

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).

## 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析<sup>\*</sup>

张 伟<sup>1,2,3</sup> 陈德花<sup>1,3</sup> 胡雅君<sup>1,2</sup> 荀爱萍<sup>1,3</sup> 蒋永成<sup>1,3</sup> 孙学金<sup>4</sup>

1 厦门市气象局,海峡气象开放实验室,厦门 361012

2 福建省灾害天气重点实验室,福州 350001

3 厦门市气象台,厦门 361012

4 国防科技大学气象海洋学院,南京 211100

**提 要:** 利用地面自动站观测、风廓线雷达、ERA5 再分析资料、葵花 8 号高分辨率卫星资料以及 FM-120 型雾滴谱资料,分析了 2019 年 4 月 7 日闽南沿海一次强浓雾过程的环流形势以及微物理特征。环流形势分析表明,此次海雾过程 500 hPa 为槽底偏西西北气流,700 hPa 至地面为一致的偏南气流,探空形势稳定。海雾发生前,整层风速明显减小,弱风速层厚度迅速增大,为海雾的形成提供了稳定的环流背景。卫星监测分析表明,海雾首先快速形成于台湾海峡上,在偏南气流作用下,平流至沿海地区。水文条件分析表明,福建近海存在一条冷水带,从海峡中部至沿海海温梯度大,海温在 18~24 ℃,近海气海温差介于 0~2 ℃,有利于海峡内平流冷却雾的形成。雾滴谱分析表明,翔安站能见度显著下降伴随着粒子数浓度、液态水含量显著增加,雾滴谱爆发性拓宽。海雾过程中,5 min 平均粒子数浓度最大超过 200 个·cm<sup>-3</sup>,瞬时数浓度最大达到 468 个·cm<sup>-3</sup>,雾过程平均数浓度为 100 个·cm<sup>-3</sup>。5 min 平均液态水含量最高达到 0.41 g·m<sup>-3</sup>,瞬时液态水含量最大达到 1.35 g·m<sup>-3</sup>,雾过程平均液态水含量为 0.17 g·m<sup>-3</sup>。粒子浓度呈现双峰结构特征,峰值分别位于 4~6 和 22~26 μm,表明小粒子和大粒子对海雾的形成均有明显的贡献。

**关键词:** 海雾,气海温差,雾滴谱

**中图分类号:** P426,P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.003

## Microphysical Structure Analysis of a Spring Sea Fog Event in Southern Coastal Area of Fujian

ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup> CHEN Dehua<sup>1,3</sup> HU Yajun<sup>1,2</sup> XUN Aiping<sup>1,3</sup> JIANG Yongcheng<sup>1,3</sup> SUN Xuejin<sup>4</sup>

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

2 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

3 Xiamen Meteorological Observatory, Xiamen 361012

4 School of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211100

**Abstract:** Based on the data of automatic weather station, wind-profiling radar, ERA5 reanalysis, Himawari 8 high resolution satellite and FM-120 fog droplet spectrometer, we discuss the circulation pattern and microphysical characteristics of an sea fog event that happened in southern coastal area of Fujian Province on 7 April 2019. Circulation analysis shows that this sea fog event occurred under the control of west-to-northwest flow at 500 hPa trough bottom, while from 700 hPa to surface there was uniform southerly flow. The sounding situation was stable. Before sea fog event, low-level wind speed decreased significantly,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41705045)和厦门市气象局海洋气象创新团队共同资助

2020 年 4 月 5 日收稿; 2020 年 12 月 7 日收修定稿

第一作者:张伟,主要从事天气动力学研究. E-mail:zw880810@126.com

通讯作者:陈德花,主要从事天气动力学研究. E-mail:497075676@qq.com

increasing the thickness of low-wind speed. This situation provided stable circulation for sea fog. Himawari 8 satellite images show that the sea fog rapidly formed in the Taiwan Strait first and then advected to coastal area affected by low-level southerly airflow. Hydrological analysis indicates that there existed a cold water band and large temperature gradient near the shore. Sea surface temperature (SST) varied between 18 °C and 24 °C. The air and sea temperature difference was between 0 °C–2 °C with sea surface colder than the air above, which contributed to the formation of advective sea fog. Fog droplet spectrum analysis shows that visibility decreased dramatically while particle number concentration (PNC), liquid water content (LWC) and droplet spectrum increased significantly at the same time. During the sea fog process, 5 min average PNC exceeded 200 cm<sup>-3</sup> and instantaneously reached 468 cm<sup>-3</sup> maximum, and the average PNC during the fog process reached 100 cm<sup>-3</sup>. The 5 min average LWC reached 0.41 g·m<sup>-3</sup> and 1.35 g·m<sup>-3</sup> instantaneously. The average LWC during the fog process reached 0.17 g·m<sup>-3</sup>. Fog droplet size featured double peaks with 4–6 μm and 22–26 μm intervals respectively during the fog process. This indicates that small and big particles both can contribute to the formation of sea fog.

**Key words:** sea fog, air and sea temperature difference, fog droplet spectrum

## 引 言

雾是低层大气水汽发生凝结,从而使得近地面空气中富含液态水滴的一种影响视程的灾害性天气现象,是影响地面能见度最主要的因素。海雾则是冬春季节福建沿海、海上重大气象灾害之一(王彬华,1983),但模式对海雾的定量预报还存在较大不确定性(黄辉军等,2015),因此开展海雾的研究极其重要。

我国沿海自北向南有 5 个相对多雾海区。国内学者对各雾区做了大量观测试验(黄辉军等,2010;刘端阳,2011;王宏斌等,2020)、统计分析(刘小宁等,2005;吴兑等,2009;尹志聪等,2015)、个例分析(张苏平等,2014;王博妮等,2019;郭丽君和郭学良,2016;雷正翠等,2019)、数值模拟(傅刚等,2004;崔驰潇等,2018),以及雾进展综述(张苏平和鲍献文,2008;牛生杰等,2016;韩美等,2016)等工作。台湾海峡是我国主要的雾区之一(王彬华,1983),其海雾在冬春季节发生频率最高,夏秋季节发生频率低(许金镜,1990),主要发生在下半夜至上午,其中清晨最多(苏鸿明,1998)。3—5 月多年平均雾日达 3~8 d(白彬人,2006)。空间上福建中南部沿海多于北部沿海,尤其是厦门、崇武概率最高(马治国等,2011)。平流雾是台湾海峡及海峡西岸海雾的主要类型。华南沿岸存在一条带状冷水区域,当偏南气流将暖湿空气输送至沿岸冷水区域时,海表面的冷却会使得

气温下降,水汽凝结,在锋前、冷高压后部等有利的静稳天气形势下,即可形成海雾(白彬人,2006)。形成海雾时,通常气海温差介于 0.5~3.0 °C(气温大于海温),海温通常不高于 25 °C(王彬华,1983),海面风速通常低于 5 m·s<sup>-1</sup>(林卫华等,2008)。

雾滴谱是研究雾微物理结构特征的最有效手段。20 世纪 60 年代起,国外学者在美国(Eldridge, 1961;Kumai,1973)、英国(Roach,1976)等多地对海雾进行了大量的观测试验,对雾滴谱分布、液态水含量与能见度的变化特征进行研究(Eldridge,1961),或是利用激光全息照相机,对不同采样过程中的平均雾滴谱特征进行对比(Kunkel,1971)。近些年,国内诸多学者研究了华东沿海(杨中秋等,1989;徐静琦等,1994)、华南沿海(黄辉军等,2010;岳岩裕等,2013;吕晶晶等,2014)、闽南沿海(张悦等,2015)的海雾,南京(刘端阳等,2009;严文莲等,2010;陆春松等,2010;于华英等,2015)、上海(鲍宝堂等,1995)、重庆(李子华等,1993;李子华和彭中贵,1994;李子华和吴君,1995)、济南(王庆等,2019)等城市,南岭等山地(邓雪娇等,2002;吴兑等,2007)的多次大雾过程的微物理结构特征,包括雾滴谱分布、液态水含量演变特征、雾爆发性增强的机理等,得到了一系列成果。研究表明陆地上的大雾由于城市可吸入颗粒物的影响,其数浓度通常高于海雾(刘端阳等,2009)。且往往具有爆发性的特征,数浓度会快速增大(濮梅娟等,2008),雾滴谱在降温过程中爆发性拓宽。雾滴谱拓宽初期,以核化、凝结过程为主,

后期以碰并、凝结过程为主(李子华等,2011)。相比于陆地雾,海雾数浓度相对较小,不同区域海雾的雾滴谱特征也存在差异。南海海雾雾滴谱数浓度较高,东海海雾含水量较高,黄海海雾含水量、数浓度最小。海雾的滴谱特征受天气形势(沈忱等,2010)、边界层稳定度(岳岩裕等,2013)、气象要素的突变(张悦等,2015)等因素影响。

2019年4月初,闽南沿海及台湾海峡发生了一次大范围强浓雾过程,沿海多站能见度低于200 m,部分站点能见度低于50 m,导致厦门至金门、厦门至台湾等多条航线停航,给海上交通和作业带来了严重的影响。本文利用常规自动站观测资料、ERA5逐小时再分析资料、风廓线雷达资料、葵花8号卫星高分辨率观测资料,分析了此次过程的环流形势和演变特征,提取了其中海雾预报的环流形势及物理量指标。利用FM-120型雾滴谱仪器,研究了海雾的微物理结构特征,并与华南沿海其他海雾事件的环流形势和雾滴谱进行对比,以期总结出有助于此类大雾天气预报参考的方法和特征指标。

## 1 资料和方法

本文使用的资料如下:(1)闽南地区321个区域自动站观测(含91个能见度自动观测站)资料;(2)翔安站(位于厦门市,地理位置见图1a)风廓线雷达资料;(3)欧洲中心(ECMWF)全球再分析数据产品ERA5;(4)日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)P-Tree系统网站下载的葵花8号高分辨卫星资料

(水平分辨率为 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ );(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(每秒测量一次),测量的粒子直径范围为 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ,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,海拔约为20 m,距离海岸线不足1 km。翔安区气象局内自动观测站(含能见度)、风廓线雷达和雾滴谱观测设备分布如图1b所示。

## 2 天气背景条件分析

### 2.1 雾的演变过程概述

图2为2019年4月7日20时至8日10时闽南沿海最低能见度分布。91个能见度自动观测站中有78个站观测到能见度小于1 km的大雾天气,其中有6个站点最低能见度低于50 m(特强浓雾),占有站点数的6.6%,主要出现在厦门岛周边区域。49个站最低能见度介于50~200 m(强浓雾),占有能见度站点数的53.8%,主要出现在厦门、漳州、泉州沿海区域,出现强浓雾及以上(能见度低于200 m)的自动站数量约占所有总数的60%。强浓雾均出现在海岸线20 km范围内。另有23个站点(25.3%)过程最低能见度介于200~1000 m,13个站点(14.3%)最低能见度在1~10 km。从内陆至沿海能见度迅速下降,能见度低于200 m站点均出现在沿海区域,表明此次过程为典型的海雾过程。

图3为翔安站4月7日20时至8日10时自动

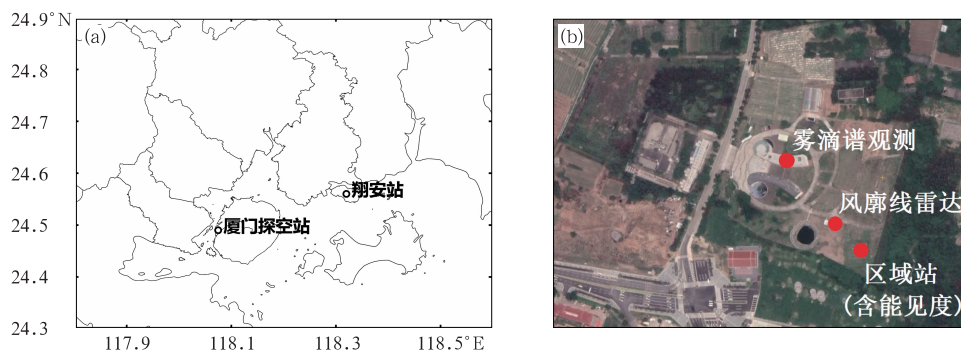


图1 (a)厦门探空站、翔安站地理位置,(b)翔安自动站(含能见度观测)、风廓线雷达、雾滴谱仪器分布

Fig. 1 (a) Locations of Xiamen Station and Xiang'an Station, (b) distribution of automatic weather station, wind profiler and FM-120 at Xiang'an Station

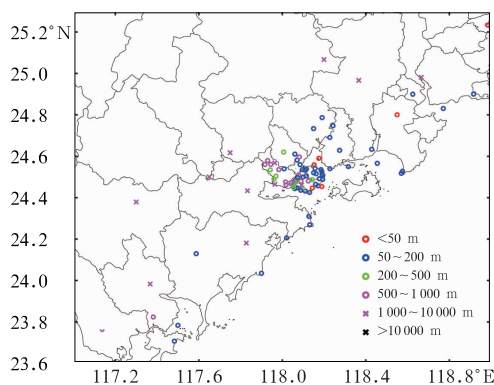


图 2 2019 年 4 月 7 日 20 时至 8 日 10 时  
闽南沿海区域最低能见度分布

Fig. 2 Minimum visibility distribution in  
southern coastal area of Fujian Province  
from 20:00 BT 7 to 10:00 BT 8 April 2019

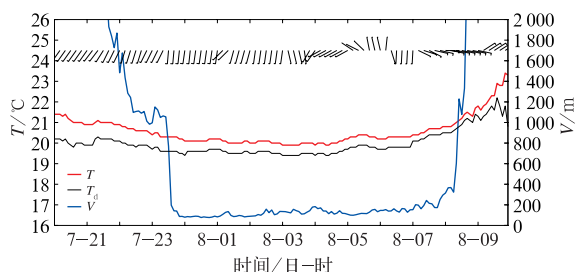


图 3 2019 年 4 月 7 日 20 时至 8 日 10 时翔安站  
逐 5 min 温度、露点温度、10 min 平均风  
(风向杆)、能见度时间序列

Fig. 3 Time series of 5 min observed temperature,  
dew point, 10 min average wind (wind barb),  
visibility at Xiang'an Station from  
20:00 BT 7 to 10:00 BT 8 April 2019

站要素序列。可以看到,21 时之前,翔安站能见度均在 2 km 以上。21—22 时能见度开始下降,从 2 km 以上快速下降至 1 km 左右。22—23 时能见度停留在 1 km 附近。从 23:30 开始,能见度显著下降,10 min 内直接从 1 km 附近下降到 200 m 以内,具有爆发性发展的特征。从 23:35 至 8 日 07:00,翔安站能见度均在 200 m 以下,其中最低能见度出现在 8 日 01:30,为 77 m。在此过程中,翔安站气温维持在 20 °C 附近,变化幅度小,且温度露点差稳定在 1 °C 以下,湿度大。风力维持弱的偏南风,仅在 05 时附近转为弱的偏西风(陆风)。8 日 07 时起,能见度缓慢上升至 200 m 以上。与此同时,气温也略有

上升。08:20 开始,能见度快速上升。08:30,能见度上升至 1 km 以上。之后气温进一步升高,露点温度差明显增大,湿度减小,且风向转为东北风,能见度显著转好,此次雾过程结束。

## 2.2 高低空环流特征分析

4 月 7 日 20 时,500 hPa 南支槽位置偏西,福建地区处槽后脊前弱偏西西北气流控制(图 4a)。850~925 hPa(图 4b,4c)处于低空急流的右侧,为弱西南偏西气流,处于反气旋环流控制,有利于弱的下沉气流的维持。地面(图 4d)属典型的均压场控制,风力小。气压南高北低,福建沿海及台湾海峡为弱西南风气流,有利于水汽输送。整体天气形势有利于海雾的形成与维持。

由厦门站(位置见图 1a,与翔安站直线距离为 26 km,海拔高度为 139.4 m)2 km 以下秒探空资料可见,4 月 7 日 20 时(图 5a)厦门站近地层以及低空(850 hPa 附近)存在明显的湿层。对流抑制能量(CIN)较大,自由对流高度高,达到了 3.5 km(图略),表明低层存在明显的抑制层,层结稳定。1500 m 以下风速小,均小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8 日 08 时近地层存在弱逆温层,相对湿度大于 90%,且整层转为西南偏南气流,2 km 以下风力仍然维持较小。由于逆温层弱,且湿层较为浅薄,因此天空云量少,8 日 08 时以后由于辐射加热,气温迅速上升,湿度快速减小,雾消散。

边界层内弱风层厚度较地面风速而言更能够代表边界层内扩散条件的变化(蒋永成等,2020)。从翔安站单站风廓线时序(图 6)可以看到,7 日上午闽南沿海地区低空风速较大,1000 m 以上风速大于等于 5 级( $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),且以偏西气流为主。7 日傍晚开始,整层的垂直风速明显减小,弱风速层厚度明显增大。16 时 1000 m 高度风速仅为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,至夜间风速进一步减小,弱风速层厚度持续增加。23 时起, $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱风速层厚度超过 2500 m,甚至一度超过 3000 m,表明夜间稳定度增大,边界层厚度增加。南风分量明显加大,有利于水平方向上的水汽输送。7 日 23 时至 8 日 08 时低能见度维持期间,2000 m 以下整层风速维持较小,均在  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。8 日 08 时之后,低空风速开始增大,弱风速层厚度持续减小,稳定度减小,雾消散。

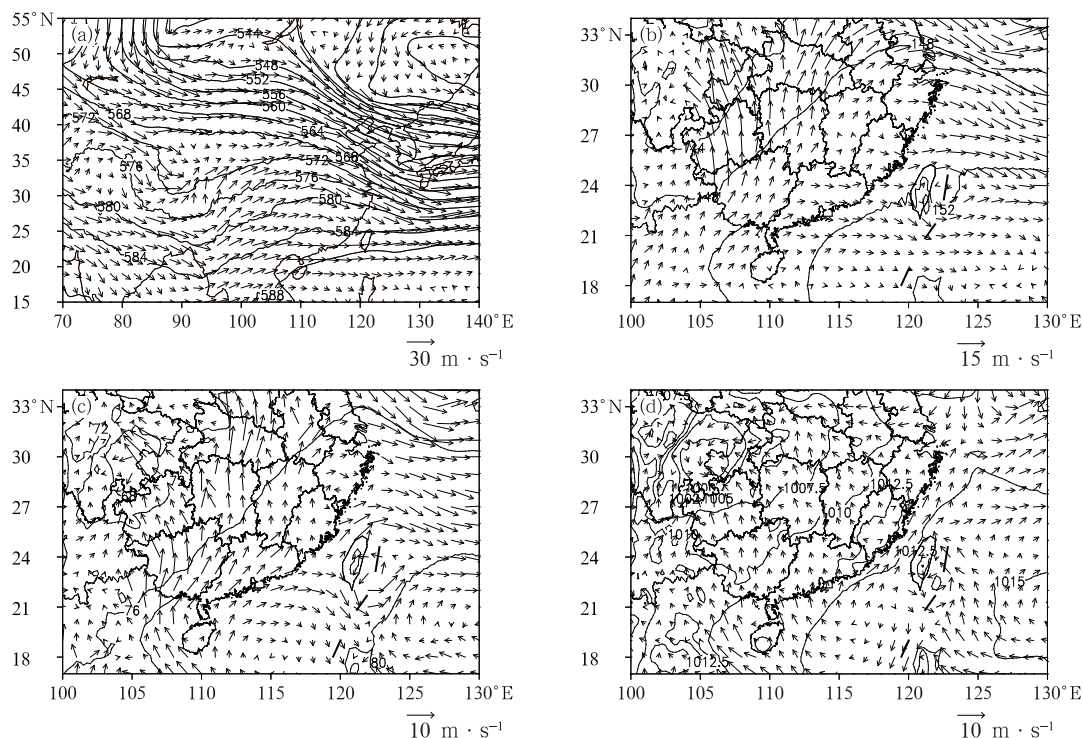


图4 2019年4月7日20时(a)500 hPa,(b)850 hPa,(c)925 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(箭头),以及(d)海平面气压场(等值线,单位:hPa)和地面风场(箭头)

Fig. 4 Geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (wind barb) at (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, (c) 925 hPa and (d) surface wind field (wind barb), mean sea level pressure (contour, unit: hPa) at 20:00 BT 7 April 2019

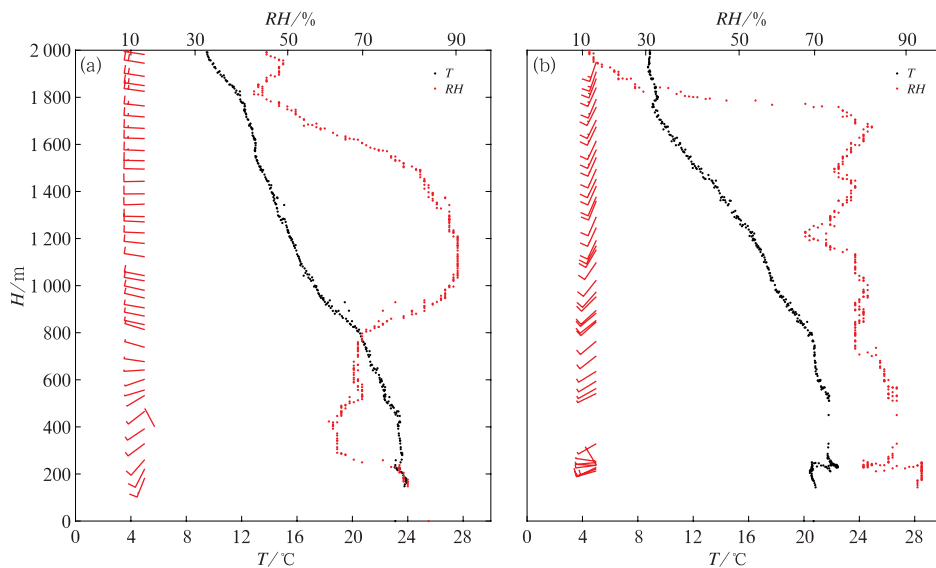


图5 2019年4月(a)7日20时,(b)8日08时厦门站2 km以下的温度、湿度和风廓线

Fig. 5 Sounding curves of temperature, humidity and wind profile below 2 km height at Xiamen Station at (a) 20:00 BT 7 and (b) 08:00 BT 8 April 2019



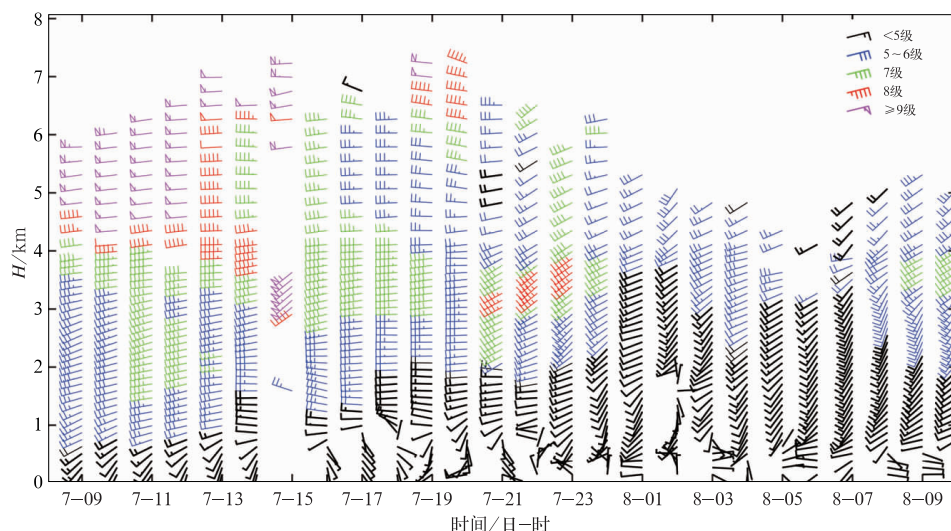


图 6 2019 年 4 月 7 日 09 时至 8 日 10 时翔安站垂直风廓线

(加粗风向杆表示风速小于等于  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Time series of wind profile from wind-profiling radar at Xiang'an

Station from 09:00 BT 7 to 10:00 BT 8 April 2019

(Bold wind barb indicates wind speed  $\leq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 2.3 卫星亮温差异及气海温差分析

由于海上缺乏能见度观测资料,夜间可利用长波红外与短波红外通道亮温差异来监测台湾海峡内海雾(张春桂等,2009)。高分辨率卫星可为台湾海峡海雾的监测提供更精细化的资料。图 7 为 4 月 7 日 22 时至 8 日 06 时葵花 8 号卫星长波红外通道平均 ( $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ , 含 3 个通道)与短波红外通道 ( $3.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$ ) 云顶亮温差异。可以看到 22 时(图 7a)台湾海峡内长波红外与短波红外的云顶亮温基本一致,差异基本为  $0^\circ\text{C}$  或小于  $0^\circ\text{C}$ ,表明此时台湾海峡南部海雾还未生成。23 时(图 7b)起,闽南近海区域长波红外与短波红外通道亮温出现明显差异,温差约为  $1 \sim 3^\circ\text{C}$ ,且此区域内长波红外亮温值位于  $17 \sim 18^\circ\text{C}$ ,纹理均匀,梯度小,表明近海区域有一条海雾带快速生成,具有典型的爆发性发展的特征(濮梅娟等,2008)。这种爆发性发展主要是由于天空云量少,长波辐射冷却导致的热力混合作用在近地层形成一个充分的混合层,使得雾顶快速向上发展(黄健等,2010)。在海上偏南气流的作用下,8 日 00 时(图 7c)海雾带进一步扩展至沿海地区,陆地翔安站能见度迅速降低,最低下降至  $100 \text{ m}$  以下。卫星反演与陆地能见度观测趋势完全一致。表明卫星反演准确可靠,也说明翔安

站能见度迅速下降主要是由海峡内的海雾平流至陆地导致的。00—06 时(图 7c~7f),双通道亮温差异与范围进一步扩大,表明海雾带持续发展。08 时起(图略),在太阳辐射的作用下,云顶亮温升高,陆地上能见度也迅速升高,近海海雾带减弱消失。卫星分析表明此次海雾过程并非在陆地上生成,而是首先于 22—23 时快速形成于台湾海峡内,在海上偏南气流的作用下,平流至沿海地区,这也是福建沿海地区海雾的典型形势之一。

合适的气海温差、海温以及风速是形成海雾的关键因素。发生海雾时气温与海温差异一般介于  $0.5 \sim 3^\circ\text{C}$ ,海温一般不高于  $25^\circ\text{C}$ ,风速通常小于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从 4 月 7 日海温分布来看(图 8),台湾海峡南部至闽南沿海地区呈现逐步降低的分布,从  $24^\circ\text{C}$  下降至  $18^\circ\text{C}$  附近,近海海温梯度大,且温度梯度在整个过程中维持少变。7 日 22 时至 8 日 08 时,海峡内均为一致的西南风,湿度大,水汽条件充沛。风速约为  $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,是最有利于形成海雾的风速区间。从气海温差分布来看,7 日 22 时至 8 日 04 时(图 8a~8d),台湾海峡中部至闽南沿海气海温差均大于  $0^\circ\text{C}$ ,海表面相对于大气为冷的下垫面,表明此次为典型的暖海雾过程(黄健等,2010)。气海温差数值在  $0 \sim 2^\circ\text{C}$ ,大部分区域数值在  $0 \sim 1^\circ\text{C}$ ,是最有利于

形成平流冷却雾的区间。06 时起(图 8e)气海温差大于  $0^{\circ}\text{C}$  区域开始减小,雾范围同时减小(图 7f)。气海温差大于  $0^{\circ}\text{C}$  的区域与图 7 中的海雾带区域基本一致,进一步表明闽南近海区域适宜的海温、气海温差与偏南气流输送是此次沿海地区海雾的主要成因。雾主要存在于沿海地区,主要是因为海陆风效应明显,夜间陆地上为陆风(偏西西北风,图 8),使得海雾仅仅平流至沿海地区(图 7c,7f),无法进一步深入内陆。同时海陆风辐合线能够导致弱的上升运动,使得湿层增厚,雾顶上升,且夜间陆地上温度相对海上较低,冷却作用更明显,有利于沿海海雾的维持和加强。

### 3 雾滴谱特征

分析此次海雾过程的雾滴谱特征(图 9)。针对翔安站,取能见度小于 1 km 的时次作为雾过程时段,则翔安站雾过程开始于 7 日 23:30,结束于 8 日

08:20(图 9a)。由于能见度为逐 5 min 观测数据,雾滴谱观频率为 1 Hz,两者频率存在差异,故以下各物理量包含 5 min 平均和瞬时值分析。

雾时段中,雾滴谱仪器观测到的液态水含量、粒子数浓度相比于其他时段显著增加(图 9b)。5 min 平均的数浓度峰值最高超过  $200 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,达到  $223 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,瞬时最大粒子数浓度达  $468 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。雾过程中平均粒子数浓度为  $100 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。这一数值与华南沿海(湛江)区域观测值相当,高于华东(舟山、青岛)沿海。与城市区域(南京、重庆、济南等)观测相比,本次过程的数浓度明显更小(表 1)。这主要是因为此次为典型的海雾过程,城市可吸入颗粒物的影响小。

液态水含量在雾过程中基本稳定在  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上,5 min 平均最高超过  $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,达到  $0.41 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。瞬时液态水含量最高值达到  $1.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。整个雾过程平均液态水含量为  $0.17 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,明显高于华南、华东沿海区域多次试验的观测

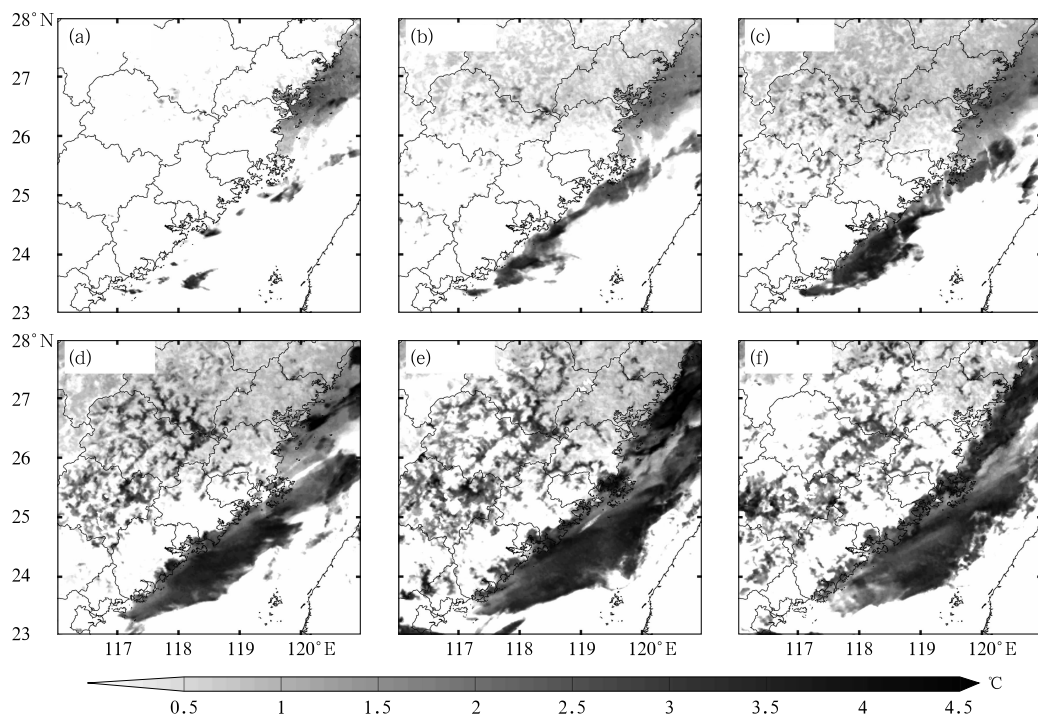


图 7 2019 年 4 月 7 日 22 时至 8 日 06 时葵花 8 号卫星长波红外通道( $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ )

平均与短红外通道( $3.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$ )云顶亮温差异分布

(a)7 日 22 时,(b)7 日 23 时,(c)8 日 00 时,(d)8 日 02 时,(e)8 日 04 时,(f)8 日 06 时

Fig. 7 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 channels of Himawari 8 satellite at (a) 22:00 BT 7, (b) 23:00 BT 7, (c) 00:00 BT 8,

(d) 02:00 BT 8, (e) 04:00 BT 8, (f) 06:00 BT 8 April 2019

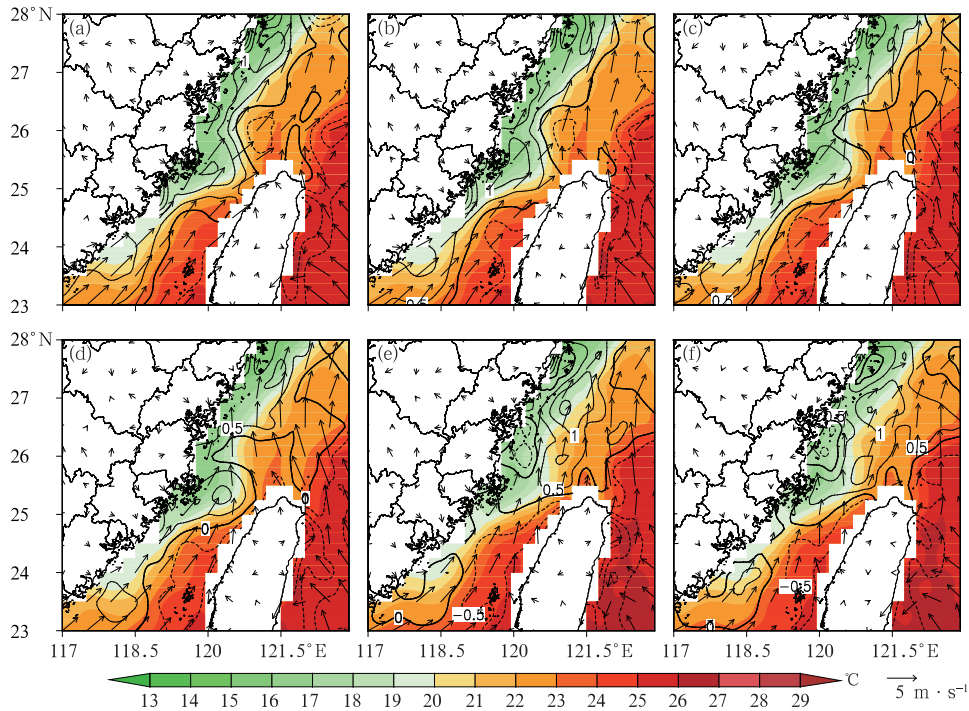


图 8 2019 年 4 月 7 日 22 时至 8 日 08 时逐 2 h 海温(填色)、气海温差  
(等值线,加粗为  $0^{\circ}\text{C}$ ,间隔为  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )与 10 m 风(箭头)

(a)7 日 22 时,(b)8 日 00 时,(c)8 日 02 时,(d)8 日 04 时,(e)8 日 06 时,(f)8 日 08 时

Fig. 8 Sea surface temperature (colored), temperature difference between air and sea surface

(contour, bold isoline means  $0^{\circ}\text{C}$  with interval of  $0.5^{\circ}\text{C}$ , unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), and 10 m wind field (wind barb)

at 22:00 BT 7 (a), 00:00 BT 8 (b), 02:00 BT 8 (c), 04:00 BT 8 (d), 06:00 BT 8 (e) and 08:00 BT 8 (f) April 2019

值,这是因为本次海雾过程强度较强,水汽含量充足;与南京等城市的特强浓雾相比,液态水含量基本持平;与重庆、济南等内陆或北方城市对比,液态水含量明显偏大。

雾过程中 5 min 平均的中值体积直径(MVD,表略)最小为  $10.6\ \mu\text{m}$ ,最大为  $29.12\ \mu\text{m}$ ,平均谱宽为  $25.36\ \mu\text{m}$ 。瞬时最小 MVD 为  $7.1\ \mu\text{m}$ ,瞬时最大为  $49\ \mu\text{m}$ 。相比于湛江等华南沿海区域,平均直径、最大直径均更大;与南京等内陆城市相比,谱宽(最大直径)的平均值明显偏小,进一步表明海雾以小粒子为主,直径较大的城市可吸入颗粒物含量少。

进一步分析可知,能见度与液态水含量、粒子数浓度呈现非线性关系。当能见度大于 400 m 时(23:35 以前),粒子数浓度基本在  $2\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$  以下,粒子数浓度的微小变化能够导致能见度迅速变化。当粒子数浓度小于  $1\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$  时,能见度大于 2000 m;数浓度增加到  $2\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$  时,能见度迅速下降至 1000 m 以下。但当能见度下降至 200 m 以下时,粒子数浓度的变化并不能导致能见度迅速变化。相反,能见度的微小变化能够导致粒子数浓

度、液态水含量的明显变化。00—06 时,能见度变化区间为 77~183 m,变化幅度仅为 106 m,但液态水含量最高与最低相差约 4 倍,粒子数浓度同样相差约 4 倍。

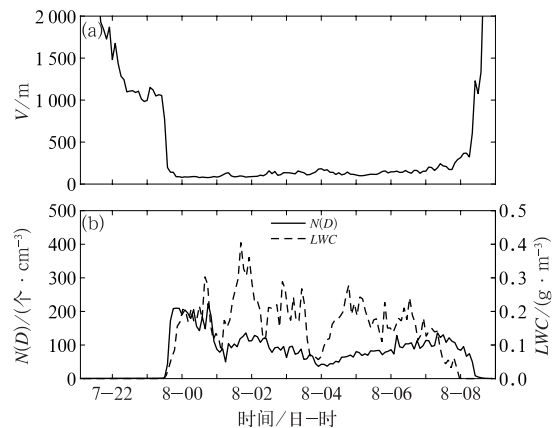


图 9 2019 年 4 月 7 日 21 时至 8 日 09 时翔安站  
逐 5 min 的(a)能见度,(b)粒子数浓度与液态水含量

Fig. 9 (a) 5 min visibility, (b) particle number  
content and liquid water content at Xiang'an

Station from 21:00 BT 7 to 09:00 BT 8 April 2019



表 1 翔安站雾滴谱参数与沿海、内陆其他研究比较

观测地点	观测时间/年-月-日	观测仪器	粒子数浓度/(个·cm <sup>-3</sup> )	液态水含量/(g·m <sup>-3</sup> )
			平均值(最大值)	平均值(最大值)
厦门翔安	2019-4-7	FM-120	100(468)	0.17(1.35)
广东东海 (岳岩裕等,2013)	2011-3-20—21	FM-100	231(616)	0.114(0.594)
广东湛江 (吕晶晶等,2014)	2010-3-31 至 4-2	FM-100	73(470)	0.03(0.232)
广东湛江 (张舒婷等,2013)	2010-3-22—23	FM-100	40(219.5)	0.013(0.155)
广东茂名 (黄辉军等,2009)	2007-3-16 至 4-29	三用滴谱仪	57.1(111.9)	0.0183(0.1808)
浙江舟山 (杨中秋等,1989)	1985-5-6	三用滴谱仪	37(122)	0.11(0.498)
山东青岛 (徐静琦等,1994)	1993-6-7	三用滴谱仪	82(249)	0.106(0.199)
山东济南 (王庆等,2019)	2017-1-3—6	FM-120	155.78(1238.25)	0.042(0.37)
南京信息工程大学 (刘端阳等,2009)	2006-12-24—27	FM-100	320.335(1261.87)	0.1530(1.018)
江苏阳澄湖 (黄建平等,1998)	1997-1-21	三用滴谱仪	268.6(/)	0.04(/)
重庆石板坡 (李子华和吴君,1995)	1989—1990	三用滴谱仪	529(2026)	0.02(0.12)

注:“/”表示文献中未给出相应参数。  
Note:“/” indicates the values are not shown in the reference.

图 10 为翔安站雾过程的平均谱分布及拟合曲线。利用最小二乘法进行拟合,满足 Deirmendjian 分布,即:

$$N(D) = aD^{\alpha} \exp(-bD^{\beta})$$

式中: $D$  为粒子直径, $N(D)$  为对应数浓度, $a, b, \alpha, \beta$  分别为拟合系数。各系数如图 10 所示。其中  $3\text{ }\mu\text{m}$  以下和  $8\sim 18\text{ }\mu\text{m}$  的实测值小于理论值,其他区间的实测值均大于理论值。雾过程的谱分布呈现典型的双峰型特征,峰值粒子直径分别为  $4\sim 6$  和  $22\sim 26\text{ }\mu\text{m}$ 。这与华南沿海的单调递减型(黄辉军等,

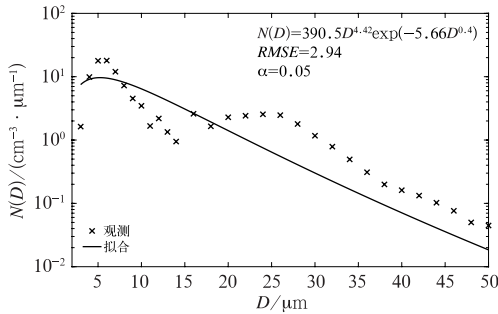


图 10 翔安站雾过程中平均谱分布及其拟合曲线  
Fig. 10 Average droplet spectrum distribution and its fitting curve during the fog process at Xiang'an Station

2009;张舒婷等,2013;吕晶晶等,2014)、南京(刘端阳等,2009)、重庆(李子华和吴君,1995)等城市区域的单峰型存在明显差异。整个谱分布偏向于小粒子一端。直径小于  $10\text{ }\mu\text{m}$  的粒子总数约占 75%。

分析雾过程中不同直径的粒子数浓度变化特征(图 11)。由图可见,当能见度明显下降时,各区间的粒子数均有爆发性增加,雾滴谱爆发性拓宽,但增加幅度差异大。 $4\sim 8\text{ }\mu\text{m}$  的小粒子数浓度增加最为明显,峰值直径为  $4\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ ,最大有超过  $250\text{ }\text{个}\cdot\text{采样体积}^{-1}$  (采样体积约为  $3.85\text{ cm}^3$ ),达到  $286\text{ }\text{个}\cdot\text{采样体积}^{-1}$ 。雾过程中主峰值直径始终维持在  $8\text{ }\mu\text{m}$  以下。粒子数浓度的次峰值在  $22\sim 26\text{ }\mu\text{m}$ ,最大数浓度达到  $27\text{ }\text{个}\cdot\text{采样体积}^{-1}$ 。 $30\text{ }\mu\text{m}$  以上的粒子浓度明显减小, $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  直径的数浓度基本在  $3\text{ }\text{个}\cdot\text{采样体积}^{-1}$  以下。这表明粒子数浓度的增加是由于大粒子与小粒子共同增加而导致的。进一步分析图 11,在雾爆发性发展的初期,小粒子数浓度最大。8 日 01 时起小粒子数浓度有所减小, $20\text{ }\mu\text{m}$  以上粒子数浓度增大,这是因为本次海雾过程水汽充足,雾形成后碰并作用明显,小粒子聚合成大粒子,导致小粒子数浓度减少,大粒子数浓度增大,雾滴谱拓宽,含水量进一步增加(图 9)。

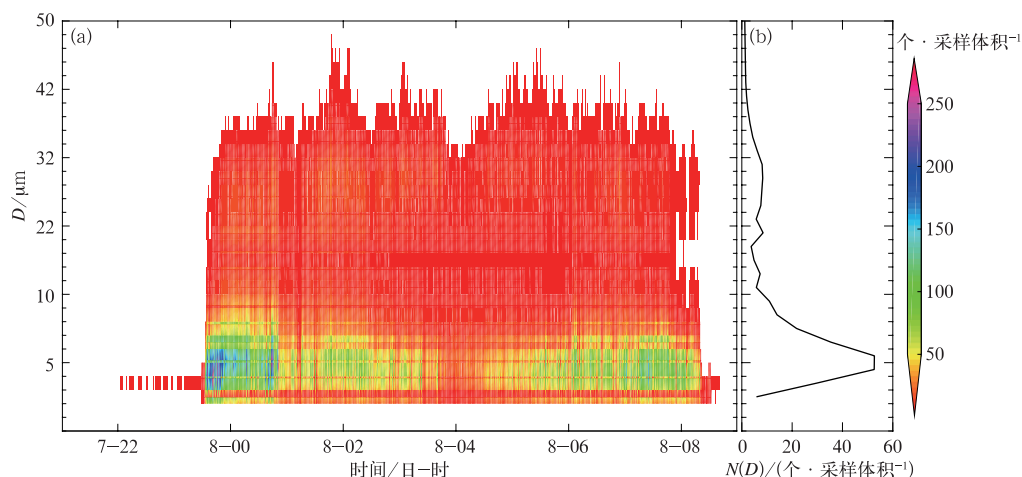


图 11 (a)2019 年 4 月 7 日 21 时至 8 日 09 时不同直径的粒子数浓度  
(填色)随时间变化,(b)雾过程中不同直径的平均粒子数浓度

Fig. 11 (a) Diagram of particle number content (colored) of different diameters  
from 21:00 BT 7 to 09:00 BT 8 April 2019,  
(b) average particle number content during the fog period

## 4 结论与讨论

本文利用地面自动站观测资料、风廓线雷达资料、ERA5 再分析资料、葵花 8 号高分辨率卫星资料,研究了 2019 年 4 月 7 日闽南沿海一次海雾过程的环流形势和演变特征,并利用 FM-120 型雾滴谱仪研究了海雾的滴谱特征。主要结论如下:

(1)此次海雾过程 500 hPa 脊前的偏西—西北气流,低层为弱的偏西西南气流与反气旋环流,地面为弱南风。海雾形成前地面至 2000 m 高度风速明显减小,弱风速层厚度明显增加,且偏南风分量加大,为海雾的发生提供静稳的环流形势和充沛的水汽条件。

(2)高分辨率卫星监测表明,此次海雾过程首先形成于闽南近海区域,具有爆发性发展特征。随着海峡内低层偏南风平流至沿海地区。再分析资料分析表明,福建近海气海温差在  $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且从海峡至沿海海温梯度大,海温在  $18\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,西南风力为  $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,有利于平流冷却雾的形成。此类平流海雾的预报着眼点,主要在近海的气海温差、地面至 2 km 高度的风向风速。在满足湿度和静稳条件的基础上,如地面至 2 km 为一致的弱西南气流,近海海温介于  $18\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气海温差介于  $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则出现平流冷却海雾的概率会明显增大,其区域范围则可

以使用高分辨率卫星的双通道亮温差异来实时监测。

(3)翔安站能见度明显下降伴随着粒子数浓度明显增加、液态水含量明显增大,雾滴谱显著拓宽。强浓雾期间 5 min 平均的数浓度峰值最高超过  $200\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,瞬时最大粒子数浓度达到  $468\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。5 min 平均液态水含量基本稳定在  $0.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,最高达到  $0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,瞬时最大值达到  $1.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,液态水含量高。强浓雾期间雾滴谱中的粒子浓度呈现双峰结构特征,峰值分别在  $4\sim 6$  和  $22\sim 26\text{ }\mu\text{m}$ 。雾爆发性发展初期小粒子数浓度增加最明显。随后由于碰并增长作用,小粒子数浓度减小, $20\text{ }\mu\text{m}$  以上大粒子数浓度增大,液态水含量也进一步增大。

(4)本次过程的雾滴谱呈现 Deirmendjian 分布特征,与湛江等华南区域的单调递减特征存在明显差异。数浓度量级与华南、华东等沿海区域基本持平,远小于南京、重庆等城市区域。液态水含量则高于华南、华东等沿海区域,与南京等城市的特强浓雾持平,明显高于重庆、济南等内陆或北方地区,这主要是因为本次过程为典型海雾过程,海上水汽充足,液态水含量高,且城市可吸入颗粒物的影响小。

## 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).
- 鲍宝堂, 束家鑫, 朱炳权, 1995. 上海城市雾理化特性的研究[J]. 南京气象学院学报, 18(1): 114-118. Bao B T, Shu J X, Zhu B Q, 1995. Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai[J]. J Nanjing Inst Meteor, 18(1): 114-118 (in Chinese).
- 崔驰潇, 包云轩, 袁成松, 等, 2018. 不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J]. 大气科学, 42(6): 1344-1362. Cui C X, Bao Y X, Yuan C S, et al, 2018. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6): 1344-1362 (in Chinese).
- 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).
- 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等, 2004. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以 2004 年 4 月 11 日为例[J]. 中国海洋大学学报, 34(5): 720-726. Fu G, Wang J Q, Zhang M G, et al, 2004. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004[J]. Period Ocean Univ China, 34(5): 720-726 (in Chinese).
- 郭丽君, 郭学良, 2016. 北京 2009~2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 40(2): 296-310. Guo L J, Guo X L, 2016. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009—2013 in the Beijing Region[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2): 296-310 (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).
- 黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等, 2009. 茂名地区海雾的微物理结构特征[J]. 海洋学报, 31(2): 17-23. Huang H J, Huang J, Liu C X, et al, 2009. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming Area[J]. Acta Oceanol Sin, 31(2): 17-23 (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).
- 黄辉军, 詹国伟, 刘春霞, 等, 2015. 一次华南沿海海雾个例的数值模拟研究[J]. 热带气象学报, 31(5): 643-654. Huang H J, Zhan G W, Liu C X, et al, 2015. A case study of numerical simulation of sea fog on the southern China coast[J]. J Trop Meteor, 31(5): 643-654 (in Chinese).
- 黄健, 王斌, 周发琇, 等, 2010. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征[J]. 大气科学, 34(4): 715-725. Huang J, Wang B, Zhou F X, et al, 2010. Turbulent heat exchange in a warm sea fog event on the coast of South China[J]. Chin J Atmos Sci, 34(4): 715-725 (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. Micro-physical structure features and evolution processes of radiation fog in Huning Region[J]. Meteor Mon, 24(5): 3-8 (in Chinese).
- 蒋永成, 张晗昀, 张伟, 等, 2020. 基于地基遥感资料的厦门市污染边界层特征分析[J]. 环境科学学报, 40(2): 450-458. Jiang Y C, Zhang H Y, Zhang W, et al, 2020. Analysis of urban boundary layer characteristics based on ground-based remote sensing data in Xiamen[J]. Acta Sci Circumstantiae, 40(2): 450-458 (in Chinese).
- 雷正翠, 郑媛媛, 刘银峰, 等, 2019. 2018 年常州一次罕见持续性雾-霾天气分析[J]. 气象, 45(8): 1123-1134. Lei Z C, Zheng Y Y, Liu Y F, et al, 2019. Causes analyses of a severe continuous fog-haze weather process in Changzhou in 2018[J]. Meteor Mon, 45(8): 1123-1134 (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 microscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening[J]. Chin J Atmos Sci, 35(1): 41-54 (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微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).
- 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).
- 刘端阳, 2011. 南京冬季雾宏微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 & Technology (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 evo-  
lution of four-day persistent fogs around Nanjing in December  
2006[J]. Acta Meteor Sin, 67(1): 147-157(in Chinese).
- 刘小宁,张洪政,李庆祥,等,2005. 我国大雾的气候特征及变化初步  
解释[J]. 应用气象学报, 16(2): 220-230. Liu X N, Zhang H Z,  
Li Q X, et al, 2005. Preliminary research on the climatic charac-  
teristics and change of fog in China[J]. J Appl Meteor Sci, 16  
(2): 220-230(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).
- 吕晶晶,牛生杰,赵丽娟,等,2014. 湛江地区一次冷锋型海雾微物理  
特征[J]. 大气科学学报, 37(2): 208-215. Lv J J, Niu S J, Zhao L  
J, et al, 2014. Microphysical characteristics of a sea fog influ-  
enced by a cold front in Zhanjiang[J]. Trans Atmos Sci, 37(2):  
208-215(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 Agrometeor, 32(s1): 69-73 (in  
Chinese).
- 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(2): 6-19. Niu S J, Lu C S, Lv J J, et al, 2016. Ad-  
vances in fog research in China[J]. Adv Meteor S & T, 6(2): 6-  
19(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]. Plat-  
eau Meteor, 27(5): 1111-1118(in Chinese).
- 沈忱,黄健,刘寿东,2010. 海雾的准周期振荡特征[J]. 热带气象学  
报, 26(1): 71-78. Shen C, Huang J, Liu S D, 2010. Characteris-  
tics of quasi-periodic oscillations (QPOS) in sea fog[J]. J Trop  
Meteor, 26(1): 71-78(in Chinese).
- 苏鸿明,1998. 台湾海峡海雾的气候分析[J]. 台湾海峡, 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: Marine Press(in Chinese).
- 王博妮,张雪蓉,濮梅娟,等,2019. 一次平流雾的形成和传播特征研  
究[J]. 气象, 45(3): 395-406. Wang B N, Zhang X R, Pu M J,  
et al, 2019. Characteristics of the formation and spread of an ad-  
vection fog[J]. Meteor Mon, 45(3): 395-406(in Chinese).
- 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(1): 89-97. Wang  
H B, Wu H, Li Y, et al, 2020. Validation of rotorcraft UAV  
boundary layer meteorological observation data and its applica-  
tion in a heavy fog event in Yancheng[J]. Meteor Mon, 46(1):  
89-97(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).
- 吴兑,邓雪娇,毛节泰,等,2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观  
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-struc-  
tures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling  
Dayaoshan Mountain[J]. Acta Meteor Sin, 65(3): 406-415 (in  
Chinese).
- 吴兑,吴晓京,朱小祥,2009. 雾和霾[M]. 北京: 北京出版社. Wu D,  
Wu X J, Zhu X X, 2009. Fog and Haze [M]. Beijing: Beijing  
Press(in Chinese).
- 徐静琦,张正,魏皓,1994. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析[J].  
海洋湖沼通报, (2): 174-178. Xu J Q, Zhang Z, Wei H, 1994.  
Measurement and analysis of droplet spectrum and liquid water  
content of sea fog[J]. Trans Oceanol Limnol, (2): 174-178 (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]. Mar Forecast, 7(3): 58-63(in Chinese).
- 严文莲,刘端阳,濮梅娟,等,2010. 南京地区雨雾的形成及其结构特  
征[J]. 气象, 36(10): 29-36. Yan W L, Liu D Y, Pu M J, et al,  
2010. Formation and structure characteristics of precipitation  
fog in Nanjing[J]. Meteor Mon, 36(10): 29-36(in Chinese).
- 杨中秋,许绍祖,耿骝,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).
- 尹志聪,王会军,郭文利,2015. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候  
变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 45(5): 649-655. Yin Z C,  
Wang H J, Guo W L, 2015. Climatic change features of fog and  
haze in winter over North China and Huang-Huai Area[J]. Sci  
China: Ear Sci, 45(5): 649-655(in Chinese).
- 于华英,牛生杰,刘鹏,等,2015. 2007 年 12 月南京六次雨雾过程宏、  
微观结构演变特征[J]. 大气科学, 39(1): 47-58. Yu H Y, Niu S  
J, Liu P, et al, 2015. Evolution of the macro- and microphysical  
properties of precipitation fog in December 2007 in Nanjing[J].  
Chin J Atmos Sci, 39(1): 47-58(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]. 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).
- 张苏平, 鲍献文, 2008. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 38(3):359-366. Zhang S P, Bao X W, 2008. The main advances in sea fog research in China[J]. Period Ocean Univ China, 38(3):359-366(in Chinese).
- 张苏平, 龙景超, 尹跃进, 等, 2014. 我国东部沿海一次局地海雾抬升成云过程分析[J]. 中国海洋大学学报, 44(2):1-10. Zhang S P, Long J C, Yin Y J, et al, 2014. Analysis of the process of a local sea fog lifted into low cloud in Eastern China[J]. Period Ocean Univ China, 44(2):1-10(in Chinese).
- 张悦, 樊曙先, 张舒婷, 等, 2015. 海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究[J]. 热带气象学报, 31(3):385-394. Zhang Y, Fan S X, Zhang S T, et al, 2015. The microstructure and characteristics of fluctuation of a sea fog along the west coast of Taiwan Strait [J]. J Trop Meteor, 31(3):385-394(in Chinese).
- Eldridge R G, 1961. A few fog drop-size distributions[J]. J Meteor, 18(5):671-676.
- Kumai M, 1973. Arctic fog droplet size distribution and its effect on light attenuation[J]. J Atmos Sci, 30(4):635-643.
- Kunkel B A, 1971. Fog drop-size distributions measured with a laser hologram camera[J]. J Appl Meteor, 10(3):482-486.
- Roach W T, 1976. On some quasi-periodic oscillations observed during a field investigation of radiation fog[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 102(432):355-359.