

基于无人机的江苏沿海辐射雾边界层气象要素和污染物浓度特征研究

郭昊鹏¹,牛生杰^{1,2*},刘端阳³,吕晶晶¹,祖繁³,周悦⁴,王元⁵,葛攀延¹,邵乃夫¹,汪玲玲⁶,鲁海宁⁷

1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/大气物理学院, 南京 210044

2. 南京工业大学 安全科学与工程学院, 南京 211816

3. 南京气象科技创新研究院 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041

4. 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

5. 兰州大学 西部生态安全协同创新中心, 兰州 730000

6. 江苏省气象服务中心, 南京 210008

7. 江苏省东海县气象局, 连云港 222300

摘要 为深入研究辐射雾边界层气象要素和污染物浓度的垂直分布特征, 2020 年冬季在东海县利用无人机开展了边界层和污染物综合观测试验。研究发现: 雾天逆温层厚度要比晴天厚几十米至数百米不等, 强度要大 $0.5-1^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。雾天低空有风切变, 风向在垂直方向上变化较小, 而晴天低层风速变化较小, 风向在低空随高度呈顺时针旋转。相较于双层逆温结构, 有着深厚单层逆温结构的辐射雾的强度更强。在同一次辐射雾过程中, 雾的强度不会随着风向的变化而变化, 较低的风速更有利于强浓雾的形成。从污染物垂直分布来看, 逆温层内相同高度处的 TVOC 在晴天要比雾天高, 在辐射雾形成前和生成阶段, SO_2 浓度随高度递减速率远高于晴天同期。晴天和雾天 O_3 和 NO_2 的垂直变化呈现明显的负相关, O_3 在雾天近地面的梯度变化明显要大于晴天。 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在雾天要比晴天高出一倍以上, CO 在辐射雾过程中相对稳定, 垂直变化较小。TVOC、 NO_2 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 会受到辐射雾过程中强逆温的影响而在逆温层内累积。它们的累计变化率在雾后与雾前相比均有了明显下降, 颗粒物污染物的累积变化率比气态下降更显著, 且大粒径颗粒物累积变化率的下降幅度要超过小粒径颗粒物。夜间地面排放的 NO 等还原物质较难向上输送, 对高层的 O_3 消耗量远小于低层, 使得夜间高层 O_3 远大于低层, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的垂直分布差异较大, 白天太阳辐射增强, 不稳定边界层的发展伴随着高空 O_3 向下的混合导致 O_3 增加以及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放增多使得二者的垂直变化较为一致。

收稿日期 2022-09-18 网络出版日期

作者简介 郭昊鹏, 男, 1995 年出生, 博士研究生, 主要从事云降水物理学和大气环境研究. E-mail: 20211103007@nuist.edu.cn

通讯作者 牛生杰, E-mail: niusj@njtech.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(41775134;42075063;42075066;41875170);广西重点研发计划项目(桂科 AB20159013)

Funded by The National Natural Science Foundation of China (Grant No.41775134; No.42075063; No.42075066; No.41875170); Key Research and Development Program of Guangxi (Grant No. GuikeAB20159013)

关键词 辐射雾 边界层 气象要素 大气污染物 无人机 高分辨率垂直观测

文章编号 2022180B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22180

Study on the characteristics of meteorological elements and pollutant concentration in the boundary layer of radiation fog in Jiangsu coast based on UAV

WU Haopeng¹, NIU Shengjie^{1,2}, LIU Duanyang³, LÜ Jingjing¹, ZU Fan³, ZHOU Yue⁴, WANG Yuan⁵, GE Panyan¹, SHAO Naifu¹, WANG Lingling⁶, LU Haining⁷

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2. College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816

3. Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing 210041

4. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

5. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000

6. Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008

7. Donghai County Meteorological Bureau, Lianyungang 222300

Abstract :In order to further study the vertical distribution characteristics of meteorological elements and pollutant concentrations in the boundary layer of radiation fog, a comprehensive observation test of boundary layer and pollutants was carried out in Donghai County by UAV in the winter of 2020. It is found that the thickness of inversion layer in foggy days is from tens to hundreds of meters thicker than that in sunny days, and the strength is 0.5-1°C/hm larger. On foggy days, there is wind shear at low altitude, and the wind direction changes little in the vertical direction. On sunny days, the wind speed changes little at low altitude, and the wind direction rotates clockwise with height at low altitude. The intensity of radiation fog with deep single-layer inversion structure is stronger than that of double-layer inversion structure. In the same radiation fog process, the intensity of fog will not change with the change of wind direction, and the lower wind speed is more conducive to the formation of strong fog. From the perspective of vertical distribution of pollutants, TVOC at the same height in the inversion layer is higher in sunny days than in foggy days. Before and during the generation stage of radiation fog, the decrease rate of SO₂ concentration with height is much higher than that in the same period of sunny days. The vertical variation of O₃ and NO₂ in clear and foggy days is significantly negatively correlated, and the gradient variation of O₃ near the ground in foggy days is significantly greater than that in clear days. PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ are more than twice higher in foggy days than in sunny days. CO is relatively stable in the process of radiation fog with little vertical change. TVOC, NO₂, PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ will be affected by the strong inversion in the process of radiation fog and accumulate in the inversion layer. Their cumulative change rate decreased significantly after fog compared with that before fog. The cumulative change rate of particulate pollutants decreased more significantly than that of gas, and the cumulative change rate of particles with large particle size decreased more than that of particles with small particle size. NO and other reducing substances emitted from the ground at night are difficult to be transported upward, and the consumption of O₃ in the upper layer is much smaller than that in the lower layer, which makes O₃ in the upper layer much larger than that in the lower layer at night. As a result, the vertical distribution of PM_{2.5} and O₃ is significantly different, and the solar radiation is enhanced during the day. The development of unstable

boundary layer is accompanied by the downward mixing of O_3 in the upper air, which leads to the increase of O_3 and the increase of $PM_{2.5}$ emission, making the vertical changes of O_3 and $PM_{2.5}$ more consistent.

Keywords Radiation fog Boundary layer Meteorological elements Atmospheric pollutant UAV High resolution vertical observation

1 引言

大气边界层是地球大气层中最关键的部分之一（张强等，2004），地气之间的物质能量交换以及大气污染物的排放、累积和扩散都发生在此（胡非等，2003）。雾是边界层内的重要天气现象，它是由悬浮小水滴或冰晶组成的水汽凝结物。Gultepe et al.（2007）根据雾形成的主要物理过程将其分为辐射雾、平流辐射雾、平流雾等几类。辐射雾是最为常见的雾，它降低地面能见度，影响社会经济发展，危害人民身体健康（王元等，2021）。

气象科技工作者为研究辐射雾形成的物理机制和污染物在边界层中排放、累积和扩散等规律，开展了边界层要素垂直分布及演变规律的观测研究。早期的边界层观测主要是施放探空气球和系留汽艇测量温度、湿度的垂直分布及时间演变情况（叶笃正，1962）。探空气球和系留汽艇具有成本低，相对载重大，施放简便不受地域和气候因素影响，飞行时间较长，携带仪器姿态稳定等优点，是边界层探测的主要工具之一。不少学者也通过施放系留汽艇开展雾的边界层观测试验：黄建平等（1998）利用系留汽艇对南京一次连续 5 天辐射雾进行观测，发现辐射雾中温度场和风场相互作用，其中温度场决定了风场的垂直结构。Liu et al.（2012）利用系留汽艇对南京北郊进行长达 4 年雾的外场观测，结果表明：雾中强逆温的稳定边界层结构有利于水汽和气溶胶的累积。利用气象塔等高建筑物进行气象要素和大气污染物的垂直观测具有较高的观测分辨率和时间连续性，是一种较为可靠的方式。众多学者也因此分别利用当地气象塔或电视塔开展污染物垂直结构研究，探讨当地典型城市污染物及其主要组分的垂直分布特征以及影响因素（Sun et al.2013; Deng et al.2015）。张光智等（2005）在北京利用 325m 铁塔对一次大雾过程中 SO_2 和 NO_2 进行梯度观测，发现起雾前，随着 SO_2 及 NO_2 浓度的增加，凝结度迅速增长；大雾期间，随着凝结度增长， SO_2 及 NO_2 浓度反而下降，这表明城市大气污染物作为凝结核在低空堆积对触发凝雾起重要作用。近年来无人机作为新型观测工具，已在大气环境观测领域得到广泛应用。多旋翼无人机可以灵活地在边界层内垂直起降和悬停，相较于系留汽艇，无人机具有更好的机动性和更为低廉的成本，而相较于气象塔的定点梯度观测，无人机可以观测到连续的廓线（王东生等，2019）。Li et al.（2017）利用固定翼无人机对 O_3 的三维分布进行了观测，发现其垂直分布与气温的垂直结构和气团的水平输送有关，曹云擎等（2020）利用六旋翼无人机对一次 $PM_{2.5}$ 污染过程进行了垂直观测，发现边界层逆温能抑制水汽和 $PM_{2.5}$ 向上输送，使得近地面 $PM_{2.5}$ 浓度升高。

先前的这些研究已经对边界层气象要素和污染物浓度的垂直分布特征有了一定的认识，但很少有在雾中同时开展边界层气象要素和污染物垂直观测，进而分析雾的垂直发展对污染物浓度垂直分布的影响，且先前对污染物的垂直观测主要集中在单一或两三种污染物，鲜有同时对多种污染气体和颗粒物开展垂直观测。

鉴于此,研究团队于 2020 年冬季使用无人机在东海县开展辐射雾边界层要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、TVOC (Total Volatile Organic Compounds)、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 PM_{10} 这 8 种污染物浓度高分辨率垂直观测试验。通过研究辐射雾中边界层气象要素和污染物浓度的演变规律,为提高辐射雾的监测预警水平提供理论支撑以及为研究城市大气污染和评估雾的环境影响提供科学依据。此外考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 是影响我国空气质量的主要大气污染物,近年来以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染为特征的大气复合污染问题频发(孙金金等, 2022), 本文还将着重对垂直方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的分布特征及变化加以讨论, 以期对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同控制对策的制定提供参考。

2 观测试验及数据处理方法

2.1 观测试验介绍

研究团队于 2020 年 11 月 19 日至 2021 年 1 月 15 日在东海国家气象观测站 (34.54°N , 118.71°E , 海拔 32.9m) 观测场进行了为期 58 天的外场综合观测试验。本文所用的三个辐射雾个例和晴天的观测数据见表 1。辐射雾微物理特征及形成机制详见文献(邬昊鹏等, 2022)。

表 1. 辐射雾和晴天的观测数据

Table 1. Datasets from radiation fog and sunny day observations

观测数据	时间
Fog 1	2020.12.11 1:30 – 2020.12.11 10:30
Fog 2	2020.12.11 23:30 – 2020.12.12 11:00
Fog 3	2020.12.28 2:30 – 2020.12.28 10:30
晴天	2020.12.26 20:00 – 2020.12.27 8:00

观测时,温度、湿度、风速、风向、能见度等地面气象要素数据来源于自动气象站,时间分辨率为 1 min。边界层气象要素和污染物浓度的廓线数据由南京气象科技创新研究院(中国气象局交通气象重点开放实验室)自主研发的多旋翼无人机观测系统收集。其中气象要素传感器集成了温、压、湿、风向、风速五要素。大气移动监测系统可以测量大气中的 TVOC、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 CO 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等 8 种污染物。气象要素传感器和大气移动监测系统的参数、测量原理和质量控制见文献(王宏斌等, 2020; 梁粤, 2021)。在进行无人机高分辨率垂直观测时,每秒进行一次数据采集,每架次无人机的飞行间隔约为 1 小时,垂直上升速度设定为 150-200m/min,垂直分辨率约为 5-10m。由于无人机起飞时需要飞行一段距离调整位置将机头朝向正北,故将探测范围设定为 20-800m。无人机飞行时次见图 1。

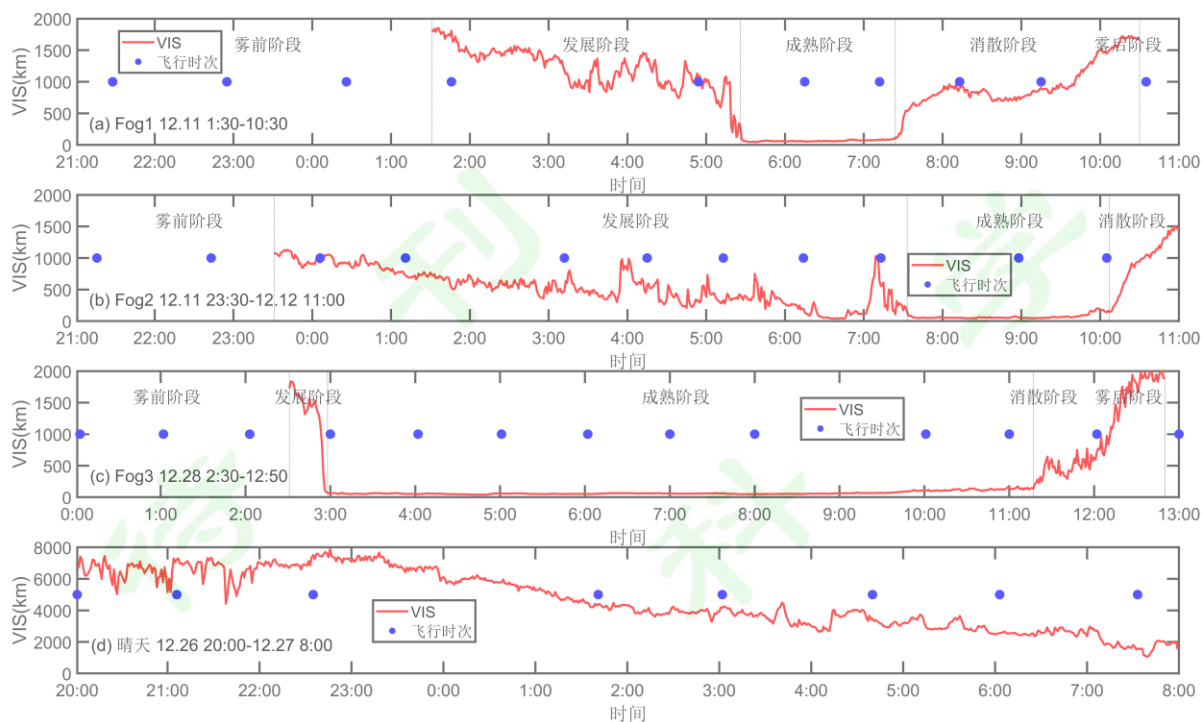


图 1.无人机飞行探测时次（飞行时次横坐标为对应的飞行时间）

Fig.1 the flight time of UAV (The abscissa of the flight is the corresponding flight time)

2.2 数据处理方法

雾作为近地面层的水汽凝结现象，必然存在水汽饱和区，即相对湿度高值区。但高湿条件下的湿度测量存在显著偏差，故本研究将相对湿度 $>90\%$ 的区域判定为雾区（郭丽君等，2105）。根据能见度（VIS）的变化情况，将辐射雾过程划分为发展阶段（ $2000\text{m}<\text{VIS}\leq 50\text{m}$ ），成熟阶段（ $\text{VIS}<50\text{m}$ ）和消散阶段（VIS 重新 $>50\text{m}$ ），具体划分情况见图 1。此外，逆温强度和污染物累积变化率是采用线性函数（ $y=kx+b$ ）对温度和污染物至其峰值高度处的垂直数据进行拟合，得出的 k 值即为逆温强度和污染物累积变化率； $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的变化率是根据 0-800m 它们廓线的变化趋势，将其大致分为 2-4 段，每段采用线性函数（ $y=kx+b$ ）对廓线进行拟合，得出的 k 值即为每段的变化率。

3、边界层气象要素垂直分布特征

3.1 晴天边界层气象要素垂直分布特征

图 2 为晴天边界层气象要素垂直分布特征。由图 2 可知逆温层从晚间 20 时开始发展，随时间推移缓慢升高，并在凌晨 6 时达到最大高度。其中在 23 时、5 时、6 时和 8 时还出现了双层逆温结构，这可能是与风向的变化有关，若上风向处为陆地，则陆地白天边界层顶存在明显的逆温层；若上风向处为海洋，则较难探测到明显的边界层顶逆温。晴天的逆温强度较弱，第一层逆温平均逆温强度为 $1.2^\circ\text{C}/\text{hm}$ ，变化范围在 $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}/\text{hm}$ 之间。晴天的逆温层厚度也较薄，第一层逆温层平均厚度为 200m。从相对湿度变化来看，26 日晚间相对湿度在垂直方向上没有明显变化，约为 60% 左右。而在 27 日凌晨，由于大量水汽在稳定的逆温环境中聚集，导致逆温层内相对湿度持续升高，在 8 时已经达到了 80%，但尚未达到形成雾的条件，而各时次饱和层之上的相对湿度均随高

度迅速减小。从风速变化来看, 20 时至 23 时, 在 200m 附近有低空急流出现, 急流之上风速随高度减小。之后随着夜间稳定边界层的发展, 低空风速逐渐减弱, 变化范围在 0-2m/s, 已达不到低空急流的强度, 在 100m 附近处出现风速极小值, 其上风速随高度增大, 在 400-500m 之间达到最大值 4m/s。在整个观测过程中, 风向在 0-200m 的低空基本都随高度呈顺时针旋转, 这表明该地出现暖平流。东海县地处中纬度沿海, 夜间海陆温差较大, 当海上暖湿空气流到大陆上时, 就会出现平流逆温。

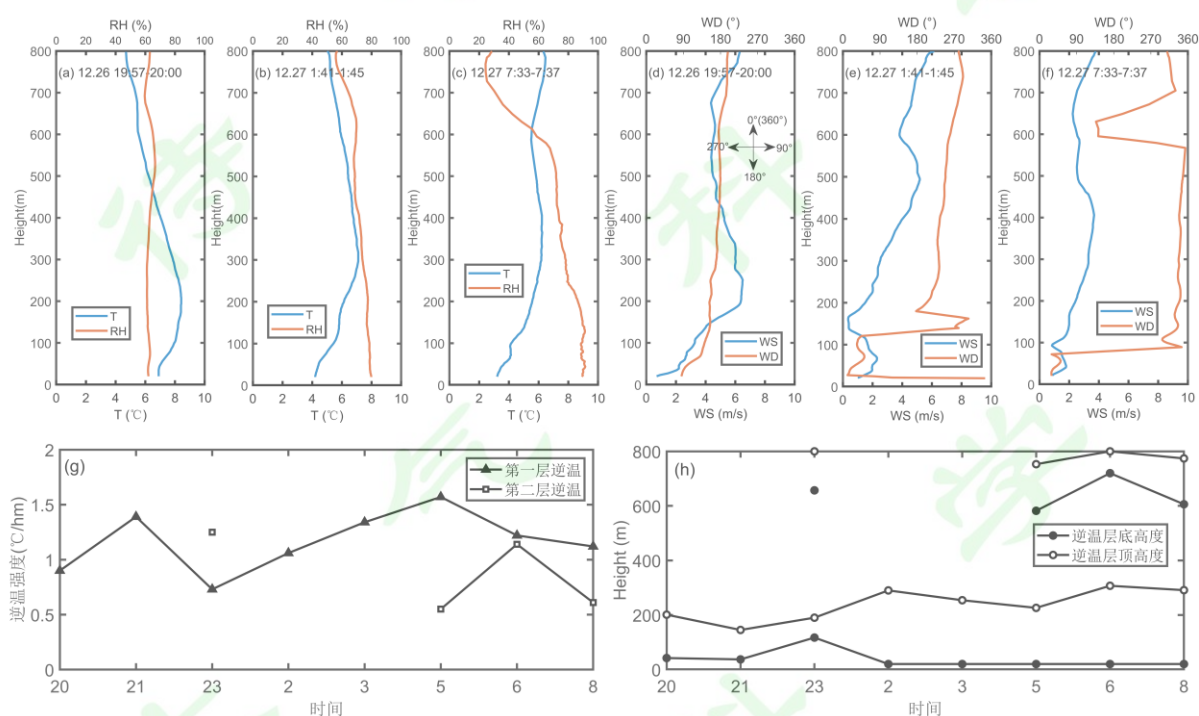


图 2. 晴天边界层气象要素垂直分布特征(a-f), 逆温变化率(g), 逆温层底和层顶高度(h)

Fig. 2 vertical distribution characteristics of boundary layer meteorological elements in Sunny days (a-f), inversion change rate (g), inversion bottom and top height (h)

3.2 辐射雾边界层垂直分布特征

图 3 是无人机探测期间的平均能见度和雾层厚度 (a), 逆温变化率 (b), 逆温层底和层顶高度 (c)。由图 3(a) 可知, 3 个个例在辐射雾形成之前都出现了贴地逆温层, 贴地逆温层的存在为辐射雾的发展提供了良好的层结条件, 有利于近地面水汽的聚集, 为雾体增厚提供了充足的水汽。其中在 Fog1 和 Fog2 的贴地逆温层上空又出现了一层逆温, 呈双层逆温结构。从图 3(b) 可以看出在 Fog1 中的 5 时和 Fog2 中的 9 时, 随着逆温层厚度增加, 贴地逆温层强度明显增大, 特别是在 Fog2 中的 9 时, 上层逆温层消失, 逆温强度较前一时次增加一倍以上, 由先前的 1.92°C/hm 迅速增长到 4.06°C/hm, 出现了两层逆温的合并, 合并后深厚的逆温更有利于雾的发展与维持。Fog3 与 Fog1 和 Fog2 不同, 虽然整个辐射雾过程中一直是单层逆温, 但其贴地逆温层厚度相较于 Fog1 和 Fog2 更为深厚, 且逆温强度更大, 平均逆温强度达到了 2.6°C/hm, 比 Fog1 和 Fog2 在双层逆温出现时的第一层逆温的平均逆温强度分别高 0.9°C/hm 和 0.6°C/hm。

从图 3(c) Fog3 的贴地逆温层底高度的变化来看, 可以清楚地看出贴地逆温层经历了建立→增

强→抬升上传→逆温强度增大→逆温层破坏的变化过程。首先夜间地面强烈的辐射降温建立了很强的贴地逆温层，地表辐射冷却使水汽大量凝结成雾，雾在刚生成时近地面温度呈常量，随着雾的发展，雾体内温度呈湿绝热递减，当辐射雾发展到一定厚度时，辐射降温的作用就会减弱，当逆温层抬升后，近地面没有新的逆温层生成则使雾难以维持，已生成的雾也将随着逆温层的破坏而消散。在 Fog1 中的 2 时也出现了贴地逆温层抬升的情况，但之后逆温层又恢复到原先的高度，这可能是出现了贴地逆温层抬升→重建的过程，即当贴地逆温层抬升至一定高度后，又会使得地面辐射冷却作用增强，新的贴地逆温层开始重建。

由图 3(a) 还可以看出，雾顶高度与贴地逆温层顶高度以及雾强度的变化有着高度的一致性。贴地逆温层顶和雾顶始终处在暖湿气流中，气流的强弱导致了雾顶和贴地逆温层顶的升降。因为雾顶始终位于贴地逆温层顶附近或之上，如果雾顶升高，雾的辐射冷却就会加强，贴地逆温层顶以上气层相对降温更加明显，贴地逆温层就会抬升，反之，如果贴地逆温层出现抬升，更有利于水汽积累，促使雾顶升高。同样的，在雾消散阶段，雾顶在下降的过程中也会出现类似的情形。

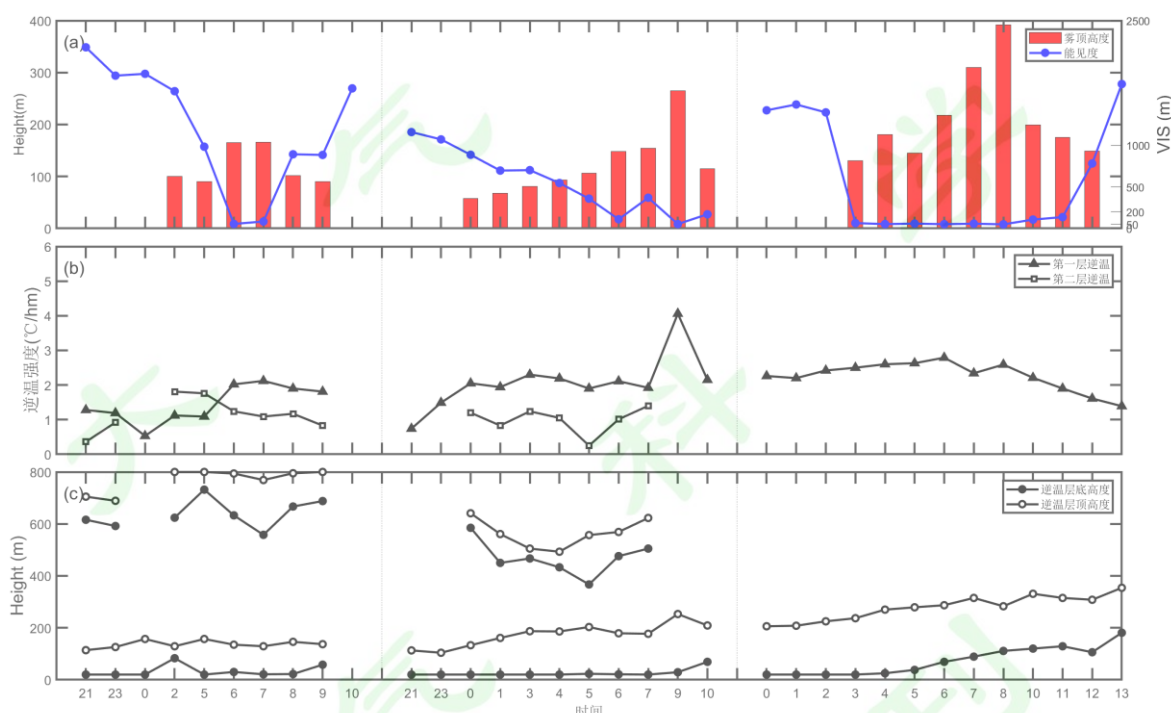


图 3.无人机探测期间的平均能见度和雾层厚度 (a), 逆温变化率 (b), 逆温层底和层顶高度 (c)

Fig.3 Average visibility and fog top height (a), inversion change rate (b), inversion bottom and top height (c) during the detection by UAV

从图 4 来看，在辐射雾的生成和发展阶段，近地面存在较强的贴地逆温层导致湍流受到抑制，湍流交换微弱使得上下层的风速差异较大，动量向下输送受阻而在此累积，导致低空急流区的出现，Fog1 中的急流速度高达 8m/s 左右，结合图 3(c) 来看，急流出现高度与贴地逆温层顶高度较为一致，这是因为两者之间存在正反馈，相互促进（赵德山和洪钟祥，1981）。随着贴地逆温层顶处的风速不断加大，其层内的湍流运动急剧产生和加强，湍流混合作用突然增大，随之引起动量和热量爆发性下传，导致贴地逆温层顶处的低空急流消失。但由于贴地逆温层的阻挡作用,动量无法

下传到地面，地面仍处于微风状态。在这一动力过程中，低层风速、温度在几十分钟内发生剧烈变化，同时贴地逆温层厚度急剧增加，风速切变迅速减小，导致切变不稳定条件消失，重新恢复到贴地逆温发展时的情况，雾的强度也增强。随着贴地逆温层逐渐离开地面抬升至雾顶附近，低空急流也逐渐消失，雾顶之上层结稳定，风速廓线满足线性变化规律。整体来看，随着辐射雾的发展，低层风速和风速切边均有着显著的减小，这表明风速减小有利于雾的强度增强。

从风向变化来看,在同一个例中，风向廓线并没有随着雾的强度变化而发生变化，在 Fog1 和 Fog2 中，风向主要以北风或西北风为主，而在 Fog3 中风向主要为东北风，相较于北风或西北风，东北风可以起到冷平流作用，使得近地层温度维持在一个较低的温度，既有利于水汽凝结，又可以将相邻的黄海的水汽输送过来，为辐射雾的发展和维持提供充足的水汽条件。这也是相较于 Fog1 和 Fog2，Fog3 中强浓雾持续时间更长的一个原因。

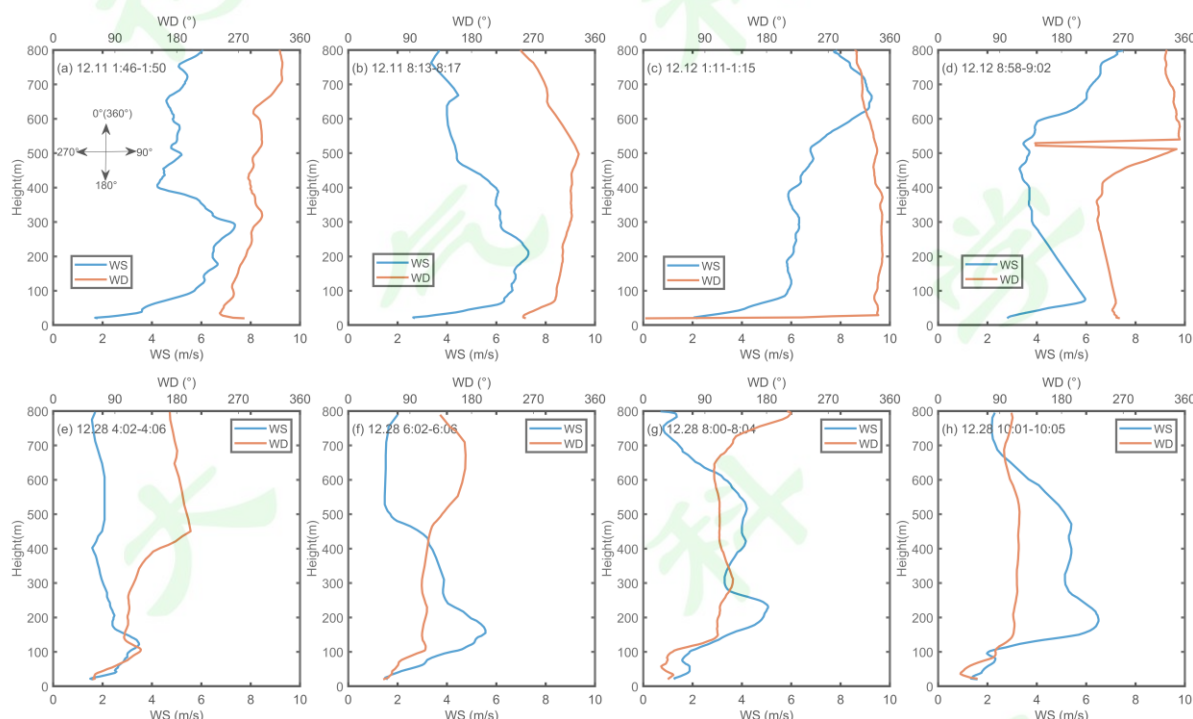


图 4. Fog1 (a-b)、Fog2 (c-d)和 Fog3 (e-h)风速、风向廓线变化

Fig.4 Variation diagram of wind speed and wind direction profile of Fog1, Fog2 and Fog3

总的来看，晴天和辐射雾中边界层气象要素的差别主要集中在以下几点：1、雾天逆温层厚度要比晴天厚几十米至数百米不等，强度要大 $0.5-1^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。2、低空有风切变,切边之上风速垂直变化不大，而晴天低层风速变化较小，存在风速极小值。其上部风速随高度增大。3、雾天风向在垂直方向上变化较小，而晴天风向在低空随高度呈顺时针旋转。

4、晴天和雾过程中 8 种污染物垂直分布特征

雾滴为一次污染物转化为二次污染物提供反应界面（wolfe 等，1979），此外，受不利扩散条件的影响，雾天中高污染物浓度往往会持续较长时间，造成严重公害事件（Whittaker 等，2004）。本节主要通过分析晴天和辐射雾过程中无人机探测到的污染物浓度廓线来探究辐射雾过程中不同污

染物的响应差异及其大气污染作用机理，为诊断环境过程中雾天对大气污染物浓度的演变作用提供参考。其中无人机探测污染物的时间为晴天的12月26日20时至12月27日8时和Fog3中的12月28日1时至13时。

4.1 晴天和雾天污染物浓度垂直分布特征对比分析

图5、图6和图7分别为TVOC、SO₂、NO₂、O₃、PM_{1.0}、PM_{2.5}、PM₁₀和CO这8种污染物在晴天和雾天的垂直分布。由图可知，由于夜间排放量的减少，TVOC在夜间的浓度要明显低于白天。晴天和雾天的夜间TVOC的廓线变化差别不大，均呈先增大后减小再增大的趋势，其峰值位置与贴地逆温层顶位置较为一致，但逆温层内同一高度处的TVOC在晴天要比雾天高出约10%，这可能是由于辐射雾中高湿环境促进了醛酮类化合物和有机酸从气相到颗粒相的转移以及液相中的去除反应（肖瑶等，2020），从而使TVOC浓度降低。日出后，TVOC的廓线变化趋势开始变为先减小后增大，且近地面处的数值相较于夜间也有了一定的减小，这可能是由于日出后随着太阳辐射增强，环境温度升高，引起混合层高度升高以及光化学反应增强有关（Zou等，2015）。而高空TVOC的增大则可能是来自区域水平输送。

SO₂在晴天和雾天均呈现出随高度减小的垂直分布特征，但其在逆温层内随高度减少较少，而逆温层外随高度减少较多。二者差别主要集中在辐射雾形成前和生成阶段，SO₂浓度随高度迅速递减，递减速率远高于同期晴天，这可能是由于在此阶段，大气的饱和度还比较低，大量的SO₂通过气-粒转化形成硫酸盐气溶胶，形成的硫酸盐气溶胶可以作为凝结核，为雾的发展提供条件（王元等，2019）。在辐射雾消散阶段，近地面SO₂并没有因为逆温层的破坏而随高度减少，这可能是白天汽车尾气和工业生产排放出大量的SO₂所致。此外在600m以上的高空，雾天所有时次的SO₂浓度都随高度增加，体现出显著的高空输送。

结合O₃和NO₂的垂直分布来看，二者呈现明显的负相关，这可能是由于地面人为活动排放的NO消耗O₃，使得O₃的浓度随着高度的增加而增加，即发生了 $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ 反应，此反应虽然一方面导致NO₂增加，但另一方面因为夜间光解作用较弱，而使NO₂呈现明显的负梯度。日出后，受光解作用影响低层NO₂浓度显著减小，而在光化学的作用影响下底层O₃浓度显著增加，即发生了 $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ 和 $\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$ 反应（朱燕舞等，2010）。由于高空光化学反应更加充分，使得夜间残留层储存的O₃较多，也可能导致高层O₃浓度较高。O₃几乎不受逆温层的影响而NO₂会在逆温层内累积。此外，O₃在雾天近地面的梯度变化明显要大于晴天，这可能是由于辐射雾中高湿环境不利于O₃的累积（严文莲，2019）。

PM_{1.0}、PM_{2.5}和PM₁₀在晴天和雾天的垂直分布差别较大，整体上看，三种颗粒物在雾天要比晴天高出一倍以上。三者在同一次观测中的变化存在高度的一致性。在晴天，虽然受逆温层的影响，它们的浓度在逆温层内出现了一定堆积，但其在垂直方向上浓度变化不大，最大值仅比近地面增加约20mg/m³，这可能是由于晴天边界层较高，湍流较强，导致它们在边界层内混合相对均匀，垂直变化不大，而在雾天，它们的浓度在逆温层内随高度增幅较大，最大值要比近地面增加50mg/m³以上。在晴天和雾天，受风切变影响，颗粒物浓度均会在一段高度内出现随高度减少的趋

势，之后浓度继续随高度增大，直至达到逆温层顶附近，逆温层以上，三者的浓度均随高度减少。从雾天 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在不同时刻的自身变化来看，三者都是在辐射雾生成后，雾体内相同高度处的浓度一直减少，等到日出后随着辐射雾逐渐消散，雾滴蒸发会释放出大量核气溶胶，以及人为排放活动的增加，它们的浓度又随之增大。辐射雾过程中颗粒物浓度降低可能是因为雾对气溶胶的沉降作用，随着辐射雾的发展，雾滴尺度和含水量会急剧增大，雾滴对气溶胶的湿清除作用也随着加剧，进入雾滴内的气溶胶粒子会跟随雾滴沉降（杨军等，2010）。

从 CO 的垂直分布来看，其在晴天和雾天均呈现出先减小后增大再减小的趋势，其中在晴天的最后 4 时至 8 时，CO 浓度在 400-500m 附近出现异常增大，这可能是区域输送所致。CO 廓线在辐射雾过程中相对稳定，变化较小，这可能是因为 CO 难溶于水，而且常温下化学性质不活泼，相比于其他污染物，雾对 CO 的影响很弱，CO 浓度的降低主要取决于垂直扩散作用的增强，其湿沉降量相比于其他污染物很少。

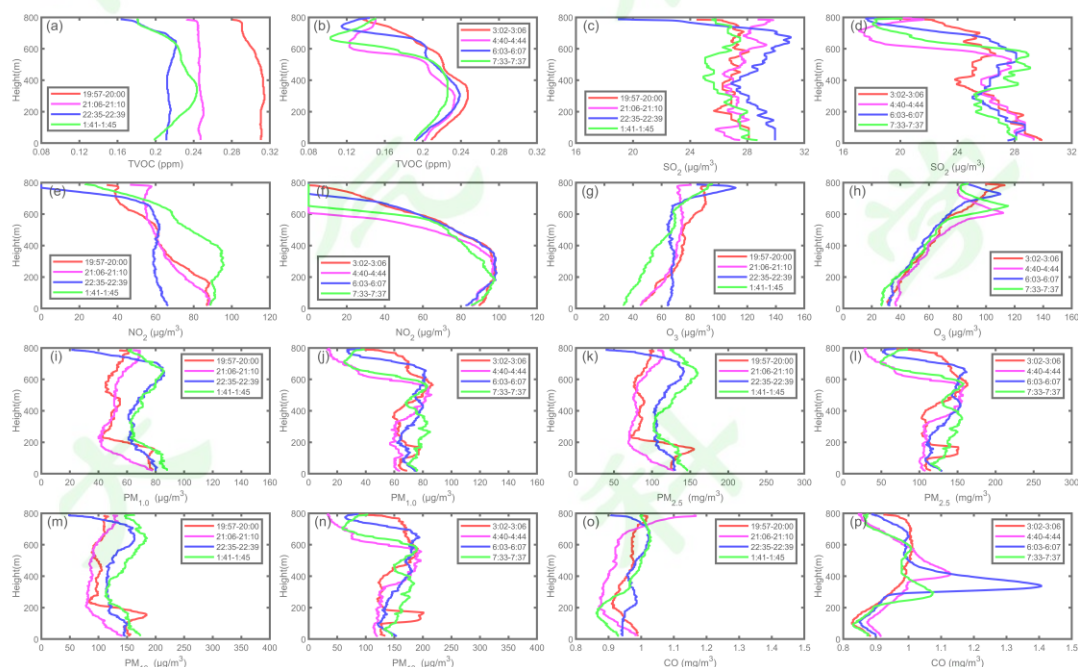


图 5.晴天 TVOC (a-b)、 SO_2 (c-d)、 NO_2 (e-f)、 O_3 (g-h)、 $PM_{1.0}$ (i-j)、 $PM_{2.5}$ (k-l)、 PM_{10} (m-n)、CO (o-p) 垂直分布特征

Fig.5 Variations of TVOC (a-b), SO_2 (c-d), NO_2 (e-f), O_3 (g-h), $PM_{1.0}$ (i-j), $PM_{2.5}$ (k-l), PM_{10} (m-n), CO (o-p) profiles in sunny day.

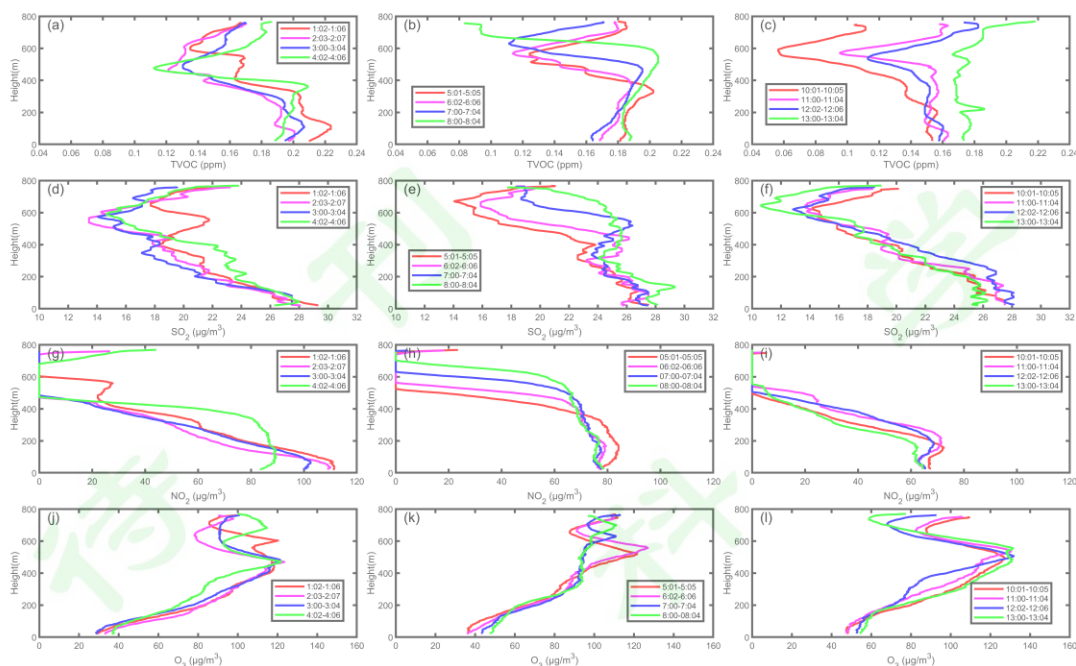


图 6.Fog3 中 TVOC (a-c)、SO₂ (d-f)、NO₂ (g-i)、O₃ (j-l) 垂直分布特征

Fig.6 Vertical distributions of TVOC (a-c), SO₂ (d-f), NO₂ (g-i) and O₃ (j-l) in Fog 3

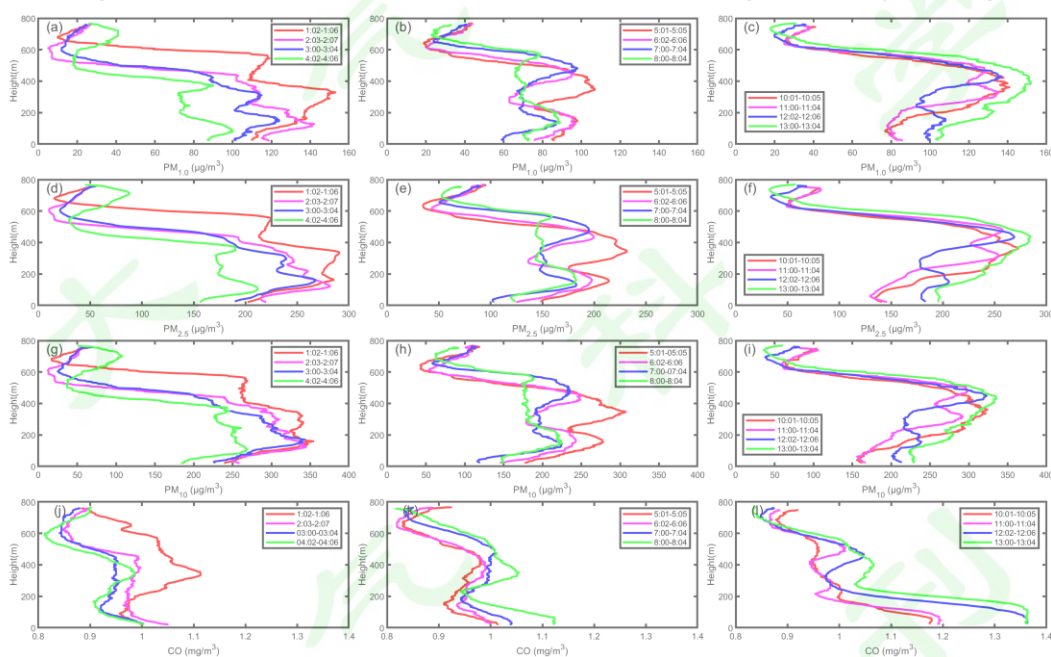


图 7. Fog3 中 PM_{1.0} (a-c)、PM_{2.5} (d-f)、PM₁₀ (g-i)、CO (j-l) 垂直分布特征

Fig. 7 Vertical distributions of PM_{1.0} (a-c), PM_{2.5} (d-f), PM₁₀ (g-i) and CO (j-l) in Fog3

4.2 逆温强度与污染物累积之间关系

为深入分析辐射雾过程中特有的强逆温结构对污染物浓度分布的影响，表 1 为辐射雾过程中不同时间次的 TVOC、NO₂、PM_{1.0}、PM_{2.5}、PM₁₀ 的峰值出现高度、累积变化率、逆温层高度及强度。从表中可以看出这五种污染物都受到逆温的影响而在逆温层内堆积，但受到的影响程度不同，TVOC 在辐射雾开始前、发展阶段、消散阶段和结束后的峰值高度较低，在成熟阶段时的峰值高度较高，特别是 4-8 时的峰值高度甚至超过了逆温层顶高度。NO₂ 的峰值高度在成熟阶段和消散

阶段较高，相较于辐射雾开始前上升了约百米， $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 三者在相同时次的峰值高度基本相同。在 1-8 时，其峰值高度均小于逆温层顶高度，而在 10 时、11 时和 13 时，其峰值高度有了大幅度提升，达到了 300m 以上，超过了逆温层顶高度。

总体来看，TVOC 的累积变化率呈下降趋势，雾前最高为 0.017ppm/hm，随着辐射雾的发展逐渐减小，直至 10 时的 0.001ppm/hm，之后逐渐上升。 NO_2 的累积变化率也是在雾前最高，为 $13.17 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ ，随着辐射雾的进程波动下降，甚至在 7 时、8 时以及 13 时没有出现累积。同一时次 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的累积变化率的大小顺序为 $PM_{10} > PM_{2.5} > PM_{1.0}$ 。从 01-07 时，三者的累积变化率呈波动上升趋势，其中 $PM_{1.0}$ 和 $PM_{2.5}$ 的累积变化率在 7 时达到最大，分别为 31.13 和 $94.37 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ ，而 PM_{10} 的累积变化率则是在 4 时达到最大为 $117.70 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ 。从 8 时起，三者的累积变化率波动下降直至辐射雾消散，在雾后又有了进一步的回升。在消散阶段三者累积变化率分别为 $6.60 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ ， $19.46 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ 和 $24.98 \mu g \cdot m^{-3}/hm$ 。由此可见相较于气体污染物的累积变化率，颗粒物污染物的累积变化率在雾中下降更显著。此外，大粒径颗粒物累积变化率的下降幅度要超过小粒径颗粒物，这可能是由于相较于小粒径气溶胶，大粒径气溶胶更易活化并且所形成的雾滴也更大，能够加速碰并过程进而促进湿清除过程的发生。

表 2. Fog3 中不同时次 TVOC、 NO_2 、 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的峰值出现高度、累积变化率、逆温层高度及强度

Table 2. The Peak height, cumulative change rate, inversion layer height and intensity of TVOC, NO_2 , $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} at different times in Case 3

时间	辐射雾阶段	TVOC 峰值 出现高度(m)/ 累积变化率 (ppm/hm)	NO_2 峰值出 现高度(m)/ 累积变化率 ($\mu g \cdot m^{-3}/hm$)	$PM_{1.0}$ 峰值出 现高度(m)/累 积变化率 ($\mu g \cdot m^{-3}/hm$)	$PM_{2.5}$ 峰值出 现高度(m)/累 积变化率 ($\mu g \cdot m^{-3}/hm$)	PM_{10} 峰值出现 高度(m)/累积 变化率 ($\mu g \cdot m^{-3}/hm$)	逆温层顶 高(m)/逆温 强度($^{\circ}C/hm$)
01:02-01:06	雾前阶段	96/0.017	24/13.17	160/21.40	160/62.76	160/89.65	208/2.2
02:03-02:07		50/0.012	35/6.55	128/28.13	121/75.49	128/101.20	225/2.42
03:00-03:04		105/0.015	60/5.78	145/17.56	156/62.01	170/84.63	237/2.5
04:02-04:06		358/0.004	92/7.65	78/22.87	103/83.9	107/117.70	270/2.6
05:01-05:05	发展阶段	323/0.005	166/5.80	144/10.22	151/54.78	151/81.29	279/2.63
06:02-06:06		351/0.005	168/2.15	129/20.00	153/57.43	153/72.74	287/2.79
07:00-07:04		450/0.007	—	123/31.13	123/94.37	147/111.90	315/2.34
08:00-08:04		512/0.004	—	134/15.03	159/56.17	148/71.65	283/2.59
10:01-10:05	成熟阶段	187/0.001	155/4.46	361/21.46	361/47.81	361/58.15	331/2.21
11:00-11:04		52/0.009	182/5.55	321/17.75	313/41.37	320/45.88	315/1.90
12:02-12:06		96/0.005	176/3.01	147/6.60	147/19.46	157/24.98	308/1.61
13:00-13:04		117/0.006	—	383/14.88	405/26.08	431/29.95	354/1.39

5、 $PM_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布及变化特征

图 8 和图 9 为晴天和雾天 $PM_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布特征，由图可知受逆温、雾顶等边界层垂直结构的影响，晴天和雾天 $PM_{2.5}$ 的垂直分布存在差异。在晴天较好的垂直扩散条件使各高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度差异不大，而雾天受逆温层的影响， $PM_{2.5}$ 无法充分的混合，导致其更多的被滞留在逆温层内无法向上扩散，使得逆温层内存在 $PM_{2.5}$ 的峰值。由于对流层内的 O_3 主要来自对流层的光化学反

应生成和平流层内 O_3 的向下输送,因此 O_3 的垂直分布特征与 $PM_{2.5}$ 存在一定的差异 (刘敬乐等, 2022)。不管在晴天还是雾天, 其在大气边界层内通常呈现浓度随高度上升的特征。夜间由于区域输送作用很弱同时没有光化学反应生成,因此各高度 O_3 浓度通常较低且保持相对稳定, 但夜间 O_3 浓度垂直差异比白天要大, 这是因为地面排放的 NO 对 O_3 的滴定作用使得低层 O_3 质量浓度降低, 由于夜间湍流运动减弱,地面排放的 NO 等还原物质较难向上输送,对高层的 O_3 消耗量远小于低层 (Ren et al., 2019), 使得夜间高层 O_3 浓度下降速度明显慢于低层,仍旧维持相对较高的浓度。这也就导致在夜间 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的垂直分布差异较大。白天地面受太阳辐射逐渐加热, 夜间稳定边界层塌陷, 不稳定边界层的发展伴随着高空 O_3 向下的混合导致 O_3 增加, 且 $PM_{2.5}$ 排放的增多使得 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的垂直分布一致性较高。但在 12 月 28 日 7 时和 8 时辐射雾成熟阶段的观测中, $PM_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布特征仍旧差异较大, 这是因为高浓度的 $PM_{2.5}$ 使得太阳辐射减弱, 抑制了 O_3 的生成 (邵平等, 2017)。

表 2 为晴天和雾天 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的变化率。由表 2 可知 O_3 首次变化率均 ≥ 0 , 且雾天总体要高于晴天, 晴天各时次 O_3 首次变化率在 $0-11.28\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 之间, 其中早上 7 时最大, 而雾天各时次首次变化率在 $9.18-22.13\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 之间, 最大值出现在 01 时,为雾前阶段。 O_3 在晴天 4 时至 8 时和雾天的所有时次的第二次变化率均 < 0 , 且减少较多, 基本超过了 $-20\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 。在雾天除 8 时的所有时次中, O_3 还出现了第三次变化率, 在 $7.89-62.09\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 之间。晴天除 20 时和次日 5 时外, $PM_{2.5}$ 的首次变化率均 < 0 , 在 $-4.87- -33.50\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 之间, 其中 21 时最小。雾天 $PM_{2.5}$ 的首次变化率均 > 0 , 在 $12.03- 94.37\mu g \cdot m^{-3}/hm$ 之间, 其中成熟阶段最大, 消散阶段最小。晴天除 20 时外, $PM_{2.5}$ 在其他时次的第二次变化率均 > 0 , 第三次变化率均 < 0 , 这与雾天所有时次的观测结果均相反。

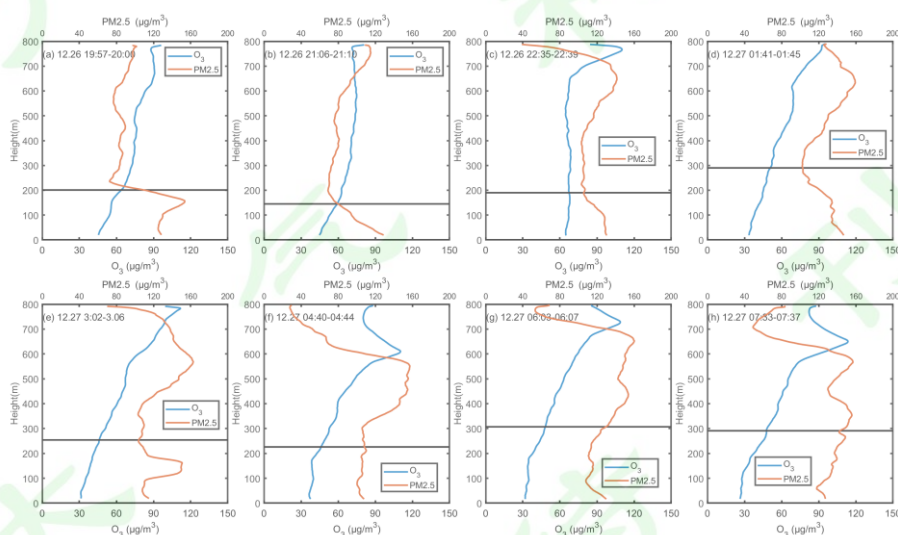


图 8.晴天 $PM_{2.5}$ 和 O_3 垂直分布特征(黑色直线为逆温层顶高度)

Fig.8 Vertical distributions of $PM_{2.5}$ and O_3 in sunny day (the black line is the inversion layer height)

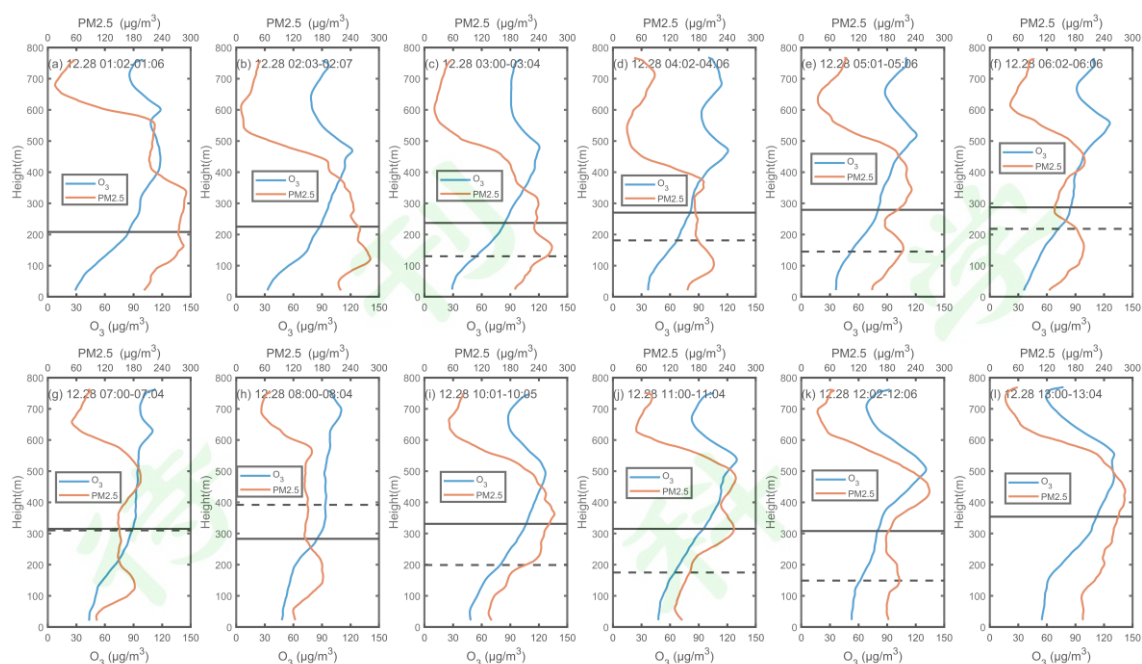


图 9. Fog3 中 PM_{2.5} 和 O₃ 垂直分布特征(黑色直线为逆温层顶高度,黑色虚线为雾顶高度)

Fig. 9 Vertical distributions of PM_{2.5} and O₃ in Fog3 (the black line is the inversion layer height, and the black dashed line is the fog top height)

表 3. 晴天和雾天 PM_{2.5} 和 O₃ 的变化率

Table.3 Change rate of PM_{2.5} and O₃ in sunny and foggy day

	时次	PM _{2.5} 变化率	O ₃ 变化率
		(µg·m ⁻³ /hm)	(µg·m ⁻³ /hm)
晴天	19:57-20:00	20.12/-110.90/2.51	5.94
	21:06-21:10	-33.50/6.84	4.99
	22:35-22:39	-16.07/16.35/-78.21	0.00/40.37/-143.60
	01:41-01:45	-16.18/18.48/-23.43	7.33
	03:02-03:06	-4.87/32.27/-31.68	9.88
	04:40-04:44	1.885/18.29/-49.35	10.09/-23.44
	06:03-06:07	-30.66/9.45/-100.54/99.98	9.10/-36.18
	07:33-07:37	-26.96/2.93/-97.42/42.19	11.28/-27.54
雾前阶段	01:02-01:06	62.76/-43.86/52.85	22.13/-11.41/31.36
	02:03-02:07	75.49/-61.38/24.61	19.01/-27.26/13.66
发展阶段	03:00-03:04	62.01/-57.02/21.89	21.79/-18.93/7.89
成熟阶段	04:02-04:06	83.90/-41.68/38.98/-79.66	17.81/-27.98/23.8/-16.06
	05:01-05:05	54.78/-34.06/49.31	16.85/-26.71/23.27
	06:02-06:06	57.43/-16.19/31.39	15.48/-36.8/20.32
	07:00-07:04	94.37/-7.46/35.77	10.22/-17.62/31.64
	08:00-08:04	46.93/-16.52/34.78	9.18/-21.21
	10:01-10:05	47.81/-88.36/33.33	19.24/-26.99/31.34
	11:00-11:04	40.05/-53.88/25.74	17.42/-41.62/28.45
消散阶段	12:02-12:06	12.03/-22.87/33.32	15.44/-36.00/48.21
雾后阶段	13:00-13:04	26.08/-97.32/100.20	17.88/-43.29/62.09

6、结论

(1) 雾天逆温层厚度要比晴天厚几十米至数百米不等, 强度要大 $0.5-1^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。雾顶高度与逆温层顶高度和雾强度变化有着高度的一致性。风速的减小有利于雾向更强等级发展。

(2) 从污染物垂直分布来看,逆温层内同一高度处的 TVOC 在晴天要比雾天高出约 10%。在辐射雾形成前和发展阶段, SO_2 浓度随高度递减速率远高于晴天同期。 O_3 和 NO_2 的垂直变化均呈现明显的负相关, O_3 在雾天近地面的梯度变化明显要大于晴天。 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在雾天要比晴天高出一倍以上, 且相较于晴天, 雾天其浓度在逆温层内随高度增幅更大。晴天和雾天 CO 廓线变化均呈先减少后增大再减少的趋势, 在辐射雾过程中相对稳定, 变化较小。

(3) 辐射雾期间逆温层的出现会导致 TVOC、 NO_2 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在逆温层内累积, 但它们受影响程度不同。TVOC 和 NO_2 的峰值高度在辐射雾成熟阶段最高, 而 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的峰值高度在辐射雾结束后最高。五种污染物的累积变化率在雾后与雾前相比均有了明显下降, 相较于气体污染物的累积变化率, 颗粒物污染物的累积变化率下降更显著, 且大粒径颗粒物累积变化率的下降幅度要超过小粒径颗粒物。

(4) $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的垂直分布特征在夜间和白天存在较大差异: 夜间湍流运动减弱,地面排放的 NO 等还原物质较难向上输送,对高层的 O_3 消耗量远小于低层, 使得夜间高层 O_3 远大于低层, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的垂直分布差异较大。白天太阳辐射增强, 不稳定边界层的发展伴随高空 O_3 向下混合导致 O_3 增加以及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放增多使得二者的垂直变化较为一致。

参考文献:

- 曹云擎, 王体健, 高丽波,等. 2020. 基于无人机垂直观测的南京 $\text{PM}_{2.5}$ 污染个例研究 [J]. 气候与环境研究, 25 (03): 292-304. Cao Yunqing, Wang Tijian, Gao Libo, et al. 2020. A case study of $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- Deng X J,Li F,Li Y H,et al. 2015. Vertical distribution characteristics of PM in the surface layer of Guangzhou [J]. Particuology,20(3): 3-9. doi: 10.1016/j.partic.2014.02.009.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure. Appl. Geophys., 164: 1121-1159. doi: 10.1007/978-3-7643-8419-7_3.
- 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等. 2015. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 45: 427 - 443. Guo Lijun, Guo Xueliang, Fang Chungang, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China [J], Science China: Earth Sciences, 58: 329-344. doi: 10.1007/s11430-014-4924-2.
- 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J].大气科学,27 (4):712-728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2003, 27(4):

712-728. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18.

黄建平, 朱诗武, 朱彬.1998.辐射雾的大气边界层特征 [J]. 大气科学学报, 2:258-265.Huang Jianping, Zhu Shiwu, Zhu Bin.1998. Characteristic of the atmospheric boundary layer during radiation fog [J]. Transactions of Atmospheric Sciences. 2:258-265.

梁粤. 2021. 便携式仪器在大气环境观测中数据订正的优化及应用[D].暨南大学. Liang Yue. 2021. Atmospheric measurements by portable instruments: data correction optimization and application. [D]. Jinan University (in Chinese).

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 D Y, Niu S J, Yang J, et al. 2012. Summary of a 4-Year Fog Field Study in Northern Nanjing, Part 1: Fog Boundary Layer [J]. Pure. Appl. Geophys.,169(5-6):809-819. doi: 10.1007/s00024-011-0343-x.

刘敬乐, 史静, 姚青, 等. 2022. 天津大气扩散条件对污染物垂直分布的影响研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1575-1584. Liu Jingle, Shi Jing, Yao Qing, et al. 2002. Effects of atmospheric diffusion conditions on vertical distribution of pollutants in Tianjin [J]. China Environmental Science (in Chinese), 42(4): 1575-1584. doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220209.004.

Ren Y, Zhang H S, Wei W, et al. Comparison of the turbulence structure during light and heavy haze pollution episodes [J]. Atmos. Res., 2019,230:104645. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104645.

邵平, 辛金元, 安俊琳, 等. 2017.长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系研究[J]. 大气科学, 41(3): 618-628. Shao Ping, Xin Jinyuan, An Junlin, et al. 2017. An analysis on the relationship between ground-level ozone and particulate matter in an industrial area in the Yangtze River delta during summer time [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 4, (3): 618-628. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1609.16173.

孙金金, 谢晓栋, 秦墨梅, 等. 不同时间尺度上 PM 2.5 与臭氧协同关系及其影响因素分析[J]. 科学通报, 2022, 67: 2018 – 2028. Sun Jingjing, Xie Xiaodong, Qin Momei, et al. Analysis of coordinated relationship between PM 2.5 and ozone and its affecting factors on different timescales [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67: 2018–2028. doi: 10.1360/TB-2021-0742.

Sun Y, Song T, Tang G, et al. 2013. The vertical distribution of PM 2.5 and boundary-layer structure during summer haze in Beijing [J]. Atmospheric Environment,74 (2): 413-421. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.03.011.

陶丽萍, 邓涛, 吴兑, 等.广州旱季双高污染及消光系数垂直分布特征[J].中国环境科学,2022,42(02):497-508. Tao Liping, Deng Tao, Wu Dui, et al. High aerosol and high ozone pollution and vertical distribution of extinction coefficients in Guangzhou during the dry season [J]. China Environmental Science (in Chinese), 2022,42(02):497-508. doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0030.

王东生, 彭仲仁, 李白, 等. 2019. 基于多旋翼无人机平台的大气 PM2.5 垂直结构观测技术[J]. 装备环境工程, 016(006), 35-40. Wang Dongsheng, Peng Zhongren, Li Bai, et al. 2019. Vertical

atmospheric structure observation technology based on multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform [J]. Equipment Environmental Engineering (in Chinese),16(6):35-40. doi: 10.7643/ issn.1672-9242.2019.06.007.

王宏斌, 吴泓, 李永, 等. 2020. 旋翼无人机盐城试验观测资料分析及其在一次浓雾天气观测中的应用 [J].气象,46(01),92-100. Wang Hongbin, Wu Hong, Li Yong, et al. 2020. Validation of rotorcraft UAV boundary layer meteorological observation data and its application in a heavy fog event in Yancheng [J]. Meteor Mon (in Chinese),46(1):89-97. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.009.

王元, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2019. 南京冬季一次强浓雾及超细粒径累积过程分析 [J]. 中国环境科学, 39(2): 459-468. Wang Yuan, Niu Shengjie, Lv Jingjing, et al.2019. Analysis of a cumulative event of nano-scale aerosols and a strong fog during winter in Nanjing [J]. China Environmental Science (in Chinese),39(2): 459-468. doi: 10.3969/j.issn.1000-6923.2019.02.002.

王元, 牛生杰, 陆春松, 等.西双版纳热带雨林地区冬季辐射雾理化特征的观测研究[J].中国科学:地球科学,2021,51(12):2098-2111. Wang Yuan, Niu Shengjie, Lu Chunsong, et al. 2021. Observational Study of the Physical and Chemical Characteristics of the Winter Radiation Fog in the Tropical Rainforest in Xishuangbanna, China. Science China Earth Sciences. doi: 10.1360/SSTe-2020-0332.

郭昊鹏, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 辐射雾微结构精细化观测研究[J/OL]. 大气科学学报. Wu Haopeng, Niu Shengjie, Lv jingjing, et al. High resolution observation of radiation fog microstructure [J/OL]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese). doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211229001.

Whittaker A, Berube K, Jones T. 2004. Killer smog of London, 50 years on: particle properties and oxidative capacity [J]. Sci Total Environ. 334/335: 435-445. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.047.

Wolfe G T, Monson P R, Ferman M A. 1979. On the nature of the diurnal variation of sulfates at rural sites in the eastern United States [J]. Environ Sci Technol, 1979, 13: 1271-1276. doi: 10.1021/es60158a010.

肖瑶, 吴志军, 郭松, 等.大气气溶胶液态水中二次有机气溶胶生成机制研究进展[J].科学通报,2020,65(Z2):3118-3133. Xiao Yao, Wu Zhijun, Guo Song, et al. Formation mechanism of secondary organic aerosol in aerosol liquid water: A review. Chin Sci Bull, 2020, 65: 3118–3133. doi: 10.1360/TB-2020-0713.

严文莲, 刘端阳, 康志明, 等.2019.江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. 气象科学, 39 (04), 477-487. Yan Wenlian, Liu Duanyang, Kang Zhiming, et al. 2109. The characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Jiangsu [I]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2019,39 (4): 477-487. doi: 10.3969/2018jms.0065.

杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 2010. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒径的微物理特征 [J]. 环境科学, (07),1425-1431. Yang Jun, Niu Zhongqing, Shi Chune, et al. 2010. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing [J]. Environmental Science (in Chinese), (07),1425-1431. doi: 10.13227/j.hjlx.2010.07.003 .

叶笃正. 1962. 最近气象学的新发展 [J]. 科学通报, 13(2):28-32. Ye Duzheng. 1962. A recent development in meteorology [J]. Chinese Science Bulletin, 13(2): 28 – 32. doi: 10.1360/csb1962-7-2-28.

张光智, 卞林根, 王继志, 等. 2005. 北京及周边地区雾形成的边界层特征 [J].中国科学 D 辑: 地球

441 科学, (35), (I): 73-83. Zhang Guangzhi, Bian lingen, Wang Jizhi, et al. 2005. Boundary layer
 442 characteristics of fog formation over Beijing and its surrounding areas [J]. SCIENCE IN CHINA Ser. D
 443 Earth Sciences, (35), (I): 73-83. doi: 10.1360/zd2005-35-S1-73.
 444 张强, 卫国安, 侯平, 等. 2004. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界结构特征的一次观测研究 [J].高原气
 445 象,23(5):475-484. Zhang Qiang, Wei Guoan, Hou Ping, et al. 2004. Observation studies of atmosphere
 446 boundary layer characteristic over Dunhuang Gobi in early summer [J]. Plateau Meteorology (in
 447 Chinese), 2004, 23(5): 587-597. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2004-05-003.
 448 赵德山, 洪钟祥. 1981. 典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征 [J].大气科学, 1981, 5(4): 407-415.
 449 Zhao Deshan, Hong Zhongxiang.1981. Some burst characteristics during the process of occuring and
 450 dissipating of typical radiation inversion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
 451 1981, 5(4): 407-415. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1981.04.07.
 452 朱燕舞, 刘文清,, 谢品华, 等. 2010. 北京边界层大气污染物的垂直廓线监测与分析
 453 [J].地 球 物 理 学 报 , (6),1278-1283. Zhu Yanwu, Liu Wenqing, Xie Pinhua, et al. Monitoring and
 454 analysis for vertical profiles of air pollutants in boundary layer of Beijing[J]. Chinese Journal of
 455 Geophysics (in Chinese), 2010, 53(6): 1278-1283.doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.005.
 456 Zou Y, Deng X J, Zhu D, et al. 2015. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and
 457 O₃ at a suburban site in Guangzhou, China [J]. Atmos. Chem. Phys., 15(12), 6625-6636. doi:
 458 10.5194/acp-15-6625-2015.