曹云擎, 王体健, 高丽波, 等. 2020. 基于无人机垂直观测的南京 PM2.5 污染个例研究 [J]. 气候与环境研究, 25(3): 292-304. CAO Yunqing, WANG Tijian, GAO Libo, et al. 2020. A Case Study of PM2.5 Pollution in Nanjing Based on Unmanned Aerial Vehicle Vertical Observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (3): 292-304. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19014

# 基于无人机垂直观测的南京 PM2.5 污染个例研究

曹云擎 1 王体健 1 高丽波 1 陈璞珑 1 赵明 1 周树道 2 王敏 2

1 南京大学大气科学学院,南京 210023 2 国防科技大学气象海洋学院,南京 211101

**摘 要**为了深入理解边界层内气温、相对湿度对 PM2.5 垂直分布和近地面污染的影响,本文使用搭载了多参数大气环境探测传感器的无人机对南京 2017 年 12 月 3~4 日和 12 月 23~24 日的 PM2.5 浓度、气温和相对湿度进行垂直观测,结合对气象数据的分析及 HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory version 4)轨迹计算模式的应用,对这两次 PM2.5 的垂直分布特征及污染过程的成因进行了分析。结果表明, PM2.5 浓度和相对湿度呈明显的正相关关系,在 12 月 23~24 日的 6 次观测中相关系数均值达到 0.96。逆温层下部,PM2.5 浓度和相对湿度高且垂直差异较小;逆温层以上,PM2.5 浓度和相对湿度随高度升高而迅速降低。由于大气扩散条件较差,导致 PM2.5 在华北平原南部不断累积,之后受到高压系统的影响分别向南和东南转移。这两次 PM2.5 污染过程都明显受到外部输送的影响,大气逆温对 PM2.5 和水汽的向上输送有明显的抑制作用,外部输送和局部逆温是导致这两次 PM2.5 污染的主要原因。

关键词 多旋翼无人机 边界层 PM2.5 污染 垂直分布 后向轨迹
 文章编号 1006-9585(2020)03-0292-13 中图分类号 P426.4 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19014

# A Case Study of PM2.5 Pollution in Nanjing Based on Unmanned Aerial Vehicle Vertical Observations

CAO Yunqing<sup>1</sup>, WANG Tijian<sup>1</sup>, GAO Libo<sup>1</sup>, CHEN Pulong<sup>1</sup>, ZHAO Ming<sup>1</sup>, ZHOU Shudao<sup>2</sup>, and WANG Min<sup>2</sup>

1 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210023

2 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

**Abstract** To completely understand the influence of temperature and relative humidity in the boundary layer on the vertical distribution of PM2.5 and near-surface pollution, in this study, an unmanned aerial vehicle (UVA) equipped with multiparameter atmospheric environment detector was used for the vertical observation of PM2.5 concentration, temperature, and relative humidity in Nanjing from 3 December to 4 December 2017 and from 23 December to 24 December 2017. Combined with the analysis of meteorological data and the application of HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory version 4) trajectory calculation model, the vertical distribution characteristics of PM2.5 and the causes of PM2.5 pollution processes from 3 December to 4 December 2017 and from 23 December to

通讯作者 王体健, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

收稿日期 2019-02-01; 网络预出版日期 2019-07-10

作者简介 曹云擎, 男, 1995年出生, 硕士研究生, 主要研究方向: 大气物理学与大气环境。E-mail: mg1728035@smail.nju.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 91544230、41575145,国家重大科技研发项目 2017YFC0209803、2016YFC0208504

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91544230 and 41575145), Major National Science and Technology Research and Development Projects (Grants 2017YFC0209803 and 2016YFC0208504)

24 December 2017 were analyzed. The results showed a significant positive correlation between PM2.5 concentration and relative humidity. Moreover, the average correlation coefficient reached 0.96 in the six observations from 23 December to 24 December , 2017. Under the inversion layer, the PM2.5 concentration and relative humidity were high and the vertical difference was small. Over the inversion layer, the PM2.5 concentration and relative humidity rapidly decreased with the increase in height. Because of the poor atmospheric diffusion conditions, PM2.5 continuously accumulates in the south of the North China Plain and moves to the south and southeast under the influence of the high-pressure system. Both PM2.5 pollution processes were significantly affected by external transport. Atmospheric inversion significantly inhibited the upward transport of PM2.5 and water vapor. Moreover, external transport and local inversion were the main causes of these two PM2.5 pollution processes.

Keywords Multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV), Boundary layer, PM2.5 pollution, Vertical distribution, Backward trajectory

# 1 引言

随着经济的迅速增长以及城市化进程的不断推进,城市环境空气质量显著恶化,PM2.5(空气动力学直径小于 2.5 µm 的颗粒物)已经成为我国许多城市的首要污染物(Chan and Yao, 2008)。 PM2.5 浓度的增加不仅能够降低能见度,影响交通安全,而且通过改变降水和辐射等对气候产生影响,此外也对人体健康有负面影响(Gurjar et al., 2010)。PM2.5 主要分布于大气边界层以内,受到排放、区域输送和大气扩散条件的影响(Ramanathan and Feng, 2009),与气象条件和边界层结构紧密相关。因此,对 PM2.5 污染期间的气象要素、天气形势和污染物垂直分布的综合分析,对于理解污染成因及大气垂直结构对 PM2.5 垂直分布的影响有着重要的意义。

国内外学者针对 PM2.5 污染成因进行了许多 研究,发现除了人为排放以外,静稳天气导致的较差的大气扩散条件(Fu et al., 2008; Zheng et al., 2014),边界层高度降低以及新粒子的生成(Liu et al., 2013; 王跃思等, 2014)等,是 PM2.5 污染的 主要原因。此外,也有学者结合环流形式及其对边 界层结构的分析,对 PM2.5 的污染进行了研究( 王跃等, 2014)。由于城市相对集中以及 PM2.5 在 大气中的停留时间较长,在一些大气环流形势下, 外部输送也可能导致某一地区 PM2.5 浓度的升高。

气象要素和污染物浓度的垂直观测,对于研究 大气边界层,分析污染物垂直扩散和分布特征有着 十分重要的科学意义。传统的大气垂直观测方法包 括气象观测塔(Han et al., 2009; Sun et al., 2009)、 高山观测(Ou-Yang et al., 2014)、系留飞艇(Li et al., 2015)、探空气球(董秋婷等, 2018)、飞机 观测(Geng et al., 2009; 王维佳等, 2018)等, 存在 着探测高度限制、地点限制、经费高昂等问题。无 人机由于其体积较小、便携等特点, 能够相应选取 不同的地点和高度进行观测, 在一定程度上突破了 传统观测方法的限制。

进入21世纪之后,随着无人机应用于大气垂 直观测领域,为人们研究气象要素和污染物的垂直 分布提供了一种新的方法。牛记和王仁波(2014) 针对不便于获取低空 PM2.5 数据的情况,开发了 一套利用六旋翼无人机搭载设备进行低空测量的系 统,对规划的航线进行了飞行测量,发现南昌地 区 0~150 m 垂直方向上 PM2.5 的浓度大小无明显 变化。郭伟等(2017)和 Peng et al. (2015)利用 固定翼无人机对 PM2.5 的三维分布进行了观测, 发现 PM2.5 浓度一般随高度增加而下降,并且明 显受到温度的影响。Li et al. (2017) 利用固定翼无 人机对臭氧的三维分布进行了观测,发现对流层底 层臭氧的垂直分布主要与气温的垂直结构和气团的 水平输送有关。通过对六旋翼无人机垂直观测数据 和其他各类型数据的综合分析, Zhou et al. (2018) 研究发现,高湿度和逆温层会导致 PM2.5 浓度的 升高,较低的边界层高度和不利的环流形势同时会 抑制污染的消散。无人机观测虽然能够克服一些传 统方法的缺点并取得一定的研究成果,但是也会受 到载重和天气条件等外部因素的影响,观测的自动 化也不易实现。因此,通过结合无人机观测、传统 垂直观测和常规观测,实现优势互补,将会是未来 无人机在大气研究领域的一个趋势。

本文使用搭载了多参数大气环境探测传感器的 六旋翼无人机,对南京 2017 年 12 月 3~4 日和 12 月 23~24 日的 PM2.5 浓度、气温和相对湿度进行 了垂直观测,分析了 PM2.5 的垂直分布特征及其 与气温和相对湿度之间的关系。进一步使用地面站 观测数据和再分析资料,对污染期间的气象要素和 天气形势进行了分析,并结合 HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory version 4, HYSPLIT4)轨迹计算模式输出的气团 后向轨迹,综合分析了这两次 PM2.5 污染的成因。

### 2 无人机观测实验和数据

#### 2.1 无人机平台

本文研究所使用的六旋翼小型遥控无人机,搭 载了多参数大气环境探测传感器,能够根据需要, 对不同高度层进行观测。由于其体积较小、便携等 特点,能够相应选取不同的地点进行观测。此外, 它还具有价格相对较低、能够定点悬停、操作技术 简单等优点,可以弥补传统观测方法的一些不足之处。

无人机平台使用的是南京奇蛙智能科技有限公司生产的奇蛙 X-8 型号无人机,是一款搭载三冗余飞控的长航时六旋翼无人机,可以通过便携式地面站进行操控。该无人机重 13.5 kg,有效载荷 5.5 kg,旋翼半径 266 mm。相对较重的机身和较大的旋翼半径,使得无人机飞行相对平稳,最大可承受风速达 12 m/s。搭载探测装置之后,在一定的天气条件下续航时间为 45±2 min。

无人机平台搭载的探测装置使用的是深圳市腾 威测控技术有限公司生产的多参数大气环境探测器, 重 350 g,电池续航可达 360 min,集成了温度、相 对湿度、高度和 PM2.5 质量浓度传感器,每5 s 将 数据保存到存储模块中,能够通过 USB 接口下载 观测数据。温度传感器是一个热敏电阻探头,测量 精度为±0.3 ℃;相对湿度传感器是一个湿敏电阻, 精度为±3%; PM2.5 传感器通过分析空气样本的光 学特性来获取观测数据,包含了空气样本的进气和 出气口。采样期间,激光照射到颗粒物上发生散射, 从一定角度收集散射光从而获得散射光强度,然后 通过集成到微处理器上的散射理论算法,计算空气 样本中的颗粒物浓度,测量精度为±10 μg/m<sup>3</sup>。

#### 2.2 观测实验设计

无人机观测实验选址位于南京市东部近郊的南 京大学仙林校区(32.105°N,118.907°E),周边 区域为农田、居民区、小片的森林和化工厂。观测 地点位于校区内的第二运动场,场地平坦并且周围 没有高大的建筑物。

两次观测的时段分别为2017年12月3日 17:00(北京时间,下同)至4日20:00和2017年 12月23日19:00至24日05:00,第一次观测时段 期间每3h进行一次观测,第二次观测时段期间每 2h进行一次观测,每次无人机飞行持续时间约为 20 min, 对地面至 1000 m 高度之间的数据进行采 集。由于无人机电池运行后期电压减小,爬升困难, 因此观测开始后,无人机直接上升至1000m高度, 从上到下进行悬停观测。每次悬停持续约 2 min, 悬停高度分别为1000m、900m、800m、700m、 600 m、500 m、250 m 和 100 m, 无人机降落至地 面(0m)后,也同样采集约2min的数据。无人 机从下降转换到悬停,大气运动引起的流场不稳定, 都有可能导致异常值。去除掉异常值之后,每个高 度层的数据差异较小。为了提高无人机观测数据的 准确性,采用的是去除异常值之后的每个高度层的 平均值。

#### 2.3 数据和模式

本文使用了 2017 年 12 月 2~4 日和 12 月 22~ 24 日中国环境监测总站的全国监测点数据,分析 了 PM2.5 的水平空间分布和南京仙林大学城监测 点的地面 PM2.5 时间变化。使用了位于观测点东 南方向 500 m左右的南京仙林自动气象站 (32°07′N,118°09′)相同时段的 10 min风向、风 速、气温、相对湿度和气压数据,分析了污染期间 的气象要素及其与 PM2.5 浓度之间的相关性。另 外,还使用了美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 FNL 全球 分析资料,水平分辨率为1°(纬度)×1°(经度), 对污染期间的天气形势进行了分析。

为了进一步分析污染物的来源和输送路径,本 文使用了由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 开发的 HYSPLIT4轨迹计算模式(Stein et al., 2015),计算了南京地区气团的48h后向轨迹。 模式采用的是全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)的气象资料,水平分 辨率为0.5°(纬度)×0.5°(经度)。

#### 2.4 观测结果的稳定性和合理性分析

通过计算流体动力学(CFD)模拟技术,对无 人机飞行期间的流场进行了模拟,根据模拟结果将 探测装置安装到了无人机机身上部干扰最小的位置, 并且对无人机在近地面工作与非工作期间的观测数 据进行了对比,结果显示,无人机飞行期间,探测 装置只受到轻微的影响(沈奥等,2018; Zhou et al., 2018)。

无人机观测的地面 PM2.5 浓度值和南京仙林 大学城监测点的 PM2.5 观测值,除了使用的观测 仪器和观测方法存在差异之外,也与观测点的位置 有关,两个观测点相距约 3 km,不同观测点周边 的环境有所不同。由于上述原因以及 PM2.5 分布 的局地性差异,导致相同时刻两者的观测结果存在 差异。对比 2017 年 12 月 3 日 17:00 至 4 日 20:00 期间两者的 PM2.5 观测值发现,虽然浓度值存在 一定差异,但两者具有一致的变化趋势,相关系数 达到 0.94。

### 3 结果分析

#### 3.1 PM2.5 地面浓度变化和垂直分布特征

3.1.1 PM2.5 地面浓度变化

图 la为 2017年 12月 2~4日的 PM2.5和 PM10小时浓度变化,图 lb为 2017年 12月 22~ 24日的 PM2.5和 PM10小时浓度变化,PM2.5和

PM10有相对一致的变化趋势。图 1a中,2日 00:00 至 3 日 19:00, PM2.5 浓度较低且相对稳定: 3 日 20:00 至 4 日 12:00 PM2.5 浓度持续保持在 100 µg/m<sup>3</sup> 以上,期间 PM2.5 浓度先维持在 110 µg/m<sup>3</sup> 左右,然后迅速升高,在4日08:00达到峰值 169 μg/m<sup>3</sup>,之后浓度迅速下降至 100 μg/m<sup>3</sup>以下。 这 3 天的日均 PM2.5 浓度分别为 70、88 和 101 μg/m<sup>3</sup>,3日和4日超过75 μg/m<sup>3</sup>,达到轻度污染 水平。图 1b中, 22日 00:00至 23日 07:00, PM2.5 浓度基本维持在 100 μg/m<sup>3</sup>以下; 23 日 08:00 至 24 日 13:00 PM2.5 浓度超过 100 µg/m<sup>3</sup>, 浓度逐渐上升,在24日07:00达到峰值241 µg/m<sup>3</sup>, 之后浓度迅速下降至100 µg/m3以下。这3天的日 均 PM2.5 浓度分别为 85、133 和 140 µg/m<sup>3</sup>, 22 日 达到轻度污染水平,23日和24日达到中度污染 水平。

3.1.2 PM2.5 垂直分布特征

南京的两次 PM2.5 污染期间,通过无人机观测实验获得了 PM2.5、气温和相对湿度的垂直观测数据,观测时段分别为 2017 年 12 月 3 日 17:00 至 4 日 20:00,每 3 h进行一次观测; 2017 年 12 月



图 1 2017 年 (a) 12 月 2~4 日、(b) 12 月 22~24 日南京仙林大学城站颗粒物(PM2.5 和 PM10)小时浓度 Fig. 1 Hourly concentration of particulate matter (PM2.5 and PM10) at Nanjing Xianlin University City site: (a) 2 December to 4 December 2017; (b) 22 December to 24 December 2017

23 日 19:00 至 24 日 05:00, 每 2 h 进行一次观测。

图 2 为 2017 年 12 月 3 日 17:00 至 4 日 05:00 无人机观测的 PM2.5、气温和相对湿度垂直廓线, 整体上 PM2.5 浓度随高度升高而降低,相对湿度 随时间升高,有明显的水汽输送,由于夜间辐射冷 却,气温随时间逐渐降低。3 日 20:00 在 500~600 m出现明显的逆温,PM2.5 难以向上输送,导致其 浓度在 600 m 处出现极大值。4 次无人机观测,都 发现在 900 m 附近也出现了逆温,除 3 日 20:00 的 观测以外,其余 3 次观测的 PM2.5 浓度都在 800~900 m 处出现极大值,相对湿度在 800 m 左 右也同样出现了极大值。3 日 20:00 至 4 日 05:00 期间,高压系统开始向东南方向移动,污染区域缓 慢向南移动,4 日 05:00 处于污染区东部过境南京 期间,且相对湿度较高,导致低层 PM2.5 浓度明显升高(图 2a)。图 3为 2017年12月4日 08:00 至 20:00 无人机观测的 PM2.5、气温和相对湿度垂 直廓线,4日 08:00 和4日 11:00 两次观测同样处 于污染区东部过境南京期间,中低层 PM2.5 浓度 明显较高。随着污染继续向南输送,可以看到 PM2.5 浓度和相对湿度逐渐下降,由于白天太阳辐 射的作用,边界层变高,湍流较强,导致 PM2.5 在边界层内混合相对均匀,垂直变化不大。4日 17:00 和 20:00 的两次观测发现 700~1000 m 高度 的 PM2.5 浓度比 700 m 以下略高,这可能与高层 的输送有关。800~900 m 高度出现逆温,逆温层 下部相对湿度明显较高,逆温层上部相对湿度迅速 降低。



图 2 2017 年 12 月 3 日 17:00、3 日 20:00、3 日 23:00 和 4 日 05:00 南京大学仙林校区无人机观测实验观测的(a) PM2.5 浓度、(b) 气温、(c) 相对湿度垂直廓线

Fig. 2 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) vertical observation profiles of (a) PM2.5 concentration, (b) temperature, and (c) relative humidity during the UAV observation experiment in Xianlin Campus of Nanjing University at 1700 LST 3 December 2017, 2000 LST 3 December 2017, 2300 LST 3 December 2017, 0200 LST 4 December 2017, and 0500 LST 4 December 2017



图 3 2017 年 12 月 4 日 08:00、11:00、14:00 和 20:00 南京大学仙林校区无人机观测实验观测的(a) PM2.5 浓度、(b) 气温、(c) 相对湿度垂直廓线

Fig. 3 UAV vertical observation profiles of (a) PM2.5 concentration, (b) temperature, and (c) relative humidity during the UAV observation experiment in Xianlin Campus of Nanjing University at 0800 LST 4 December 2017, 1100 LST 4 December 2017, 1400 LST 4 December 2017, and 2000 LST 4 December 2017

第二次污染期间的观测(图4)中,23日 19:00至23:003次无人机观测发现,在900m左 右有明显的逆温,逆温层下部,PM2.5浓度和相对 湿度较高且随高度变化相对较小;逆温层上部, PM2.5浓度和相对湿度迅速降低。24日01:00至 05:003次无人机观测发现,分别在250m、600m、 和500m处出现逆温,PM2.5浓度和相对湿度在逆 温层上部和下部也同样出现了与前3次观测类似的 分布特征,表明逆温层对PM2.5和水汽的向上输 送有明显的抑制作用。

表1为PM2.5浓度与气温和相对湿度的相关性,可以看到,PM2.5浓度和气温整体上呈正相关关系,这与两者整体上随高度降低有关,4日14:00至20:00的3次观测中,高层PM2.5浓度整体上比低层高(图3a),相关系数为负值,这可能与高层PM2.5输送有关。在第一次污染过程期间,PM2.5浓度和相对湿度整体上表现为明显的正相关关系,4日02:00至08:00的3次观测中,相关性减弱且出现负相关性;在第二次污染过程期间,PM2.5浓度和相对湿度表现为明显的正相关关系且平均相关系数达到0.96。由于PM2.5和水汽的来源整体上位于近地面,随着大气运动向上输送,因此两者垂直分布的相关性较高,4日02:00至08:00的3次无人机观测中,两者相关性减弱且出现负相关性,这与高层较强的水汽输送有关(图2c)。

#### 3.2 气象要素分析

气象要素对于 PM2.5 的累积、输送和消散起 着重要的作用。一般来说,风速较低,不利于 表 1 2017 年 12 月南京大学仙林校区无人机观测实验观测的 PM2.5 浓度和气温、PM2.5 浓度和相对湿度垂直分布的 相关性

Table 1Vertical distribution correlation of PM2.5concentration and temperature, PM2.5concentrationand relative humidity observed by UAV during the UAVobservation experiment in Xianlin Campus of NanjingUniversity in December 2017

	相关系数		
观测时间	PM2.5浓度与气温	PM2.5浓度与相对湿度	
12月3日17:00	0.64	0.08	
12月3日20:00	0.73*	0.95*	
12月3日23:00	0.49	0.69*	
12月4日02:00	0.89*	-0.03	
12月4日05:00	0.91*	-0.60	
12月4日08:00	0.85*	0.44	
12月4日11:00	0.58	0.70*	
12月4日14:00	-0.18	0.68*	
12月4日17:00	-0.82*	0.77*	
12月4日20:00	-0.83*	0.56	
12月23日19:00	0.40	0.92*	
12月23日21:00	0.64	0.97*	
12月23日23:00	0.68*	0.98*	
12月24日01:00	0.75*	0.99*	
12月24日03:00	0.34	0.99*	
12月24日05:00	0.75*	0.90*	

\*表示通过显著性检验。

PM2.5 的扩散,容易形成污染。图 5 为风矢量在两次 PM2.5 污染期间的时间序列。从图 5a 可以看出,对应颗粒物浓度从相对稳定到上升期间(图 1a, 3



图 4 2017 年 12 月 23 日 19:00、23 日 21:00、23 日 23:00、24 日 01:00、24 日 03:00 和 24 日 05:00 南京大学仙林校区无人机观测实验观测的(a) PM2.5 浓度、(b) 气温、(c) 相对湿度垂直廓线

Fig. 4 UAV vertical observation profiles (a) PM2.5 concentration, (b) temperature, and (c) relative humidity during the UAV observation experiment in Xianlin Campus of Nanjing University at 1900 LST 23 December 2017, 2100 LST 23 December 2017, 2300 LST 23 December 2017, 0100 LST 24 December 2017, 0300 LST 24 December 2017, and 0500 LST 24 December 2017

日 00:00 至 4 日 08:00),风向由偏南风转为偏北 风,浓度上升期间,风速呈现增大的趋势,之后继 续保持偏北风,风速呈略微减小的趋势,浓度迅速 下降。图 5b 中,对应颗粒物浓度上升期间(图 1b, 22 日 18:00 至 24 日 07:00),风向由东北风沿逆时 针方向转变为西南风,风速在 PM2.5 达到峰值的 时间(24 日 07:00)前后明显增大;之后随着偏西 北风的建立以及风速的增大,颗粒物浓度迅速下降。 风矢量与 PM2.5 浓度关系图能够更加清晰的反映 出风与 PM2.5 浓度之间的关系,图 6a 显示,2 m/s 左右的西北风和 3~4 m/s 的偏北风对应较大的 PM2.5 浓度,风速在该时段内相对较大但不超过 4 m/s; 图 6b 中,整体上偏西南风对应较高的 PM2.5 浓度,偏西北风对应较低的浓度,但是两个 浓度大值区分别对应偏西南风和偏西北风,且风速 大于 5 m/s。这两次污染期间,都发生了明显的风 向转变且风速相对较大,不同于常见污染条件下风 速较小的情况。

气温、相对湿度和气压等气象要素也同样会 对 PM2.5 浓度造成影响,气温较低,使得边界层

![](_page_6_Figure_6.jpeg)

图 5 2017 年 (a) 12 月 2~4 日、(b) 12 月 22~24 日南京仙林站风矢量时间序列

Fig. 5 Time series of wind vector at Nanjing Xianlin site during (a) 2 December to 4 December 2017 and (b) 22 December to 24 December 2017

![](_page_6_Figure_9.jpeg)

图 6 2017 年 (a) 12 月 3~4 日、(b) 12 月 23~24 日南京仙林站风玫瑰与 PM2.5 浓度关系。图中黑色线条部分表示不同风向的频率 Fig. 6 Relationship between wind rose and PM2.5 concentration at Nanjing Xianlin site during (a) 3 December to 4 December 2017, and (b) 23 December to 24 December 2017. The black lines indicate the frequency of different wind directions

高度降低,导致 PM2.5 浓度升高;相对湿度高, 有利于 PM2.5 的吸湿增长 (Leng et al., 2016)。 表 2 中分析了两次污染期间以及 PM2.5 浓度大于 100 µg/m<sup>3</sup> 期间的 PM2.5 浓度与气象要素的相关性, 选取 PM2.5 浓度大于 100 µg/m3 的时段来研究相关 关系,能够更加突出两者之间的相关性。可以看到, 在两次污染过程期间, PM2.5 浓度大于 100 μg/m<sup>3</sup> 时段内,PM2.5浓度与风速呈显著的正相关关系, 与之前分析一致,PM2.5浓度与气温呈显著的负相 关关系,这是因为夜间气温降低导致边界层高度降 低,从而使得 PM2.5 浓度升高。PM2.5 浓度与相 对湿度,在第一次污染中(表 2,12月3日20:00 至4日12:00时段)表现为显著正相关,在第二次 污染中(表 2, 12月23日08:00至24日13:00时 段)表现为弱的正相关,这可能与下垫面的水汽通 量差异有关。两次污染过程中 PM2.5 大于 100 ug/m<sup>3</sup>时段内的平均相对湿度分别为 78% 和 62%, 相对较高的相对湿度容易促进 PM2.5 的吸湿增长

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

表 2 2017 年 12 月南京大学仙林校区无人机观测实验期间 仙林站 PM2.5 浓度与气象要素的相关性

Table 2Correlation between PM2.5 concentration andmeteorological elements at Nanjing Xianlin site during theUAV observation experiment in Xianlin Campus of NanjingUniversity in December 2017

	与PM2.5浓度相关系数			
时间段	风速	气温	相对湿度	气压
12月2~4日	-0.03	0.25*	0.16	0.10
12月3日20:00至4日12:00	0.68*	-0.68*	0.59*	0.79*
12月22~24日	0.41*	0.02	0.52*	-0.51*
12月23日08:00至24日13:00	0.54*	-0.76*	0.15	0.36

\*表示通过显著性检验。12月3日20:00至4日12:00为PM2.5浓度大于 100 µg/m<sup>3</sup>时段; 12月23日08:00至24日13:00为PM2.5浓度大于100 µg/m<sup>3</sup>时段

而提高两者的相关性。此外,PM2.5 化学组分的差 异会影响粒子吸湿增长的能力从而影响 PM2.5 浓 度与相对湿度的相关性。PM2.5 浓度与气压表现为 正相关,与高压系统的活动密切相关,在 3.3 中会

![](_page_7_Figure_10.jpeg)

图 7 2017 年 12 月 (a) 3 日 00:00、(b) 3 日 12:00、(c) 4 日 00:00、(d) 4 日 12:00 PM2.5 浓度水平分布 Fig. 7 Horizontal distribution of PM2.5 concentration at (a) 0000 LST 3 December 2017, (b) 1200 LST 3 December 2017, (c) 0000 LST 4 December 2017, and (d) 1200 LST 4 December 2017

详细分析。

#### 3.3 PM2.5 水平分布和天气形势分析

#### 3.3.1 PM2.5 水平分布

通过分析 PM2.5 的水平分布,能够更加直观 的看到 PM2.5 的累积和输送过程。图 7 和图 8 为 两次污染过程期间 PM2.5 的水平分布,使用的是 中国环境监测总站的全国监测点数据并插值到格点 上,图中时间间隔为 12 h。图 7 显示,2017 年 12 月 3~4 日,PM2.5 在河北省南部逐渐累积,并缓 慢向南移动,期间 PM2.5 浓度持续升高,部分站 点 PM2.5 小时浓度超过 275 μg/m<sup>3</sup>。南京位于整个 污染区的偏东部,因此污染期间南京 PM2.5 浓度 峰值为 169 μg/m<sup>3</sup>,相对较低。图 8 显示,2017 年 12 月 23~24 日,PM2.5 在河南、山东、安徽和江 苏四省交界区域逐渐累积并停留较长时间,南京位 于整个污染区的东南部,之后污染中心迅速向东南 方向移动,期间过境南京。因此,第二次污染期间, 南京 PM2.5 浓度逐渐升高并达到峰值 241 µg/m<sup>3</sup>, 之后浓度迅速降低。

#### 3.3.2 天气形势分析

天气形势对于污染物的累积、输送和水平分布 起着重要作用,稳定的天气形势,有利于污染物的 累积;高压系统的活动,特别是高压系统前部通常 伴随着大风和降水等天气过程,有利于污染物的扩 散和清除。图9和图10为两次污染物过程期间的 天气形势,使用的是美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 FNL全球分析资料,水平分辨率为1°(纬度) ×1°(经度)。第一次污染期间(图9),前期中 国以北受到高压系统控制,华北地区气压稳定,风 速较小,且在河南和河北交界区域有弱的水平辐合 (图9a),有利于 PM2.5 的累积;之后由于高压 系统前部自内蒙古向东南方向移动,华北地区受西 北风控制,华北地区以南受偏北风控制,由于风速

![](_page_8_Figure_10.jpeg)

图 8 2017 年 12 月 (a) 23 日 06:00、(b) 23 日 18:00、(c) 24 日 06:00、(d) 24 日 18:00 PM2.5 浓度水平分布 Fig. 8 Horizontal distribution of PM2.5 concentration at (a) 0600 LST 23 December 2017, (b) 1800 LST 23 December 2017, (c) 0600 LST 24 December 2017, and (d) 1800 LST 24 December 2017

曹云擎等:基于无人机垂直观测的南京 PM2.5 污染个例研究 CAO Yunging et al. A Case Study of PM2.5 Pollution in Nanjing Based on Unmanned Aerial ...

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

图 9 2017 年 12 月 (a) 3 日 08:00、(b) 3 日 20:00、(c) 4 日 08:00、(d) 4 日 20:00 海平面气压场(单位: hPa)和 850 hPa 水平风场( 图中白色圆点表示南京)

![](_page_9_Figure_4.jpeg)

![](_page_9_Figure_5.jpeg)

图 10 2017 年 12 月 (a) 23 日 08:00、(b) 23 日 20:00、(c) 24 日 02:00、(d) 24 日 14:00 海平面气压场(单位: hPa)和 850 hPa 水平风场。图中白色圆点表示南京

Fig. 10 Sea level pressure field (color map, units: hPa) and the horizontal wind field at 850 hPa (black wind shaft) at (a) 0800 LST on 23 December 2017, (b) 2000 LST 23 December 2017, (c) 0200 LST 24 December 2017, and (d) 1400 LST 24 December 2017. The white dot represents the location of Nanjing

相对较小,导致 PM2.5 缓慢向南输送。第二次污染期间(图 10),可以看到,在河南、山东、安徽和江苏四省交界区域风速较小,有明显的偏南气流和西北气流的辐合(图 10a);之后,偏南风转为偏西风,风速略微增大,辐合减弱(图 10b);随后,高压系统南移并崩溃,中国华北和东部地区出现较大的西北风。第二次污染期间,PM2.5 在辐合区内不断累积,之后受到高压系统的影响迅速向东南方向移动。

可见,发生在南京的这两次污染过程,都明显 的受到了外部输送的影响。第一次污染过程,外部 输送较为显著;第二次污染过程期间,南京位于辐 合区的东南部,本地以及邻近区域的排放导致 PM2.5浓度逐渐升高,随着污染中心向东南方向迅 速移动并过境南京,PM2.5浓度进一步升高达到峰 值,之后浓度迅速下降。

#### 3.4 气团后向轨迹分析

通过使用 HYSPLIT4 轨迹计算模式,能够帮助分析污染物来源和输送路径,图 11 为两次污染 期间不同高度气团的 48 h 后向轨迹,起始点设置 为南京(32.105°N,118.907°E),相同时长的模 拟,后向轨迹越长,表示输送越快。图 11a 和 11b 为第一次污染期间的气团后向轨迹,2017年12月 4日 08:00 对应南京地面 PM2.5 浓度达到峰值的时 刻,4日 14:00 对应 PM2.5 浓度迅速降低且浓度较 低的时刻。可以看到,PM2.5 累积期间,低层 PM2.5 主要来自于南京本地以及南京以西的临近区 域,较高层 PM2.5 主要来自于河南和安徽交界区 域,浓度达到峰值前的时段以偏北的输送为主,输 送过程缓慢。之后北风开始加强,污染逐渐消散, 期间气团经过海面,造成由北向南的水汽输送,与 第一次污染期间的无人机观测一致。图 11c 和 11d

![](_page_10_Figure_7.jpeg)

图 11 2017 年 12 月(a) 4 日 08:00、(b) 4 日 14:00、(c) 24 日 06:00、(d) 24 日 12:00 气团 48 h 后向轨迹(轨迹颜色表示气团所在高度, 星号代表轨迹终点南京)

Fig. 11 48-h backward trajectories at (a) 0800 LST 4 December 2017, (b) 1400 LST 4 December 2017, (c) 0600 LST 24 December 2017, and (d) 1200 LST 24 December 2017 (trajectory color indicates the height of the air mass, the asterisk represents the end of the track, Nanjing)

为第二次污染期间的气团后向轨迹,2017年12月24日06:00 对应南京地面 PM2.5 浓度达到峰值的时刻,24日12:00 对应 PM2.5 浓度迅速降低的时刻。气团在河南、山东、安徽和江苏四省交界区域呈缓慢的逆时针运动,有利于污染物的累积,之后向东南方向移动并过境南京。图11d中可以看到,由高层至低层的西北风开始建立且风速较大,导致污染迅速向东南方向移动。

## 4 结论

本文结合无人机垂直观测、气象分析和 HYSPLIT4 轨迹计算模式的应用,对南京两次 PM2.5 污染过 程的特征、成因及 PM2.5 的垂直分布进行了分析, 得到以下主要结论:

(1) 2017年12月2~4日污染个例日均
PM2.5浓度为70~101μg/m<sup>3</sup>,峰值浓度达到169μg/m<sup>3</sup>,2017年12月22~24日污染个例日均
PM2.5浓度为85~140μg/m<sup>3</sup>,峰值浓度达到241μg/m<sup>3</sup>。

(2)通过对无人机观测数据的分析发现,边 界层逆温能够有效地抑制 PM2.5 和水汽向上输送。 夜间较低的边界层高度和逆温,会导致近地面 PM2.5 浓度升高,伴随外部的输送进一步加重近地 面 PM2.5 污染。

(3) 2017 年 12 月 2~4 日污染期间, PM2.5 在中国华北地区逐渐累积,之后随着高压系统前部 自内蒙古向东南方向移动,北风建立,风速相对较 小,导致污染物缓慢向南输送,外部输送是这次污 染的主要原因。

(4) 2017 年 12 月 22~24 日污染期间,PM2.5 在河南、山东、安徽和江苏四省交界区域逐渐累积, 南京位于整个污染区的东南部,之后污染中心迅速 向东南方向移动,期间过境南京。本次污染过程, 前期以南京本地及西北部临近区域的影响为主, PM2.5 浓度逐渐升高;后期由于高压系统崩溃及较 强的西北风的影响,污染中心过境南京,PM2.5 浓 度继续升高并达到峰值,以外部输送为主。

致谢 本文使用了中国环境监测总站的全国监测点数据, 南京仙林自动气象站的观测数据,美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 FNL全球分析资料,全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)的气象资料,美国国家海洋和大 气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)开发的HYSPLIT4轨迹计算模式,在此表示感谢。

#### 参考文献(References)

- Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmos. Environ., 42(1): 1–42. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.003
- 董秋婷, 贺明慧, 刁军, 等. 2018. 夏季不同天气条件下风廓线雷达探 测精度分析 [J]. 气象科技, 46(1): 16-28. Dong Qiuting, He Minghui, Diao Jun, et al. 2018. Precision variation of wind profiler measurements with height in different weather conditions in summer [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 46(1): 16-28. doi:10.19517/j.1671-6345.20170015
- Fu Q Y, Zhuang G S, Wang J, et al. 2008. Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmos. Environ., 42(9): 2023–2036. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.12.002
- Geng F H, Zhang Q, Tie X X, et al. 2009. Aircraft measurements of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, and SO<sub>2</sub> in the Yangtze River Delta region [J]. Atmos. Environ., 43(3): 584–593. doi:10.1016/j.atmosenv.2008. 10.021
- 郭伟,余华芬,黄国栋. 2017. 基于无人机的 PM2.5 监测技术研究 [J].
  测绘通报 (S1): 147-151. Guo Wei, Yu Huafen, Huang Guodong.
  2017. PM2.5 monitoring technology based on unmanned aerial vehicle [J]. Bull. Surv. Mapp. (in Chinese)(S1): 147-151. doi:10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0639
- Gurjar B R, Jain A, Sharma A, et al. 2010. Human health risks in megacities due to air pollution [J]. Atmos. Environ., 44(36): 4606–4613. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.08.011
- Han S Q, Bian H, Tie X X, et al. 2009. Impact of nocturnal planetary boundary layer on urban air pollutants: Measurements from a 250-m tower over Tianjin, China [J]. J. Hazard. Mater., 162(1): 264–269. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.05.056
- Leng C, Duan J Y, Xu C, et al. 2016. Insights into a historic severe haze event in Shanghai: Synoptic situation, boundary layer and pollutants
  [J]. Atmos. Chem. Phys., 16(14): 9221–9234. doi:10.5194/acp-16-9221-2016
- Li J, Fu Q Y, Huo J T, et al. 2015. Tethered balloon-based black carbon profiles within the lower troposphere of Shanghai in the 2013 East China smog [J]. Atmos. Environ., 123: 327–338. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.096
- Li X B, Wang D S, Lu Q C, et al. 2017. Three-dimensional investigation of ozone pollution in the lower troposphere using an unmanned aerial vehicle platform [J]. Environ. Pollut., 224: 107–116. doi:10.1016/j.envpol.2017.01.064
- Liu X G, Li J, Qu Y, et al. 2013. Formation and evolution mechanism of regional haze: A case study in the megacity Beijing, China [J]. Atmos. Chem. Phys., 13(9): 4501–4514. doi:10.5194/acp-13-4501-2013
- 牛记, 王仁波. 2014. 基于六旋翼无人机的 PM2.5 低空测量系统 [J].

科学技术与工程, 14(36): 72-76. Niu Ji, Wang Renbo. 2014. PM2.5 low altitude measurement system based on six-rotor UAV [J]. Sci. Technol. Eng., 14(36): 72-76. doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2014.36.014

- Ou-Yang C F, Lin N H, Lin C C, et al. 2014. Characteristics of atmospheric carbon monoxide at a high-mountain background station in East Asia [J]. Atmos. Environ., 89(2): 613–622. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.02.060
- Peng Z R, Wang D S, Wang Z Y, et al. 2015. A study of vertical distribution patterns of PM2.5 concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: A case in Hangzhou, China [J]. Atmos. Environ., 123: 357–369. doi:10.1016/ j.atmosenv.2015.10.074
- Ramanathan V, Feng Y. 2009. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives [J]. Atmos. Environ., 43(1): 37–50. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.063
- 沈奥,周树道,王敏,等. 2018. 旋翼无人机大气探测设备布局仿真优 化设计 [J]. 计算机测量与控制, 26(2): 165-169, 174. Shen Ao, Zhou Shudao, Wang Min, et al. 2018. Simulation and optimization design of atmospheric detection equipment layout based on UAV [J]. Comput. Meas. Control, 26(2): 165-169, 174. doi:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2018.02.041
- Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96(12): 2059–2077. doi:10.1175/BAMS-D-14-00110.1
- Sun Y, Wang Y S, Zhang C C. 2009. Measurement of the vertical profile of atmospheric SO2 during the heating period in Beijing on

days of high air pollution [J]. Atmos. Environ., 43(2): 468-472. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.057

- 王维佳, 郭学良, 李宏宇, 等. 2018. 基于飞机观测的四川盆地初夏云 下气溶胶特征 [J]. 干旱气象, 36(2): 167-175. Wang Weijia, Guo Xueliang, Li Hongyu, et al. 2018. Aerosols characteristics beneath the clouds based on airborne observation in early summer over Sichuan basin [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 36(2): 167-175. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0167
- 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 2014. 北京冬季 PM2.5 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 19(2): 173-184. Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM2.5 heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic Environ. Res., 19(2): 173-184. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13178
- 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 57(1): 14-25. Wang Yuesi, Yao Li, Wang Lili, et al. 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China [J]. Sci. China Earth Sci., 57(1): 14-25. doi:10.1007/s11430-013-4773-4
- Zheng G J, Duan F K, Ma Y L, et al. 2014. Exploring the severe winter haze in Beijing [J]. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 14: 17907–17942. doi:10.5194/acpd-14-17907-2014
- Zhou S D, Peng S L, Wang M, et al. 2018. The characteristics and contributing factors of air pollution in Nanjing: A case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets [J]. Atmosphere, 9(9): 343. doi:10.3390/atmos9090343