

安徽寿县两次浓雾生消过程中两个高度微物理机理分析

朱世珍^{1,2}, 张昭艺^{1,3}, 吴诗晓¹, 杨军¹, 王兆宇⁴, 石春娥^{5,6}, 胡汉峰¹, 张浩^{5,6}, 倪婷⁶, 邱玉珺¹, 陆春松¹

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810001; 3. 商丘市气象局, 商丘 476000; 4. 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074; 5. 安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031; 6. 寿县国家气候观象台/中国气象局淮河流域典型农田生态野外科学试验基地, 寿县 232200)

摘要: 利用安徽寿县 2019 年 1 月 12 和 13 日两次浓雾过程地面与 20 m 高度雾滴谱和能见度数据, 对雾不同发展阶段的谱分布、雾滴数浓度、含水量、平均直径、谱宽等微物理特征及不同微物理量(数浓度、含水量、平均直径)之间的相关性进行了分析。结果表明: 两次雾过程均为辐射雾; 当贴地强逆温结构维持时, 能使水汽抑制在逆温层内, 有利于浓雾长期维持。20 m 高度雾形成时间晚于地面, 在形成、发展和成熟阶段前期, 地面各微物理特征量都大于 20 m 高度处。成熟阶段后期, 可能由于雾凝结释放潜热、地面加热等过程增加了雾中的湍流混合强度, 让雾在垂直方向上变得均匀。两个高度雾过程均以核化、凝结增长为主, 但在地面雾中碰并也起了重要作用。地面雾从形成、发展到成熟阶段, 碰并过程逐渐增强, 数浓度、含水量、平均直径之间的相关关系从较强正相关到弱正相关或负相关; 20 m 高度雾从成熟阶段前期到后期, 平均直径与数浓度从正相关变为负相关, 可能与湍流运动、夹卷混合等因素有关。

关键词: 辐射雾, 微物理特征, 微物理量相关性

中图分类号: P426

Analysis of Microphysical Mechanisms at Two Heights during the Two Dense Fog Generation and Disappearance Processes in Shou County, Anhui Province

ZHU Shizhen^{1,2}, ZHANG Zhaoyi^{1,3}, WU Shixiao¹, YANG Jun¹, WANG Zhaoyu⁴, SHI Chune^{5,6}, HU Hanfeng¹, ZHANG Hao^{5,6}, NI Ting⁶, QIU Yujun¹, LU Chunsong¹

资助课题: 国家自然科学基金项目(41675135、41875171、41675018、42075073)

第一作者: 朱世珍, 硕士研究生, 主要从事云降水物理方向研究. E-mail: 2460126652@qq.com

通信作者: 邱玉珺, 主要从事大气气溶胶、云物理参量遥感反演研究. E-mail: qyj@nuist.edu.cn

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2. Qinghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xining 810001; 3. Shangqiu Meteorological Bureau, Shangqiu 476000; 4. Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074; 5. Anhui Meteorological Institute/Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031; 6. Shouxian National Climatological Observatory/Typical Farmland Ecology Field Experiment Station in Huaihe River Basin of China Meteorological Administration, Shouxian 232200)

Abstract: Using the fog droplet spectrum and visibility data of two dense fog processes on January 12 and 13, 2019 in Shou County, Anhui Province, the microphysical characteristics (such as the spectral distribution, droplet number concentration, liquid water content, average diameter, spectral width, etc.) and the correlations among microphysical properties (number concentration, liquid water content, average diameter) in the different stages of fog are analyzed. The result shows that: both fog processes are radiation fog. If the strong inversion structure close to the ground maintains, the water vapor will be restrained in the inversion layer. It is conducive to the long-term maintenance of dense fog. The formation time of the fog at 20 m is later than that of the ground. In the early stage of formation, development and maturity, the microphysical characteristics of the ground fog are all larger than that at 20 m. At the late stage of maturity, the release of latent heat by condensation and ground heating may increase the intensity of turbulent mixing in the fog, making the fog uniform in the vertical direction. The fog processes at two heights are dominated by nucleation and condensation growth, but the collision-coalescence process also plays an important role in the fog on the ground. From the stage of formation, development to maturity, the collision-coalescence processes of the ground fog gradually strengthens. The correlation between the number concentration, water content, and average diameter generally ranges from a strong positive correlation to a weak positive or negative correlation. From the early stage to the late stage of the mature stage, the average diameter and number concentration of the fog at 20 m height change from a positive correlation to a negative correlation, which may be related to the factors such as turbulent, entrainment mixing, etc.

Keywords: radiation fog, microphysical characteristics, microphysical relationships

1 引言

雾是水汽凝结(华)物悬浮于大气边界层内使水平能见度降至 1 km 以下时的天气现象, 具有影响范围广、发生概率高的特点(杨军等, 2011)。雾造成的低能见度对交通安全、植物生长、身体健康、建筑物、电力设施等带来诸多不利影响(黄玉生等, 1992; Niu et al, 2010a; 张伟等, 2021; 严文莲等, 2018; 方春刚和郭学良, 2019; 王庆等, 2021; 梁卫等,

2021), 能直接或间接影响人类活动, 带来的经济损失有时不亚于龙卷风、飓风 (Gultepe et al, 2007)。因此, 及时、准确地预报雾天气过程具有重要的意义。

在天气预报过程中, 大雾的预报准确率不高, 深入理解雾的微物理过程, 对于雾的微物理过程参数化、数值预报、气候模式、遥感等水平的提高等具有重要意义 (胡朝霞等, 2011; Liu et al, 2011; 贾星灿和郭学良, 2012; 王庆等, 2019; 朱承瑛等, 2018; 祖繁等, 2020; 王宏斌等, 2021)。雾的预报水平受限于对雾在不同时空尺度下的理化过程的理解, 其形成、发展、消散是热力、动力、微物理过程相互作用的结果。目前国内外在雾的微物理观测和实验研究方面已取得了很多成果, 揭示了不同类型雾的微物理和宏观物理结构。1958年, Eldridge (1961) 观测了两次雾过程, 发现雾滴尺度越小, 数量越多。1979年11月, Gerber (1981) 通过观测一次辐射雾发现湍流能控制雾的发展, 雾准周期振荡的平均周期为 18min, 近饱和湍流的湍流混合是雾形成和雾滴谱拓宽的主要原因。1994年11月, Wendish et al (1998) 观测了意大利北部波河流域的雾, 发现大多数雾滴谱分布是双峰型, 其演变有两个典型阶段, 在第二阶段雾滴谱呈准周期振荡变化, 周期在 10-15min。中国最早进行的云雾观测是在 1958年。1968、1969年, 南方各省作过一次雾的普查, 对雾的微物理结构做了初步观测 (李子华, 2001)。1996年, 黄建平等 (1998)、李子华等 (1999) 分别观测了沪宁地区和南京两次浓雾的微物理结构特征, 其中在沪宁地区的观测发现含水量、谱宽等存在周期为 20-30分钟的振荡现象。2010年3月、2011年2-3月, 张舒婷等 (2013)、岳岩裕等 (2013) 分别对广东湛江地区海雾的微物理结构进行了观测, 发现湍流的参与使雾滴混合均匀, 使平均直径趋向平均化, 同时使雾体内部和外部空气交流。

由于雾在时间和空间分布不均匀, 仍需要大量不同条件环境和在垂直方向上的观测来深入了解其物理机制。但限于观测条件, 关于雾的微物理特征的垂直观测数据很少, 国内外已有的研究多借助于系留气艇和气象铁塔来获取数据, 对雾垂直微物理结构特征的了解不多。1959年, Okita (1962) 在日本观测了四次辐射雾过程中的含水量、数密度等微物理特征的垂直廓线。结果表明: 一般的雾主要通过凝结增长, 在雾或层云顶部附近存在半径约 $50\mu\text{m}$ 或更大的水滴是产生毛毛雨的必要条件。1976年, Pinnick et al (1978) 在西德利用系留气球观测了雾、霾过程中的谱分布、数密度等垂直分布特征。发现在半径大于 $4\mu\text{m}$ 的雾滴数浓度在 150m 高度的垂直方向上显著增加。1989年, Fuzzi et al (1992) 在意大利北部波河流域利用 50m 高的铁塔观测了雾的微物理结构。2011、2012年, Egli et al (2015) 利用系留气球观测了在德国林登地区两次辐射雾过程的微物理垂直结构。结果表明, 在雾生命期的成熟阶段, 实测和理论液水含量剖面之间的趋势和梯度十分一致, 并强调了现有的关于雾微物理特征垂直分布知识的匮乏。

本文利用常规气象要素、能见度、边界层探空等资料对 2019年1月12和13日两次浓雾过程的天气背景及宏观发展过程进行分析; 利用气象铁塔获得的地面和 20 m 高度的微物理量观测数据, 对不同阶段 (形成、发展、成熟、消散) 地面与空中微物理特征参量、雾滴

谱及微物理参量间相关性进行分析, 总结出演变规律及差异性, 进一步提高对浓雾生消过程的认识。

2 观测地点、仪器及数据处理

2019年1月2日-15日, 在安徽省淮南市寿县气象局(32.44 °N、116.79 °E, 海拔高度26 m)进行了为期14天的雾外场观测实验, 场地四周都为农田, 下垫面条件均一。

利用美国DMT公司生产的FM-100型和FM-120型雾滴谱仪分别观测了距地面约1 m高度处和气象塔20 m高度处雾的微物理结构。两台雾滴谱仪采样频率均为1 Hz, 其中, FM-100型雾滴谱仪分20档, FM-120型雾滴谱仪分30档。由于FM-100型雾滴谱仪和FM-120型雾滴谱仪第一档起始范围不确定, 分别为 $< 2\mu\text{m}$ 和 $< 3\mu\text{m}$, 且该档中大多为干气溶胶粒子, 因此本文在数据处理中去除了第一档(李子华等, 2011), FM-100型和FM-120型雾滴谱仪计算雾滴的直径范围分别为2-50 μm 、3-50 μm 。利用芬兰Vaisala公司生产的系留气球探测系统观测了有雾期间的边界层结构, 内容包括温度和气压。能见度、湿度、风速等地面常规气象要素数据来自观测场内的自动气象观测站。

为了分析雾滴的碰并和收集效率, 引入自动转化阈值, 根据Liu et al (2005, 2006), 阈值方程一般描述为:

$$T = \frac{P}{P_0} = \left[\frac{\int_{r_c}^{\infty} r^6 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^6 n(r) dr} \right] \left[\frac{\int_{r_c}^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr} \right], \quad (1)$$

其中, T 是自动转化阈值, 其变化范围在0~1之间, 值越大表示碰并和收集效率越高, 碰并过程越强。 P 是自动转化率, P_0 代表自动转化后的转化速度, r 是雾滴半径, r_c 是自动转化的临界半径。 r_c 的表达式为(Liu et al, 2004):

$$r_c \approx 4.09 \times 10^{-4} \beta_{con}^{1/6} \frac{N^{1/6}}{LWC^{1/3}}, \quad (2)$$

其中, $\beta_{con}=1.15 \times 10^{23}$ 是经验系数, N 表示数浓度, LWC 表示液态水含量。

本文先对12日和13日两次雾过程期间FM-100、FM-120雾滴谱仪数据均作了一分钟内切尾平均, 然后利用测得的雾滴大小分布数据, 计算出雾过程中含水量、数浓度、平均直径、谱宽、自动转化阈值等微物理特征参量, 再取能见度 $< 1000 \text{ m}$ 、 $LWC \geq 0.001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的数据作为有雾阶段。边界层内温度、气压廓线数据也先做了分钟平均, 再根据压高公式得到相应高度数据。

3 结果分析

3.1 雾过程概况

11日20:00-13日20:00(北京时, 下同)500 hPa天气图上, 安徽省上空主要受平直西风带上的偏西气流控制; 地面图上, 安徽省一直处于高压均压区内。雾发生前约一周内, 均为多云、小雨或小雪天气, 相对湿度大致保持在80%以上。由于天空无云, 近地面风速较

小, 12 和 13 日夜间地面均有较强的辐射降温, 两次雾过程主要受辐射降温影响, 均属于辐射雾。12 日雾消散后, 为阴天, 白天地面相对湿度一直在 85 % 以上, 风速总体在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 为 13 日浓雾的形成提供了水汽条件。12 日雾 (能见度 $< 1000 \text{ m}$) 过程形成于 12 日 00:40, 消散于 08:39, 共维持了约 8 h, 整个过程中能见度在 02:46 达到最低值 75 m。13 日雾过程形成于 13 日 02:38, 消散于 11:11, 共维持了约 8 h 40 min, 能见度在早上 08:43 达到最低值 67 m。

图 1 (a)、(b) 分别为 12 和 13 日两次雾过程前后温度的垂直分布廓线。在雾形成前, 11 日 22:57, 近地面形成一高度为 34 m, 温度约 $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的近似等温层, 由于地面持续辐射冷却, 00:41, 地面雾形成的同时, 近地面存在厚为 62 m, 强度为 $0.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 的贴地逆温层, 此后地面持续降温。04:50, 此时逆温层已从地表上移, 逆温强度也增大为 $4.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。随着雾不断发展加厚, 地面辐射降温减少, 且由于日出后太阳辐射加强, 地面温度开始上升, 逆温层不断上移, 07:10, 逆温层上升到 85-150 m 高度, 逆温强度减弱至 $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。地表持续升温使逆温层逐渐上移且强度不断减弱。而在 13 日, 雾形成前 2 h 及雾过程中近地面始终存在很强的贴地逆温, 雾过程期间逆温层顶高度在 70-170 m 之间, 逆温层之上为近似等温层, 浓雾在日出 (07:12) 后仍维持了大约 4 h 才消散。强逆温结构的维持能使近地面大气层结保持稳定状态, 大量水汽集中在近地面, 对于雾的长时间维持和发展起着重要作用 (邓雪娇等, 2002)。13 日雾过程中强逆温的维持为浓雾过程提供了充足的水汽, 也使地面温度在日出之后没有很快升高, 是浓雾在日出后仍长时间维持的主要原因。

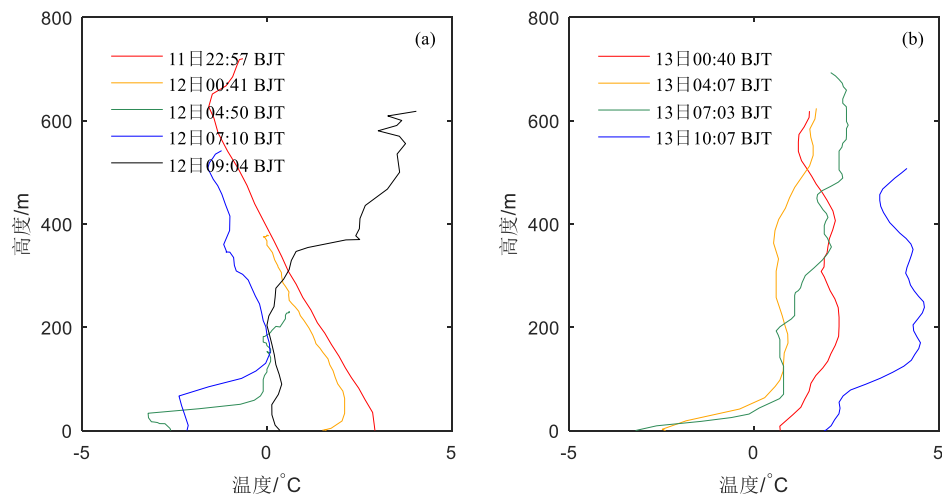


图 1 2019 年 1 月 12 日 (a) 和 13 日 (b) 雾过程前后温度的垂直廓线

Fig. 1 Vertical profile of temperature before and after the fog process on January 12 (a) and 13 (b), 2019

从表 1 可知, 两次雾过程在地面和 20 m 高度数浓度 (number concentration, N)、平均直径 (average diameter, D_{ave}) 相差不大, 但液态水含量 (liquid water content, LWC) 和谱宽 (maximum diameter, D_{max}) 在地面明显大于 20 m 高度处, 尤其是 LWC , 在地面是 20 m 高度的 2 倍以上, 说明在地面大雾滴相对小雾滴的数量比 20 m 高度多。13 日 N 在地面和 20 m 高度均是 12 日的 2 倍左右, LWC 也略大于 12 日, 且 D_{ave} 、 D_{max} 在地面和 20 m 高度都分别

略小于 12 日, 说明与 12 日相比, 13 日雾小雾滴的数量远远多于大雾滴, 这可能与 13 日雾过程中贴地强逆温的存在有关, 逆温使水汽抑制在逆温层内, 充足的水汽使核化、凝结过程较为活跃且持久, 小雾滴供应充足, 使得 13 日雾在地面附近的强度比 12 日强。

表 1 两次雾过程地面与 20 m 高度数浓度 (N)、液态水含量 (LWC)、平均直径 (D_{ave})、谱宽 (D_{max}) 平均值

Table 1 The average value of the number concentration (N), liquid water content (LWC), average diameter (D_{ave}) and maximum diameter (D_{max}) on the ground and at 20 m height during the two fog processes

| 日期 | 高度 | $N/(\text{个} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $LWC/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | $D_{ave}/\mu\text{m}$ | $D_{max}/\mu\text{m}$ |
|------|---------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 12 日 | 地面 | 80.08 (23.77-234.42) | 0.060 (0.001-0.363) | 7.02 (3.54-10.17) | 27.59 (9.00-36.50) |
| | 20 m 高度 | 70.34 (22.76-197.55) | 0.027 (0.001-0.142) | 7.27 (4.14-11.41) | 21.23 (13.00-36.50) |
| 13 日 | 地面 | 201.60 (30.07-440.39) | 0.090 (0.001-0.292) | 6.56 (3.52-9.28) | 24.08 (9.00-39.50) |
| | 20 m 高度 | 216.36 (24.56-509.14) | 0.036 (0.001-0.178) | 5.46 (3.84-7.87) | 17.38 (6.50-31.00) |

注: 括号内为数值范围

Note: The data in brackets is the range of values

3.2 雾过程的发展阶段分析

图 2、图 3 分别是 12 日和 13 日两次浓雾过程中, 地面与 20 m 高度雾滴微物理特征量时间序列图。根据雾过程中地面能见度及微物理特征参量的差异, 将雾划分为形成、发展、成熟、消散阶段。12 日不同阶段具体划分为: 形成阶段(00:40-01:00)、发展阶段(01:01-01:42)、成熟阶段(01:43-07:27)、消散阶段(07:28-08:39)。根据地面和 20 m 高度各物理量的差异, 将成熟阶段分为两个阶段: 成熟阶段前期(01:43-03:34)和成熟阶段后期(03:35-07:27)。13 日雾过程各阶段具体划分为: 形成阶段(02:38-03:15)、发展阶段(03:16-04:00)、成熟阶段前期(04:01-08:19)、成熟阶段后期(08:20-10:20)、消散阶段(10:21-11:10)。

在地面雾形成和发展阶段, 20 m 高度 N 、 LWC 、 D_{ave} 、 D_{max} 都很小且基本保持不变。成熟阶段前期, 20 m 高度 N 迅速增加, 其他微物理特征量也逐渐增大, 但各物理量值总体小于地面。从图 2、图 3 可以看出, 在成熟阶段前期图中红框内, 地面和 20 m 高度 LWC 、 N 和 D_{ave} 都分别有相反的变化趋势, 从发展阶段到成熟阶段前期, 地面 LWC 、 N 和 D_{ave} 都先不断波动增大直到峰值, 之后都有一个先急剧减小又回升的过程, 与此同时, 20 m 高度对应的各微物理特征量都有一个先急剧增大又回落的过程。说明浓雾中存在垂直方向的上下层交换, 这可能与湍流运动等有关。湍流扩散对动量、热量和水汽的垂直输送、雾滴碰并增长起着重要作用。浓雾进入增强阶段以后, 湍流不仅能向上输送热量和水汽使大量凝结核化增长, 而且能促进雾滴之间的碰并使大滴显著增长(刘端阳, 2011)。成熟阶段后期和消散

阶段，20 m 高度处各物理量曲线和地面基本重合，变化趋势也基本一致。可能是由于雾凝结释放潜热和地面加热增强了雾中的湍流混合强度（姚青等，2018），使雾在垂直方向变得均匀（赵丽娟，2012）。但两次雾过程在垂直方向上变得均匀的时间有所差异，13 日雾在垂直方向上变得均匀的时间明显晚于 12 日，可能与 13 日浓雾过程中始终存在贴地强逆温，抑制了湍流运动和雾层上下层交换有关。

在地面，12 日雾 T 的大值区与 LWC 、 N 、 D_{max} 大值区相对应，成熟阶段碰并效率较高，当 D_{max} 大于 $27.5 \mu\text{m}$ 时，碰并效率明显升高， T 最大值出现在 03:04，为 0.70。说明雾在形成和发展阶段地面以核化、凝结增长为主，成熟阶段碰并效率增大，使 D_{max} 拓宽， LWC 增大。与 12 日相比，13 日雾过程中地面雾的 T 值大值区的范围和数值都较小， T 值较大、碰并过程较强的阶段只在成熟阶段后期。在 20 m 高度，两次雾过程的 T 值均几乎为 0，说明 20 m 高度雾碰并过程并不活跃。

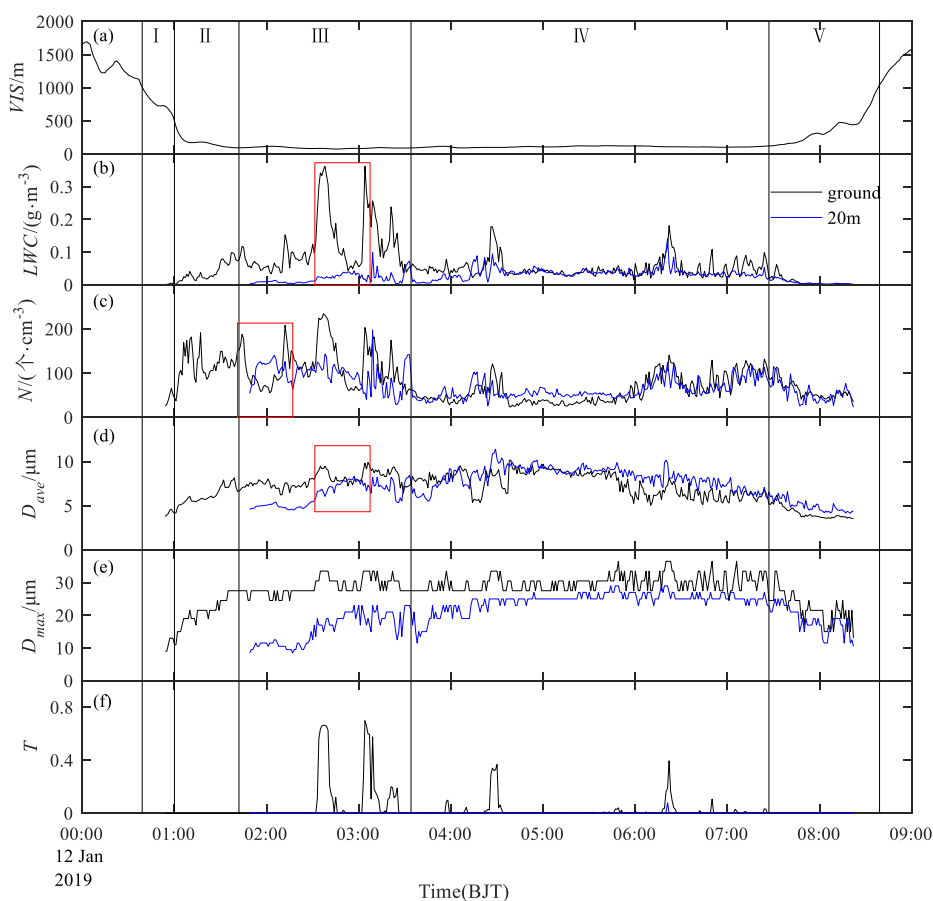


图 2 2019 年 1 月 12 日雾过程地面和 20 m 高度 (a) 能见度 (VIS)、(b) 液态水含量 (LWC)、(c) 数浓度 (N)、(d) 平均直径 (D_{ave})、(e) 谱宽 (D_{max})、(f) 自动转化阈值 (T) 随时间演变
 Fig. 2 Temporal variations of (a) visibility (VIS), (b) liquid water content (LWC), (c) number concentration (N), (d) average diameter (D_{ave}), (e) maximum diameter (D_{max}), (f) automatic conversion threshold (T) on the ground and at 20 m height in the fog on January 12, 2019

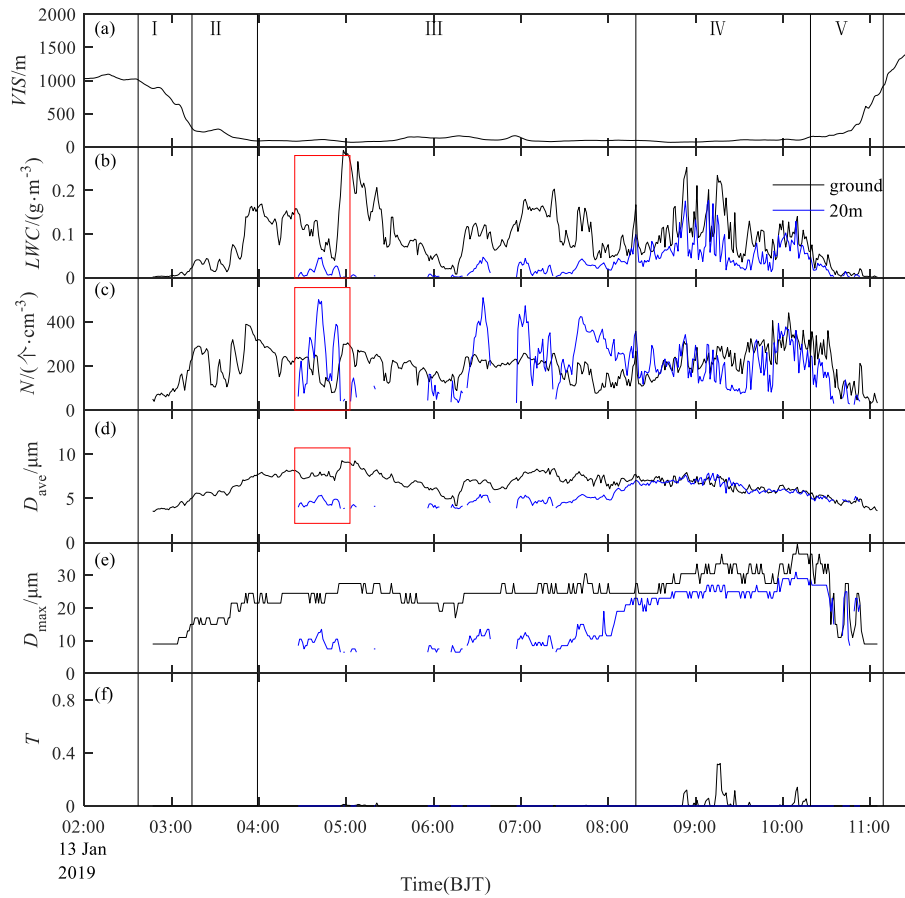


图3 2019年1月13日雾过程地面和20m高度 (a) 能见度 (VIS)、(b) 液态水含量 (LWC)、(c) 数浓度 (N)、(d) 平均直径 (D_{ave})、(e) 谱宽 (D_{max})、(f) 自动转化阈值 (T) 随时间演变
 Fig.3 Temporal variations of (a) visibility (VIS), (b) liquid water content (LWC), (c) number concentration (N), (d) average diameter (D_{ave}), (e) maximum diameter (D_{max}), (f) automatic conversion threshold (T) on the ground and at 20 m height in the fog on January 13,2019

3.3 雾滴谱分布特征

两次雾过程地面和空中不同阶段和总过程平均雾滴谱分布分别如图4、图5所示。由图4、图5可知，两次雾过程雾滴谱从形成到消散阶段，都经历了谱宽从逐渐拓宽到收缩、谱线先上抬再下降的过程。在地面雾形成、发展、消散阶段，雾滴谱均为单峰分布，谱宽较窄，成熟阶段由于碰并过程活跃，使大雾滴数量增加，雾滴谱明显拓宽的同时变为双峰分布。20 m高度直径大于10 μm左右的大雾滴较少，谱宽较窄，一直为单峰结构。两次雾过程总的雾滴谱在地面谱型均为双峰结构，20 m高度谱型均为单峰结构，20 m高度谱宽分别窄于地面7.5 μm、8.5 μm。说明20 m高度大雾滴的数量明显少于地面，雾滴生长可能主要以凝结增长为主。

13日雾过程在地面、20 m高度谱宽分别大于12日3 μm、2 μm，但直径大于10 μm的雾滴谱线在12日雾成熟阶段上抬的范围明显大于13日，大雾滴的数量相对13日更多。直径大于10 μm的雾滴数密度在雾成熟阶段增长及消散阶段下降的速率最为明显，对平均直

径和含水量的影响较大。两次雾过程雾滴谱演变与 Price (2011) 在 2007-2008 年在英国东南部卡丁顿地区观测的 7 次雾过程期间典型雾滴谱演变特征相似：最初雾滴谱为直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 左右的单峰分布，大概 4-5 h 之后，雾滴谱拓宽，变为双峰或偏态分布。

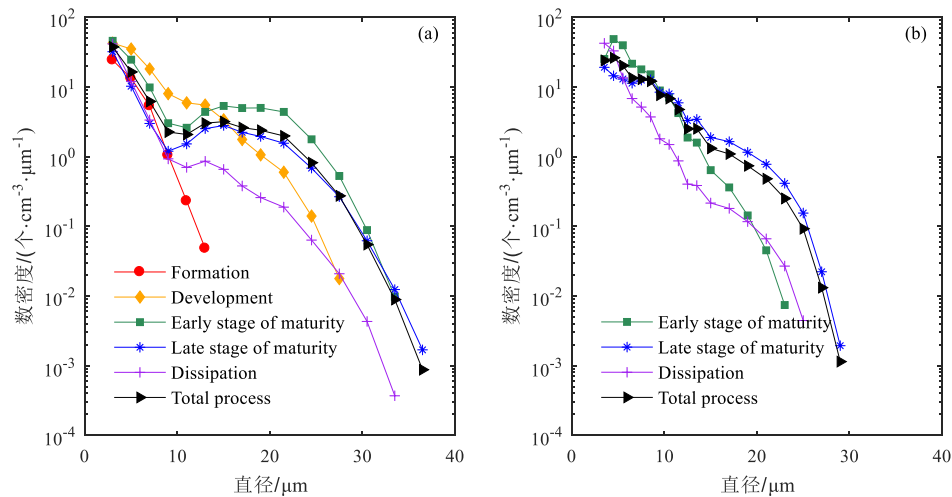


图 4 2019 年 1 月 12 日雾过程 (a) 地面和 (b) 20 m 高度不同阶段和总过程平均雾滴谱

Fig. 4 The average droplet spectrum of the fog process (a) on the ground and (b) at 20 m height in the different stages and total process on January 12, 2019

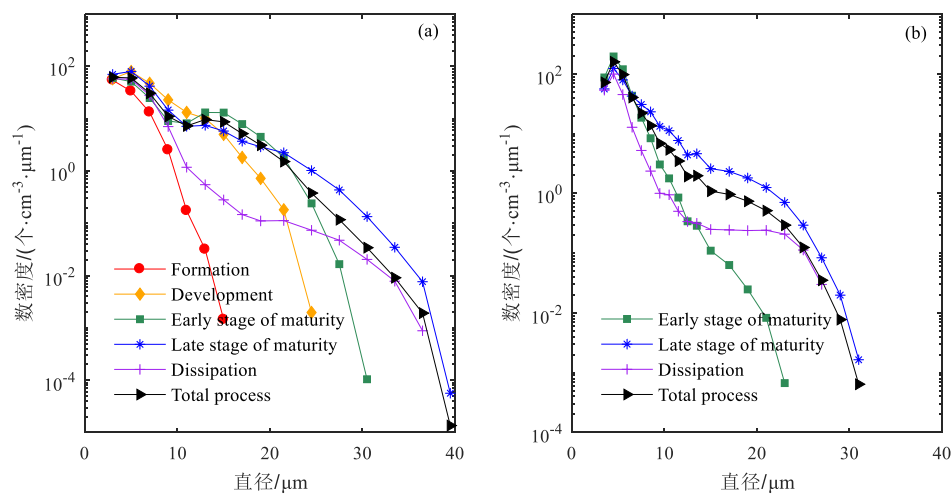


图 5 2019 年 1 月 13 日雾过程 (a) 地面和 (b) 20 m 高度不同阶段和总过程平均雾滴谱

Fig.5 The average droplet spectrum of the fog process (a) on the ground and (b) at 20 m height in the different stages and total process on January 13, 2019

3.4 微物理量关系

雾过程中 D_{ave} 、 N 与 LWC 三者之间的关系可以反映雾滴核化、凝结和碰并等微物理过程的影响 (Niu et al, 2010b)。图 6 和图 7 分别为两次雾整个雾过程 LWC 与 N 、 LWC 与 D_{ave} 、 N 与 D_{ave} 之间的相关性分析。两次雾过程在地面， LWC 与 N 、 LWC 与 D_{ave} 之间均有较强的正相关， N 与 D_{ave} 之间分别为不相关和很弱的正相关。20 m 高度， LWC 与 N 之间为

较弱的正相关, LWC 与 D_{ave} 之间为较强的正相关, N 与 D_{ave} 之间在 12 日为较弱的负相关, 13 日为较弱的正相关。不同于之前在南京、湛江地区观测到的整个雾过程期间各微物理特征量之间均呈正相关性的结果 (张舒婷等, 2013; Niu et al, 2010b; Lu et al, 2013)。

在地面, 12 日雾 N 与 D_{ave} 变化范围均较大, 且 N 与 D_{ave} 之间呈不相关 (如图 6 (c)), 13 日雾 N 与 D_{ave} 之间呈较弱的正相关 (如图 7 (c)), 与之前的很多研究中认为一般情况下雾滴平均直径与数浓度呈反比的认识不同 (黄建平等, 1998; 黄玉生等, 2000; 唐浩华等, 2002)。但与 Niu et al (2010b)、Lu et al (2013) 在南京雾的研究中发现整个雾过程中 N 与 D_{ave} 之间呈正相关的现象相同。Lu et al (2013) 认为 N 与 D_{ave} 之间是呈正相关、负相关或不相关, 取决于整个雾过程中由于碰并失去小雾滴和由于核化凝结补充小雾滴这两个过程的强弱。若由于核化凝结补充小雾滴的过程强于由于碰并失去小雾滴的过程, 则 N 与 D_{ave} 之间就呈正相关。再从图 6 (a) 可知, 整个雾过程 LWC 与 N 之间呈较强的正相关, 如果是碰并过程为主导, 大雾滴碰并小雾滴之后, 会使 N 减小, D_{ave} 增大, 大雾滴对含水量的贡献较大, 会使得 LWC 增大, 使 N 与 LWC 之间呈负相关。由此说明碰并过程不是整个雾过程的主导过程, 整个雾过程的优势过程可能是核化凝结, 同时碰并过程也具有重要作用。

20 m 高度, N 与 D_{ave} 在 12 日呈弱的负相关 (如图 6 (f)), 13 日呈弱的正相关 (如图 7 (f))。根据两次雾过程 LWC 与 N 均呈弱的正相关 (如图 6 (d)、图 7 (d)), 且 20 m 高度 T 值在整个雾过程中几乎为零 (如图 2 (f)、图 3 (f)) 可知, 碰并过程在 20 m 高度很弱, 不会是影响 20 m 高度雾的主要微物理过程, 20 m 高度雾可能主要受核化凝结过程的影响。 N 与 D_{ave} 在 12 日呈弱的负相关, 13 日呈弱的正相关的原因, 可能有以下两方面: 与地面相比, 20 m 高度 N 、 LWC 、 D_{ave} 都明显小于地面 (如表 1), 20 m 高度谱宽也明显小于地面 (如图 4、图 5), 大雾滴的数量很少, 这可能与湍流运动有关, 较强的湍流运动会使雾团与未饱和空气团发生混合, 导致部分雾滴蒸发, 同时使得不断有新的凝结核核化、凝结增长, 造成大部分雾滴都直径较小, 使 N 与 D_{ave} 的相关性不大 (赵丽娟, 2012); 另外, 还可能与夹卷混合过程有关, 云雾中的非均匀夹卷混合机制认为, 云雾滴越靠近干空气, 越容易蒸发, 而远离干空气的云滴基本不受影响, 造成云雾滴 D_{ave} 基本不变, 但 N 减小, 也会造成 N 与 D_{ave} 的相关性不强 (Baker and Latham, 1979; 陆春松和徐晓齐, 2021)。

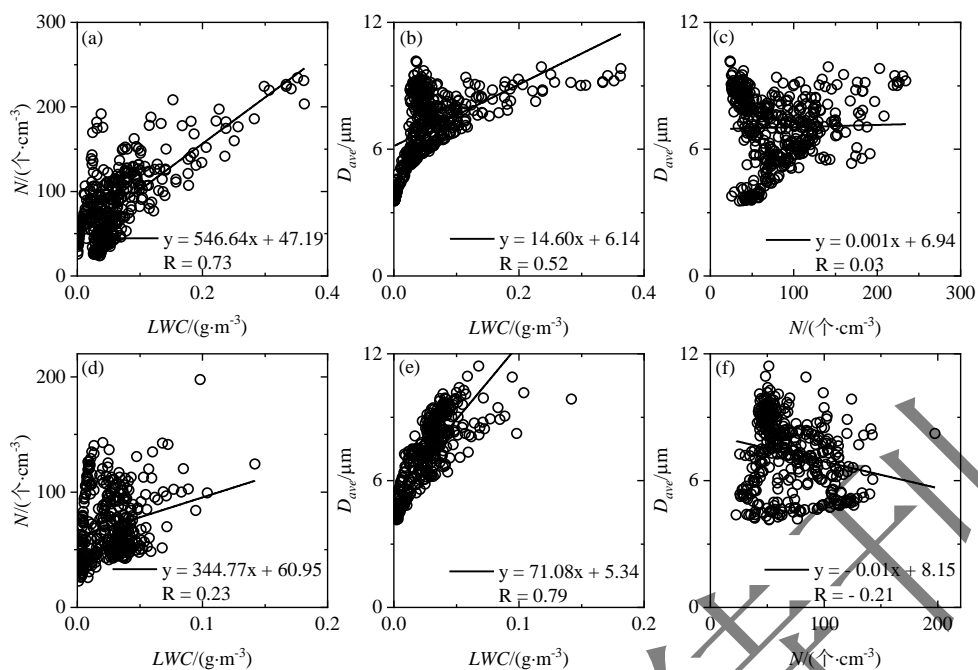


图6 2019年1月12日雾(a)地面液态水含量(LWC)与数浓度(N)、(b)地面LWC与平均直径(D_{ave})、(c)地面N与 D_{ave} 、(d)20m高度LWC与N、(e)20m高度LWC与 D_{ave} 、(f)20m高度N与 D_{ave} 之间的相关关系

Fig. 6 The correlation between (a) the ground liquid water content(LWC) and number concentration(N), (b) Ground LWC and average diameter(D_{ave}), (c) Ground N and D_{ave} , (d) 20 m height LWC and N, (e)20 m height LWC and D_{ave} , (f) 20 m height N and D_{ave} during the fog on January 12, 20

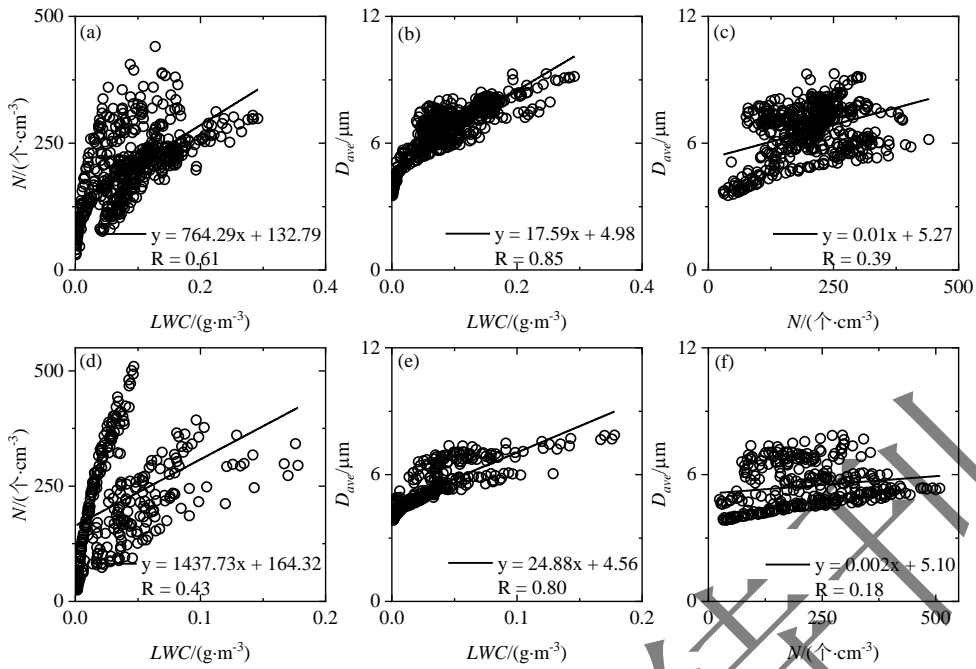


图7 2019年1月13日雾 (a) 地面液态水含量 (LWC) 与数浓度 (N)、(b) 地面 LWC 与平均直径 (D_{ave})、(c) 地面 N 与 D_{ave} 、(d) 20 m 高度 LWC 与 N 、(e) 20 m 高度 LWC 与 D_{ave} 、(f) 20 m 高度 N 与 D_{ave} 之间的相关关系

Fig. 7 The correlation between (a) the ground liquid water content (LWC) and number concentration (N), (b) Ground LWC and average diameter (D_{ave}), (c) Ground N and D_{ave} , (d) 20 m height LWC and N , (e) 20 m height LWC and D_{ave} , (f) 20 m height N and D_{ave} during the fog on January 13, 2019

为进一步了解整个雾过程中雾滴核化、凝结和碰并等微物理过程的变化，下一步对不同阶段三个微物理特征参量之间的相关性进行了分析。图8和图9分别为12和13日两次浓雾过程不同阶段 LWC 与 N 、 LWC 与 D_{ave} 、 N 与 D_{ave} 之间的相关性分析。

在地面，两次浓雾过程形成、发展和成熟阶段前期各微物理特征量之间均呈正相关， LWC 、 N 、 D_{ave} 增长明显，说明这几个阶段雾中微物理过程以核化、凝结增长为主，其中成熟阶段前期，由图2(f)、图3(f)可知 T 值较大，碰并收集效率较高，说明同时有碰并过程发生。成熟阶段后期， LWC 、 N 明显减小， D_{ave} 变化不大， LWC 与 N 、 LWC 与 D_{ave} 之间仍呈正相关，但 N 与 D_{ave} 之间呈负相关，说明此阶段除了核化凝结，碰并过程也较活跃，打破了 N 与 D_{ave} 的正相关。由上文可知，可能由于此阶段雾在垂直方向发生了上下层交换，促进了雾滴之间的碰并。消散阶段，三个特征量均显著减小，各个特征量之间呈强的正相关，由图2(f)、图3(f)可知，消散阶段 T 值很小，说明碰并效率不高，该阶段可能以重力沉降、蒸发等过程为主。从形成、发展到成熟阶段，三个微物理量之间的相关关系大致从较强的正相关到弱的正相关或负相关，说明碰并作用逐渐增强，各参量之间的正相关性不断被削弱，与 Lu et al (2013) 在南京观测到的几次个例发展趋势相类似。

如图 8 (d)、(f)、(e) 所示, 两次浓雾过程在形成和发展阶段还没有发展到 20 m 高度。在成熟阶段前期, 20 m 高度 LWC 、 N 与 D_{ave} 明显增大, 各物理量之间均呈正相关, 说明此阶段以核化、凝结过程为主。成熟阶段后期, N 与 LWC 相关性变化不大, LWC 与 D_{ave} 的正相关性有所减弱, D_{ave} 与 N 从正相关变为负相关, 由上文可知 20 m 高度在此阶段 T 值很小, 碰并过程并不活跃, 这一阶段仍以核化凝结过程为主。 D_{ave} 与 N 从正相关变为负相关, 可能与上文中提到的湍流运动、夹卷混合等因素有关。吴诗晓等 (2021) 对雾不同阶段夹卷混合机制的研究也表明, 成熟阶段雾中以极端非均匀夹卷混合机制为主, N 和 LWC 同时减小, D_{ave} 基本保持不变, 会使 D_{ave} 与 N 从正相关变为不相关。13 日 20 m 高度雾在成熟阶段后期, D_{ave} 与 N 、 LWC 相关性均较差, 雾滴直径在 $6 \mu\text{m}$ 左右集中, 在海雾中也有这样的现象, 张舒婷等 (2013) 认为这可能与湍流混合作用有关, 湍流带动了小雾滴随湍流运动, 促进了小雾滴生长; 同时湍流促进了雾体内外空气交换, 使 N 增大, 而 D_{ave} 变化很小。

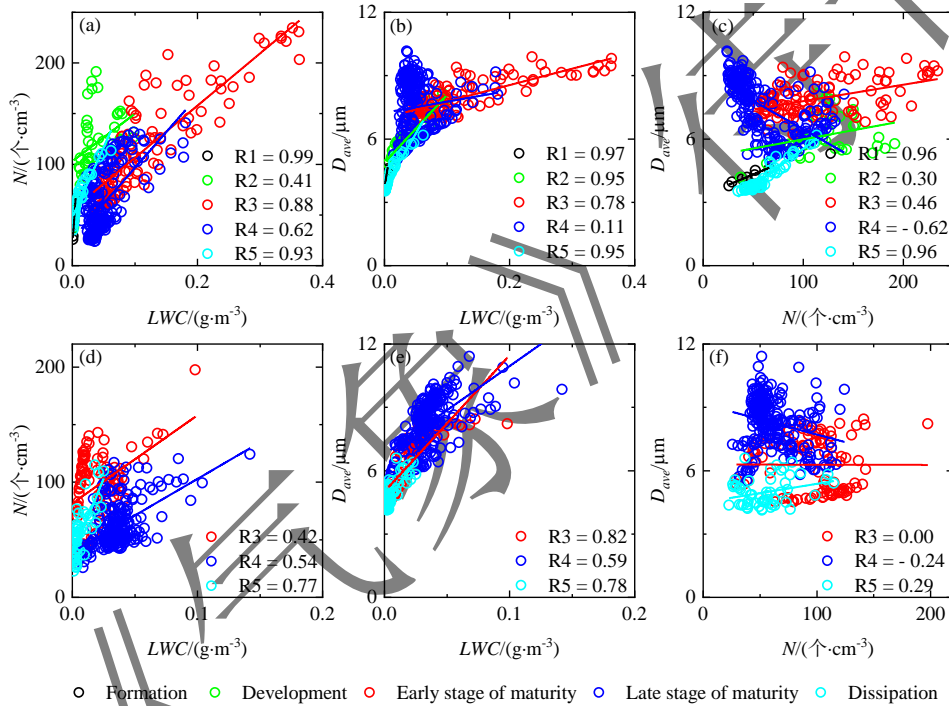


图 8 2019 年 1 月 12 日雾不同阶段 (a) 地面液态水含量 (LWC) 与数浓度 (N)、(b) 地面 LWC 与平均直径 (D_{ave})、(c) 地面 N 与 D_{ave} 、(d) 20 m 高度 LWC 与 N 、(e) 20 m 高度 LWC 与 D_{ave} 、(f) 20 m 高度 N 与 D_{ave} 之间的相关关系

Fig. 8 The correlation between (a) the ground liquid water content (LWC) and number concentration (N), (b) Ground LWC and average diameter (D_{ave}), (c) Ground N and D_{ave} , (d) 20 m height LWC and N , (e) 20 m height LWC and D_{ave} , (f) 20 m height N and D_{ave} in the different stages of fog on January 12, 2019

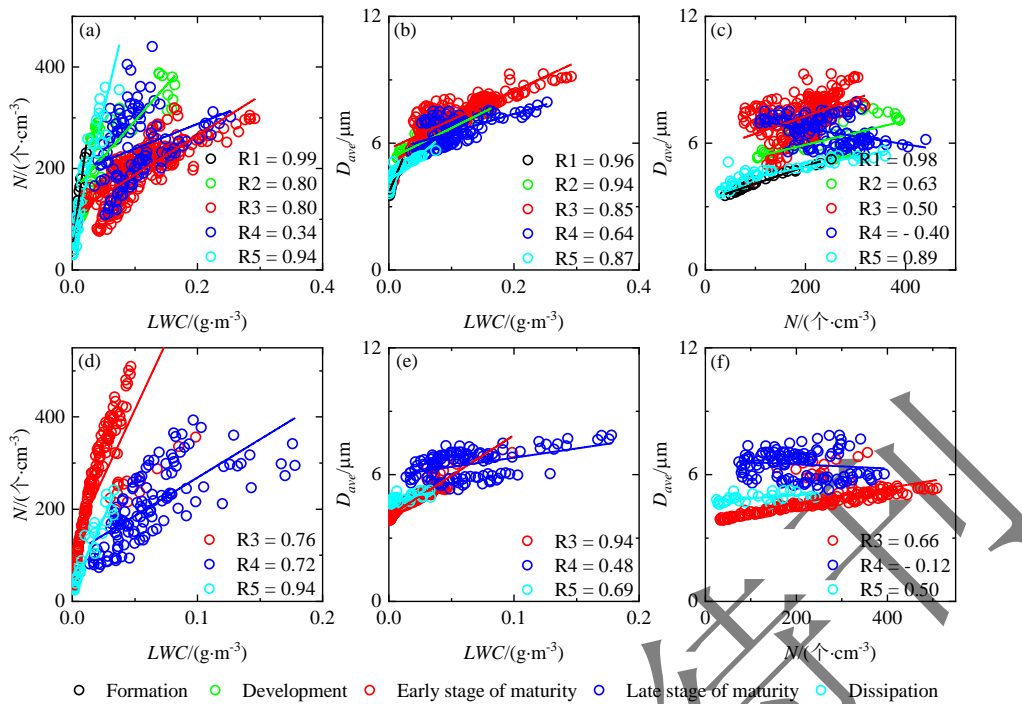


图9 2019年1月13日雾不同阶段 (a) 地面液态水含量 (LWC) 与数浓度 (N)、(b) 地面 LWC 与平均直径 (D_{ave})、(c) 地面 N 与 D_{ave} 、(d) 20 m 高度 LWC 与 N 、(e) 20 m 高度 LWC 与 D_{ave} 、(f) 20 m 高度 N 与 D_{ave} 之间的相关关系

Fig. 9 The correlation between (a) the ground liquid water content (LWC) and number concentration (N), (b) Ground LWC and average diameter (D_{ave}), (c) Ground N and D_{ave} , (d) 20 m height LWC and N , (e) 20 m height LWC and D_{ave} , (f) 20 m height N and D_{ave} in the different stages of fog on January 13, 2019

4 结论

2019年1月12和13日,利用雾滴谱仪在安徽省淮南市寿县连续观测了两次浓雾期间地面与空中微物理量的演变。根据其演变将雾划分为生成、发展、成熟、消散四个阶段,比较了不同阶段地面与20 m高度雾滴谱分布及各微物理参量差异。得到结论如下:

(1) 稳定的天气系统、良好的水汽条件,使寿县连续两天出现浓雾。两次雾过程均在辐射冷却条件下形成,为辐射雾;13日雾过程中由于强逆温结构始终维持,使水汽抑制在逆温层内,让雾在地面附近的强度强于12日,并在日出后仍维持较长时间。

(2) 20 m高度雾形成时间晚于地面,在地面雾形成、发展和成熟阶段前期,地面数浓度、含水量、平均直径、谱宽都整体大于20 m高度处,其中在成熟阶段前期,地面和20 m高度含水量、数浓度和平均直径都分别呈相反的变化趋势,雾中发生上下层之间的交换。在成熟阶段后期和消散阶段,可能由于雾凝结释放潜热、地面加热等过程增加了雾中的湍流混合强度,各微物理特征量在地面和20 m高度变化曲线逐渐重合,雾在垂直方向上变得均匀。13日雾在垂直方向上变得均匀的时间远远晚于12日,可能与贴地强逆温的存在抑制了湍流运动和雾层上下层交换有关。

(3) 两次雾过程平均雾滴谱分布在地面均为双峰分布, 20 m 高度均为单峰分布且谱宽明显小于地面。在地面, 整个雾过程中核化、凝结增长过程占主导, 同时碰并过程也具有重要作用。20 m 高度大雾滴的数量明显少于地面, 雾滴生长主要以凝结增长为主。

(4) 地面雾从形成、发展到成熟阶段, 碰并过程逐渐增强, 数浓度、含水量、平均直径之间的相关关系大致从较强的正相关到弱的正相关或负相关。20 m 高度雾从成熟阶段前期到后期, 平均直径与数浓度从正相关变为负相关, 可能与湍流运动、夹卷混合等因素有关。

参考文献:

- 邓雪娇, 吴兑, 叶燕翔, 2002. 南岭山地浓雾的物理特征[J]. 热带气象学报, 18(3): 227-236. Deng X J, Wu D, Ye Y X, 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling Mountain Region[J]. J Trop Meteor, 18(3): 227-236 (in Chinese).
- 方春刚, 郭学良, 2019. 华北一次浓雾过程爆发性增强的微物理特征[J]. 应用气象学报, 30(6): 700-709. Fang C G, Guo X L, 2019. The microphysical structure of a heavy fog event in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 700-709 (in Chinese).
- 胡朝霞, 雷恒池, 董剑希, 等, 2011. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟[J]. 气候与环境研究, 16(1): 71-84. Hu Z X, Lei H C, Dong J X, et al, 2011. Characteristic analysis and numerical simulation of a regional warm fog event[J]. Climatic Environ Res, 16(1): 71-84 (in Chinese).
- 黄建平, 梅清银, 靳永才, 等, 1998. 沪宁地区辐射雾的微物理结构及其演变[J]. 气象, 24(5): 3-8. Huang J P, Mei Q Y, Jin Y C, et al, 1998. Microphysical structure features and evolution processes of radiation fog in Huning region[J]. Meteor Mon, 24(5): 3-8 (in Chinese).
- 黄玉生, 许文荣, 李子华, 等, 1992. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究[J]. 气象学报, 50(1): 112-117. Huang Y S, Xu W R, Li Z H, et al, 1992. An observation and analysis on the radiation fog in Xishuangbanna[J]. Acta Meteor Sinica, 50(1): 112-117 (in Chinese).
- 黄玉生, 黄玉仁, 李子华, 等, 2000. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程[J]. 气象学报, 58(6): 715-725. Huang Y S, Huang Y R, Li Z H, et al, 2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna[J]. Acta Meteor Sin, 58(6): 715-725 (in Chinese).
- 贾星灿, 郭学良, 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究[J]. 大气科学, 36(5): 995-1008. Jia X C, Guo X L, 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5): 995-1008 (in Chinese).
- 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等, 1999. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征[J]. 气象学报, 57(5): 622-631. Li Z H, Huang J P, Zhou Y Q, et al, 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. Acta Meteor Sin, 57(5): 622-631 (in Chinese).
- 李子华, 2001. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 59(5): 616-624. Li Z H, 2001. Studies of fog in China over the past 40 years[J]. Acta Meteor Sin, 59(5): 616-624 (in Chinese).
- 李子华, 刘端阳, 杨军, 2011. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件[J]. 大气科学, 35(1): 41-54. Li Z H, Liu D Y, Yang J, 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1): 41-54 (in Chinese).
- 梁卫, 吴俊杰, 邹海波, 2021. 南昌昌北机场雾的分类特征与统计分析[J]. 气象, 47(10): 1255-1265. Liang W, Wu J J, Zou H B, 2021.

- Classification characteristics and statistical analysis of fogs at Nanchang Changbei airport[J]. Meteor Mon, 47(10): 1255-1265 (in Chinese).
- 刘端阳, 2011. 南京冬季雾宏观物理结构的观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Liu D Y, 2011. Observational study on the winter fog macro- micro-physical structures in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 陆春松, 徐晓齐, 2021. 云中夹卷混合过程的研究进展[J]. 暴雨灾害, 40(3): 271-279. Lu C S, Xu X Q, 2021. Advances in the studies of cloud entrainment and mixing process[J]. Torr Rain Dis, 40(3): 271-279 (in Chinese).
- 唐浩华, 范绍佳, 吴兑, 等, 2002. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. 中山大学学报(自然科学版), 41(4): 92-96. Tang H H, Fan S J, Wu D, et al, 2002. Research of the microphysical structure and evolution of dense fog over Nanling mountain area[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatsen, 41(4): 92-96 (in Chinese).
- 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等, 2021. 江苏不同等级雾的宏观和微观特征[J]. 高原气象, 40(5): 1177-1188. Wang H B, Zhang Z W, Liu D Y, et al, 2021. Characteristics of the macro-and micro-structures of the different grades fog in Jiangsu province[J]. Plateau Meteor, 40(5): 1177-1188 (in Chinese).
- 王庆, 李季, 樊明月, 等, 2019. 济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象, 45(9): 1299-1309. Wang Q, Li J, Fan M Y, et al, 2019. Microphysical structure and evolution characteristics of an advection-radiation fog event in Jinan[J]. Meteor Mon, 45(9): 1299-1309 (in Chinese).
- 王庆, 樊明月, 李季, 等, 2021. 济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响[J]. 大气科学, 45(2): 333-354. Wang Q, Fan M Y, Li J, et al, 2021. The microphysical characteristics of winter fog in Jinan and its effect on visibility[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2): 333-354 (in Chinese).
- 吴诗晓, 陆春松, 朱磊, 等, 2021. 从夹卷的角度探讨雾不同阶段微物理量的变化机理[J]. 大气科学, 45(5): 1057-1070. Wu S X, Lu C S, Zhu L, et al, 2021. Examination of mechanisms underlying the variations of microphysical properties in different fog phases from the perspective of entrainment [J]. Chin J Atmos Sci, 45(5): 1057-1070 (in Chinese).
- 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等, 2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 44(7): 892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 44(7): 892-901 (in Chinese).
- 杨军, 陈宝君, 银燕, 等, 2011. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社, 76-77. Yang J, Chen B J, Yin Y, et al, 2011. Physics of Clouds and Precipitation[M]. Beijing: Meteorological Press, 76-77 (in Chinese).
- 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等, 2018. 天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析[J]. 环境科学学报, 38(10): 3856-3867. Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, et al, 2018. Analysis of temperature and moisture structure and turbulence characteristics of a smog and haze weather process in Tianjin[J]. Acta Sci Circumst, 38(10): 3856-3867 (in Chinese).
- 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等, 2013. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏观特征分析[J]. 大气科学, 37(3): 609-622. Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, et al, 2013. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 609-622 (in Chinese).
- 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟, 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析[J]. 大气科学, 37(3): 552-562. Zhang S T, Niu S J, Zhao L J, 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China sea[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 552-562 (in Chinese).
- 张伟, 陈德花, 胡雅君, 等, 2021. 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析[J]. 气象, 47(2): 157-169. Zhang W, Chen D H, Hu Y

- J, et al, 2021. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian[J]. Meteor Mon, 47(2): 157-169 (in Chinese).
- 赵丽娟, 2012. 雾宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用[D]. 南京: 南京信息工程大学. Zhao L J, 2012. Interaction among macro- and microphysical characteristics of fog, turbulence, radiation, and aerosol[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等, 2018. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 44(9): 1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al, 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1208-1219 (in Chinese).
- 祖繁, 袁成松, 吴泓, 等, 2020. 江苏北部不同等级雾的微物理结构及个例分析[J]. 气象学报, 78(4): 691-704. Zu F, Yuan C S, Wu H, et al, 2020. Microphysical structure of fog droplets in different levels of fog and a case study in northern Jiangsu province[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 691-704 (in Chinese).
- Baker M B, Latham J, 1979. The evolution of droplet spectra and the rate of production of embryonic raindrops in small cumulus clouds[J]. J Atmos Sci, 36(8): 1612-1615.
- Egli S, Maier F, Bendix J, et al, 2015. Vertical distribution of microphysical properties in radiation fogs—A case study[J]. Atmos Res, 151: 130-145.
- Eldridge R G, 1961. A few fog drop-size distributions[J]. J Atmos Sci, 18(5): 671-676.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al, 1992. The Po valley fog experiment 1989[J]. Tellus B, 44(5): 448-468.
- Gerber H E, 1981. Microstructure of a radiation fog[J]. J Atmos Sci, 38(2): 454-458.
- 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(6-7): 1121-1159.
- Liu D Y, Yang J, Niu S J, et al, 2011. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing[J]. Adv Atmos Sci, 28(1): 223-237.
- Liu Y G, Daum P H, McGraw R, 2004. An analytical expression for predicting the critical radius in the autoconversion parameterization[J]. Geophys Res Lett, 31(6): L06121.
- Liu Y G, Daum P H, McGraw R L, 2005. Size truncation effect, threshold behavior, and a new type of autoconversion parameterization[J]. Geophys Res Lett, 32(11): L11811.
- Liu Y G, Daum P H, McGraw R, et al, 2006. Generalized threshold function accounting for effect of relative dispersion on threshold behavior of autoconversion process[J]. Geophys Res Lett, 33(11): L11804.
- Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al, 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs[J]. Acta Meteor Sin, 27(6): 832-848.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al, 2010a. Fog research in China: An overview[J]. Adv Atmos Sci, 27(3): 639-662.
- Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al, 2010b. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study[J]. Adv Atmos Sci, 27(6): 1259-1275.
- Okita T, 1962. Observations of the vertical structure of a stratus cloud and radiation fogs in relation to the mechanism of drizzle formation[J]. Tellus, 14(3): 310-322.
- Pinnick R G, Hoihjelle D L, Fernandez G, et al, 1978. Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared

extinction[J]. J Atmos Sci, 35(10): 2020-2032.

Price J, 2011. Radiation fog. Part I: Observations of stability and drop size distributions[J]. Bound-Layer Meteor, 139(2): 167-191.

Wendish M, Mertes S, Heintzenberg J, et al, 1998. Drop size distribution and LWC in Po Valley fog[J]. Contrib Atmos Phys, 71(1): 87-100.

