辐射雾微结构精细化观测研究

邬昊鹏¹, 牛生杰^{1,2*}, 吕晶晶¹, 王元¹, 刘端阳³, 祖繁³, 汪玲玲⁴, 邵乃夫¹, 王心恰¹, 葛攀延¹, 鲁海宁⁵

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/中国气象局气溶胶与云降水重 点开放实验室, 江苏 南京 210044;

2.南京工业大学 安全科学与工程学院, 江苏 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, 江苏南京 210041

4.江苏省气象服务中心, 江苏南京 210008;

5.江苏省东海县气象局, 江苏 连云港 222300

*联系人: 牛生杰, E-mail: niusj@njtech.edu.cn

2021-12-29 收稿, 2022-01-25 接受

国家科学自然基金资助项目(41775134;42075063;42075066);广西重点研发计划项目(桂科 AB20159013)

摘要:为研究 FM-120 雾滴谱仪不同采样频率(5Hz、1Hz)对辐射雾微结构观测的影响, 2020 年冬季在连云港东海县开展了为期 58d 的雾外场精细化观测。在 2020 年 12 月 28 日一 次辐射雾观测阶段使用 5Hz 和 1Hz 两台不同频率的雾滴谱仪进行辐射雾精细化观测研究。 研究发现:相较于 1Hz 的观测结果,5Hz 更容易观测到雾微物理量的极值。从整个雾过程 来看,5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后的结果在雾的生成和消散阶段与 1Hz 雾滴谱仪的原始结 果的相似度较低,在雾的成熟和发展阶段相似度较高。从谱型来看,5Hz 和 1Hz 观测到的 谱型基本类似,主要差别出现在峰值。5Hz 和 1Hz 均能反映此次雾过程中不同阶段微物理 之间的关系,主要差别出现在雾的生成阶段,可能为 5Hz 在此阶段观测到的活化并凝结增 长的新雾滴相对较少所导致。

关键词:辐射雾;雾微结构;精细化观测;爆发性增长;采样频率

雾是由大量悬浮在近地层空气中的气溶胶粒子、微小水滴(或冰晶)组成的气溶胶系统 (牛生杰等,2016)。雾的分类有很多种,Gultepe (2007) 根据物理过程将雾分为辐射雾、高逆温雾、平流辐射雾、平流雾和蒸发雾。其中辐射雾是陆地上最常见的雾,它严重地降低了地面能见度,直接地危害交通运输特别是航空业。

天气条件和环流形势是辐射雾能否产生的先决条件。辐射雾大多出现在陆地,一般是 在天气形势稳定,夜间为无云或少云,风速较小的天气时,因为强辐射冷却作用,近地面 气温下降,水汽达到饱和时而形成的。林建等 (2008)根据 1971-2005 年 714 个站点的大雾 资料,统计了我国大雾的时空分布特征和环流形势,结果表明发生在我国的雾大多数属于 辐射雾,持续时间不超过 10 小时,地面均压场是大范围辐射雾的出现的一个共同特征,四 川盆地、重庆、云南南部、湖南和江南东部是出现大雾最多的地区。

早在上世纪 40 年代,我国就有学者通过观测能见度、气温、风向风速等气象要素来从 宏观上对雾进行研究分析(欧阳楚豪,1943;郑子政,1943)。到 20 世纪 60 年代初,三用

滴谱仪开始逐渐应用于云雾微物理的观测试验(杨中秋等,1989;邓雪娇等,2002; 王东海 等,2014)。三用滴谱仪它采用接触收集技术,主要根据惯性原理,使雾滴沉降在涂有油层 的玻璃片上,人工测量雾滴大小和数目(李晓娜等,2010)。但三用滴谱仪的分档较为粗糙, 难以获得较小雾滴的数据,且采样频率低不适于连续观测,只能获得少量的、间断的雾滴谱 数据(黄辉军等,2010)。牛生杰教授研究团队于2006年12月在南京北郊进行浓雾观测时 (陆春松等, 2008),在国内首次使用了由美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪,对雾 的微物理结构特征进行了连续观测(黄辉军等, 2010)。FM-100型雾滴谱仪使用非接触收 集技术,利用激光测量雾滴,根据大小不同的雾滴对激光散射强度的不同,对雾滴进行分 档、计数,分别计算出每一档内的雾滴数量,其采用了内部加热的方式,避免水汽在设备 凝结而造成的影响,获取相对准确的数据,同时可以进行连续观测 (DMT 公司, 2005)。 此后国内开始广泛使用 FM-100 型雾滴谱仪先后在南京、湛江、厦门、庐山、华北、威宁、 西双版纳等地进行观测,取得了系列研究成果(陆春松等,2011;赵丽娟和牛生杰,2012; 岳岩裕等, 2013; 郭丽君等, 2015; 方莎莎等, 2016; 王元等, 2019, 2021; Wang 等, 2019)。近年来,又有学者使用美国 DMT 公司生产的 FM-120 型雾滴谱仪进行雾观测试验 (朱承瑛等, 2018; 祖繁等, 2020), FM-120 型雾滴谱仪是在 FM-100 型雾滴谱仪 (Spiegel et al, 2012) 基础上加以改进的新一代产品, 与 FM-100 型雾滴谱仪相比, FM-120 型雾滴谱仪型雾滴谱仪测量的粒径范围由 0-50µm 变为 2-50µm, 在小粒径端的分档更为 精细,同时也消除了FM-100型第一档起始范围不确定带来的影响(李子华等,2011)。

先前的这些雾观测试验使用的观测仪器的频率一般为 1Hz, 少有使用高频率进行观测, 相较于频率为 1Hz 的常规观测,高频率观测结果应更加精细准确。为进一步深入研究辐射 雾的微观特征, 2020 年冬季,研究团队在连云港市东海县开展辐射雾精细观测试验。东海 县位于江苏省东北部,东临黄海,黄海是我国海雾发生最频繁的海区之一(王彬华, 1983)。 试验采用两台 FM-120 型雾滴谱仪对雾的微结构进行同步观测,并设置高分辨率的 5Hz 采 样频率与常用的 1Hz 采样频率进行对照试验,目的为探究二者在观测辐射雾微结构方面的 异同点,从而深化对辐射雾的认识。

1 观测及方法

1.1 观测时间、地点及仪器

2020 年 11 月 19 日至 2021 年 1 月 15 日在江苏省连云港市东海县国家基本气象站 (34.54°N, 118.7°E, 海拔 32.9m)观测场进行了为期 58 天的外场综合观测试验, 观测地 点如图 1a 所示。东海县国家基本气象站位于东海县城西侧 3km 外的城郊, 周围地势平坦, 无建筑物遮挡。

在观测过程中,温度、湿度、风速、风向等地面气象要素数据由江苏省无线电科学研究所生产的 DZZ4 型自动气象站收集,能见度数据由洛阳凯迈环测有限公司生产的 CJY-1G 型前向散射能见度仪收集,雾的微物理结构数据采用美国 DMT 公司生产的 FM-120 型雾滴 谱仪测量。FM-120 型雾滴谱仪共 30 档,每档的上边界详见(祖繁等,2020)。在进行精细 化观测研究时,我们选用两台 FM-120 雾滴谱仪,采样频率分别为 1Hz 和 5Hz,两台仪器 并排间隔 1.5m 放置,雾滴谱采样方向与起雾时盛行风向一致(图 1b)。以研究不同频率雾 滴谱仪在观测辐射雾微结构上的异同点。此外,我们在观测前使用单分散的直径为 30.1µm, 折射率为 1.51 的标准玻璃粒子标定这两台 FM-120,通过调节光路,令定标后的峰值均出 现在 26μm,进而保证雾滴谱测量结果的可靠性(Spiegel et al., 2012)。



图 1.东海县地理位置 (a), 1Hz 和 5Hz 雾滴谱仪摆放方式(b)

Fig 1. Location of Donghai County (a), placement of 1Hz and 5Hz fog drop spectrometers(b) **1.2 数据处理方法:**

根据 FM-120 型雾滴谱仪测量得到的雾滴谱 (N(D)),可以通过公式计算得出雾滴数浓度 (N),算术平均直径 (MD),体积平均直径 (*D_v*),液态含水量 (LWC),滴谱标准差 (σ) 以及离散度 (ε),公式详见(王元等,2021)。 考虑到两台仪器间可能存在的系统误差,我们将数浓度 (N) 和含水量 (LWC)进行如下

标准化处理。对序列 $x_1, x_2, ..., x_n$ 进行变换:

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$
,其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$, $s = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{n-1}} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$ 则新序列 y_1, y_2, \dots, y_n 的均值为 0,方差为1,且无量纲。

同时本文中的雾滴谱也采用相对谱,即用雾滴谱仪观测到的每一档雾滴个数与总雾滴 个数的比值除以每一档档宽来表示,定义这个变量为Q。

在比较 5Hz 和 1Hz 雾滴谱仪差别是,引入相关系数 (R),均方根误差 (RMSE),平均偏差 (MBE) 这三个统计量,公式如下:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - y_i)^2}$$
(2)

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - y_i)$$
(3)

2.分析研究

2.1. 辐射雾生消机理

为探究雾过程中不同频率雾滴谱仪观测的微物理量的异同点,我们选取 2020 年 12 月 28 日 02:30-12:50 的一次典型辐射雾过程进行深入分析。2020 年 12 月 27 日 20 时至 2020 年

12月28日08时,从500hpa高度场上来看(图略,下同),华东地区受纬向环流控制,没有 明显的冷平流,低空925hPa高度场上在南风的影响下形成暖脊,有利于建立"上暖下冷"逆 温层。地面图上由于冷空气即将南下,形势场较弱。地面相对湿度较大,夜间随着辐射降 温,一方面逐渐达到饱和后形成雾滴,另一方面降温也有利于加强逆温层。此次雾过程是 一次典型的辐射雾过程。

图 2 给出了此次雾过程中各气象要素及微物理量随时间变化,为了与基本气象要素时间匹配,对 1Hz 和 5Hz 雾滴谱数据均做了 1min 平均。根据能见度及雾滴谱的变化情况,将此次雾过程分为以下几个阶段。

(1) 形成阶段(阶段 I, 28 日 02 时 30 分——28 日 02 时 57 分) 在此阶段中, 能见 度呈波动下降趋势, 地面相对湿度在 95%左右, 此时初期的低能见度可能是因霾 所致, 地面气温持续下降, 风向为稳定的北风, 且风速较小, 湍流较弱, 较低的 风速有利于雾的形成(Niu et al, 2010), 湍流较弱会导致悬浮于空气中的大量霾粒 子不易消散, 吸湿增长成为雾滴。在这一阶段雾滴数浓度和含水量都非常小。

(2)发展阶段(阶段 II, 28 日 02 时 58 分—28 日 03 时 06 分)在此阶段中,能见 度在 9 分钟之内由 1200m 迅速下降到 50m 以内,相对湿度达到 100%,风向为稳 定的北风,弱冷平流使气温持续下降,雾体出现了爆发性增强。雾的爆发性增强 是雾过程中一种典型现象,在爆发性增强期间,雾滴谱在短时间内抬升、拓宽, 雾滴数量增多,平均直径增大(Niu et al, 2012)。在此阶段,雾滴标准数浓度和标 准液态含水量都呈现出明显的增长。

(3)成熟阶段(阶段Ⅲ,28日 03 时 07 分 28 日 09 时 39 分)在此阶段中,能见 度维持在 10m 左右,雾滴标准数浓度和标准液态含水量都保持着相对的高值,风 向总体上为北风和东北风,这一风向既可以起到冷平流作用,导致近地层温度维 持在一个较低的温度,使得饱和水汽压减小,利于水汽的凝结(陆春松等,2010), 又可以将黄海的水汽输送过来,为雾的发展和维持提供充足的水汽条件。在此过 程中,雾微物理量在 5:00 左右存在一个明显的起伏变化,这可能是因为风向发生 北向南突变所致。日出后,虽然地气温受太阳短波辐射影响开始回升,且风速明 显增大,但雾的微物理量的值未出现明显降低,仍维持在较高水平,能见度也未 出现明显回升。这可能是因为日出后风向仍为北风或东北风,冷平流抑制了气温 升高的速度。

(4) 消散阶段(阶段Ⅳ,28日09时40分——28日12时50分) 在此阶段中,气温 持续升高,风速和风向存在明显的波动,这可能是因为逆温减弱阶段的动量下传、 湍流发展所导致(陆春松等,2010)。在温度升高和湍流发展的共同作用下,各微物 理量参量均显著减小,能见度也逐渐好转,达到2000m左右。



图 2.雾过程中(a)能见度(VIS)、(b)标准雾滴数浓度(Standard N)、(c)标准液态含水量(Standard LWC)、(d)雾滴平均直径(MD)、(e)温度(T)、(f)风速和风向(WS,WD)、(g)相对湿度(RH)随时间变化

Fig 2. In the fog process, (a) visibility (VIS), (b) Standard droplet number concentration (Standard N), (c) Standard liquid water content (Standard LWC), (d) average droplet diameter (MD), (e) temperature (T), (f) wind speed and direction (WS, WD), (g) relative humidity (RH) change with time

2.2.辐射雾微物理统计分析

图 3 为在雾观测期间,5Hz 滴谱仪和 1Hz 滴谱仪测得的雾的基本微物理量 (Standard N、 Standard LWC、MD、D_ν、ε) 概率密度分布 (PDF) 图。由图可知, 5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾 滴谱仪所观测到的微物理量的特征总体来说比较相似,但也存在一定差异。根据统计数据, 标准数浓度基本集中在-1.6~2 范围内, 5Hz 的 PDF 峰值出现在-1.55 处附近, 峰值大约为 8%, 而 1Hz 的 PDF 峰值出现在-1.4 处附近,峰值大约为 15%,约为 5Hz 的两倍。两台雾 滴谱仪在其他数值的标准数浓度的 PDF 都比较少,均不超过 2%。标准液态含水量的 PDF 分布主要集中在-1.2~2 范围内,5Hz的 PDF 峰值和 1Hz 的峰值位置较为相似,但是 1Hz的 峰值要比 5Hz 高约 5%。5Hz 的 PDF 分布形态与 1Hz 的存在明显不同, 5Hz 的 PDF 分布从-1~2之间近似直角三角形,其值从5%开始逐渐递减至0,而1Hz的PDF分布在-1~2之间则 较为不规则,在-0.8 附近有一个小的峰值后一直呈近似带状分布,其值比较低,均不不超 过 2%。5Hz 和 1Hz 的平均直径和体积直径的 PDF 分布比较相似,呈双峰分布。其中 5Hz 和 1Hz 平均直径的 PDF 最大的峰值均处于 6.8µm 附近,5Hz 和 1Hz 的 MD 的平均值分别为 6.76μm 和 6.54μm, 5Hz 体积直径最大的 PDF 峰值处于 11μm 附近, 而 1Hz 则处于 12μm 处附近。5Hz 和 1Hz 的 ε 的 PDF 分布也较为一致, 二者的 PDF 峰值都为 5%左右。它们之 间存在两个细小的差别: 5Hz的 PDF 分布主要集中在 0.5-1 之间,而 1Hz的 PDF 分布主要 集中在 0.5-1.2 之间。



图 3.5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪在雾观测期间,雾的基本微物理量概率密度分布 (PDF) 示意图.标准数浓度 Standard N (a-b),标准含水量 Standard LWC (c-d),平均直径 MD (e-f),体积半径 D_v (g-h),离散度 ε (i-j). 其中,PDF 的统计方式为数据在取值范围内分为 100 档,每档的样本数除以总样本数即为该档的 PDF 大小.

Fig 3. Schematic diagram of probability density distribution (PDF) of the basic microphysical quantity of fog during fog observation by 5Hz fog drop spectrometer and 1Hz fog drop spectrometer. Standard number concentration Standard N (a-b), Standard water content Standard LWC (c-D), mean diameter MD (e-f), volume radius D_v (g-h), dispersion ε (i-j). In PDF statistics, the data is divided into 100 files within the value range, and the sample number of each file divided by the total sample number is the PDF size of the file.

图 4 为 5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪在雾过程的不同阶段的微物理特征量对比,由图可知,五种微物理平均值的大小关系都存在阶段III>阶段II>阶段IV>阶段 I 的关系。在各阶段中,5Hz 和 1Hz 的各微物理量的平均值和最小值相差不大,其中在阶段 I,阶段 II 和阶段IV中,5Hz 和 1Hz 的平均直径、体积直径和离散度的最小值均相同,这说明二者都可以很好地捕捉到小雾滴的情况,但是平均直径和体积直径的微物理量 5Hz 的最大值要比 1Hz 大,5Hz 平均直径的最大值在阶段 I、II 和IV甚至要比 1Hz 高 10μm 以上。这说明相较于 1Hz,5Hz 由于观测频率的增加,在捕捉大雾滴方面的能力要比 1Hz 强。





Fig 4. Comparison of microphysical characteristics of fog at different stages between 5Hz droplet spectrometer and 1Hz droplet spectrometer (the middle point is the average value, and the upper and lower ends are the maximum and minimum values respectively)

为了进一步研究 5Hz 和 1Hz 雾滴谱仪在观测时的差异,我们将 5Hz 雾滴谱仪采样的数 据平均成 1Hz 数据来与 1Hz 雾滴谱仪的原始数据作对比,图 5 为 5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后与1Hz雾滴谱仪微物理相关系数(R)、均方根误差(RMSE)、平均偏差(MBE)的对比。 从结果可以发现,从总过程的统计量来看,5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后的结果与 1Hz 的原 始结果有着较高的相似性,各微物理之间的相关系数都超过了 0.6,均通过了 99%的显著 性检验。其中二者离散度的相关系数最高,达到了 0.87,标准数浓度、标准含水量、体积 直径的相关系数也均超过了 0.8,平均直径的相关系数相对较小,但也达到了 0.62。结合 RMSE 和 MBE 来看,二者之间还是存在一定的差异。从每个阶段分析来看,在阶段 I中,各 微物理量之间的相关系数都非常低,这可能是由于该阶段中,空气中的雾滴个数比较少, 且分布不均匀,两台仪器在一定空间内采集到的雾滴存在差异而导致。在阶段Ⅰ后,经过 雾的爆发性增长,随着雾滴的数浓度和含水量的大幅度提高,在阶段Ⅱ和阶段Ⅲ中,各微 物理之间的相关系数也有了大幅度的提高,说明在高数浓度的情况下,5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪的结果是比较接近的。其中二者平均直径的相关系数相较于其他物理量较低, 这可能是因为雾滴的生长是由凝结核活化,凝结增长后再通过碰并其他液滴继续增长而形 成的(Devenish et al ,2012),同时在雾滴谱仪采样的一定空间内,雾滴的分布是不均匀的, 由于 5Hz 和 1Hz 的采样频率差异,可能会造成它们采样到的雾滴分布的档位不一致,从而 导致平均直径的不同。四个阶段中,各微物理量的 RMSE 和 MBE 在阶段IV中相对较大, 这是因为在雾消散过程中,太阳辐射增强,地面温度风速增大,湍流运动较强,动量下传 (赵德山和洪钟祥, 1981) 导致雾滴蒸发,各微物理迅速减小,由于观测频率不同,使得采 集到的每一档雾滴个数不同从而导致产生较大的 RMSE 和 MBE。在在阶段 I 中也存在类

似的情形,但由于在雾的生成阶段,各微物理量的值比较小,从而导致该阶段的 RMSE 和 MBE 不大。



图 5.5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后与 1Hz 雾滴谱仪原始数据的微物理量对比

Fig 5. Comparison of microphysical quantities between the original data of 5Hz droplet spectrometer after averaging 1Hz and 1Hz droplet spectrometer

2.3. 辐射雾相对雾滴谱对比

图 6 为本次雾全过程 5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪的平均相对雾滴谱。由图 6 可知这两台仪器的平均雾滴谱都具有单峰分布的特征,但它们 Q 值的峰值大小不同。5Hz 的峰值 在第二档,其值约为 0.29,1Hz 的峰值也同样在第二档,但它的值要比 5Hz 的要小,约为 0.24,同时在第三档处的值也仅比第二档的峰值略小。5Hz 在第一档、第三档的值要比 1Hz 小约 0.04。二者在第四档到第八档之间的 Q 值较为一致,在第九档至第十四档的范围内, 5Hz 的 Q 值要比 1Hz 略高。从第十五档开始,两者的 Q 值又继续保持一致、并且从第二十 档开始,两者的 Q 值均趋于 0,这说明本次雾过程中,雾滴的平均直径主要分布在 2-30µm。 由于雾全过程平均相对雾滴谱只能反映雾全过程中的整体雾滴分布情况,不能体现雾在不 同发展过程中的雾滴分布状况。图 7 为 5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪各阶段平均相对雾滴 谱。由图 7 可知,四个阶段的相对雾滴谱分布均为单峰分布。

形成阶段: 5Hz 和 1Hz 的相对雾滴谱谱宽均很窄, 5Hz 的最大直径处在第 18 档的 24-26μm 处, 1Hz 的最大直径处在第 19 档的 26-28μm 处, 但二者大于 10μm 粒径的 Q 值均非 常小。两个雾滴谱的 Q 值最大峰值均在第二档,但 5Hz 的 Q 值峰值要比 1Hz 高约 0.07, 且 5Hz 前四档的 Q 值之和要比 1Hz 高约 0.05, 这表明 5Hz 可以比 1Hz 捕捉到更多的小雾 滴。

发展阶段:由于碰并作用使得大雾滴增多,5Hz 和 1Hz 的 Q 值在小滴端相较于形成阶段有了减小,在大滴端出现增加,5Hz 的 Q 值在大滴端要稍高 1Hz,同时它们的相对雾滴谱均有了明显拓宽。二者 Q 值的峰值位置有所不同,5Hz 出现在第二档,1Hz 则出现在第三档,但 Q 值的峰值大小依旧是 5Hz 要高于 1Hz,高约 0.05。

成熟阶段:与上一阶段相比,5Hz 和 1Hz 的 Q 值在小滴端继续减小,Q 值在大滴端继续增加。二者的 Q 值峰值都出现在了第二档,Q 值峰值依旧是 5Hz 要高 1Hz 约 0.05。二者 最大的区别是在第一档处,5Hz 的 Q 值要比 1Hz 低约 0.06。这可能是由于观测的频率不同,5Hz 观测到了碰并作用占主导,更多的小雾滴消耗和大雾滴生成,而 1Hz 则观测到的活化 作用占主导,凝结核活化的小雾滴来补偿碰并消耗的大雾滴。

消散阶段:在这个阶段,5Hz和1Hz的Q值的峰值位置又出现了不同,5Hz出现在第

二档,1Hz 出现在第三档,但它们的峰值大小比较接近,5Hz 仅比 1Hz 高出约 0.015,而且 它们前四档的 Q 值·之和也比较接近,差值约为 0.01,这说明两台仪器在此阶段的差别较小。



图 7.5Hz 雾滴谱仪和 1Hz 雾滴谱仪各阶段平均相对雾滴谱(Q)

Fig 7. 5Hz droplet spectrometer and 1Hz droplet spectrometer average relative droplet spectra at each stage (Q)

濮梅娟等 (2008) 研究表明,雾体爆发性发展,本质就是雾滴爆发性增多增大,使雾滴谱拓宽。先前图 6、图 7 分别比较了雾全过程和各阶段 5Hz 和 1Hz 平均相对雾滴谱的差异,但平均相对雾滴谱只能反映一段时间内雾滴谱的总体变化,并不能反映短时间内雾滴谱的连续变化,

因此通过比较雾爆发性增强过程中逐分钟雾滴谱来探究 5Hz 和 1Hz 雾滴谱仪的差异。

图 8 为雾爆发性增强过程中 5Hz 和 1Hz 相对雾滴谱的逐分钟连续变化情况。从 02:58-03:06,5Hz和1Hz的O值在小滴端逐渐减小,在大滴端逐渐增大,同时在此过程间谱宽也 有了明显的拓宽,从图 2 也可以看出在此过程期间,标准数浓度也呈一直上升趋势。雾滴 标准数浓度的增多是凝结核活化导致,Q值在小滴端的减少,在大滴端的增大是凝结增长 的结果。从 02:58 开始,相对雾滴谱开始拓宽,在 03:00 时开始出现了个别大于 20um 以上 的大滴,1分钟后相对雾滴谱整体谱宽已经基本达到了 20µm 以上,到 3:03 时,大于 10µm 处的 Q 值有了明显的提高, 谱宽持续拓宽, 直到 3:06 时达到了 40µm 左右。总体来看, 这 次雾的爆发性增强过程在9分钟内, 谱宽由不到 15µm 拓宽到 40µm 以上, 雾滴标准数密度 和含水量都有了大幅度上升。细分起来,此次雾的爆发性增长过程也可以分为三个阶段。 02:58-03:00 为拓宽的初期,以核化、凝结过程为主,O 值的峰值逐渐减小,峰值左边相邻 的档位的 Q 值逐渐增加,但相对雾滴谱尚未有明显的拓宽。03:01-03:03 为拓宽中期,同时 存在碰并、凝结和活化过程,大于 10µm 雾滴的 Q 值明显增加, 谱宽也拓宽到了 30µm 左 右。03:04-03:06 为拓宽后期,类似中期的过程继续出现,谱宽继续拓宽至 40µm 以上,但 在小滴端的 Q 值减小较缓,10-25μm 间的 Q 值明显增大,这可能表明相对于活化凝结作用, 碰并作用更占主导。此外,本次雾滴谱的拓宽先是在个别档位出现大滴,而后大滴增多, 并与谱分布曲线相连。个别大滴的产生它可能是湍流碰并的结果 (李子华等, 2011)。在本 次爆发性过程中,5Hz 和 1Hz 的相对滴谱整体谱型较为一致,差别主要有两点,一是二者 的Q值峰值所在位置不同,5Hz处在第二档,1Hz则是在第三档。二是二者的Q值峰值数 值大小不同,5Hz的Q值峰值在02:58比 1Hz 高约0.15,随着时间推移工者的差值逐步减 小,到 03:06,1Hz 的 Q 值峰值反而高处 5Hz 约 0.03。在二者 Q 值的差值逐渐缩小的同时, 5Hz 在 5-20µm 处的 Q 值比 1Hz 要越来越高,这可能是因为 5Hz 的观测频率要高于 1Hz, 所以其更容易反映出在爆发性发展初期由于凝结核活化生成小雾滴从而导致 5Hz 比 1Hz 在 小滴端的 Q 值要高,以及在爆发性发展中后期小雾滴之间由于碰并作用生成大雾滴从而导 致 5Hz 比 1Hz 在大滴端的 O 值也要高现象。



图 8. 2020 年 12 月 28 日 02:58-03:06 相对雾滴谱(Q) 逐分钟的连续变化情况 Fig 8. Continuous minute-by-minute variation of relative fog drop spectrum (Q) during 02:58-03:06 in 2020.12.28

2.4. 雾的微物理参量关系对比及雾过程分析

为讨论在不同阶段 5Hz 和 1Hz 雾滴谱仪的微物理参量关系有何异同,结合图 9 和图 10, 对 5Hz 和 1Hz 在不同阶段标准数浓度与液态含水量以及滴谱标准差之间相关关系进行分析。

在阶段 I 中,由于标准液态含水量较低,雾滴数浓度的尺度分布也相对较窄,5Hz 和 1Hz 的标准数浓度与液态含水量以及滴谱标准差的相关性并不高,这可能是因为在此过程 中出现了凝结核活化并凝结增长,但是由于可凝结的水汽有限,存在大量未活化的霾粒子 或是未达到雾滴谱仪检测下限的小液滴,活化并凝结增长的新雾滴会使得总体的滴谱标准 差降低。在此阶段,5Hz 雾滴谱仪标准数浓度与液态含水量的相关性要小于 1Hz,但标准 数浓度与滴谱标准差的相关性 5Hz 要大于 1Hz, 这可能是因为 5Hz 的观测频率要高于 1Hz 导致 5Hz 观测到的活化并凝结增长的新雾滴相对较少,由于有限的水汽会抑制活化凝结过 程的发展,雾滴标准数浓度的升高会导致滴谱标准差的降低,会使得标准数浓度与滴谱标 准差的相关性降低,从而导致 5Hz 中标准数浓度与滴谱标准差的相关性要高于 1Hz。同时 由于此阶段是雾生成阶段,5Hz 相较 1Hz 观测到的雾滴分布更为零散从而导致其标准数浓 度与液态含水量的相关性比 1Hz 要低。在阶段 II 前期,雾微物理相较于前一阶段有了飞速 增长,5Hz和1Hz标准数浓度与标准含水量以及滴谱标准差的相关性都有了大幅度提升,呈 现出良好的正相关关系, 日 5Hz 和 1Hz 的相关系数差别不大。在这一阶段, 标准数浓度和 标准含水量呈同步飞速增长,说明凝结核活化并凝结增长仍是主要过程,但此阶段中,水 汽含量充足,使得雾滴在凝结增长的同时,凝结核也在持续活化生成小雾滴从而巩固该过 程。但由于液滴凝结增长速率是与其尺度成反比 (Hammer et al, 2014),仅靠凝结很难实现大 雾滴的快速增长,此过程中滴谱的拓宽可能是因为湍流混合<mark>或随机</mark>碰并。而到了阶段Ⅱ后 期,随着雾滴<mark>谱标准数浓度的逐渐增大,碰并过程也开始逐渐增强</mark>并占据主导,从而导致 标准数浓度与滴谱标准差由原先的正相关关系转为负相关关系。在阶段Ⅲ中,雾滴标准数 浓度在较高的数值上起伏变化,5Hz 和 1Hz 的标准数浓度与标准含水量和滴谱标准差的相 关性较低,特别是 1Hz 的标准数浓度与滴谱标准差的相关系数仅有 0.1, 这可能是因为在 此阶段碰并过程显著,大滴的形成消耗了小滴,导致破坏了标准数浓度与滴谱标准差之间 良好的正相关。到了阶段Ⅳ,随着日出后湍流混合增强,雾滴的蒸发过程逐渐显著,雾滴 的标准数浓度与标准含水量以及滴谱标准差的相关性有了较大的提高。总的来看,除阶段 II 中 5Hz 和 1Hz 标准数浓度与滴谱标准差在低值区呈正相关,高值区呈负相关外,在其余 阶段,5Hz 和 1Hz 的标准数浓度与标准含水量和滴谱标准差均呈正相关且通过 99%的显著 性检验。除阶段 I 外,在其他三个阶段 5Hz 和 1Hz 的标准数浓度与标准含水量和滴谱标准 差的相关性均较为一致。



图 9.5Hz (a-d)和 1Hz (e-h) 在不同阶段雾滴标准数浓度 (Standard N) 与标准液态含水量 (Standard LWC) 的关系

Fig 9. The relationship between Standard number concentration of fog drops (Standard N) and Standard liquid water content (Standard LWC) at different stages of 5Hz (a-d) and 1Hz (e-h)



图 10. 5Hz (a-d)和 1Hz (e-h) 在不同阶段雾滴标准数浓度 (Standard N) 与滴谱标准差 (SD) 的关系

Fig 10. Relationship between Standard number concentration (Standard N) of fog drops and Standard deviation (SD) of droplet spectrum at different stages of 5Hz (a-d) and 1Hz (e-h)

3 结论

利用 5Hz 和 1Hz 两台不同频率的 FM-120 雾滴谱仪于 2020 年 12 月 28 日在东海县进行 一次辐射雾过程的精细化观测,结论如下:

1)由于观测频率的增加,相较于 1Hz 的观测结果,5Hz 更容易观测到极值,5Hz 平均 直径和体积直径的最大值都要大于 1Hz。从整个雾过程来看,5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后 的结果与 1Hz 雾滴谱仪的原始结果有着较高的相似性,各微物理量之间的相关系数都超过 了 0.6,且均通过了 99%的显著性检验。分阶段来看,5Hz 雾滴谱仪平均成 1Hz 后的结果 在雾的生成和消散阶段与 1Hz 的原始结果的相似度较低,在雾的成熟和发展阶段相似度较 高。

2) 从整个雾过程相对谱和各阶段相对谱来看,5Hz 和 1Hz 的谱型基本类似,但 5Hz 滴谱的 Q 值峰值和在大滴端的 Q 值要高于 1Hz;从雾的爆发性增长过程的分钟平均谱来看,在爆发性增长初期 5Hz 的 Q 值峰值要高于 1Hz 约 0.15,随着爆发性增长过程的持续进行,5Hz 和 1Hz 的 Q 值峰值之差缩小直至 1Hz 高于 5Hz。

3)5Hz和1Hz均能反映此次雾过程中不同阶段微物理量之间的关系。在雾形成初期, 有限的水汽使雾滴标准数浓度与标准含水量和滴谱标准差的相关系数较低,在爆发性增长 阶段前期,充足的水汽使雾滴标准数浓度与标准含水量和滴谱标准差的相关系数迅速提高。 而到了爆发性增长后期以及雾的成熟阶段,碰并过程效果显著,破坏了雾滴标准数浓度与 标准含水量和滴谱标准差良好的正相关关系,但随着日出后雾滴蒸发作用增强,它们之间 的相关系数再次提高。除了在雾生成阶段,5Hz和1Hz各自的雾滴标准数浓度分别与标准 含水量和滴谱标准差的相关系数之间相差较大外,其他三个阶段,二者雾滴标准数浓度与 标准含水量和滴谱标准差的相关系数均比较接近。因此在进行雾的常规观测时,选择频率 为1Hz的雾滴谱仪可以基本满足研究需要。

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, (3):227-236. Deng X J, Wu D, Ye Y X. 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling mountain region [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (3):227-236.

Devenish, B. J., Bartello, P., Brenguier, J. L., et al. 2012. Droplet growth in warm turbulent clouds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 138(667), 1401-1429.

- DMT 公司. 2005. 雾滴谱仪操作者使用手册 Doc-0088 修订 A [Z]. 美国 DMT 公司, 6-15. DMT. 2005. Fog Monitor Operator Manual Doc-0088 Revision A [Z]. DMT. 6-15.
- 方莎莎, 韩永翔, 王瑾等. 2016. 高污染下云凝结核对雨、雾滴谱的影响[J]. 中国环境科学, 2016,36(9): 2585-2590. Fang S S, Hang Y X, Wang J, et al. 2016. Impacts of CCN on droplet spectra of rain and fog during high pollution days [J]. China Environmental Science (in Chinese), 2016,36(9): 2585~2590
- Gultepe I. 2007. Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting[M]. Birkhäuser Basel.
- 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 L J, Guo X L, Fang C G, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China (in Chinese), Science China: Earth Sciences, 58: 329–344.

- Hammer E, Gysel M, Roberts G C, et al. 2014. Size-dependent particle activation properties in fog during the Paris Fog 2012/13 field campaign[J].Atmos Chem Phy, 14(19): 10517-10533
- 黄辉军,黄健,毛伟康, 等. 2010. 茂名地区海雾含水量的演变特征及其与大气水平能见度的关系[J]. 海洋学报, 32(2):40-53. Huang H J, Huang J, Mao W K, et al. 2010. Characteristics of liquid water content of sea fog in Maoming area and its relationship with atmospheric horizontal visibility [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 32(2):40-53.
- 李晓娜, 黄健, 申双和, 等. 2010. 一次高压型海雾中的液态含水量演变特征 [J]. 热带气象 学报, (1):79-85. Li X N, Huang J, Shen S H, et al. 2010. Evolution characteristics of liquid water content for a high-pressure pattern of sea fog [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (1):79-85.
- 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 41-54.
- Lillis, D., Cruz, C. N., Collett, J., et al .1999. Production and removal of aerosol in a polluted fog layer: model evaluation and fog effect on pm[J]. Atmospheric Environment, 33(29), 4797-4816.
- 林建,杨贵名,毛冬艳. 2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势 [J]. 气候与环境 研究, 13(002):171-181. Lin Jian, Yang G M, Mao D Y. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),13(2):171-181.
- 陆春松,牛生杰,杨军,等.2008.南京冬季平流雾的生消机制及边界层结构观测分析 [J]. 大气科 学学报.4.520.529. Lu C S, Niu S J, Yang J, et al. 2008. An Observational Study on Physical Mechanism and Boundary Layer Structure of Winter Advection Fog in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 4:520.529.
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学, 34(4): 681-690. Lu C S, Niu S J, Yang J, et al. 2010. Jump Features and Causes of Macro and Microphysical Structures of a Winter Fog in Nanjing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(4): 681-690.
- 陆春松,牛生杰,岳平,等.2011.南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J].大气科学学报,1:58.65. Lu C S, Niu S J, Yue P, et al. 2011. Observational research on boundary layer structure during high □incidence period of winter fog in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1:58.65.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in china: an overview [J]. Advances in Atmospheric Sciences.
- Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern nanjing, part 2: fog microphysics [J]. Pure & Applied Geophysics, 169 (5-6), 1137-1155.
- 牛生杰,陆春松,吕晶晶,等.2016.近年来中国雾研究进展 [J]. 气象科技进展, 6(002), 6-19.

Niu S J, Lu C S, Lv J J, et al. 2016. Advances in Fog Research in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 6(002), 6-19.

- 欧阳楚豪. 1943. 湖南近五年来之雾[J].气象学报,(Z1):99-107. Ouyang C H. 1943. The fog of Hunan in the past five years. [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (Z1):99-107.
- 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 2008. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究 [J]. 高原气象, 27(005), 1111-1118. Pu M J, Yan W L, Shang Z T, et al.2008. Study on the Physical Characteristics of Burst Reinforcement during the Winter Fog of Nanjing[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(5): 1111-1118.
- Spiegel, J. K., Zieger, P., Bukowiecki, N., et al. 2012. Evaluating the capabilities and uncertainties of droplet measurements for the fog droplet spectrometer (FM-100) [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 5,9 (2012-09-20).
- 王彬华.1983.海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 59-67.Wang B H.1983. Sea fog [M]. Beijing:China Ocean Press (in Chinese). 59-67.
- 王东海, 尹金方, 翟国庆. 2014. 1960 年以来东亚季风区云-降水微物理的直接观测研究[J]. 气象学报, (4): 639-657. Wang D H, Yin J F, Zhai G Q. 2014. In-situ measurements of cloudpercipitation microphysics in East Asian monsoon region since 1960[J]. Acta Meteorologica Sinica, (4): 639-657.
- 王元, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2019. 南京冬季一次强浓雾及超细粒子累积过程分析[J]. 中国环境 科学, 39(2): 459-468. Wang Y, Niu S J, Lv J J, 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.
- 王元, 牛生杰, 陆春松, 等. 2021. 西双版纳热带雨林地区冬季辐射雾理化特征的观测研究. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2098–2111. Wang Y, Niu S J, Lu C S, 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, 64(11): 1982–1995.
- Wang T S, Niu S J, Lv J J, et al. Observational study on the supercooled fog droplet spectrum distribution and icing accumulation mechanism in Lushan, Southeast China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(1): 29–40
- 杨中秋,许绍祖,耿骠. 1989. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构[J].海洋学报,11(4):431-438. Yang Z Q, Xu S Z, Geng P. 1989. Formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan Region [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 11(4):431-438.
- 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微观特征分析[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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 609-622.
- 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, 5(4), 407-415. Zhao D S, Hong Z X .1981. Some burst characteristics during the process of occuring and dissipating of typical radiation inversion[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1981, 5(4): 407-415.

- 赵丽娟,牛生杰.2012.近地层辐射过程与雾微结构的相互作用特征[J].大气科学学报,6:673.679.Zhao L J, Niu S J. 2012. Characteristics of interactions between radiation processes and fog microphysical structure [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 6:673.679.
- 郑子政. 1943. 重庆之雾[J].气象学报,(Z1):85-98. Zheng Z Z. 1943. The fog of Chong Qing[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (Z1):85-98.
- 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 (in Chinese),44(9):1208-1219.
- 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(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 Meteorologica Sinica (in Chinese), 78 (4):691-704.

High resolution observation of radiation fog

microstructure WU Haopeng¹, NIU Shengjie^{1,2*}, LYU Jingjing¹, Wang Yuan¹, LIU Duanyang³, ZU Fan³, WANG Lingling⁴, SHHAO Naifu¹, WANG Xinyi¹, GE Panyan¹, LU Haining⁵

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

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

3. Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Key Laboratory of Transportation

Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing 210041, China;

4. Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008, China;

5. Donghai County Meteorological Bureau, Lianyungang 222300, China

Abstract: To study the differences and similarities between fine observation and conventional observation in fog microstructure, a systematic field observation of fog was conducted and lasted 58 days in Donghai, Lianyungang during the winter of 2020. Two fog monitors with different frequencies (5Hz and 1Hz) were applied simultaneously for measuring a radiation fog on December 28, 2020. Based on this observation, we found that compared with the 1Hz data, the 5Hz measurement observed more extreme values. In terms of the whole fog process, the results of the 5Hz fog droplet spectrometer averaged into 1Hz are less similar to the original results of 1Hz in the fog generation and dissipation stages, and more similar in the fog maturation and development stages. In terms of the spectral patterns, the spectral patterns of 5 Hz and 1 Hz are similar, while the main differences appear at the peak. The measurements of 5 Hz and 1 Hz can

both reflect the relationship between the microphysics at different stages of this fog process, and the main differences appear at the fog generation stage. This may be due to the relatively small number of activation and condensation growth of new fog droplets observed by 5Hz at this stage.

Keywords: radiation fog, microstructure, high resolution observation, explosive growth,

sample frequency

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb. 20211229001

大气科学学报 优先出版稿