素检出位置

图 8 花粉遭受雷击前后的能谱图

Fig.8 Energy spectrum diagram of pollen particles before and after lightning strikes

后的活性和吸附能力增强，进一步加强花粉的致敏和致病能力。相较于已有的湿度-对流猜想[6-7](该猜想不能解释无雷暴活动的阴雨天气未引发哮喘的对比事实)，上述观测到的因遭受雷击放电产生的花粉形态和特征变化能帮助进一步认识雷暴哮喘现象的机理。

## 3 结合哮喘机理的分析

雷暴哮喘是一种在发生在花粉季节的雷暴天气下发生的呼吸系统疾病，在花粉引发过敏性哮喘的情况中，花粉颗粒需在外界作用下破裂为更小的颗粒或组织，才会通过呼吸道或与呼吸道黏膜接触，进而引发过敏性哮喘反应，造成呼吸道阻塞和炎症反应，诱发后续的过敏性哮喘临床症状(如胸闷气短、咳嗽、打喷嚏、流鼻涕)等。试验采用的花粉样本为油菜花粉，其雷击试验前单位体积颗粒粒径平均为>30 μg/m$^3$，结合已有研究结论可知，花粉颗粒尺寸在≤30 μg/m$^3$ 范围时更易通过呼吸道，并深入到下呼吸道甚至抵达肺部等位置[15-16]。模拟雷击试验前，花粉颗粒单位体积颗粒粒径较大(>30 μg/m$^3$)，不易通过呼吸道，或深入到下呼吸道甚至抵达肺部，难以引发哮喘反应，这也解释了无雷暴活动的阴雨天气未引发哮喘的对比事实。

经过上述花粉遭受雷击放电的试验结果及其分析可知，花粉遭受雷击后颗粒破裂且尺寸变小(尺寸变小到≤30 μg/m$^3$ 范围)，使得花粉颗粒更易通过呼吸道，并有可能深入到下呼吸道甚至抵达肺部等位置。此外，花粉遭受雷击后表面形状变得不规则，花粉壁出现破损、裂口和组织破损、脱落等现象，且脱落等后的花粉颗粒直径平均<25 μm(如图 5 所示)。这些研究得到的结果都表明花粉遭受雷击后颗粒尺寸减小，这大大增加了其与呼吸道壁、黏膜甚至肺部的接触可能性。同时，花粉粒径的大小也会影响花粉颗粒在空气中的悬浮能力、悬浮时间、传播距离及对呼吸道壁和黏膜的穿透能力。花粉遭受雷击后粒径变小，变小的花粉颗粒悬浮能力增强，悬浮时间增长，传播距离和时间增大，对呼吸道壁和黏膜的穿透能力也增强，这使得花粉更易进入人体呼吸道较深的部位，从而容易引发过敏性哮喘症状。

除花粉颗粒尺寸因素之外，影响花粉引发过敏性哮喘的主要因素还有花粉的浓度[11-13]。已有研究表明：空气中较高浓度的花粉更易传播和被人体吸入，通过呼吸道道壁和黏膜接触，引起免疫系统的过敏反应，这种反应的严重程度也与空气中花粉浓度直接呈现出正相关关系[14]。结合上述模拟雷电试验可知，雷暴环境下花粉遭受雷击后出现了颗粒分裂、局部组织脱落等现象，使得单位体积内花粉数目增多，造成花粉浓度增大，花粉暴露表面积也增大。同时，放电伴随的臭氧和净电荷残留现象也有助于增大花粉的吸附和悬浮能力。这些试验发现的结果也有助于解释雷暴环境下更易引发哮喘的临床统计结果。

此外，雷暴哮喘现象也被临床发现会发病于不具过敏体质的个体，这说明除花粉中会引发过敏反应的蛋白质等过敏原物质外[8]，花粉中的非过敏原物质如糖类和脂质类也会引发雷暴哮喘。花粉遭受雷击后出现花粉壁破损、内部物质析出、碳 C、氧 O 元素增加等结果，可能使得花粉壁包裹的糖类和脂质类等物质析出并附着在花粉颗粒表面，当花粉被人体吸入进入呼吸道时，位于析出在花粉表面的糖类和脂质类等物质在接触到呼吸道壁和黏膜时，这些物质会与人体的肥大细胞和嗜碱性粒细胞表面的特异性抗体结合[9-10]，激活这些细胞释放过敏介质，可能引发炎症反应，表现出胸闷气短、咳嗽、

打喷嚏、流鼻涕等症状；或引起不正常的呼吸道平滑肌收缩或是肥大、呼吸道阻塞、呼吸道发炎(如嗜酸性粒细胞浸润症或嗜中性球浸润症等)等问题，表现出咳嗽、呼吸困难等。上述机制为不具过敏体质的个体出现雷暴哮喘的临床数据提供了可能的解释。

另一方面，花粉对于哮喘的致敏性也受到环境因素的影响，大气中的硫氧化合物、臭氧以及悬浮于空气中的颗粒物可能会与花粉产生协同作用[19]，也可能改变花粉颗粒表面形态和化学成分[23]。其中，大气中的氮氧化物可使花粉表面产生褶皱，增大花粉与呼吸道壁和黏膜的接触面积，也会改变花粉内部可溶性蛋白质成分，使内部蛋白质释放和分布在花粉颗粒表面，这些机制都会增大过敏性哮喘的发生概率。在对豚草花粉致敏的患者分析和研究中发现，致敏花粉的化学成分和外部形态会在化学类空气污染物、空气污染物、真菌孢子等生物成分和沙尘等非生物成分的共同作用下发生改变[24-26]，并增加豚草花粉的活力和致敏能力[27]。其中，臭氧与花粉的相互作用产生的影响较为明显，已有研究发现，桦树花粉的活力和致敏能力在臭氧环境下得到增强，且不同的臭氧暴露质量浓度(在54~85 μg/m$^3$ 范围内)环境下，桦树花粉的致敏原含量随臭氧浓度升高呈现出明显增加的现象[28]。

结合花粉遭受雷击后的特征变化可知，雷电放电时大气中的空气会受到电、热多物理场作用影响，空气中的氧气、氮气分子等会发生气体电离、化学反应等，这些过程中会生成臭氧、一氧化氮、二氧化氮等气体。放电过程产生的臭氧、氮氧化物会影响花粉的致敏能力，也从另一方面提升了花粉对哮喘的致敏性[29]。

## 4 结论

1）花粉遭受雷击放电时有臭氧和净电荷残留现象，使得花粉活性和吸附能力增强，提升了花粉接触人体及呼吸道的概率和频次。

2）雷击后花粉颗粒的尺寸变小，花粉分裂和受损破损组织脱落是形成颗粒变小的主要原因；花粉颗粒表面形状不规则度增大，暴露面积增大，裂口增多且内部物质析出，增大了花粉致敏能力。

3）花粉在遭受雷击后碳元素表观浓度增加36%，氧元素表观浓度增加 28%，雷击使得花粉表面元素变化，为雷暴哮喘也被临床发现于不具过敏体质个体的现象提供了可能的分析参考。

## 参考文献 References


[1] 严 梅，靳泉鹏，褚娇娇，等. 一起群体性雷暴哮喘的调查分析[J]. 宁夏医学杂志，2023，45(3)：270-273.
YAN Mei, JIN Quanpeng, CHU Jiaojiao, et al. Investigation and analysis of a group thunderstorm asthma[J]. Ningxia Medical Journal, 2023, 45(3): 270-273.

[2] FOROUZAN A, MASOUMI K, SHOUSHTARI M H, et al. An overview of thunderstorm-associated asthma outbreak in southwest of Iran[J]. Journal of Environmental and Public Health, 2014, 2014(1): 504017.

[3] DABRERA G, MURRAY V, EMBERLIN J, et al. Thunderstorm asthma: an overview of the evidence base and implications for public health advice[J]. QJM, 2013, 106(3): 207-217.

[4] THIEN F, BEGGS P J, CSUTOROS D, et al. The Melbourne epidemic thunderstorm asthma event 2016: an investigation of environmental triggers, effect on health services, and patient risk factors[J]. The Lancet Planetary Health, 2018, 2(6): e255-e263.

[5] DALES R E, CAKMAK S, JUDEK S, et al. The role of fungal spores in thunderstorm asthma[J]. Chest, 2003, 123(3): 745-750.

[6] 杨国华，张静虹，宝 瑞，等. 石嘴山市雷暴天气与花粉症的关系[J]. 宁夏医学杂志，2019，41(4)：339-341.
YANG Guohua, ZHANG Jinghong, BAO Rui, et al. Relationship between thunderstorm weather and hay fever in Shizuishan City[J]. Ningxia Medical Journal, 2019, 41(4): 339-341.

[7] KEVAT A. Thunderstorm asthma: looking back and looking forward[J]. Journal of Asthma and Allergy, 2020, 13: 293-299.

[8] 杨琼梁，欧阳婷，颜 红，等. 花粉过敏的研究进展[J]. 中国农学通报，2015，31(24)：163-167.
YANG Qiongliang, OUYANG Ting, YAN Hong, et al. Research progress of pollen allergy[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(24): 163-167.

[9] 付婉艺. 中国蒿属花粉过敏原分子生物学分析和组分诊断[D]. 杭州：浙江大学，2023.
FU Wanyi, Molecular biological analysis and component diagnosis of Artemisia spp. pollen allergens in China[D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2023.

[10] 尹舒婷，王 妙，李强强，等. 蜂花粉过敏及致敏原研究进展[C]//2021 年中国(广西 •梧州)蜂业博览会暨全国蜂产品市场信息交流会论文集(上册). 梧州：中国养蜂学会，中国蜂产品协会，广西壮族自治区农业农村厅，梧州市人民政府，2021：292-296.
YIN Shuting, WANG Miao, LI Qiangqiang, et al. Research progress on bee pollen allergy and allergens[C]//2021 Proceedings of the China (Wuzhou, Guangxi) Bee Industry Expo and National Bee Products Market Information Exchange Conference(Volume 1). Wuzhou, China: Apicultural Science Association of China, China Bee Products Association, Gvangjsih Bouxcuengh Swcigih Nungzyez Nungzcunh Dingh Department of Agriculture and Rural Affairs of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Wuzhou Municipal People's Government, 2021: 292-296.

[11] 冯国会，王宣颖. 过敏原颗粒物特性研究进展[C]//中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四). 西安：中国环境科学学会环境工程分会，2019：8.
FENG Guohui, WANG Xuanying. Research progress on the characteristics of allergen particles[C]//Proceedings of the 2019 Science and Technology Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Science-Environmental Engineering Technology Innovation and Application Sub-forum(4). Xi'an, China: Environmental Engineering Branch of the Chinese Society of Environmental Sciences,

2019: 8.

[12] PARNIA S, BROWN J L, FREW A J. The role of pollutants in allergic sensitization and the development of asthma[J]. Allergy, 2002, 57(12): 1111-1117.

[13] 胡 敏，何凌燕，黄晓锋，等. 北京大气细粒子和超细粒子理化特征、来源及形成机制[M]. 北京：科学出版社，2009.
HU Min, HE Lingyan, HUANG Xiaofeng, et al. Physical and chemical characteristics, sources and formation mechanisms of fine and ultrafine particles in the Beijing atmosphere[M]. Beijing, China: Science Press, 2009.

[14] ANNESI-MAESANO I, ROUVE S, DESQUEYROUX H, et al. Grass pollen counts, air pollution levels and allergic rhinitis severity[J]. International Archives of Allergy and Immunology, 2012, 158(4): 397-404.

[15] WILSON A F, NOVEY H S, BERKE R A, et al. Deposition of inhaled pollen and pollen extract in human airways[J]. The New England Journal of Medicine, 1973, 288(20): 1056-1058.

[16] SUPHIOGLU C, SINGH M B, TAYLOR P, et al. Mechanism of grass-pollen-induced asthma[J]. The Lancet, 1992, 339(8793): 569-572.

[17] 陈晓旸，朱德华，王 敏，等. 广东连续两次飑线过程触发机制和雷暴大风形成原因分析[J]. 高电压技术，2022，48(增刊 2)：199-206.
CHEN Xiaoyang, ZHU Dehua, WANG Min, et al. Analysis of the triggering mechanisms of two consecutive squall line events in Guangdong and the causes of severe thunderstorm winds[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(Supplement 2): 199-206.

[18] 董冰冰，宋家乐，李 特，等. 强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性[J]. 高电压技术，2023，49(2)：525-535.
DONG Bingbing, SONG Jiale, LI Te, et al. Lightning impulse arc development process and flashover characteristics of 110 kV SIR insulators under heavy rainstorms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 525-535.

[19] 陈家宏，赵 淳，谷山强，等. 我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J]. 高电压技术，2016，42(11)：3361-3375.
CHEN Jiahong, ZHAO Chun. GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.

[20] 蒋正龙，陆佳政，何俊佳，等. 湖南省雷电活动及其规律的分析[J]. 高电压技术，2011，37(10)：2431-2436.
JIANG Zhenglong, LU Jiazheng, HE Junjia, et al. Analyses of lightning activity and its law in Hunan Province[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2431-2436.

[21] 高 攀，孟 刚，郭钧天，等. 基于大数据统计的雷暴环境特征分析[J]. 高电压技术，2021，47(增刊 2)：19-24.
GAO Pan, MENG Gang, GUO Juntian, et al. Analysis of thunderstorm environmental characteristics based on big data statistics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(Supplement 2): 19-24.

[22] 谷山强，王 剑，冯万兴，等. 电网雷电监测数据统计与挖掘分析[J]. 高电压技术，2016，42(11)：3383-3391.
GU Shanqiang, WANG Jian, FENG Wanxing, et al. Statistical and mining analysis of lightning detection data in power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3383-3391.

[23] 向明珠，张国明，孙煦然，等. 花粉过敏的环境因素[J]. 环境卫生学杂志，2022，12(12)：903-908，914.
XIANG Mingzhu, ZHANG Guoming, SUN Xuran, et al. Environmental factors for pollen allergy[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(12): 903-908, 914.

[24] 云文丽，刘克利. 城市中花粉致敏植物及其影响因素研究进展[J]. 内蒙古气象，2008(4)：14-17.
YUN Wenli, LIU Keli. Research progress on pollen-allergenic plants and their influencing factors in cities[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2008(4): 14-17.

[25] ZHAO F, DURNER J, BARBRO WINKLER J, et al. Pollen of common ragweed (Ambrosia artemisiifolia L.): Illumina-based de novo sequencing and differential transcript expression upon elevated $NO_2$/$O_3$[J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 503-514.

[26] FRANK U, ERNST D. Effects of $NO_2$ and ozone on pollen allergenicity[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 91.

[27] PASQUALINI S, TEDESCHINI E, FRENGUELLI G, et al. Ozone affects pollen viability and NAD(P)H oxidase release from Ambrosia artemisiifolia pollen[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2823-2830.

[28] VISEZ N, HAMZÉ M, VANDENBOSSCHE K, et al. Uptake of ozone by allergenic pollen grains[J]. Environmental Pollution, 2023, 331: 121793.

[29] GILLES S, BEHRENDT H, RING J, et al. The pollen enigma: modulation of the allergic immune response by non-allergenic, pollen-derived compounds[J]. Current Pharmaceutical Design, 2012, 18(16): 2314-2319.



**罗栋煌**
2001—，男，硕士生
主要研究方向为雷电过电压分析和雷电防护
E-mail: 2609215095@sjtu.edu.cn

LUO Donghuang



**刘亚坤**(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，博导
主要研究方向为雷电防护与高电压试验技术
E-mail: liuyakunhv@163.com

LIU Yakun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2024-07-23 修回日期 2025-04-11 编辑 曾文君