

张伟,李菲,吕巧谊,等,2023. 闽南沿海一次海雾过程的多源资料综合分析[J]. 气象,49(6):682-696. Zhang W, Li F, Lyu Q Y, et al, 2023. Comprehensive analysis of a sea fog event in southern coast of Fujian based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 49(6):682-696(in Chinese).

闽南沿海一次海雾过程的多源资料综合分析*

张 伟^{1,2} 李 菲¹ 吕巧谊¹ 崔梦雪^{1,2} 张妤晴^{1,2} 陈德花^{1,2}

1 厦门市海峡气象开放重点实验室, 厦门 361012

2 厦门市气象台, 厦门 361012

提 要: 基于自动站资料、ERA5 再分析资料、葵花 8 号卫星资料、翔安站多源观测资料, 分析了 2021 年 4 月 1 日闽南沿海一次大雾过程的环流形势、演变特征和微物理结构。结果表明此次是一次典型的海雾过程。雾形成时 500 hPa 为偏西—西南气流, 低层为一致的西南气流与反气旋下沉气流, 近地面存在逆温层和湿层, 为海雾的发生发展提供了静稳的环流形势和充沛的水汽条件。此次大雾过程存在雾和低云的相互转化。白天以低云为主, 傍晚随着气温的下降和整层风速的减小, 低云逐渐接地转变为雾。清晨由于偏西气流的作用, 沿海的雾再次转变为低云。利用气溶胶激光雷达推演雾顶高度, 雾的初生和发展阶段厚度相对较低且波动性大, 成熟阶段雾顶高度约为 100 m。微物理参数分析表明雾过程的平均粒子数浓度为 $52.4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 液态水含量为 $0.084 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均直径为 $9.4 \mu\text{m}$; 1 分钟平均粒子数浓度最大达到 $132.6 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 液态水含量达到 $0.7321 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此次过程不同阶段粒子数浓度和液态水含量的谱分布特征具有较大差异, 其中数浓度的谱分布在初生、发展和消散阶段, 以单峰结构为主, 峰值直径为 $4 \sim 6 \mu\text{m}$; 成熟阶段表现为双峰结构特征, 主峰位于 $4 \sim 5 \mu\text{m}$, 次峰位于 $24 \sim 26 \mu\text{m}$; 液态水含量同样为双峰分布, 但主峰位于 $24 \sim 26 \mu\text{m}$, 次峰位于 $5 \sim 6 \mu\text{m}$; 表明雾的粒子数浓度受小粒子影响为主, 但液态水含量以 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 的粒子贡献最大。从发展到成熟阶段谱对比来看, $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 粒子数量的增加使得液态水含量明显增大, 这是导致能见度进一步下降的主要原因。

关键词: 海雾, 多源资料, 微物理特征, 雾滴谱

中图分类号: P412, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.011601

Comprehensive Analysis of a Sea Fog Event in Southern Coast of Fujian Based on Multi-Source Data

ZHANG Wei^{1,2} LI Fei¹ LYU Qiaoyi¹ CUI Mengxue^{1,2} ZHANG Yuqing^{1,2} CHEN Dehua^{1,2}

1 Xiamen Key Laboratory of Strait Meteorology, Xiamen 361012

2 Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012

Abstract: Using observation data from automatic weather station (AWS), ERA5 reanalysis data, Himawari-8 satellite data and multi-source observation data at Xiang'an Station, we analyze the circulation situation, evolution characteristics and microphysical structure of a sea fog event that occurred in southern Fujian Coastal Area (SFCA) on 1 April 2021. The results show that this was a typical advection fog process. Multiple weather conditions provided stable circulation situation and abundant water vapor conditions for the occurrence and development of sea fog. In other words, when the fog was formed, there was west-southwest airflow at 500 hPa, the lower troposphere was controlled by consistent southwest airflow and anticyclonic sinking airflow, and the temperature inversion layer and wet layer existed near surface.

* 厦门市科技局指导性专项(3502Z20214ZD4007)和厦门市气象局海洋气象创新团队共同资助

2022 年 11 月 1 日收稿; 2023 年 4 月 12 日收修定稿

第一作者: 张伟, 主要从事海洋气象研究. E-mail: zw880810@126.com

通讯作者: 李菲, 主要从事云微物理过程研究. E-mail: leefeicat@163.com

Low-level cloud and sea fog conversed into each other during the whole fog process. Daytime was dominated by low-level cloud, but after sunset, the low-level cloud changes into fog with dropping temperature and slowing wind. Next morning, fog changed into low-level cloud under the effect of west wind. The fog height is deduced by aerosol lidar. The fog thickness was relatively low and fluctuated greatly in the initial and developing stages, and the fog top height was about 100 m in the mature stage. Microphysical analysis shows that average fog droplet number concentration (N) was 52.4 cm^{-3} , the average fog droplet liquid water content (LWC) was $0.084 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, and the mean diameter (MD) was $9.4 \mu\text{m}$ during this event. The maxima of the average N per minute and the average LWC per minute were 132.6 cm^{-3} and $0.7321 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. Spectrums of N and LWC at different stages exhibited quite different characteristics, of which the size distribution of N was mainly a unimodal structure with the peak diameter at $4-6 \mu\text{m}$ in the preliminary, development and dissipation stages, but it was a bimodal structure with the main peak at $4-5 \mu\text{m}$ and the secondary peak at $24-26 \mu\text{m}$ in the mature stage. The LWC also had a bimodal structure, with the main peak at $24-26 \mu\text{m}$ and the secondary peak at $5-6 \mu\text{m}$. Thus, the N should be dominantly influenced by small particles, but the greatest influence to LWC is fog droplets of $20-30 \mu\text{m}$. Comparative analysis of size distribution at the development and mature stages shows that the main reason for the further deterioration of visibility should be the significant increase in LWC which resulted from the increase in the particles of $20-30 \mu\text{m}$.

Key words: sea fog, multi-source data, microphysical feature, fog droplet spectrum

引言

雾是由大量悬浮在近地面的微小水滴或冰晶导致的一种灾害性天气。海雾是冬春季节闽南沿海的重大气象灾害之一,对沿岸城市的港口船舶进出和机场飞机起降等航行安全产生巨大影响(韩美等,2016)。由于海上缺乏观测资料,对海雾的实时地基监测难度较大,且数值模式对海上能见度定量预报的TS评分低(Zhou et al,2012),导致海雾预报存在较大不确定性,因此开展相关研究极其重要。

台湾海峡是我国沿海主要的雾区之一(王彬华,1983)。学者针对台湾海峡内的海雾做了较多的统计分析(许金镜,1990;苏鸿明,1998)、环流分型(陈千盛,1986)、卫星反演(张春桂等,2009)和进展综述(韩美等,2016)等工作。研究指出台湾海峡海雾主要出现在3—5月(苏鸿明,1998),夜间出现概率高于白天,南部高于北部(马治国等,2011)。平流冷却降温是海雾形成的主要机制之一。闽南沿海存在一条带状冷水区域,上游的偏南暖湿气流遇冷水带被冷却凝结,在静稳的天气形势下就容易形成海雾(白彬人,2006)。海雾形成时,海温通常不高于 25°C (王彬华,1983),海面风速通常低于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气海

温差介于 $0.5\sim 3^\circ\text{C}$ (气温大于海温),以 1°C 附近概率最大(林卫华等,2008)。

近年来随着观测设备的快速发展,基于边界层梯度观测(陆春松等,2010;梁绵等,2019)、毫米波云雷达(岑炬辉等,2021;胡树贞等,2022)、气溶胶粒径谱仪(郭丽君等,2015;Guo et al,2015)等多源融合资料的研究逐渐增多,进一步加深了对雾形成过程中边界层精细化结构的认知。雾滴谱仪的应用则加深了对雾的微物理过程的认知(Gerber,1981;Gultepe et al,2006)。国外针对雾滴谱的研究起步较早。Eldridge(1961)研究了美国地区的雾滴谱特征,Kunkel(1971)基于雾滴谱参数,建立了能见度与液态水含量的参数化公式。近年来国内学者在华南沿海(黄辉军等,2010;岳岩裕等,2013;徐峰等,2012)、东南沿海(张曦等,2016;张伟等,2021)、华东沿海(杨中秋等,1989)、黄渤海(Wang et al,2020;黄彬等,2014;2018)及其县郊(祖繁等,2020)、城市(李子华等,1993;李子华和彭中贵,1994;刘端阳等,2009;王庆等,2019;2021)、山地(吴兑等,2007)等开展了诸多观测试验,对不同类型雾的微物理特征有了进一步的认知。研究表明降温冷却对雾的爆发性发展具有关键作用(濮梅娟等,2008)。雾滴谱在降温过程中得到爆发性拓宽,成熟阶段的滴谱形态主

要呈现单峰或双峰分布特征,主峰集中在小粒子端(王庆等,2019)。不同区域、不同阶段会呈现不同的特征,雾越强双峰特征结构越明显(张浩等,2021)。对于不同的观测环境,雾滴数浓度量级可以从 10 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$ 变化到 10^3 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$,液态水含量通常低于 $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2021 年 3 月末至 4 月初,闽南沿海及台湾海峡发生了一次大范围的强浓雾过程,以 4 月 1 日夜间的雾过程最为强盛,对海上交通影响最为明显。本文基于翔安区气象局布设的自动站、微波辐射计、风廓线雷达、3D 气溶胶激光雷达等多源观测资料,结合 ERA5 再分析资料,分析此次雾过程的环流形势、边界层特征等。利用雾滴谱仪分析了雾过程的微物理参数特征,研究其演变过程中的微物理过程,以期为此类大雾的预报以及模式模拟提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 采用资料

使用的资料如下:(1)闽南地区 133 个区域自动站能见度观测资料(站点海拔高度均在 200 m 以下);(2)翔安站多源垂直观测资料,包括微波辐射计、风廓线雷达和 3D 气溶胶激光雷达资料(观测设备分布及其参数分别见图 1、表 1);(3)欧洲中心(ECMWF)第五代全球再分析数据产品(ERA5);(4)葵花 8 号高分辨卫星红外通道观测资料(水平分

辨率: $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$);(5)雾滴谱观测资料,采样仪器为美国 Droplet Measurement Technologies 公司的 FM-120 型雾滴谱仪,采样频率为 1 Hz,测量的粒子直径范围为 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ (祖繁等,2020),分为 30 个非等间距区间,采样地点为翔安区气象局业务楼顶,海拔高度约为 20 m,距离海岸线不足 1 km。

1.2 微物理参数计算方法

本文使用的微物理参数包括粒子数浓度(N ,单位:个 $\cdot \text{cm}^{-3}$)、液态水含量(L ,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、平均直径(r_m ,单位: μm)、中值体积直径(MVD,单位: μm ,由仪器自动输出)等,具体计算公式如下:

$$N = \sum_{r=2}^{50} n(r) \Delta r$$

$$L_r = 1 \times 10^{-6} \times \rho \times \frac{4\pi}{3} r^3 n(r)$$

$$L = 1 \times 10^{-6} \times \rho \times \sum_{r=2}^{50} \frac{4\pi}{3} r^3 n(r) \Delta r$$

$$r_m = \frac{1}{N} \sum_{r=2}^{50} m(r) \Delta r$$

式中: r 为直径, $n(r)$ 为分区间的粒子数浓度, L_r 为单个区间的液态水含量, ρ 为液态水的密度。

2 雾过程概况

2021 年 4 月 1 日,受稳定的西南暖湿气流影响,闽南沿海出现了一次大范围雾过程。统计 4 月 1 日 08:00 至 2 日 08:00(北京时,下同)闽南区域最低能见度(图 2),1000 m 以下能见度站点基本出

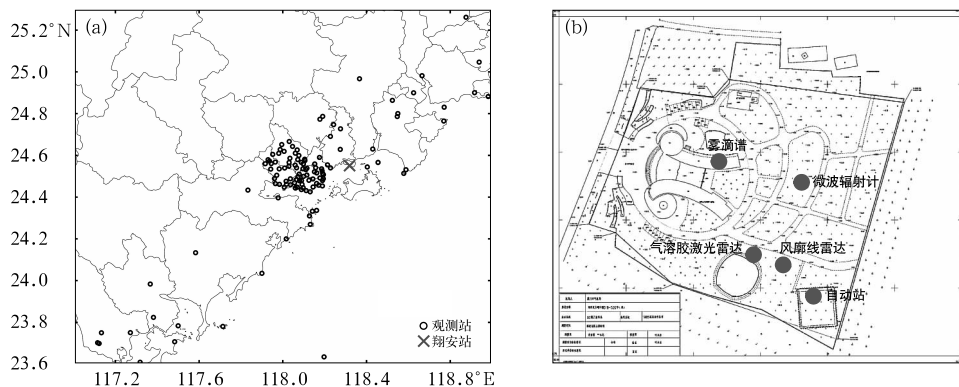


图 1 (a) 闽南沿海能见度测站分布,(b)翔安区气象局场内观测设备布局
Fig. 1 Distribution of (a) visibility stations in southern coast of Fujian, and (b) observation instruments in Xiang'an District

表 1 仪器参数一览表

Table 1 Parameters of observation instruments used in this paper

仪器名称	测量要素	观测频率	主要指标
DZZ4 型区域自动站	降水、气温、气压、湿度、能见度、风向、风速等	1 min	/
HATPRO-G5 型微波辐射计	温度、湿度、液态水含量等廓线	1 min	垂直探测范围 0~10 km, 最多分 93 层
CFL-06 型风廓线雷达	水平风向、风速、垂直速度、CN2	6 min	垂直探测范围 0~10 km, 低层分辨率为 120 m, 高层分辨率为 240 m
3D-气溶胶激光雷达	消光系数、后向散射系数、退偏比	1 min	垂直分辨率为 15 m
FM-120 型雾滴谱仪	雾滴谱、粒子数浓度、液态水含量、中值体积直径	1 s	30 个非等距区间, 2~14 μm 间隔 1 μm , 14~50 μm 间隔 2 μm

现在沿海以及湾口地区, 尤其是 200 m 以下能见度基本出现在沿海, 越深入内陆能见度越高, 叠加一致的偏南暖湿气流, 初步表明这是一次平流海雾过程。从能见度区间分布来看, 1 km 以下站点数为 66 个, 占比为 49.6%; 其中最低能见度介于 500~1000 m 的站点数为 10 个, 占比为 7.5%, 比例相对较低。200~500 m 能见度站点数为 25 个, 占比为 18.8%。过程最低能见度低于 200 m 站点数为 31 个, 占比为 23.3%。逐分钟最低能见度为 66 m, 出现在翔安站, 时间为 2 日 04:04。

以过程最低能见度出现的翔安站为例, 分析能见度和各气象要素随时间的变化趋势(图 3)。1 日 17:00 之前, 翔安站气温约为 22°C, 能见度较高, 基本在 3000 m 以上。17:00 起气温逐步下降, 从 21.7°C 下降至 21°C。与此同时, 能见度呈现快速振荡

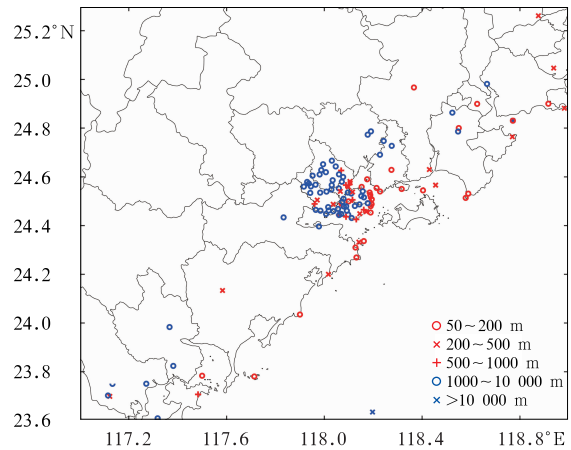


图 2 2021 年 4 月 1 日 08:00 至 2 日 08:00 闽南地区最低能见度分布

Fig. 2 Distribution of minimum visibility in southern coast of Fujian from 08:00 BT 1 to 08:00 BT 2 April 2021

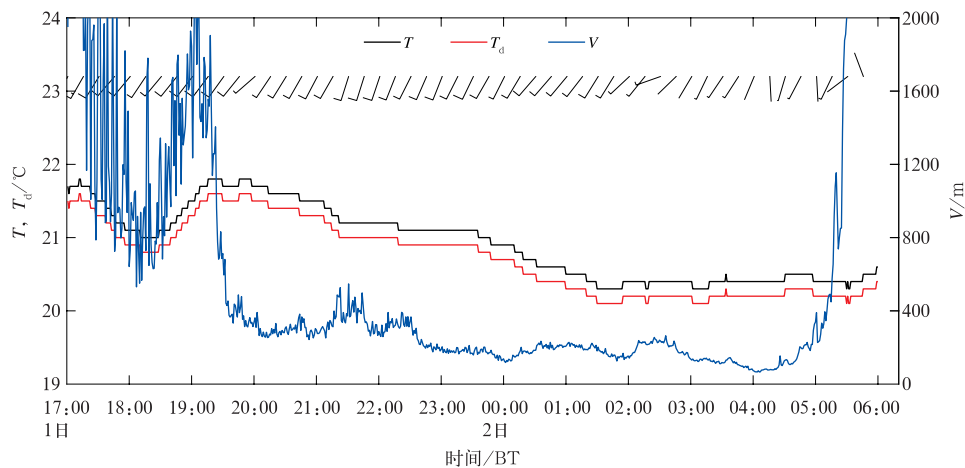


图 3 2021 年 4 月 1 日 17:00 至 2 日 06:00 翔安站逐分钟能见度(V)、温度(T)、露点温度(T_d)和 10 分钟平均风(风羽)

Fig. 3 One-min observed visibility (V), temperature (T), dew point temperature (T_d), 10 min average wind (barb) at Xiang'an Station from 17:00 BT 1 to 06:00 BT 2 April 2021

下降的趋势,在 18:07 达到最低,为 531 m。此后随着气温的短暂上升,能见度也随之逐渐上升,一度超过 2000 m。19:20 能见度快速下降,雾呈现爆发性发展的特征,15 分钟内能见度从 2000 m 以上下降至 250 m 左右,气温在此过程中逐渐下降。22:37 随着气温的进一步下降,能见度也持续下降。1 日 23:00 至 2 日 05:00 能见度基本在 200 m 以下,为本次过程的最强时段。在此过程中受长波辐射冷却作用影响,气温呈现缓慢下降趋势,最低达到 20.5℃。风向以西南风为主,10 分钟平均风力小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2 日 05:20 起,陆地上的风向偏西分量加大,翔安站能见度快速上升至 3000 m 以上。整个雾过程中温度露点差基本在 0.2°C 以内,相对湿度接近 100%,水汽充沛。能见度与气温有较好的对应关系,气温下降伴随着能见度的下降,表明降温是能见度下降的主要诱因之一。依据能见度的演变趋势,对雾进行阶段划分。将 17:01—19:22 定义为初生阶段,19:23—22:36 为发展阶段,22:37—05:18 为雾的成熟阶段,05:19 之后

为消散阶段。

3 雾的环流形势分析

1 日 20 时,副热带高压主体位于海上,华南地区 500 hPa 以偏西—西南气流控制为主(图 4a)。700 hPa 至地面均为西南气流以及弱的反气旋环流控制,有利于水汽输送和层结的稳定。850 hPa 闽南沿海风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到低空急流的标准(图 4b)。925 hPa 从南海中北部至闽南地区存在一支显著气流,其中心风速约为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4c)。近地面西南地区存在弱的低压倒槽(图 4d),闽南处于均压场控制,气压梯度小,无锋面影响。海峡内为一致的西南气流控制,风速约为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。环流形势分析表明此次大雾过程受单一暖湿气流影响,无锋面系统参与,且夜间气温下降幅度很小。结合最低能见度的空间分布特征,进一步证明此次大雾为平流海雾过程。

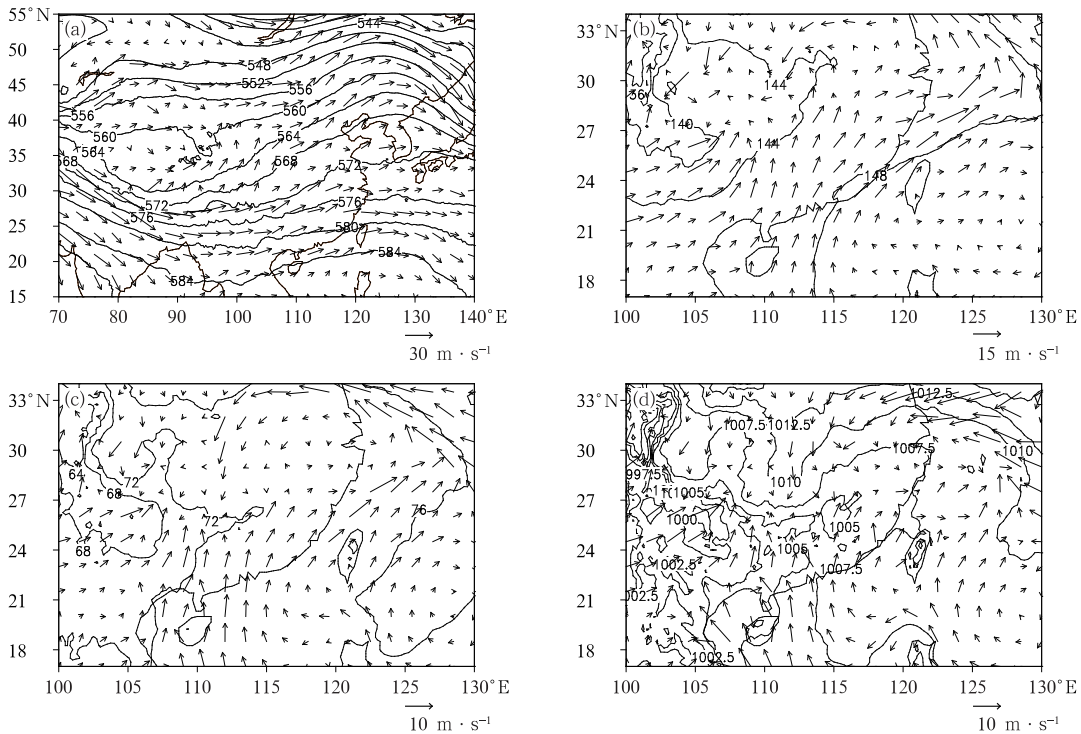


图 4 2021 年 4 月 1 日 20:00(a)500 hPa,(b)850 hPa,(c)925 hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和风向(风矢),(d)海平面气压场(等值线,单位:hPa)和地面风向(风矢)

Fig. 4 Geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (wind vector) at (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, (c) 925 hPa, (d) surface wind field (wind vector) and mean sea level pressure (contour, unit: hPa) at 20:00 BT 1 April 2021

借助厦门站(与翔安站直线距离约为 26 km) 2000 m 以下秒级探空数据(图 5)分析垂直层结特征。1 日 20:00(图 5a)低层相对湿度较大,400 m 以下相对湿度大于 90%,且 2000 m 以下均为一致的西南气流,水汽条件较好。高湿区之上 400~500 m 高度层存在一定的逆温层。对流抑制能量(CIN)较大,达到 $198.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;自由对流高度高,达到了 700 hPa 附近(图略),表明低层存在明显的抑制层,层结稳定,逆温层之下高湿区的水汽不易向上扩散。2 日 08:00(图 5b)探空可见湿层变薄,仅 250 m 以下存在浅薄的湿层,在此以上湿度快速减小,因此天空云量少。受辐射和风向转变的影响,雾退回海上,陆上能见度快速上升。

4 海雾多源观测资料分析

4.1 雾的卫星反演特征

由于夜间低层云雾在长波红外和短波红外通道发射率存在差别,造成其亮温存在一定的差异(张春桂等,2009)。基于葵花 8 号高分辨率卫星的长波与短波红外亮温差异分析海上雾的发展过程(图 6)。为避免可见光对短波红外的干扰,从 20:00 开始分

析。可以看到 1 日 20:00(图 6a),闽南沿海卫星双通道存在亮温差异,温差约为 $1\sim 3 \text{ K}$,且此区域内长波红外亮温值较高,位于 $289\sim 291 \text{ K}$,表明云顶高度相对较低且梯度小,纹理相对均匀并覆盖至沿海地区,证明此时闽南沿海存在一条带状分布的海雾(或低云)带,其宽度约为 30 km。23:00(图 6b)海雾快速发展,范围快速扩大,存在爆发性发展的特征,与此同时陆地上翔安站的能见度也持续下降,进入成熟阶段,这与翔安站能见度观测趋势一致。2 日 02:00—04:00(图 6c,6e),海雾带维持并有所扩大,同时进一步向陆地和海峡内扩展。06:00(图 6f)海雾带相比于 04:00 范围有所减小,但仍旧覆盖海峡南部海区以及翔安地区,同时云顶亮温略有上升,但此时翔安站观测的能见度已经上升。猜测此时大范围的云雾仍旧存在,但由于近地层风向转为偏西风(陆风,图 3)的缘故,原本覆盖近地层的雾转变为不接地的低云,此过程将在下文由激光气溶胶雷达资料进一步佐证分析。这也是使用卫星监测海雾的难点之一,即无法明确区分低云和雾。

4.2 雾的边界层特征

基于风廓线雷达、微波辐射计分析海雾生消过程中的边界层特征(图 7)。从图中可见,1—2 日翔

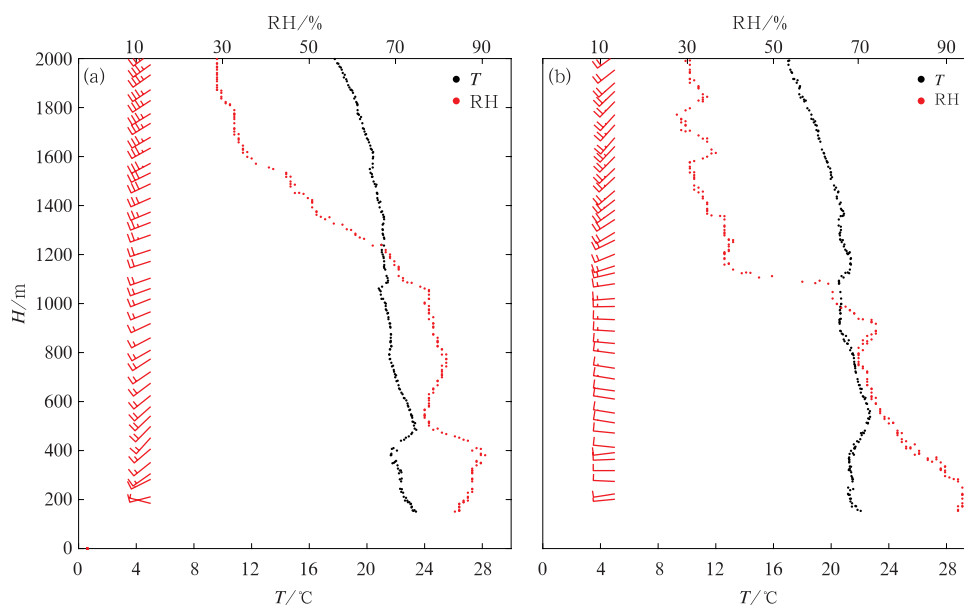


图 5 2021 年 4 月(a)1 日 20:00,(b)2 日 08:00 厦门站 2000 m 以下温度、湿度和风廓线

Fig. 5 Temperature, humidity and wind profiles at Xiamen Station below

2000 m height at (a) 20:00 BT 1 and (b) 08:00 BT 2 April 2021

安沿海大气 1500 m 以下水平风场基本以一致的偏西南风为主,与探空风向基本一致。90%以上的高相对湿度层基本维持在 1000 m 高度以下,尤其是近地面的相对湿度基本维持在 95%以上,湿度条件较好。分时段来看,1 日 12:00 之前 1000 m 以下风

速较小。受太阳辐射的影响,低层高湿度层厚度从 500 m 以上逐渐下降到 300 m 以内,湿层变薄。14:00 低层风速逐渐增强至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 叠加上整层一致的偏南气流,水汽输送效应明显,使得近地面的高相对湿度层也明显增厚。17:00 近地面 90%以上

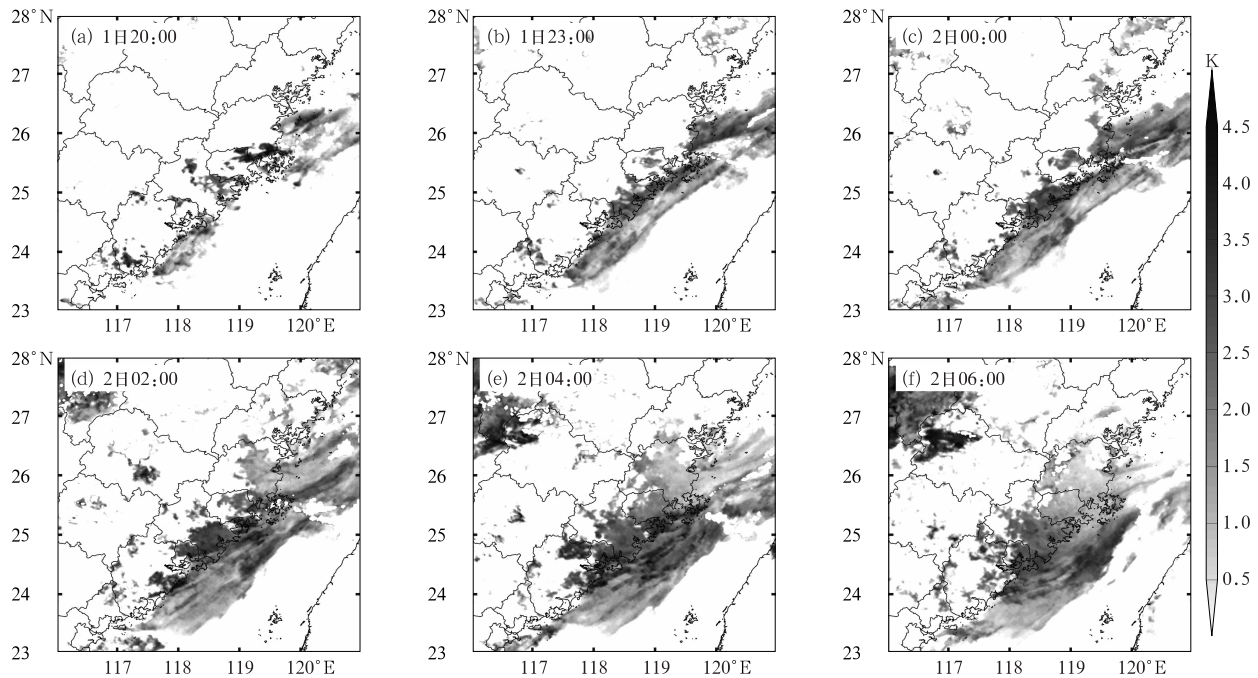
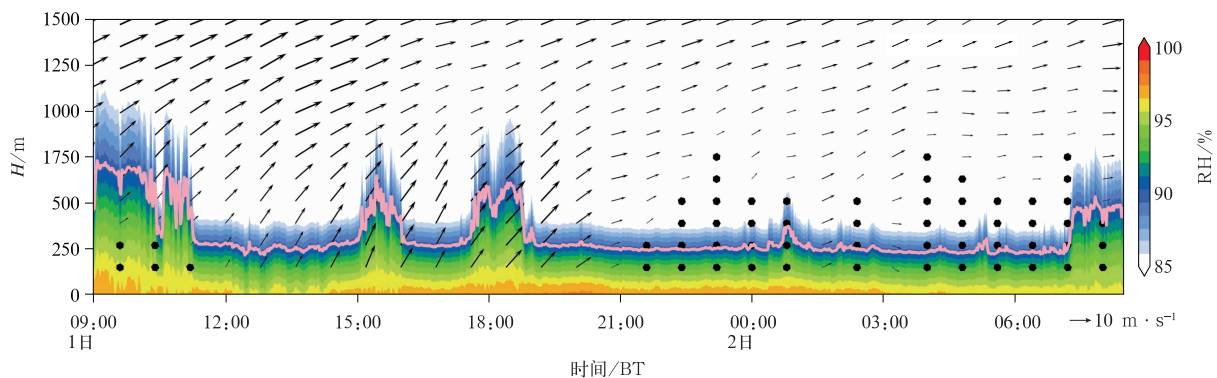


图 6 2021 年 4 月 1 日 20:00 至 2 日 06:00 葵花 8 号卫星长波红外通道($10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$)平均与短红外通道($3.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$)亮温差异分布

Fig. 6 TBB difference between average long wave ($10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$) and short wave ($3.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$) infrared channel of Himawari-8 satellite from 20:00 BT 1 to 06:00 BT 2 April 2021



注:粉红实线:90%相对湿度线。

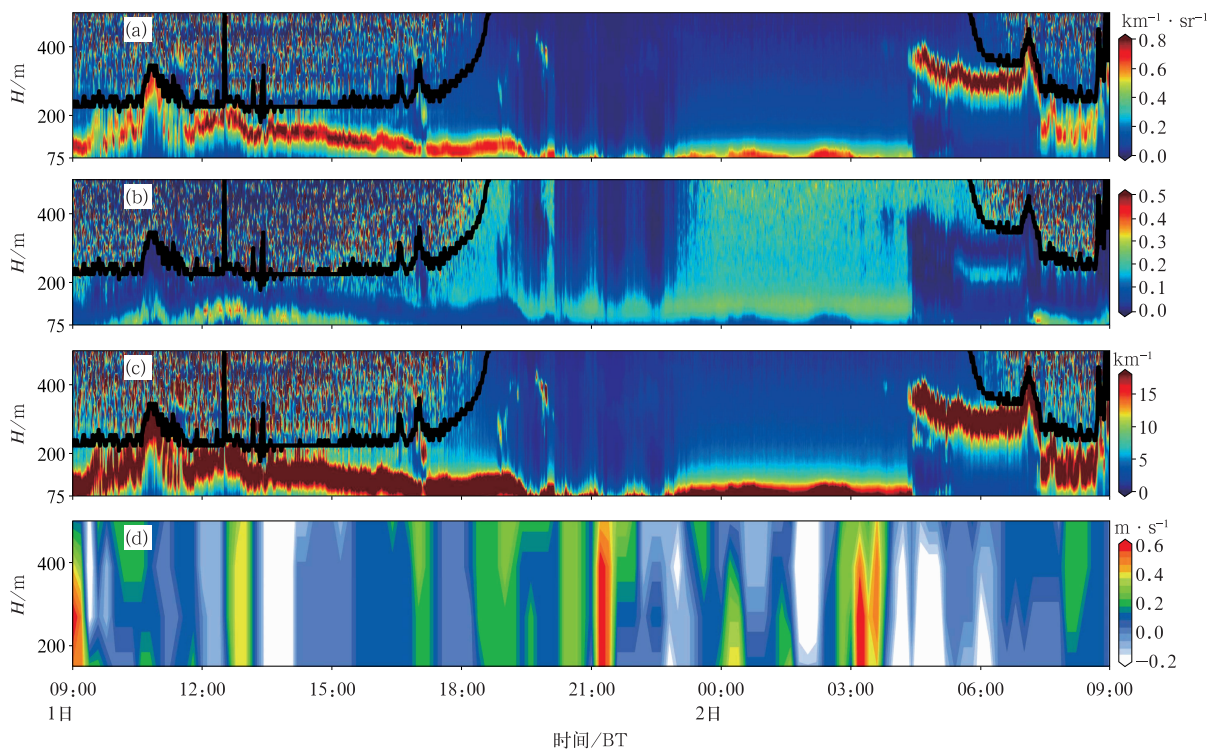
图 7 2021 年 4 月 1 日 09:00 至 2 日 08:00 翔安站风廓线雷达水平风场(风矢,黑点表示水平风速 $\leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和微波辐射计相对湿度(填色)时序图

Fig. 7 Time series of horizontal wind field measured by wind profiler (wind vector, black dots correspond to wind speed $\leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity measured by microwave radiometer (colored) at Xiang'an Station from 09:00 BT 1 to 08:00 BT 2 April 2021

的相对湿度层厚度增加。与此同时,低层风速也逐渐减小,从 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐减弱至 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 弱风速层厚度快速增厚,天气形势更加静稳,翔安站能见度也同步下降。18:00 以后 500 m 以下风速整体快速减小,2 日凌晨个别时次还出现近地面整层的静小风,同期近地面 95% 以上的相对湿度层厚度维持在 200 m 以内。

基于激光气溶胶雷达的后向散射系数、消光系数和退偏比参数分析雾的垂直演变特征(图 8)。主要分析图 8a~8c 中信噪比高于 100(黑线)以下区域。其中退偏比为激光雷达同时探测后向散射光中垂直分量与平行分量回波信号比值,其数值反映了大气气溶胶粒子和云粒子的非球形特征,数值越接近零表示越接近于球形(刘东,2005)。由图可见 1 日 10:00—18:00,近地面 400 m 高度内的后向散射系数(图 8a)与消光系数(图 8c)廓线随时间变化呈明显的带状高值区且高度逐渐降低。从图 8b 也

可看到同期相应高度的退偏比小值区呈一致的趋势变化。此时段内风廓线雷达测得垂直方向上大气主要为微弱的下沉运动,下沉速度介于 $-0.1\sim 0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 8d)。判断此时间段内低空的云层在正午后开始逐渐向地面发展,云底逐渐降低,接地的时间与地面能见度快速下降的时间完全一致,低云发展为雾。1 日 18:00—22:00,近地层的后向散射与消光系数廓线高值区呈现波动特征,此阶段近地面的能见度也呈现波动特征,结合退偏比廓线,推测雾顶降低至 100 m 之下或有零星的低云飘过;1 日 22:00 至 2 日 03:00,后向散射系数与消光系数廓线在近地面约 100 m 范围相应一致出现高值区域和退偏比的低值区,厚度持续稳定。100 m 以上退偏比有所增大,数值在 $0.3\sim 0.4$,推测该时间段内 100 m 以下为雾区(球形粒子),雾顶覆有颗粒物层(不规则形状)。这证明成熟阶段的海雾雾顶高度仅为 100 m 左右。2 日 05:00 之后,后向散射系数和消光系数



注:激光气溶胶雷达起始高度为 75 m;图 8a~8c 中黑线为信噪比质量控制线,黑线以下区域信噪比高于 100。

图 8 2021 年 4 月 1 日 09:00 至 2 日 09:00 翔安站(a~c)气溶胶激光雷达(a)后向散射系数,(b)退偏比,(c)消光系数,(d)风廓线雷达垂直速度廓线

Fig. 8 Time series of (a) backscattering coefficient, (b) depolarization ratio, (c) extinction coefficient measured by aerosol lidar, and (d) vertical velocity of wind profiler at Xiang'an Station from 09:00 BT 1 to 09:00 BT 2 April 2021

大值区有所抬升,高度介于 200~400 m。此时段地面能见度快速逐渐抬升。可推测该时间段内近地面 100 m 以下的雾开始消散,在 200~400 m 高度出现明显的云层。表明 2 日 05:00 以后雾不再接地,而是转变为低云。

4.3 气海温差

合适的气海温差是平流海雾形成和发展的重要因素之一(林卫华等,2008)。分析海温和气海温差在海雾生消过程中的演变特征。从海温分布来看,闽南沿海存在一条明显的冷水带(图 9 等值线)。台湾海峡南部近海海域的海温达到 22℃ 以上,至北部

近海海温下降至 17℃ 附近,温差超过 5℃,存在明显的温度梯度。海上的偏南气流将南方的暖湿空气向北输送至较冷的近海区域后,暖湿气流被冷却。并且,由于海上偏南风力较大,至陆地上风力逐渐减小,夜间陆上低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此从沿海至陆地存在明显的风速辐合,有利于水汽在海岸带堆积,在静稳的环流形势下易形成平流雾。从气海温差的分布来看,台湾海峡西侧基本为正值,气温均大于海温,海洋为冷的下垫面,至海峡东侧逐渐转为负值,海洋为暖的下垫面。卫星反演海雾区域(图 6)均位于气海温差大于零的区域,也进一步证明平流冷却是台湾海峡内海雾形成的重要机制。分时段来看,1 日

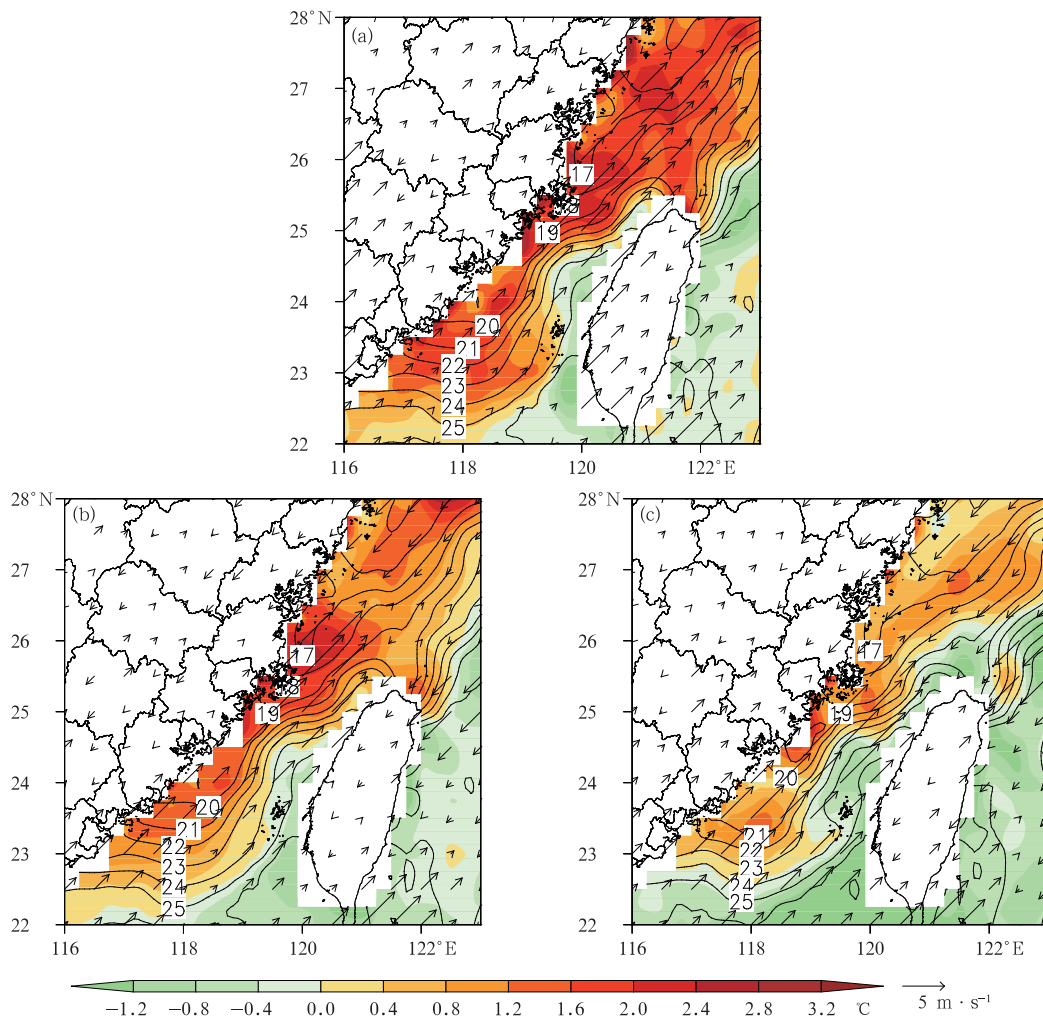


图 9 2021 年 4 月(a)1 日 17:00 和(b)1 日 23:00,(c)2 日 06:00 海温(等值线,单位:℃)、气海温差(填色)和风场(风矢)

Fig. 9 SST (contour, unit: °C) and difference in air and sea surface temperatures (colored) and wind (wind vector) at (a) 17:00 BT 1, (b) 23:00 BT 1 and (c) 06:00 BT 2 April 2021

17:00 闽南近海的气海温差介于 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$; 入夜后由于长波辐射冷却作用, 气温逐渐下降, 气海温差逐渐减小; 23:00 (海雾发展阶段) 闽南近近海的气海温差介于 $0.5\sim 2^{\circ}\text{C}$; 至 2 日清晨气海温差逐渐减小, 海表面的冷却作用减弱, 加上翔安站转为偏西风, 使得海雾逐渐退回到海上, 陆地区域转变为低云。

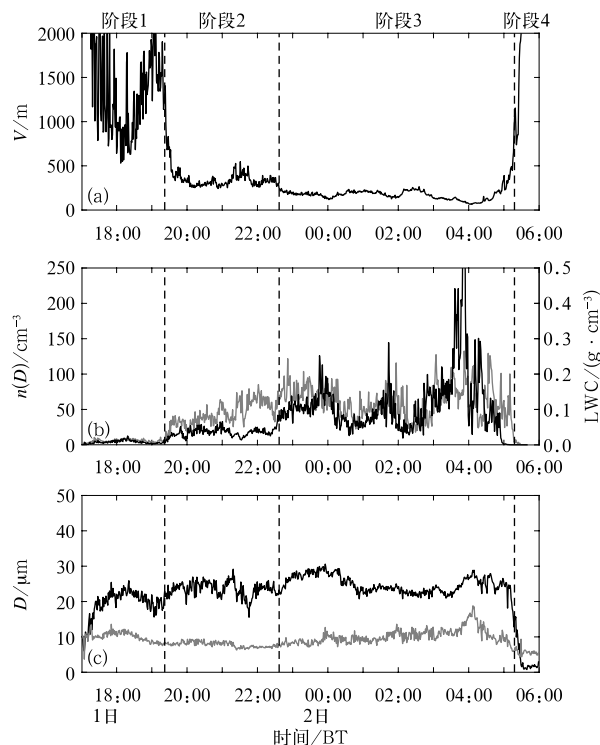
以上多源资料分析表明, 在海雾发生发展过程中, 闽南沿海地区低云和雾之间存在相互转化的过程。整层一致的偏南气流和近海冷水带提供了良好的水汽和降温条件, 使得海峡西岸的低云带持续维持。白天由于近地层气温较高, 以低云为主。傍晚起云顶辐射冷却作用导致云体上层较冷的空气下沉, 同时近地层气温逐渐下降, 低层水汽凝结使得沿海地区的低云逐渐降低并发展为雾。清晨当地面转为偏西风时, 沿岸的雾再次转变为低云。

4.4 雾的微物理参数演变特征

基于 FM-120 型雾滴谱仪测得的雾滴谱数据, 分析海雾在不同阶段的粒子数浓度、液态水含量、平均直径等微物理参数演变特征 (图 10, 表 2), 由于能见度为逐分钟资料, 因此各微物理参数也均处理成逐分钟平均。

阶段 1 (初始阶段, 1 日 17:01—19:22) 的能见度基本呈现波动变化特征。粒子数浓度的平均值为 $6.0 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 1 分钟平均最大值为 $11.5 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$; 液态水含量量级约为 $10^{-2}\sim 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其平均值为 $0.0092 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值为 $0.025 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 中值体积直径介于 $15.1\sim 25.9 \mu\text{m}$; 平均直径介于 $7.5\sim 13.6 \mu\text{m}$ 且始终小于中值体积直径。当能见度下降时, 各物理量均有不同幅度的增大, 其中液态水含量和粒子数浓度增大幅度较为一致, 中值体积直径增幅略大于平均直径增幅。

阶段 2 (1 日 19:23—22:36) 为快速发展阶段, 能见度由 2000 m 以上快速下降至 400 m 附近。粒子数浓度和液态水含量随之快速增大。此阶段平均能见度为 357 m, 平均粒子数浓度和液态水含量相比于第一阶段均明显增大, 其中粒子数浓度平均值增大至 $43.8 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 最大值达到 $85.1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$; 平均液态水含量为 $0.0341 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大达到 $0.0658 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 中值体积直径相比于阶段 1 也有所增大, 最大达到 $29.1 \mu\text{m}$, 增幅相比于粒子数浓度等



注: 黑色虚线为各阶段的分界线。

图 10 2021 年 4 月 1 日 17:00 至 2 日 06:00 (a) 能见度, (b) 数浓度 (灰线)、液态水含量 (黑线), (c) 中值体积直径 (黑线)、平均直径 (灰线) 随时间的变化

Fig. 10 Temporal variation of (a) visibility, (b) particle number concentration (grey line) and liquid water content (black line), and (c) median volume diameter (black line), mean diameter (grey line) from 17:00 BT 1 to 07:00 BT 2 April 2021

较小; 平均直径相比于阶段 1 反而减小, 这是由于此阶段小粒子数量增大幅度更大, 导致平均直径减小。

阶段 3 (1 日 22:37—05:18) 为雾最强时段, 平均能见度为 179 m。与之相对应的平均粒子数浓度和液态水含量也进一步增大。平均粒子数浓度进一步增大至 $61.7 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 最大达到 $132.6 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$; 平均液态水含量达到 $0.1165 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值达到 $0.7321 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 均出现在 2 日 04:00 前后, 这与能见度的最低值对应; 能见度达到最低值时, 平均直径也明显增大, 最大达到了 $18.8 \mu\text{m}$, 表明此时大粒子数量明显增多, 导致平均直径明显增大。分析此阶段各微物理参数特征可知, 虽然能见度变化幅度减小, 但微物理参数的标准差相较于前两个阶段却明显增大。这是由于海雾以平流雾为主, 空间分

布的不均匀特征较之内陆辐射雾或混合雾更明显, 导致粒子数浓度等参数变化幅度更大。

阶段 4 为雾消散阶段。随着能见度的快速上升, 除平均直径以外的各微物理参数均快速下降。

表 2 雾不同阶段各微物理参数特征

Table 2 Distribution of micro-physical parameters for different phases of fog event

微物理参数	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	全过程
能见度/m	1678/1235 (531~6531)	357/130 (243~1405)	179/77 (66~917)	2896/1251 (738~4548)	643/982 (66~6531)
粒子数浓度/ (个·cm ⁻³)	6.0/2.2 (2.3~11.5)	43.8/16.4 (4.8~85.1)	61.7/23.0 (3.5~132.6)	0.9/1.6 (0.0~7.1)	52.4/29.5 (0.0~132.6)
液态水含量/ (g·m ⁻³)	0.0092/0.0045 (0.0028~0.025)	0.0341/0.0112 (0.0052~0.0658)	0.1165/0.0899 (0.0009~0.7321)	0.0003/0 (0.00~0.0027)	0.084/0.0812 (0.00~0.7321)
中值体积直径/ μm	20.4 (15.1~25.9)	23.5 (15.6~29.1)	24.8 (12.8~30.6)	3.8 (0.8~15.8)	22.5 (0.8~30.6)
平均直径/ μm	10.2 (7.5~13.6)	7.8 (6.3~9.4)	10.2 (5.9~18.8)	5.7 (4.4~9.4)	9.4 (4.4~18.8)

注: 斜杠前数值为平均值, 斜杠后数值为标准差, 括号内数值为演变范围。

从整个过程的平均来看, 雾的平均粒子数浓度为 52.4 个·cm⁻³, 平均液态水含量为 0.084 g·m⁻³。与其他沿海地区相比(表 3), 闽南沿海粒子数浓度与广东湛江(Zhao et al, 2013)基本持平, 略低于黄海区域的山东青岛(Wang et al, 2020)。虽有沿海地区各有差异, 但整体数浓度介于 40~70 个·cm⁻³, 量级变化不大。过程平均液态水含量均在 0.1 g·m⁻³ 以下, 但闽南沿海相比于上述两个地区较大, 这是由于闽南沿海海雾中存在更多的大粒子, 平均直径更大, 因此同等浓度情况下液态水含量更高。与南京(刘端阳等, 2009)、重庆(李子华和吴君, 1995)等城市区域相比, 闽南沿海的粒子数浓度明显偏小、液态水含量更高, 这是由于沿海地区水汽更加充沛, 且受气溶胶颗粒物影响小。

从不同阶段各区间的粒子数浓度分布特征来看(图 11a), 阶段 4(消散阶段)整体数浓度最低, 往上依次为阶段 1(初生阶段)、阶段 2(发展阶段)以及阶段 3(成熟阶段)。从雾滴谱分布特征来看, 阶段 4 呈现单峰分布特征, 阶段 1 和阶段 2 的双峰结构逐

渐显现。阶段 3 则是呈现典型的双峰特征, 主峰值为 4~5 μm , 次峰值位于 24~26 μm 。这表明不同浓度雾的滴谱分布具有一定的差异。雾强度越强, 双峰分布特征就越明显。但不论何种阶段, 10 μm 以下小粒子的数量占比均超过 75%, 表明雾滴的数浓度主要受小粒子影响。从不同阶段的粒子数浓度对比来看, 阶段 1 所有区间的平均粒子数浓度量级均在 10⁰ 以下, 峰值直径为 5~6 μm , 对应的数浓度为 0.89 个·cm⁻³。阶段 2 各区间的粒子数浓度快速增大, 峰值直径为 4~5 μm , 达到 10.50 个·cm⁻³, 相比于阶段 1 的峰值直径浓度增大约 11 倍。20 μm 以上大粒子的数浓度也有不同程度的增大, 增大幅度整体介于 3~9 倍。阶段 3(成熟阶段)粒子数浓度在各区间均为最大, 且呈现出双峰分布特征。主峰值直径位于第三档(4~5 μm), 其平均数浓度达到 14.06 个·cm⁻³, 次峰值位于 24~26 μm , 峰值粒子数浓度约为 1.1 个·cm⁻³。10 μm 直径以内的粒子数浓度合计达到 44.5 个·cm⁻³, 占比达到 81.5%。30 μm 以上粒子数浓度快速减小, 浓

表 3 闽南沿海雾微物理特征量及与其他地区对比

Table 3 Micro-physical parameters of fog in Xiang'an and the comparison with other areas

微物理参数	厦门(沿海, 2021 年 4 月 1 日)	湛江(沿海*, 2010 年 3 月 4 日)	青岛(沿海, 2017 年 4 月 6—8 日)	南京(城市*, 2006—2007 年冬季)	重庆(城市**, 1989—1990 年)
粒子数浓度/(个·cm ⁻³)	52.4	54.3	64.4	336.5	529
液态水含量/(g·m ⁻³)	0.084	0.02	0.057	0.0503	0.02
平均直径/ μm	9.3	5.0	4	2.1	4.4

注: * 代表 FM-100 雾滴谱仪, ** 代表三用滴谱仪, 未标星号代表 FM-120 雾滴谱仪。

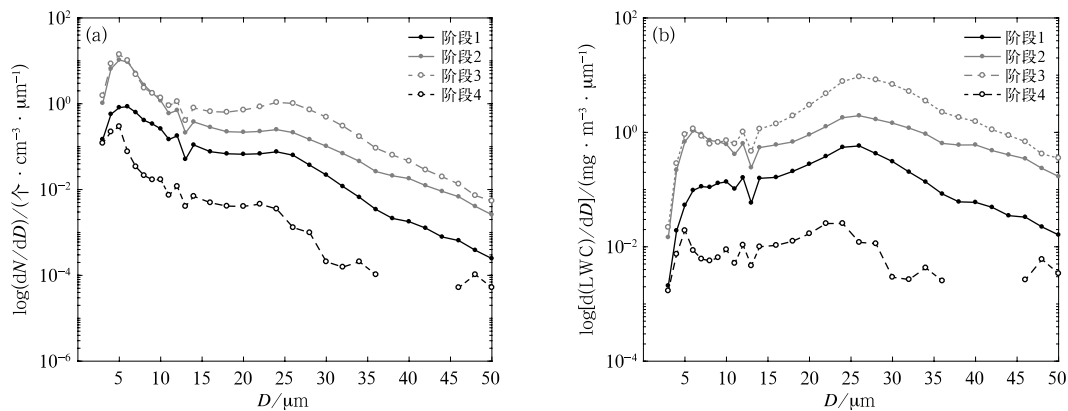


图 11 阶段 1~阶段 4(a)平均雾滴数浓度和(b)液态水含量尺度分布

Fig. 11 Average distribution of (a) number concentration and (b) liquid water content in Phase one to Phase four

度均在 $0.5 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下。阶段 4 除前三个区间以外,其余所有区间粒子数浓度都在 $0.1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下,表明消散阶段粒子数浓度的量级会迅速减小。

从不同阶段各区间的液态水含量分布特征来看(图 11b),阶段 1 为单峰分布特征,峰值位于 $24 \sim 26 \mu\text{m}$,液态水含量为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各区间的液态水含量均在 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。阶段 2 各区间液态水含量均快速增大,并且呈现双峰特征。主峰位于 $24 \sim 26 \mu\text{m}$,其数值为 $1.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,相比于阶段 1 峰值增大 2 倍;次峰值位于 $5 \sim 6 \mu\text{m}$,为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。阶段 3 与阶段 2 分布特征基本类似,同样为双峰分布,且数值进一步增大。主峰值同样为 $24 \sim 26 \mu\text{m}$,其数值达到 $9.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,是阶段 2 的 4.8 倍;次峰值($1.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)也同样为 $5 \sim 6 \mu\text{m}$,增大幅度明显小于主峰;此阶段 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 直径的粒子对液态水含量的贡献率达到 53.2%。阶段 4 各区间液态水含量快速减小,其量级基本在 $10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。

深入对比阶段 2 和阶段 3 粒子数浓度和液态水含量的差异。两者均呈现双峰分布特征,但峰值分布相反。液态水含量的主峰位于大粒子端,而数浓度则位于小粒子端,这主要是由于液态水含量与粒子直径的 3 次方成正比,同时也表明雾中粒子数浓度主要受小粒子浓度影响,而液态水含量主要受 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 直径粒子影响为主。阶段 3 的粒子数浓度在所有区间内均在阶段 2 之上,但小粒子端数浓度差别相对较小。主峰 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 的数浓度分别为 $10.5 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $14.06 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,两者相差不到

50%。但随着粒子直径的增大,数浓度差异逐渐增大,在 $25 \mu\text{m}$ 附近差异最大,阶段 3 对应的数值为阶段 2 的 4.8 倍。液态水含量的分布也是如此,小粒子端增大幅度较小, $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 增大幅度更大。这表明大粒子数浓度的增大对于雾强度的进一步增强,尤其是加强为强浓雾具有重要作用。

5 结论

本文利用自动站资料、ERA5 再分析资料、葵花 8 号高分辨率卫星资料、翔安站多源观测资料等,分析了 2021 年 4 月 1 日闽南沿海一次大雾过程演变特征、环流形势和垂直结构特征。基于 FM-120 型雾滴谱仪资料,对比分析了海雾在不同阶段的微物理参数演变特征。主要结论如下:

(1)此次大雾主要发生在一致的西南气流中,200 m 以下低能见度主要出现在沿海地区,为典型的海雾过程。低层至近地面均为反气旋环流控制,探空温湿廓线表明存在近地面逆温层和湿层,为海雾的发生发展提供静稳的环流形势和充沛的水汽条件。

(2)多源资料分析表明,在海雾发生发展过程中低云和雾之间存在相互转化的过程。白天以低云为主,傍晚起云顶辐射冷却作用导致云体上层较冷的空气下沉,同时近地层气温逐渐下降,低层水汽凝结使得沿海地区的低云逐渐降低并发展为雾。清晨当地面转为偏西风时,雾再次转变为低云。单纯通过卫星无法有效区分雾和低云,但可以结合气溶胶激

光雷达共同判定。雾期间气溶胶激光雷达测得的近地层消光系数达到 $3\sim 4\text{ km}^{-1}$, 消光系数大值区的厚度与雾的强度演变趋势一致, 可用于推演雾顶的高度。雾的初生和发展阶段厚度相对较低且波动性大, 成熟阶段雾顶高度约为 100 m。

(3) 海温分析表明, 台湾海峡中部至闽南近海的海温存在较大的梯度。近海的冷水带导致气温逐渐高于海温, 气温温差介于 $0.5\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。雾区集中在气温大于海温的区域, 海上的偏南气流将南方的暖湿空气向北输送至较冷的近海区域后, 原本相对饱和的暖湿气流被冷却凝结, 在静稳的环流形势下易形成平流海雾。

(4) 雾滴谱分析表明, 本次雾过程平均粒子数浓度为 $52.4\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 液态水含量为 $0.084\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。平均直径为 $9.4\text{ }\mu\text{m}$ 。不同阶段粒子数浓度、液态水含量等微物理参数差异较大。初生和消散阶段各参数较小, 发展阶段快速增大, 成熟阶段达到最大, 1 分钟平均粒子数浓度最大达到 $132.6\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 平均液态水含量达到 $0.7321\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。雾在各阶段的粒子数浓度和液态水含量谱分布具有较大差异。其中粒子数浓度在初生、发展和消散阶段以单峰结构为主, 峰值直径为 $4\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 。成熟阶段表现为双峰结构特征, 主峰位于 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$, 次峰位于 $24\sim 26\text{ }\mu\text{m}$ 。液态水含量除消散阶段外, 整体呈现双峰分布特征, 主峰位于 $24\sim 26\text{ }\mu\text{m}$, 次峰位于 $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$, 峰值分布与粒子数浓度相反。这表明雾滴数浓度受小粒子影响为主, 但液态水含量以 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子贡献最大。发展和成熟阶段谱分布对比表明, $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下小粒子增加幅度小, 而 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 区间增大幅度较大, 因此大粒子数浓度的增大对于雾强度的进一步增强具有重要作用。

参考文献

白彬人, 2006. 中国近海沿岸海雾规律特征、机理及年际变化的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Bai B R, 2006. The character, mechanisms and interannual variation of China inshore sea fog [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).

岑炬辉, 唐世浩, 胡利军, 等, 2021. 降水-雾过程毫米波雷达探测分析 [J]. 气象, 47(2): 205-215. Cen J H, Tang S H, Hu L J, et al, 2021. Analysis of a precipitation-fog process detected by millimeter-wave radar [J]. Meteor Mon, 47(2): 205-215 (in Chinese).

陈千盛, 1986. 台湾岛和福建沿岸的雾 [J]. 台湾海峡, 5(2): 101-106.

Chen Q S, 1986. Fog over Taiwan Island and Fujian Coast [J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 5(2): 101-106 (in Chinese).

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(4): 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 [J]. Sci China Earth Sci, 45(4): 427-443 (in Chinese).

韩美, 高珊, 曾瑾瑜, 等, 2016. 台湾海峡西岸海雾研究现状与未来发展方向 [J]. 气象科技, 44(6): 928-936, 955. Han M, Gao S, Zeng J Y, et al, 2016. Status and development direction of sea fog research in western side of Taiwan Strait [J]. Meteor Sci Technol, 44(6): 928-936, 955 (in Chinese).

胡树贞, 王志成, 张雪芬, 等, 2022. 毫米波雷达海雾回波特征分析及能见度反演 [J]. 气象, 48(10): 1270-1280. Hu S Z, Wang Z C, Zhang X F, et al, 2022. Analysis of sea fog echo characteristics and visibility inversion of millimeter-wave radar [J]. Meteor Mon, 48(10): 1270-1280 (in Chinese).

黄彬, 王晴, 陆雪, 等, 2014. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析 [J]. 气象, 40(11): 1324-1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Meteor Mon, 40(11): 1324-1337 (in Chinese).

黄彬, 许健民, 史得道, 等, 2018. 黄渤海一次持续性海雾过程形变特征及其成因分析 [J]. 气象, 44(10): 1342-1351. Huang B, Xu J M, Shi D D, et al, 2018. Deformation feature of a continuous sea fog process over the Yellow Sea and Bohai Sea and its genesis analysis [J]. Meteor Mon, 44(10): 1342-1351 (in Chinese).

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 Oceanol Sin, 32(2): 40-53 (in Chinese).

李子华, 彭中贵, 1994. 重庆市冬季雾的物理化学特性 [J]. 气象学报, 52(4): 477-483. Li Z H, Peng Z G, 1994. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog [J]. Acta Meteor Sin, 52(4): 477-483 (in Chinese).

李子华, 吴君, 1995. 重庆市区冬季雾滴谱特征 [J]. 南京气象学院学报, 18(1): 46-51. Li Z H, Wu J, 1995. Winter fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing [J]. J Nanjing Inst Meteor, 18(1): 46-51 (in Chinese).

李子华, 张利民, 楼小凤, 1993. 重庆市区冬季雾的宏观结构及其物理成因 [J]. 南京气象学院学报, 16(1): 48-54. Li Z H, Zhang L M, Lou X F, 1993. The macro- and micro-structure of winter fog in the Chongqing urban district and the physical cause of its formation [J]. J Nanjing Inst Meteor, 16(1): 48-54 (in Chinese).

梁锦, 杨军, 王巍巍, 等, 2019. 雨后两次强浓雾的爆发性增强过程 [J]. 气象科学, 39(2): 153-163. Liang M, Yang J, Wang W W,

- et al, 2019. The burst reinforcement process of the twice heavy fog after the rain[J]. *J Meteor Sci*, 39(2): 153-163(in Chinese).
- 林卫华, 蒋荣复, 王正廷, 2008. 湄洲湾海雾的发生规律和成因分析[J]. *海洋学研究*, 26(3): 71-76. Lin W H, Jiang R F, Wang Z T, 2008. Analysis of the occurrence and origin of heavy fog in Meizhouwan Bay[J]. *J Mar Sci*, 26(3): 71-76(in Chinese).
- 刘东, 2005. 偏振米激光雷达的研制和大气边界层的激光雷达探测[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院. Liu D, 2005. Development of polarization-Mie lidar and lidar observation of atmosphere boundary layer[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- 刘端阳, 濮梅娟, 杨军, 等, 2009. 2006年12月南京连续4天浓雾的微观物理结构及演变特征[J]. *气象学报*, 67(1): 147-157. Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al, 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(1): 147-157(in Chinese).
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等, 2010. 南京冬季一次雾过程宏观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]. *Chin J Atmos Sci*, 34(4): 681-690(in Chinese).
- 马治国, 张春桂, 陈家金, 等, 2011. 福建省沿海雾的气候变化特征分析[J]. *中国农业气象*, 32(S1): 69-73. Ma Z G, Zhang C G, Chen J J, et al, 2011. Analysis on climate characteristics of coastal fog in Fujian Province[J]. *Chin J Agrometeorol*, 32(S1): 69-73(in Chinese).
- 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(5): 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 Meteor*, 27(5): 1111-1118(in Chinese).
- 苏鸿明, 1998. 台湾海峡海雾的气候分析[J]. *应用海洋学学报*, 17(1): 25-28. Su H M, 1998. Climatic analysis of fog in Taiwan Strait[J]. *J Oceanogr Taiwan Strait*, 17(1): 25-28(in Chinese).
- 王彬华, 1983. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社. Wang B H, 1983. Sea Fog[M]. Beijing: China Marine Press(in Chinese).
- 王庆, 樊明月, 李季, 等, 2021. 济南冬季雾的微观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).
- 王庆, 李季, 樊明月, 等, 2019. 济南一次平流辐射雾的微观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).
- 吴兑, 邓雪娇, 毛节泰, 等, 2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏观微观结构与能见度研究[J]. *气象学报*, 65(3): 406-415. Wu D, Deng X J, Mao J T, et al, 2007. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(3): 406-415(in Chinese).
- 徐峰, 王晶, 张羽, 等, 2012. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J]. *气象*, 38(8): 985-996. Xu F, Wang J, Zhang Y, et al, 2012. Analysis on the climatic and microphysical characteristics of sea fog over the coast of West Guangdong[J]. *Meteor Mon*, 38(8): 985-996(in Chinese).
- 许金镜, 1990. 海峡西岸海雾的统计分析[J]. *海洋预报*, 7(3): 58-63. Xu J J, 1990. Statistic analysis of sea fog in the west coast of Taiwan Strait[J]. *Marin Forec*, 7(3): 58-63(in Chinese).
- 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 B, 1989. The formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan Area[J]. *Acta Oceanol Sin*, 11(4): 431-438(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).
- 张春桂, 蔡义勇, 张加春, 2009. MODIS 遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用[J]. *应用气象学报*, 20(1): 8-16. Zhang C G, Cai Y Y, Zhang J C, 2009. The application of monitoring sea fog in Taiwan strait using MODIS remote sensing data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 20(1): 8-16(in Chinese).
- 张浩, 石春娥, 杨军, 等, 2021. 寿县不同强度雾的微观物理特征及其与能见度的关系[J]. *大气科学*, 45(6): 1217-1231. Zhang H, Shi C E, Yang J, et al, 2021. Microphysical characteristics of fog with different intensities and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1217-1231(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观物理特征分析[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).
- 张曦, 牛生杰, 魏锦成, 等, 2016. 厦门春季海雾天气分类及典型个例宏观微观结构分析[J]. *气象科学*, 36(1): 121-127. Zhang X, Niu S J, Wei J C, et al, 2016. Classification and case study of macro and micro structures of spring sea fog in Xiamen[J]. *J Meteor Sci*, 36(1): 121-127(in Chinese).
- 祖繁, 袁成松, 吴泓, 等, 2020. 江苏北部不同等级雾的微观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).
- Eldridge R G, 1961. A few fog drop-size distributions[J]. *J Meteor*, 18(5): 671-676.

- Gerber H E, 1981. Microstructure of a radiation fog[J]. *J Atmos Sci*, 38(2):454-458.
- Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z, 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(11):1469-1480.
- 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[J]. *Sci China Earth Sci*, 58(3):329-344.
- Kunkel B A, 1971. Fog drop-size distributions measured with a laser hologram camera[J]. *J Appl Meteor*, 10(3):482-486.
- Wang S K, Yi L, Zhang S P, et al, 2020. The microphysical properties of a sea-fog event along the west coast of the Yellow Sea in spring[J]. *Atmosphere*, 11(4):413.
- Zhao L J, Niu S J, Zhang Y, et al, 2013. Microphysical characteristics of sea fog over the east coast of Leizhou Peninsula China[J]. *Adv Atmos Sci*, 30(4):1154-1172.
- Zhou B B, Du J, Gultepe I, et al, 2012. Forecast of low visibility and fog from NCEP: Current status and efforts[J]. *Pure Appl Geophys*, 169(5/6):895-909.

(本文责编:何晓欢)