

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12009. Yue Yanyu, Niu Shengjie, Zhao Lijuan, 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.

湛江地区近海岸雾产生的天气条件 及宏微观特征分析

岳岩裕¹ 牛生杰¹ 赵丽娟¹ 张羽² 徐峰³

¹ 南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室/大气物理学院, 南京 210044

² 湛江市气象局, 湛江 524001

³ 广东海洋大学, 湛江 524009

摘 要 利用 2011 年 2~3 月广东省湛江市东海岛雷达站观测得到的 12 次雾过程中雾滴谱、能见度、边界层风温场资料以及常规气象资料, 对沿岸海雾发生时的天气系统进行分类, 分析了雾发生时的气象条件、边界层特点、微物理特征等, 并对典型个例进行讨论。总结发现: 海雾易出现在低压前部、高压后部和冷锋前部等天气形势下; 雾过程中, 地面以偏东风为主, 高空以偏东、偏南风为主; 雾滴数浓度 (N) 的平均值变化范围为 $170\sim 372\text{ cm}^{-3}$, 液态水含量 (LWC) 为 $0.018\sim 0.170\text{ g m}^{-3}$, 平均半径为 $1.71\sim 3.28\text{ }\mu\text{m}$ 。选取了一个典型个例来研究典型天气形势下海雾宏微观特征, 该过程发展初期以核化凝结为主, 在水汽不充足时, 大量的雾滴凝结核争食水汽, 使得 N 增加而平均半径几乎不变。根据自动转化阈值 T 可以看出, 成熟时期碰并效率增加, 大滴端数密度增加, 滴谱拓宽。结合边界层气象要素演变分析发现, 在夜间急流显著时, 不利于雾滴生长, LWC 较低; 而高空风速较小, 逆温较强可能是消散阶段平均半径出现跃增的原因。雾滴谱呈双峰分布, 且瞬时谱符合 Gamma 分布; 液态水含量与消光系数、有效半径呈正相关关系, 相关系数分别为 0.95 和 0.97。

关键词 天气系统 气象要素 宏微观特征 雾滴谱

文章编号 1006-9895(2013)03-0609-14

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12009

Study on the Synoptic System and Macro-Micro Characteristics of Sea Fog along the Zhanjiang Coastal Area

YUE Yanyu¹, NIU Shengjie¹, ZHAO Lijuan¹, ZHANG Yu², and XU Feng³

¹ Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring & Pollution Control/School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Zhanjiang Meteorological Bureau, Zhanjiang 524001

³ Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524009

Abstract Based on data of droplet spectra, visibility, temperature field, wind field, and meteorological elements for twelve cases from a comprehensive fog experiment carried out at the radar station on Donghai Island of Guangdong from February to March 2011, we classified the weather synoptic system for fog occurrence and analyzed the meteorological elements, boundary layer structures, and microphysical properties. Furthermore, a typical case was studied. It is summarized that when Zhanjiang is located at forepart of depression, cold front and rearward of high pressure, the

收稿日期 2012-01-14, 2012-08-08 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41275151, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY(QX)2007-6-26, 江苏高校优势学科建设工程资助项目, 江苏省青蓝工程云雾降水物理学与气溶胶研究创新团队项目, 江苏省普通高校研究生科研创新计划

作者简介 岳岩裕, 女, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事云雾物理化学研究。E-mail: yueyanyu123@gmail.com

frequency of fog occurrence was high. During the fog events, the wind direction was mainly easterly near the surface, and southerly and easterly in the upper air. The range of fog droplets number concentration (N), liquid water content (LWC), and average radius was $170\text{--}372\text{ cm}^{-3}$, $0.018\text{--}0.170\text{ g m}^{-3}$, and $1.71\text{--}3.28\text{ }\mu\text{m}$, respectively. The initial stage of the development of Case 11 was dominated by droplet activation and condensational growth. N increased with a slight variation of radius when the water vapor was not sufficient for the growth of fog condensation nuclei. In the mature stage, according to the auto conversion threshold functions, the collision-coalescence efficiency and the number density of large droplets increased, and the drop-size distribution expanded. Combined with the meteorological elements in the boundary layer, we demonstrated that the wind jets were significant at night, inhibiting the growth of the fog droplets, and the LWC was low. The reasons for the sharp increase in average radius might be the strong inversion of the virtual temperature and the low wind speed. Statistical analysis showed that the droplets spectrum had a bimodal distribution and could be described by the Gamma distribution. The relationships between LWC and the extinction coefficient and the effective radius were positive with a correlation coefficient 0.95 and 0.97, respectively.

Keywords Synoptic system, Meteorological elements, Macro-micro properties, Droplet spectrum

1 引言

海雾是发生在海上或岸边低层大气中的一种水汽凝结现象。它不仅会对海上交通运输、海洋捕捞、航空、军事活动等造成重要影响,同时会造成污染物富集,影响沿岸的空气质量,严重影响人们的身体健康。因此,海雾研究受到沿海国家的普遍重视。雾的形成过程较复杂,其与热力学、动力学、辐射、气溶胶、微物理过程、下垫面状况等多方面因素有关 (Gultepe and Milbrandt, 2007a),但由于海雾发生在海洋上,对其观测较困难,学者们主要是通过通过对岸边雾的研究来了解海雾的宏微观特征 (Pilié et al., 1979; Leipper, 1994; Fedorova et al., 2008)。

宏观天气系统和边界层结构对雾的生消起主导作用 (陆春松等, 2010),同时宏观过程与微物理特征演变之间也存在密切联系 (Niu et al., 2010b)。Lewis et al. (2003)指出反气旋系统影响下大尺度的下沉运动是海雾形成的一个重要因子,海洋边界层厚度的减少和逆温层厚度的增加有利于大范围持续性雾的形成。同时,在反气旋天气下,海雾发生时海面的强风以及显热通量的增加会促进边界层内的混合,导致海雾消散 (Tachibana et al., 2008)。因此研究海雾发生时的天气系统和边界层特征,有助于更全面的认识不同类型海雾发生演变规律,对海雾的预报起指导作用。

海雾出现时较低的能见度易导致船只相碰等事故的发生,严重影响海运安全,讨论能见度的主要影响因子成为令人关注的问题 (Tomasi and Tampieri, 1976),而微物理特征量又与能见度存在密切联系,雾滴数浓度和粒径的大小直接影响到其

对可见光的削弱作用 (Eldridge, 1971)。因此,许多学者通过外场观测的方式对海雾的微物理特征进行研究 (Fitzgerald, 1978; Kunkel, 1984; Lewis et al., 2004)。雾滴或雾滴的大小分布可利用修正的 Gamma 分布进行表达,不同发展阶段雾滴的谱分布不同 (Baronti and Elzweig, 1973; Podzimek, 1997), Niu et al. (2010a)发现 Gamma 分布也可以很好地反映雾滴谱分布特征。海洋性气团的雾滴平均浓度要低于大陆性的,平流雾的微物理量会随着空气团的传输发生系统性的变化 (Goodman, 1977)。在美国太平洋海岸的观测则发现,海雾微物理量的变化范围与凝结核浓度有关,过饱和度的差异也会造成雾微结构不同 (Hudson, 1980)。雾中小滴数浓度的增加主要是由于核化和凝结,而滴谱的拓宽则主要通过碰并作用,谱的变窄主要是由重力沉降引起的 (Bott et al., 1990; 黄玉生等, 2000; 唐浩华等, 2002)。Gultepe and Milbrandt (2007a)则进一步通过建立数浓度、液态水含量与能见度之间的参数化关系,并应用在数值预报模式中,提高能见度预报的准确性。

中国对海雾的研究最早始于 20 世纪 60 年代,沿海地区的观测较少,仅在青岛 (黄海) (徐静琦等, 1994; Gao et al., 2007)、舟山 (东海) (杨中秋等, 1989) 和茂名 (南海) (黄辉军等, 2009) 等地,主要针对雾滴尺度分布、数浓度、含水量等进行了外场观测,初步分析了微物理量的变化和滴谱分布特征等,建立了消光系数与能见度之间简单的线性关系。与内陆城市雾 (鲍宝堂等, 1995) 相比,海雾数浓度偏低。

中国广东省湛江市东海岛雷达站濒临南海,春季海雾频发,对琼州海峡客运、海上捕捞和航空运

输等造成了重要影响。然而对该区域的观测研究相对较少，尤其是利用先进的观测设备，针对不同天气系统影响下海雾的宏微观特征进行系统连续观测分析。因此在东海岛的雷达站设立外场观测点，对边界层风、温，地面气象要素，海雾的微物理特征和雾水等进行系统的观测采集。本文总结了易导致海雾出现的 5 种天气类型，并给出 12 次雾过程中宏微观物理量的基本特征。同时细致分析了一次低压影响下海雾过程中天气形势、气象要素、边界层特征、微物理特征量等的变化特点，讨论了边界层特征对海雾微结构的影响，并进一步使用偏度和峰度对雾滴谱特征进行分析，最后给出了微物理量与光学特性间的联系。

2 观测地点及仪器介绍

2011 年 2 月 19 日至 3 月 23 日在中国广东省湛江市东海岛雷达站进行海雾的综合观测。东海岛东面和南面临南海，北面和西面濒临雷州半岛。东海岛地处低纬度的东风带中，常年盛行风向都带有东风分量。雷达站（21.01°N，110.53°E）位于东海岛东海岸一个小山坡顶，站内配有风廓线雷达、多普勒雷达等，距离海岸线 800 m，海拔高度 51 m。观测期间将雾滴谱仪、VPF-730 能见度仪、雾水采集器、气象粒子探测仪（MPS）、雨滴谱仪等仪器架设在院内公寓楼的楼顶（距离地面约为 10 m），前方无阻挡物。观测期间仪器进行实时监测，同时每小时进行一次人工记录。

雾滴大小分布测量主要是利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 雾滴谱仪。采样频率为 0.5 Hz，测量雾滴的直径范围为 2~50 μm，分为 20 档。能见度观测是利用英国 Biral 公司研制的 VPF-730 散射式能见度仪进行的，当能见度小于 16 km 时，误差为±10%，时间间隔为 5 s。地面的气象要素（如温、压、湿、风）是利用架设在东海岛上的 WP3103 型自动气象站来观测的，自动气象站架设地点为（21.02°N，110.38°E），由广东省气象技术装备中心研制生产，时间间隔为 5 min。航天二十三所制造的 CFL-08 型对流层风廓线仪，工作频率 445 MHz，能够不间断地提供 150~8000 m 内的水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数等气象要素随高度的分布；通过与声技术结合（RASS），提供 150 m~4000 m 高度范围内的大气虚温场分布，垂直分辨率都为 120 m，时间间隔分别为 6 min 和 1 h。

3 结果分析

3.1 海雾过程分型讨论

基于海雾生成时不同的天气形势，将湛江地区 2011 年 2~3 月观测到的 12 次雾过程分为五类（见表 1）：高压后部型、低压前部型、高低压之间型、均压场或鞍形场型和冷锋影响型。12 次雾过程主要发生在三个时间段内，个例 1~6 雾过程发生在 2 月 23 日至 3 月 1 日，个例 7~9 雾过程发生在 3 月 12~15 日，个例 10~12 雾过程发生在 3 月 20~22

表 1 12 次雾过程的基本特征量
Table 1 The main characteristics quantities for 12 cases

个例 序号	时间（2011 年）		持续时间		天气系统	最低能见 度 (m)					
			(h)	样本数			$N(\text{cm}^{-3})$	$LWC(\text{g m}^{-3})$	$r_e(\mu\text{m})$	$r_v(\mu\text{m})$	$\bar{r}(\mu\text{m})$
1	2 月 23~24 日	21:58~12:01	14.05	841	高压后部	40	253(73)	0.104(0.058)	7.10(1.29)	4.37(0.88)	2.63(0.48)
2	2 月 24~25 日	17:17~11:48	18.52	1112	高压后部	10	324(135)	0.068(0.066)	5.39(2.04)	3.52(1.21)	2.30(0.60)
3	2 月 25~26 日	23:13~10:55	11.7	703	高低压之间	50	252(195)	0.018(0.017)	3.30(0.57)	2.28(0.30)	1.71(0.15)
4	2 月 27~28 日	18:37~06:53	12.27	737	低压前部	27	170(109)	0.026(0.041)	4.43(1.38)	2.77(0.76)	1.88(0.37)
5	2 月 28 日	17:58~21:46	3.8	229	冷锋影响	73	194(71)	0.047(0.027)	5.56(0.86)	3.76(0.61)	2.50(0.42))
6	2 月 28 日~3 月 1 日	23:29~10:00	10.52	632	冷锋影响	70	213(54)	0.040(0.028)	5.19(1.33)	3.34(0.78)	2.20(0.41)
7	3 月 12~13 日	23:37~10:42	11.08	666	高压后部	40	372(212)	0.148(0.191)	6.01(6.01)	3.83(1.24)	2.48(1.03)
8	3 月 13~14 日	17:49~9:54	16.08	965	均压场或鞍形场	50	350(201)	0.093(0.109)	4.96(2.04)	3.36(1.35)	2.32(0.76)
9	3 月 14~15 日	23:12~7:54	8.7	523	冷锋影响	50	250(132)	0.170(0.156)	7.58(2.25)	4.94(1.66)	3.12(1.14)
10	3 月 20 日	4:04~14:12	10.13	609	低压前部	100	224(137)	0.022(0.014)	4.79(2.11)	2.95(0.83)	2.00(0.33)
11	3 月 20~21 日	14:46~13:09	22.38	1344	低压前部	60	231(126)	0.114(0.092)	7.10(2.20)	4.80(1.52)	3.28(1.20)
12	3 月 21~22 日	14:00~6:39	16.65	1000	冷锋影响	60	323(162)	0.056(0.105)	5.60(1.97)	3.64(1.19)	2.42(0.69)

注：表中给出了数浓度 N 、液态水含量 LWC 、有效半径 r_e 、体积半径 r_v 和算数平均半径 $\bar{r}$ 的平均值和标准差（括号内）。

日。对海雾形成时的天气形势进行归纳总结,发现冷锋影响型所占比例最高,三个时间段内的雾过程(个例 1~6、个例 7~9 和个例 10~12)的结束与冷空气南下有关,例如个例 12 中,21 日 20:00(北京时间, BT, 下同)锋面逼近湛江市,22 日 08:00 冷锋锋面南压入海,雾过程完全结束。通过对 12 次雾过程中风廓线和虚温廓线的观测发现,受低压天气系统影响的个例 11 雾过程中逆虚温出现频次最多,且持续时间最长。12 次过程中高空风向具有类似的特点,即上层吹偏南风、中下层吹偏东风。有冷锋过境时中下层偏北风会增加,且垂直速度负速度区域增加,地面偏北风频次增加,高空逆虚温较少。1000 m 以下风速急流主要发生在傍晚至凌晨。

同时表中给出了 12 次雾过程中最低能见度、持续时间和基本的微物理特征量。均压场或鞍形场、低压前部型和高压后部型海雾过程持续时间较长,冷锋影响型时间最短。高压后部型、均压场或鞍形场型和冷锋影响型的雾滴数浓度(N)、平均半径($\bar{r}$)和液态水含量(LWC)比较高。 N 平均值的变化范围为 $170\sim372\text{ cm}^{-3}$, LWC 为 $0.018\sim0.170\text{ g m}^{-3}$, 平均半径为 $1.71\sim3.28\text{ }\mu\text{m}$ 。相同天气形势下的雾过程微物理特征量量值接近,但也存在一些差异,如个例 9 中 LWC 值很高。为研究典型天气形势下海雾宏微观特征的变化及之间可能存在的联系,选取了持续时间最长的一次过程(个例 11)进行分析。

表 2 给出了 12 次雾过程中气压、气温、风速和风向的变化范围和平均值。可以看出,平均风速基本在 3 m s^{-1} 以下,与林晓能和宋萍萍(1990)在南海观测到的风速基本相当。过大的风速容易造成强的乱流使海雾抬升为低云,过弱则不利于与暖湿空气的输送和热交换冷却。地面风向主要是以偏东、偏南风为主,除个例 6、9、10 外,其余几次雾过程偏东偏南风均占 60%以上,个例 12 以偏东风为主,但在雾过程即将消散时偏北风加剧。除去 2 个气温缺测的过程,其余过程中平均气温均在 20°C 左右,且最低气温大于 17°C 。春季海面的温度一般较低,两者之间的温度差易导致气团冷却饱和,从而造成海雾的出现。

3.2 个例分析

3.2.1 天气形势分析

个例 11 过程的发生时间为 2011 年 3 月 20 日 14:46 至 3 月 21 日 13:09。500 hPa 环流形势为纬向型,西风槽较为活跃,湛江地区主要受短波槽影响,上空含有丰富水汽的西南气流较为强盛。20 日 08 时暖温度脊逐渐东移,并控制华南,受西南偏西的暖湿气流影响,副高逐渐东移减弱。850 hPa 切变线在云贵一带,逐渐南压,广东湛江主要受切变线南侧的西南暖湿气流影响。海平面气压场,我国西南地区或中南半岛有一低压,低压前部为偏南、偏东流场。地面与高空流场的综合作用,使得海上的暖湿气流不断地输入到华南沿海地区,出现了本次雾过程。

表 2 12 次雾过程中气象要素变化范围和平均值
Table 2 The variation ranges and average values of meteorological elements for 12 cases

个例序号	气压 (hPa)	$T_s(^{\circ}\text{C})$	风速(m s^{-1})	风向
1	1013.4~1015.6 (1014.6)	/	0.8~3.5 (1.8)	$12^{\circ}\sim105^{\circ}$ (61.2°)
2	1011.1~1015.3 (1012.9)	/	0.6~6.3 (3.4)	$39^{\circ}\sim105^{\circ}$ (84.7°)
3	1011.3~1017.1 (1014.3)	19.0~24.3 (20.4)	1.8~7.4 (4.4)	$58^{\circ}\sim95^{\circ}$ (77.9°)
4	1011.8~1013.6 (1012.7)	18.4~20.2 (19.3)	0.8~4.7 (2.3)	$39^{\circ}\sim117^{\circ}$ (87.9°)
5	1010.3~1011.9 (1011.1)	18.0~22.5 (19.3)	1.0~3.7 (2.4)	$33^{\circ}\sim130^{\circ}$ (93.4°)
6	1011.3~1015.5 (1012.6)	17.2~20.4 (18.7)	0.0~3.3 (1.7)	$9^{\circ}\sim148^{\circ}$ (46.8°)
7	1013.6~1015.4 (1014.4)	18.9~20.6 (19.6)	0.0~2.7 (1.5)	$15^{\circ}\sim167^{\circ}$ (79.4°)
8	1010.7~1015.0 (1012.3)	20.2~22.6 (21.4)	0.7~4.7 (2.3)	$21^{\circ}\sim133^{\circ}$ (90.5°)
9	1013.1~1015.9 (1014.1)	19.5~21.2 (20.2)	0.0~2.5 (1.1)	$10^{\circ}\sim164^{\circ}$ (73.4°)
10	1008.3~1011.5 (1010.4)	18.1~21.1 (19.6)	0.0~2.2 (1.1)	$14^{\circ}\sim151^{\circ}$ (49.8°)
11	1006.4~1010.9 (1008.3)	19.9~26.1 (22.2)	0.0~3.3 (1.5)	$14^{\circ}\sim155^{\circ}$ (70.3°)
12	1007.4~1013.1 (1009.7)	20.8~25.6 (23.3)	1.0~4.5 (2.9)	$18^{\circ}\sim104^{\circ}$ (70.1°)

3.2.2 边界层特征分析

边界层内的温度场、风场、湿度场相互影响、相互制约，共同导致了雾的生消(陆春松等, 2008)。虚温是指在气压相等的情况下，具有和湿空气相等密度时的干空气具有的温度。其变化趋势可以大致反映温度的变化，表达式为 $T_v = (1 + 0.608q)T_s$ ， q 为比湿， T_s 为空气温度。逆温是雾出现和维持的一个重要条件(宋润田和金永利, 2001；何晖等, 2009)，但统计结果也显示有 28%左右的雾出现在没有明显逆温的条件下(Beardsley, 1976)。大连地区观测发现平流雾的逆温为弱的逆温或无逆温，辐射雾逆温厚而强(程相坤和蔡冬梅, 2010)。由图 1a 可以看出，从 20 日 13:06 左右开始出现虚温随高度增加递增，逆虚温现象持续到 21 日 14:05 左右结束，整个过程都处在逆虚温的影响下，逆虚温的长时间维持有利于雾体的稳定发展，而当雾层较薄时，没有逆虚温出现。

图 1b, c 为高空水平风速和风向随高度的变化。在 20 日 18:00~23:00，400~800 m 左右急流区稳定维持，最大值出现在 20:00~23:00，风速达 $15\sim18\text{ m s}^{-1}$ 。21 日 01:00 开始高空风速减小，在 10:00~12:00 左右 1300 m 高度以下风速都较小，基本在 4 m s^{-1} 以下。通过风向分析发现，200 m 以下以偏东风为主，与地面观测到的风向一致，中、高层以偏南风为主，偏东和偏南气流均来自于海洋，

为东海岛带来充足的暖湿水汽。垂直风速随高度变化如图 1d 所示，垂直风速以正速度(向下的垂直气流)为主，正速度的最大值为 0.9 m s^{-1} ，而负速度(向上的垂直气流)则仅短时间、小范围的出现，且主要在中、低空，最大值为 -0.3 m s^{-1} 左右。

研究海雾发生过程中近地面各气象要素随时间的变化对研究海雾的生消有重要作用(图 2)。个例 11 过程发生在冷锋前，21 日 00 时左右温度开始上升，整个过程平均温度较高；20 日以东北偏东风为主，21 日 03 时左右东南偏东风频次增加，暖湿水汽输送加强，09 时左右转为东北偏北风；风速在 21 日 04 时至 08 时左右时最小，与高空风减弱的时间段相近。气象要素变化对微物理特征量演变的影响将在 3.2.4 节中进行描述。

3.2.3 微物理特征量演变特征

通过统计东海岛 2011 年个例 11 中各微物理特征量(计算方法详见 Niu et al., 2010a)的平均值 and 变化范围，发现此次过程中的 N 、LWC、平均半径($\bar{r}$)较大。2011 年的观测点与 2010 年在东海岛沿岸的观测点相比，水平距离相差 600 m 左右，海拔高度相差 50 m 左右。由表 3 可以看出个例 11 中各微物理量比 2010 年的大，而 2010 年 3 月 23~24 日雾过程是 2010 年观测中各微物理特征量值比较大的一次过程，2011 年最低能见度(60 m 左右)比 2010 年的(120 m 左右)要低。造成微物理特征

表 3 湛江东海岛海雾微物理特征量平均值以及与其他沿海地区的比较
Table 3 The comparison of sea fog microphysical parameters among Donghai Island, Zhanjiang and other areas

观测地点	观测时间	观测仪器	LWC (g m^{-3})	N (cm^{-3})	$\bar{r}$ (μm)	r_{max} (μm)	r_p (μm)
广东东海岛雷达站	2011 年 3 月 20~21 日	FM-100 雾滴谱仪	0.114 (0.001~0.594)	231 (147~616)	3.3 (1.5~6.8)	18.4 (4.5~24.5)	1.6 (1.4~8.5)
广东东海岛岸边 ^[a]	2010 年 3 月 23~24 日	FM-100 雾滴谱仪	0.024 (0.001~0.205)	57 (0.2~402)	2.3 (1.4~13.0)	13.4 (1.4~24.5)	1.4 (1.4~12.3)
广东茂名 ^[b,c]	2007 年 3~4 月	三用滴谱仪	0.018 (0.002~0.181)	57 (17~112)	2.4 (1.6~7.7)	12.7 (6.7~28.1)	1.5 (1.4~2.7)
	2008 年 3 月 16~19 日	FM-100 雾滴谱仪	0.069 (0.010~0.335)	288 (15~423)	1.7 (1.1~3.4)	21.8 (13.8~24.5)	1.5 (0.5~1.5)
浙江舟山 ^[d]	1985 年 4~5 月	三用滴谱仪	0.110 (/~0.498)	37 (8~122)	11.1 (8.9~13.9)	29.8 (7.2~/)	10.0 (0.8~20.1)
山东青岛 ^[e]	1993 年 6~7 月	三用滴谱仪	0.106 (0.001~0.199)	82 (5~249)	2.3 (2.0~2.5)		
加拿大新斯科舍 ^[f]	1975 年 8 月 2 日	/	0.030	78($D>4\mu\text{m}$)	4.1		
美国加利福尼亚沿岸 ^[g]	1974 年 7 月 20~21 日	云滴取样器	0.052	145	3.1		
美国马萨诸塞州科德角 ^[h]	1980 年 7 月	PMS 前向散射探头	0.079 (0.050~0.148)	415 (124~722)	4.7 (3.1~7.3)		

注：① LWC 为液态水含量， N 为雾滴数浓度， $\bar{r}$ 为平均半径， r_{max} 为最大半径， r_p 为峰值半径， D 为平均直径；括号内的数字为最小值和最大值，“/”表示不确定值或因素。② a-h 分别为引文徐峰(2011)、黄辉军等(2009)、黄辉军等(2010)、杨中秋等(1989)、徐静琦等(1994)、Fitzgerald(1978)、Goodman(1977)、Kunkel(1984)。

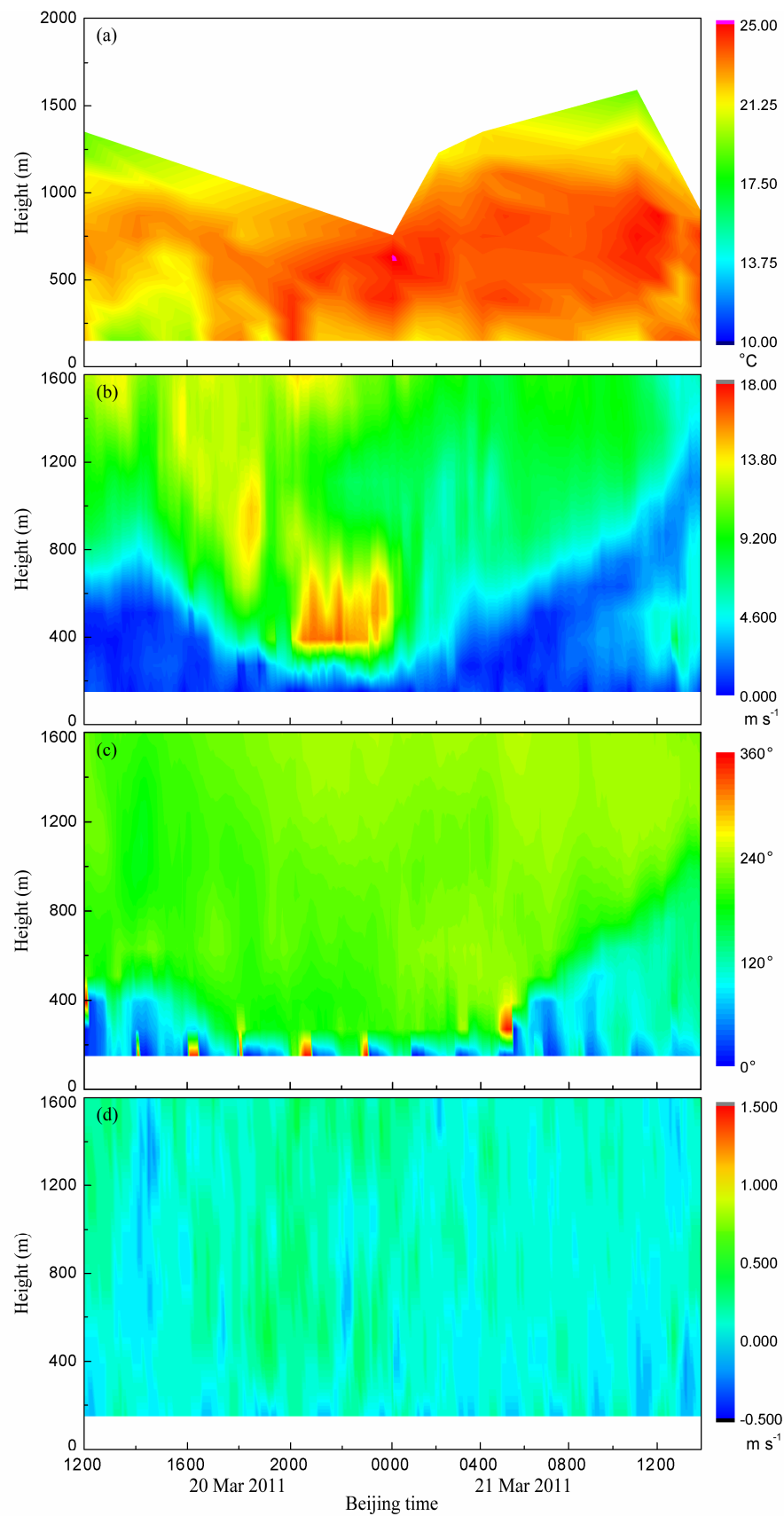


图1 边界层内 (a) 虚温、(b) 水平风速、(c) 水平风向、(d) 垂直风速随高度的变化

Fig. 1 The vertical distribution of (a) virtual temperature, (b) horizontal wind velocity, (c) horizontal wind direction, (d) vertical velocity

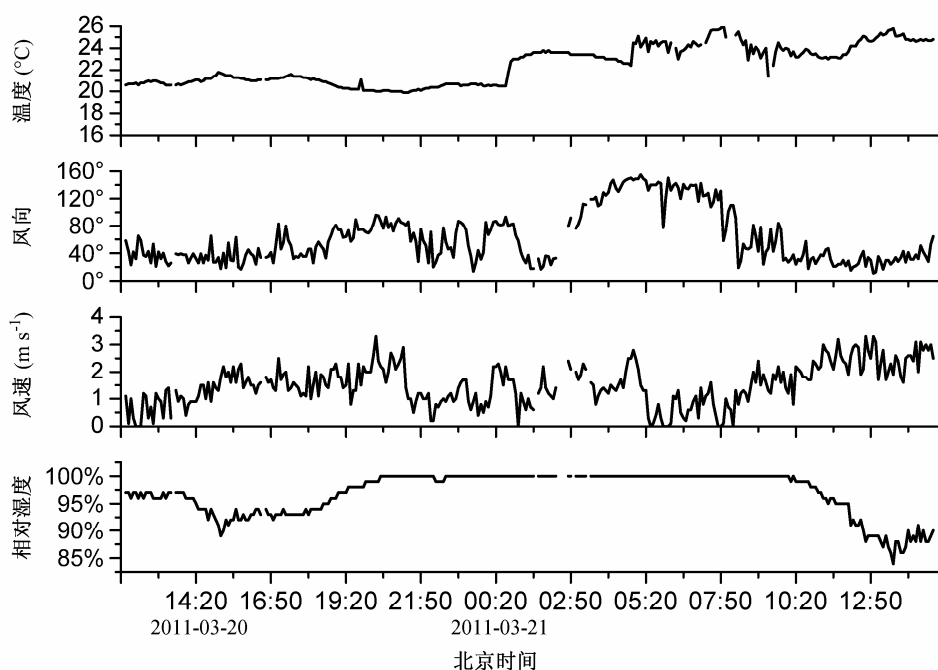


图2 个例 11 中各气象要素(温度、风向、风速和相对湿度)随时间的变化

Fig. 2 The temporal variations of meteorological elements (temperature, wind direction, wind speed, and relative humidity)

量偏大的原因可能是地形和高度的影响, 雷达站位于一个斜坡顶, 气流爬坡时抬升冷却有利于雾滴活化并凝结增长(唐浩华等, 2002), 且观测点海拔高度较 2010 年高, 滴谱特征量会随着高度而增大 (Goodman, 1977)。茂名市和湛江市是紧邻的两个市, 黄辉军等 (2009, 2010) 通过在茂名两年的观测发现, 不同的观测仪器也会对结果产生影响。2011 年观测到的雾滴数浓度与广东茂名 2008 年的观测结果相近。舟山雾滴最大半径为 $29.8 \mu\text{m}$; 马萨诸塞州科德角的数浓度为 415 cm^{-3} , 与其他地区的结果存在明显差异, 这可能与所用仪器不同有关。国内(除舟山)与国外的观测结果相比较, LWC、 N 和 $\bar{r}$ 平均值相近。

进一步分析微物理特征量的演变特征, 图 3 中给出了能见度、液态水含量 (LWC)、数浓度 (N)、平均半径 ($\bar{r}$)、有效半径 (r_e) 和自动转化阈值 (T) 随时间的变化曲线。此次雾过程最低能见度低于 100 m, 属于浓雾过程 ($50 \text{ m} < \text{能见度} < 500 \text{ m}$)。

发展初期以核化和凝结增长为主, N 与 $\bar{r}$ 及 LWC 与 N 之间呈正相关 (如图 4), 表明在充足水汽的供应下, 受核化凝结的影响, 会出现更多、更大的雾滴。在雾的成熟阶段出现了 4 次 LWC 的振荡变化, 第 1、2 次的 LWC 振荡期, 最大值在 0.1 g m^{-3} 左右, 各物理量之间的相关关系较差。这一阶

段中随着 N 迅速增加, $\bar{r}$ 变化不大, 两者呈弱的负相关, 这说明此时小滴争食水分导致大滴生长受限, 与黄玉生等 (2000) 和唐浩华等 (2002) 在分析中提出的观点“当核化和凝结占主导时, 小滴数会大量增加, 数浓度增加, 平均直径减小”类似。因此这一阶段仍以核化凝结增长为主。21 日 00:00 左右出现了第 3 次 LWC 振荡, 振荡期间碰并效率增加, LWC 达到了最大值 0.6 g m^{-3} 。在第 3 次 LWC 振荡期间, 出现了 N 略有下降, $\bar{r}$ 和 LWC 增加的现象, 这一阶段中 $\bar{r}$ 与 N 负相关显著, 说明在雾发展成熟阶段, 大雾滴碰并小雾滴, 消耗大量小滴, 导致雾滴 N 下降。第 4 次 LWC 振荡期间, N 变化较小, LWC 与 $\bar{r}$ 先增加后减小, 三者的相关性较差。这一阶段雾滴凝结核通过活化和凝结生长对雾滴进行补充的过程增强, 所以总雾滴数基本不变 (Niu et al., 2010a)。雾的成熟阶段 LWC 等微物理特征量的起伏变化, 除了与雾体本身发展有关, 受平流因素的影响也较大 (邓雪娇等, 2002), 东海岛岸边雾从海上平移而来, 有团雾特点, 同时在移动的过程中, 受海陆不同下垫面、海风强度、风向转变等因素的影响都会使特征量出现起伏变化。Eldridge (1971) 指出大滴的增多对 LWC 增加起主要贡献作用, 当雾滴浓度增加主要表现在小滴浓度上时, 液态水含量较低。平均半径的变化趋势与 LWC 的相

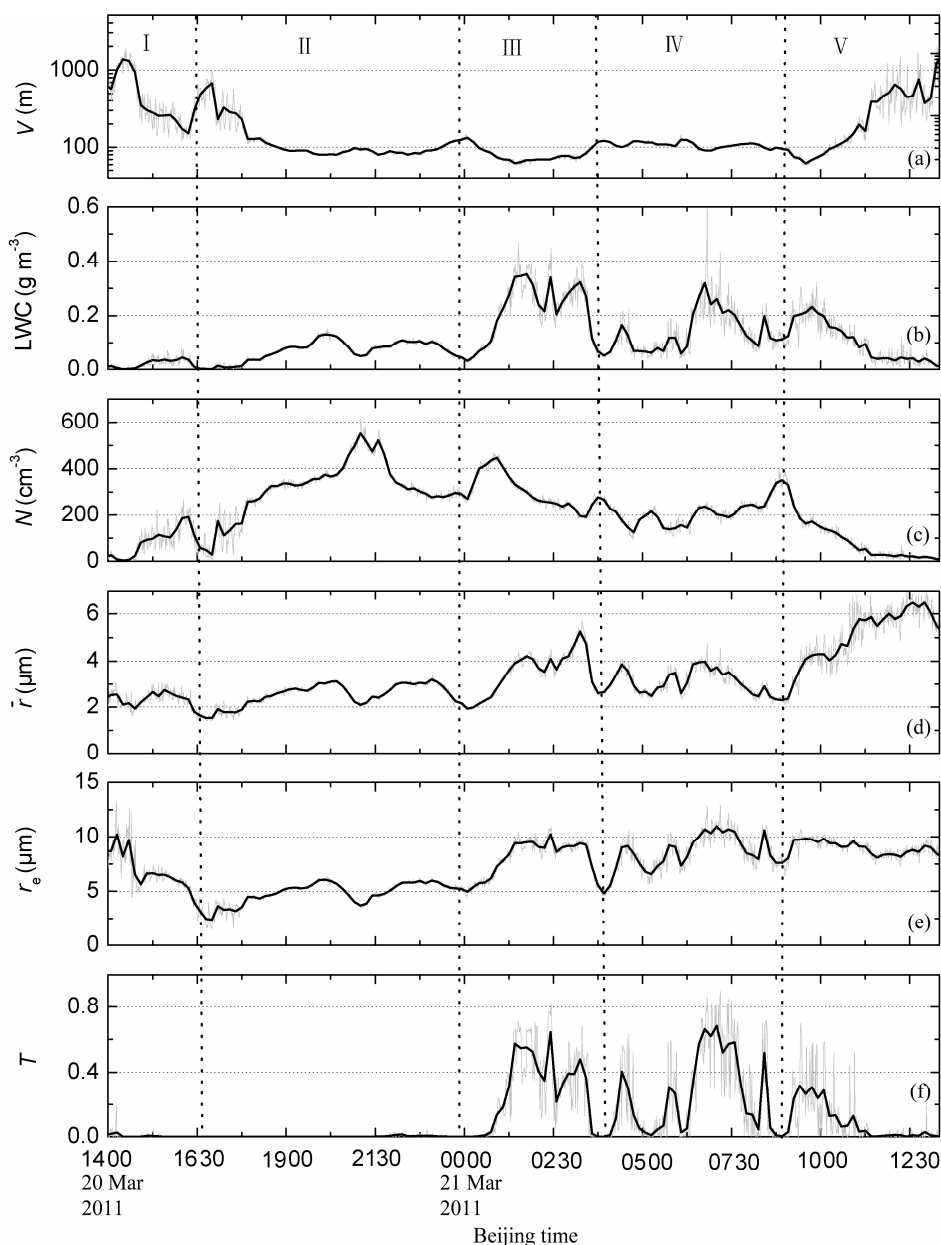


图3 各物理量随时间的变化: (a) 能见度 V ; (b) 含水量 LWC ; (c) 数浓度 N ; (d) 平均半径 $\bar{r}$; (e) 有效半径 r_e ; (f) 自动转化阈值 T 。灰线与黑实线分别表示 1 min 与 10 min 平均值。I: 发展初期; II: 第 1、2 次 LWC 振荡; III: 第 3 次 LWC 振荡; IV: 第 4 次 LWC 振荡; V: 消散阶段

Fig. 3 The temporal variations of physical parameters. (a–f) represent the visibility V , liquid water content, number concentration N , average radius $\bar{r}$, effective radius r_e , threshold function T , respectively. The gray line and black solid line are 1-min- and 10-min-average values. I Early stage of development; II The first and second LWC oscillation; III The third LWC oscillation; IV The fourth LWC oscillation; V Dissipation stage

似。消散阶段平均半径显著增长,并在完全消散前达到最大值 $6.8 \mu\text{m}$ 。在这一阶段峰值半径向大滴端拓展,变化范围为 $1.4 \sim 8.5 \mu\text{m}$ 。虽然这一阶段雾滴数浓度很低, LWC 不高,但由于雾滴主要集中在大滴端,平均半径增长。

为研究过程中出现的 LWC 迅速增长,数浓度下降的现象,引入自动转化阈值 T 来分析收集效率。Kessler (1969) 提出了一个参数将自动转化速

率与云水含量联系起来,当云水含量低于某一阈值时自动转化不会发生。自动转化方程一般都被写作 $P=P_0T$, P 是自动转化率; P_0 代表在一系列自动转化过程后的转化速度。 T 为自动转化阈值,可用来表示自动转化过程的临界状态。根据 Liu et al. (2005, 2006a), 阈值方程一般描述为:

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

其中, r 是滴的半径, r_c 是自动转化的临界半径。

Liu et al. (2004) 推导了一个关于 r_c 的表达式:

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

其中 $\beta_{\text{con}} = 1.15 \times 10^{23}$ 是经验系数。 T 的变化范围是 $0 \sim 1$, T 值越大表明收集效率越高。 Niu et al.

(2010a) 利用该参数检验了南京雾的收集效率, 证实了一些学者针对雾中偶尔会发生毛毛雨的论述。

由图 3 可以看出, 在个例 11 中 01:20 左右 T 迅速增大到 0.7 左右, 收集效率很高, 有利于大滴的形成, 大滴对 LWC 的贡献明显, 所以 LWC 显著上升。同时由于碰并小雾滴, 雾滴数浓度下降。

3.2.4 边界层特征对海雾微结构的影响

微物理特征量之间不仅会互相影响, 也会受到宏观过程的作用 (屈凤秋等, 2008)。通过结合风廓线雷达资料和地面气象要素的观测资料, 综合讨论了海雾发生期间宏微观物理量可能存在的内在联系。由地面和高空气象要素变化 (表 2 和图 1) 可以看出, 3 月 20 日 18:00~23:00 风速急流显著时, 边界层不稳定, 不利于雾的维持, 产生的大雾滴少, 此时虽然能见度很低, 但 LWC 仅有 0.1 g m^{-3} 左右 (图 3)。能见度低可能是因雾中小滴数量比较多, 小雾滴的消光作用明显 (Eldridge, 1971)。3 月 21 日 01:20 左右 T 增大时, LWC 出现跃增, 此时风速急流消失, 整层风速下降。09:00 左右, 即平均半径开始增长时, 近地面的风向出现由东南风向东北风的急转, 且风速有所增加, 相对湿度开始下降 (图 2), 雾滴由于相对湿度的减少, 蒸发过程加剧, 尤其是小雾滴的数浓度减少迅速, 总雾滴数浓度相应减少。此时的风向转变造成气团来源的变化, 促使雾滴凝结核来源变化, 雾滴浓度取决于雾滴凝结核谱 (Hudson, 1980), 对微物理特征产生影响, 这可能也是导致此时出现少量大滴, 但 N 、LWC 很小的原因。1600 m 以下风速较小, 基本在 $4 \sim 6 \text{ m s}^{-1}$ 以下, 且逆温最显著, 整层空气比较稳定。在稳定大气层结下, 雾滴生长形成的大滴不会因强烈的大气垂直运动、湍流输送等原因消散, 有利于维持其存在。这一阶段中能能见度存在明显起伏, 特别是消散前 1 小时内出现了在两分钟内能见度由 310 m—1140 m—400 m 变化的现象, 由此看出雾团的不均匀性。在对中东部地区雾的观测模拟中发现雾的水平分布很不均匀, 下垫面对雾区的不均匀产生影响 (胡朝霞等, 2011)。

3.2.5 雾滴谱分布特征

雾滴谱是表征雾微物理结构的一个重要特征量, 其分布特征是各种复杂过程综合作用的结果。舟山地区 (杨中秋等, 1989) 的雾滴谱分布满足 Deirmendjian 分布, 而茂名 (黄辉军等, 2009) 的符合 Junge 分布。刘延刚 (1991) 引入两个统计学参数偏度 S (Skewness) 和峰度 K (Kurtosis) 来分析滴谱的实际分布特征, 并将其运用到雾滴谱谱型的拟合分析中。偏度与峰度的计算公式如下:

$$S = \frac{\int (D - \bar{D})^3 \frac{N(D)}{N} dD}{\left[\int (D - \bar{D})^2 \frac{N(D)}{N} dD \right]^{3/2}}, \quad (3)$$

$$K = \frac{\int (D - \bar{D})^4 \frac{N(D)}{N} dD}{\left[\int (D - \bar{D})^2 \frac{N(D)}{N} dD \right]^2} - 3, \quad (4)$$

其中, N 为总数浓度, S 为偏度, K 为峰度。当 $S = K = 0$ 时, 滴谱为正态分布。 $S > 0$ 时, 呈正偏分布; $S < 0$ 时, 呈负偏分布。 K 的大小反映了分布在峰值附近的集中程度, $K > 0$ 时, 呈尖峰态分布; $K < 0$ 时, 呈低峰态分布。Gamma 分布的偏度和峰度如下: $S = 2/\sqrt{1+\mu}$ 和 $K = 6/\sqrt{1+\mu}$ 。M-P 分布是 Gamma 分布在 $\mu = 0$ 时的特例, 以 M-P 分布的偏度和峰度为基准引入偏度偏离系数 C_S 和峰度偏离系数 C_K , 定义如下: $C_S = S^2/4$, $C_K = K/6$, 对于 Gamma 分布而言, 关系式 $C_S = C_K$ 成立, 可通过计算实际谱的 C_S 和 C_K 来验证实际谱是否可用 Gamma 谱拟合。

利用此次雾过程中的雾滴数浓度和直径计算 C_S 和 C_K , 并绘制点聚图 5。 C_S 和 C_K 散点分别主要集中在 $0 \sim 20$, 当 $C_S = C_K = 1$ 时雾滴谱符合 M-P 分布, 由图可以看出满足这一特殊情况的点相对较少, 即更多的瞬时谱符合 Gamma 分布。在点聚图中存在偏离 $y=x$ 的点, 可能与截断谱有关, 因为公式推导是 $0 \sim \infty$ 的条件下进行的, 而实际谱是存在上界和下界的 (刘延刚, 1991)。

对个例 11 不同阶段的滴谱分布进行讨论 (图 6), 发现滴谱分布呈双峰型, 初期和消散阶段滴谱偏窄。发展初期 (21 日 14:46~16:30), 各微物理特征量之间呈正相关 (图 4), 主要以核化凝结增长为主, 小滴端数密度 (N') 增加, 半径增大, 但仅靠凝结增长过程雾滴的生长缓慢, 对产生大滴贡献比较小, 滴谱较窄。第 1、2 次 LWC 振荡时期 (21 日 16:30~23:30 左右), 小滴大量增加, 第一档雾滴数密度为五个阶段中最高的, 但由于水汽不足, 滴的

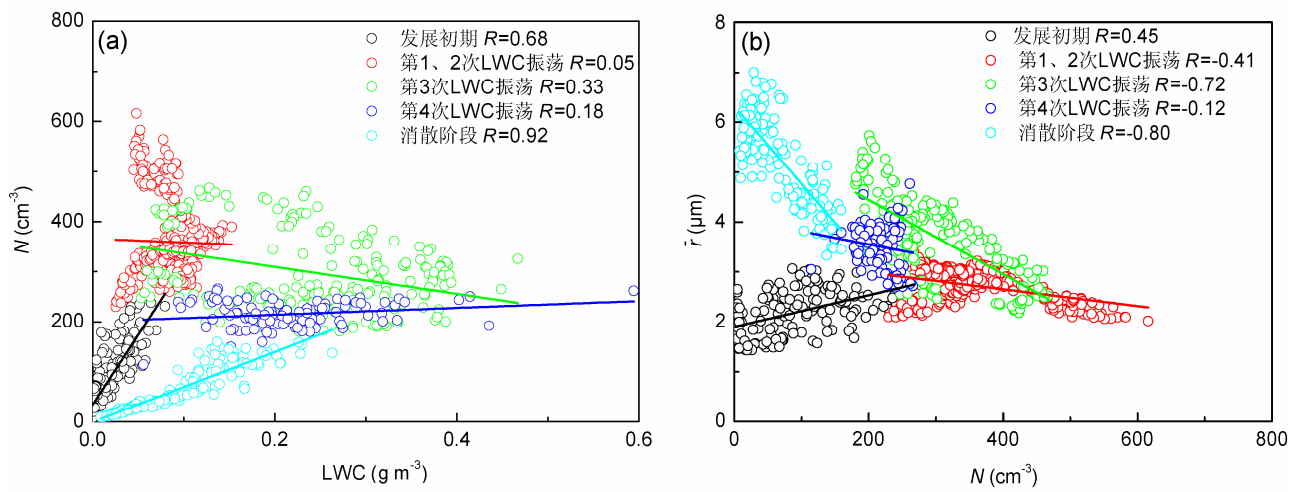


图4 个例11不同阶段微物理特征量之间的关系: (a) N 与LWC的关系; (b) N 与 $\bar{r}$ 的关系

Fig. 4 The relationships between different microphysical properties in Case 11: (a) N and LWC; (b) N and $\bar{r}$

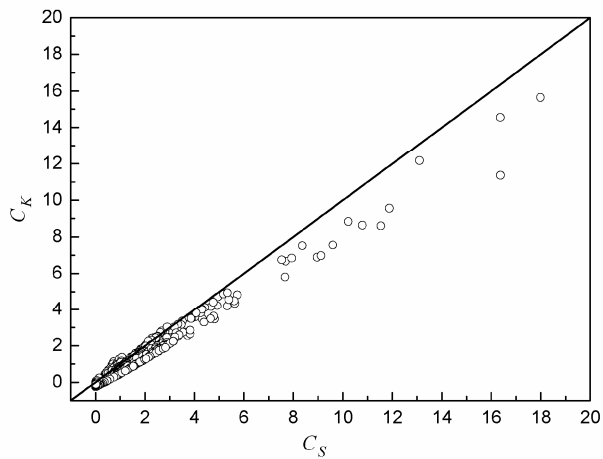


图5 个例11中 C_S 与 C_K 的关系

Fig. 5 The relationship between C_S and C_K in Case 11

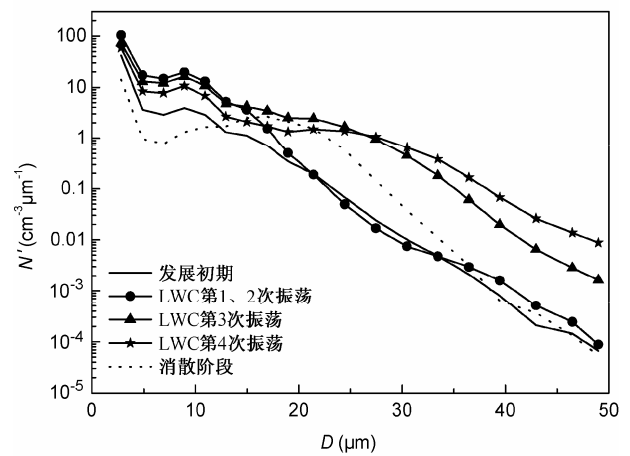


图6 个例11过程中不同阶段雾滴谱特征

Fig. 6 The average spectra in different stages of Case 11

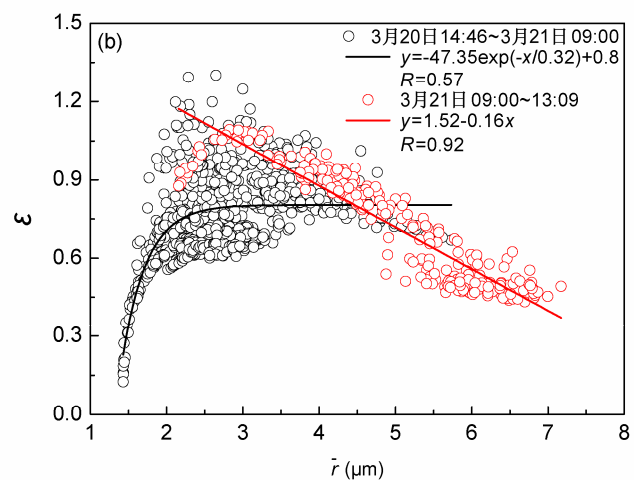
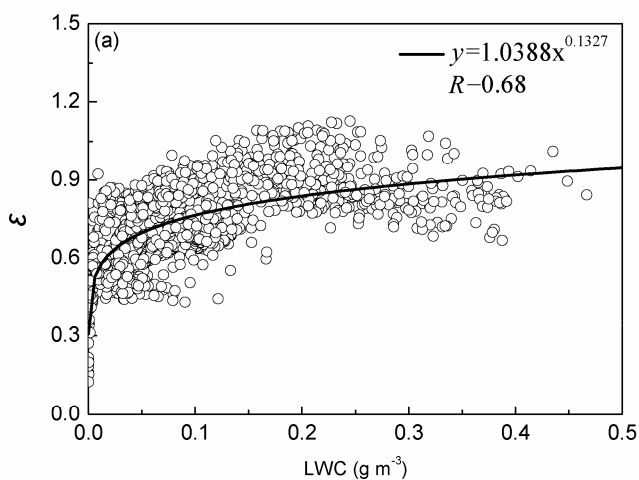


图7 (a) 散度 ϵ 与LWC的关系; (b) 散度 ϵ 与平均半径 $\bar{r}$ 的关系

Fig. 7 (a) The relationship between ϵ and LWC; (b) the relationship between ϵ and $\bar{r}$

生长受限, 大滴数密度不高。第 3、4 次 LWC 振荡时期 (21 日 23:30 至 22 日 09:00 左右), 碰并效应明显增强, LWC 和大滴端 ($D > 15 \mu\text{m}$) 的雾滴数密度明显增加, 与其他阶段相比数密度大 1~2 个数量级, 滴谱拓宽。消散阶段 (22 日 09:00~13:00 左右) 小滴和大滴数密度均减少, 但与发展初期和第 1、2 次 LWC 振荡期相比, 雾滴直径在 16~35 μm 左右时数密度偏大。利用 Gamma 分布对整个雾过程的平均谱和不同发展阶段的平均谱进行拟合, 拟合公式为: $N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D)$ 。由表 4 Gamma 分布拟合参数可以看出, 在发展初期 N_0 、 μ 、 λ 三个参数值较其他阶段都比较大, 第 1、2 次 LWC 振荡时期 N_0 值也比较大, 可见核化凝结过程产生的大量小雾滴对 N_0 值的影响比较明显。在 LWC 振荡变化时期, 参数 μ 、 λ 比较小。拟合的相关系数随着雾的发展有所下降, 由于小雾滴的数浓度最大, 影响到 Gamma 分布对大雾滴的拟合效果, 因而在消散阶段出现小雾滴相对较少, 粒径 20 μm 左右雾滴增多的情况时拟合相关系数下降。

表 4 不同发展阶段 Gamma 分布拟合参数

Table 4 The fitting parameters of Gamma distribution function in different stages

不同阶段	拟合参数			相关系数 R
	N_0	μ	λ	
发展初期	2258	-4.28	-0.16	0.99
第 1、2 次 LWC 振荡	1314	-2.63	-0.06	0.98
第 3 次 LWC 振荡	688	-2.33	-0.06	0.97
第 4 次 LWC 振荡	878	-2.85	-0.09	0.98
消散阶段	307	-3.33	-0.13	0.92
整个过程平均谱	1137	-2.94	-0.09	0.98

Liu et al. (2006b) 指出滴谱的散度也是云滴分布研究中一个重要的物理量。定义散度 ε 为直径的标准差比平均值:

$$\varepsilon = \frac{\left[\int (D - \bar{D})^2 \frac{N(D)}{N} dD \right]^{1/2}}{\int D \frac{N(D)}{N} dD} \quad (5)$$

散度可以用来表征滴谱各档直径与平均直径的离散程度, 也可以描述滴谱宽。

由图 7a 可以看出散度与 LWC 的变化趋势基本一致, 且散度基本上都在 1 以下。当 $\text{LWC} < 0.1 \text{ g m}^{-3}$ 时, 随 LWC 增大散度增大, 即雾滴凝结增长, 产生的大滴增多, 液水含量增多, 此时雾滴数浓度和

平均半径增大, 雾滴半径偏离平均半径的程度增大。散度与平均半径的关系也基本上是正相关 (图 7b), 特别当 $\bar{r}$ 小于 2.7 μm 左右时, ε 随 $\bar{r}$ 增大。 $\bar{r}$ 小于 2.7 μm 的雾滴基本都出现在发展初期和第 1、2 次 LWC 振荡时期 (图 4b), 这两个阶段大滴端数密度不高 (图 6)。当 $\bar{r}$ 大于 2.7 μm 时, ε 随 $\bar{r}$ 的变化有两种情况, 一是维持在高值附近小幅振荡, 二是随 $\bar{r}$ 增大而减小。第 3、4 次 LWC 振荡时期, ε 维持在高值附近。一般情况下 ε 值比较大, 滴谱分布比较宽, 大滴数密度较高。21 日 09:00~13:09, ε 与 $\bar{r}$ 出现负相关。这一阶段雾滴 $\bar{r}$ 迅速增长, 在 12:30 左右达到了最大值。此时 LWC、 N 都较小, ε 减少, 说明此时雾滴较少且以大滴为主, 集中在平均半径附近, 偏离程度小, 但由于雾滴数浓度很少, 所以 LWC 较小。

3.2.6 光学特性参数化

研究微物理量与光学特性 (消光系数、有效半径) 的联系, 不仅为能见度参数化提供依据, 而且能为模式中辐射方案的改进提供帮助 (Dickson and Hales, 1963; Tomasi and Tampieri, 1976)。利用在东海岛观测到的雾微物理特征与能见度资料, 建立两者之间的关系, 将有利于进一步研究该地区雾的能见度参数化和辐射特性等。

能见度与消光系数的计算公式如下:

$$V = -\frac{\ln \alpha}{\beta} \quad (6)$$

$$\beta = \pi \sum_{i=1}^K Q_{\text{ext}} n_i(r_i) r_i^2 \quad (7)$$

α 对比视感阈值, 是指当亮度对比值减小到目标物不能见时的亮度对比值, 通常等于 0.02; β 消光系数, 单位 km^{-1} ; Q_{ext} 是与数浓度、半径及可见光波长有关的米散射系数; r_i 为第 i 档雾滴半径; $n_i(r_i)$ 为半径 r_i 处的雾滴数浓度,

$$Q_{\text{ext}} = 2 - \frac{4}{\rho} \sin \rho + \left(\frac{2}{\rho} \right)^2 (1 - \cos \rho) \quad (8)$$

其中 $\rho = 2x(m-1)$; $x = 2\pi r / \lambda$ 。对于水滴 $m = 4/3$, λ 通常被认为等于 0.5 μ , r 为半径。因为 LWC 与 $\sum n_i r_i^3$ 有关, 所以消光系数与 LWC 之间也存在一个关系。在早期的研究中试图确定一个消光系数和 LWC 之间的指数关系 (Pinnick et al., 1979; Kunkel, 1984),

$$\beta = a \text{LWC}^b \quad (9)$$

a 和 b 是经验常数, LWC 单位为 g m^{-3} 。图 8 建立

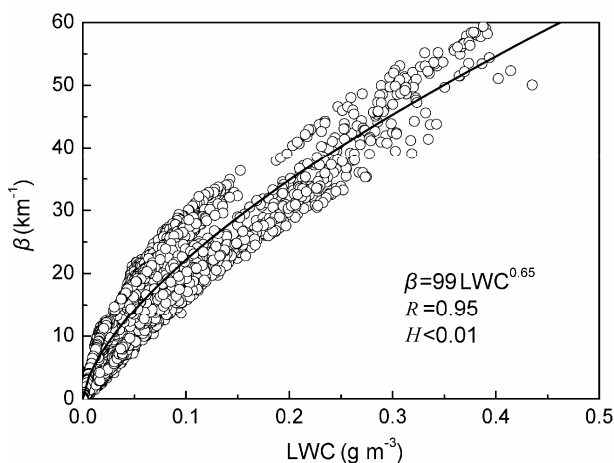
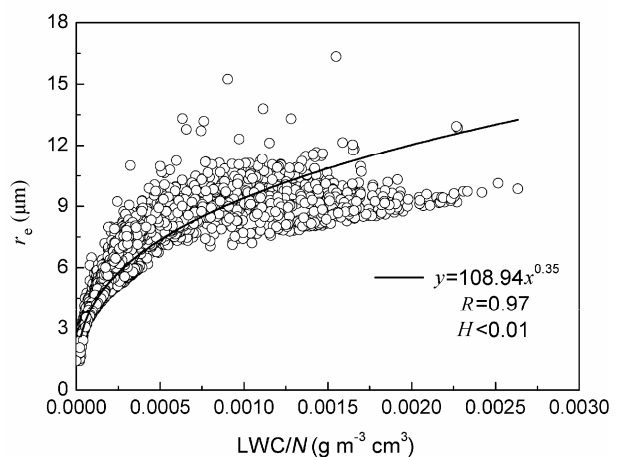


图 8 LWC 与消光系数之间的相关关系

Fig. 8 The relationship between LWC and β 图 9 r_c 与 LWC/N 之间的关系Fig. 9 The relationship between r_c and LWC/N

了东海岛海雾 LWC 与消光系数之间的关系, 拟合参数 $a = 99$, $b = 0.65$, $H < 0.01$ 表示通过了 0.01 的显著性检验。在不同的研究中 a , b 的值不同, 根据 Gultepe et al. (2007b) 的研究, 给出了一个变化范围 $65 \leq a \leq 178$, $0.63 \leq b \leq 0.96$ 。同时, 在 LWC 一定的情况, 雾的消光系数还受到雾纯净程度的影响, 污染的雾中较高的雾滴数浓度会导致更高的消光系数 (Kunkel, 1984)。

在气候模式中云滴有效半径是计算辐射特性的一个很重要的参量, 在清洁的海洋大气中, 典型云微物理特征可以反映雾的微物理特征 (Hudson, 1980)。许多学者通过外场的观测试验建立了云滴有效半径与 LWC、 N 之间的回归关系, 指出它们之间存在一个 $1/3$ 指数定律, $r_c = \alpha (LWC/N)^{1/3}$ (Gultepe et al., 1996; Reid et al., 1999)。同时 Pontikis and Hicks (1992) 及 Liu and Hallett (1997) 还提出了计算参数 α 的方法。因此, 利用公式 $r_c = \alpha (LWC/N)^\beta$ 建立个例 11 雾过程中有效半径与 LWC、 N 之间的关系, 如图 9 所示。该地区建立的关系式为 $r_c = 108.94 (LWC/N)^{0.35}$, 拟合得到的指数 β 近似等于 $1/3$, 符合 $1/3$ 定律。

4 结论

本文利用 2011 年 2~3 月在中国广东湛江东海岛雷达站观测获得的雾滴谱、能见度、风温廓线等资料, 对 12 次雾过程进行分型讨论, 并对个例 11 雾过程中宏微观特征进行重点分析。主要结论如下:

(1) 湛江地区处于低压前部、高压后部、高低

压之间、冷锋前部和均压场等天气形势下时容易出现海雾。高压后部型、均压场或鞍形场型和冷锋影响型雾过程的 N 、平均半径、LWC 较高, 持续时间较长的是均压场或鞍形场型、低压前部型和高压后部型雾过程。12 次过程 N 的变化范围为 $170 \sim 372 \text{ cm}^{-3}$, LWC 为 $0.018 \sim 0.170 \text{ g m}^{-3}$, 平均半径为 $1.71 \sim 3.28 \text{ }\mu\text{m}$ 。统计发现高空风向基本为上层偏南风、中下层偏东风, 地面以偏东风为主; 1000 m 以下风速急流主要出现在傍晚至凌晨时间段; 当冷锋过境时中低空偏北风出现频次增加。

(2) 个例 11 中数浓度、液态水含量、平均半径、最大半径的平均值分别为 231 cm^{-3} 、 0.114 g m^{-3} 、 $3.3 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $18.4 \text{ }\mu\text{m}$ 。在雾发展初期和第 1、2 次 LWC 振荡时期, 雾滴以核化凝结增长为主; 碰并效率在第 3、4 次 LWC 振荡时期明显增大, 导致大滴增多, LWC 增加显著。在雾的消散阶段雾滴平均半径出现了跃增, 并在雾结束时达到最大值。

(3) 结合宏观物理量分析发现, 边界层稳定与否对雾的发展起着重要影响, 20 日 20:00~23:00 左右风速急流显著, 边界层不稳定, 不利于雾滴生长, LWC 处于低值。风向的转变会引起气团来源的变化, 改变雾滴凝结核来源, 对雾的微结构产生影响。21 日风速减弱, 稳定的边界层条件和风向、湿度的转变是导致 LWC 和平均半径跃增可能的原因之一。地形和观测点海拔高度是造成 2011 年微物理特征量与 2010 年相比普遍偏大的重要原因。

(4) 利用峰度和偏度对雾滴谱分布类型进行判断, 发现雾滴瞬时谱更符合 Gamma 分布。雾滴谱呈双峰分布, 成熟阶段碰并增长明显, 大滴增多。

当 $LWC < 0.1 \text{ g m}^{-3}$, $\bar{r} < 2.7 \mu\text{m}$ 时, LWC 、 $\bar{r}$ 与散度之间呈正相关。利用经验公式建立了东海岛地区 LWC 与消光系数、有效半径等参量之间的关系, $\beta = 99LWC^{0.65}$ 、 $r_e = 108.94(LWC/N)^{0.35}$, 为进一步研究该地区雾能见度参数化和辐射特性等奠定了基础。

参考文献 (References)

- 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 Baotang, Shu Jiaxin, Zhu Bingquan. 1995. Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18 (1): 114–118.
- Baronti P, Elzweig S. 1973. A study of droplet spectra in fogs [J]. J. Atmos. Sci., 30: 903–908.
- Beardsley J W. 1976. Fog on the central California coast for 1973: Analysis of trends [D]. M. S. thesis, Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, 114.
- Bott A, Sievers U, Zdunkowski W. 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 47: 2153–2166.
- 程相坤, 蔡冬梅. 2010. 大连地区辐射雾与平流雾边界层温度场及风场对比 [J]. 气象科技, 38 (4): 427–431. Cheng Xiangkun, Cai Dongmei. 2010. Comparison of ABL temperature and wind features between radiative and advective fogs in Dalian [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 38 (4): 427–431.
- 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 Xuejiao, Wu Dui, Ye Yanxiang. 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling mountain region [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (3): 227–236.
- Dickson D R, Hales J V. 1963. Computation of visual range in fog and low clouds [J]. J. Appl. Meteor., 2: 281–285.
- Eldridge R G. 1971. The relationship between visibility and liquid water content in fog [J]. J. Atmos. Sci., 28: 1183–1186.
- Fedorova N, Levit V, Fedorov D. 2008. Fog and stratus formation on the coast of Brazil [J]. Atmospheric Research, 87 (3–4): 268–278.
- Fitzgerald J W. 1978. A numerical model of the formation of droplet spectra in advection fogs at sea and its applicability to fogs off Nova Scotia [J]. J. Atmos. Sci., 35: 1522–1535.
- Gao S H, Lin H, Shen B, et al. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (1): 65–81.
- Goodman J. 1977. The microstructure of California Coastal fog and stratus [J]. J. Appl. Meteor., 16: 1056–1067.
- Gultepe I, Isaac G A, Leaitch W R, et al. 1996. Parameterizations of marine stratus microphysics based on in situ observations: Implications for GCMs [J]. J. Climate, 9: 345–357.
- Gultepe I, Milbrandt J A. 2007a. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM Project [J]. Pure Appl. Geophys., 164: 1161–1178.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007b. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure Appl. Geophys., 164 (6–7): 1121–1159.
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174–1186.
- He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174–1186.
- 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 Zhaoxia, Lei Hengchi, Dong Jianxi, et al. 2011. Characteristic analysis and numerical simulation of a regional warm fog event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 71–84.
- 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 Huijun, Huang Jian, Liu Chunxia, et al. 2009. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming area [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 31 (2): 17–23.
- 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]. 海洋科学, 32 (2): 40–53. Huang Huijun, Huang Jian, Mao Weikang, 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.
- 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 Yusheng, Huang Yuren, Li Zihua, et al. 2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (6): 715–725.
- Hudson J G. 1980. Relationship between fog condensation nuclei and fog microstructure [J]. J. Atmos. Sci., 37: 1854–1867.
- Kessler E. 1969. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation [M]. Boston: American Meteorological Society, 84pp.
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23: 34–41.
- Leipper D F. 1994. Fog on the U. S. West coast: A review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 75 (2): 229–240.
- Lewis J, Koracin D, Rabin R, et al. 2003. Sea fog off the California coast: Viewed in the context of transient weather systems [J]. J. Geophys. Res., 108: 4457, doi: 10.1029/2002JD002833.
- Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T. 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States: A historical essay including outlook [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85: 395–408.
- 林晓能, 宋萍萍. 1990. 南海一次典型海雾过程的特征分析 [J]. 海洋预报, 7 (4): 75–78. Lin Xiaoneng, Song Pingping. 1990. Analysis on the characteristic of a typical sea fog process over South China Sea [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 7 (4): 75–78.
- 刘延刚. 1991. 偏度和峰度在粒子谱研究中的应用 [J]. 气象, 17 (1): 9–14. Liu Yan'gang. 1991. The application of skewness and kurtosis to

- the studies on particle distribution [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 17 (1): 9–14.
- Liu Y G, Hallett J. 1997. The “1/3” power law between effective radius and liquid–water content [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123: 1789–1795.
- 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: L06121, doi: 10.1029/2003GL019117.
- 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: L11811, doi: 10.1029/2005GL022636.
- Liu Y G, Daum P H, McGraw R, et al. 2006a. Generalized threshold function accounting for effect of relative dispersion on threshold behavior of autoconversion process [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L11804, doi: 10.1029/2005GL025500.
- Liu Y G, Daum P H, Yum S S. 2006b. Analytical expression for the relative dispersion of the cloud droplet size distribution [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L02810, doi: 10.1029/2005GL024052.
- 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]. *南京气象学院学报*, 31 (4): 520–529. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2008. An observational study on physical mechanism and boundary layer structure of winter advection fog in Nanjing [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31 (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 Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, 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.
- Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. 2010a. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 27 (6): 1259–1275.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010b. Fog research in China: An overview [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (3): 639–661.
- Pilié R J, Mack E J, Rogers C W, et al. 1979. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California coast [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18 (10): 1275–1286.
- Pinnick R G, Jennings S G, Chýlek P, et al. 1979. Verification of a linear relation between IR extinction, absorption and liquid water content of fogs [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 1577–1586.
- Podzimek J. 1997. Droplet concentration and size distribution in haze and fog [J]. *Studia Geophysica ET Geodaetica*, 41: 277–296.
- Pontikis C, Hicks E. 1992. Contribution to the cloud droplet effective radius parameterization [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 19: 2227–2230.
- 屈凤秋, 刘寿东, 易燕明, 等. 2008. 一次华南海雾过程的观测分析 [J]. *热带气象学报*, 24 (5): 490–496. Qu Fengqiu, Liu Shoudong, Yi Yanming, et al. 2008. The observation and analysis of a sea fog event in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (5): 490–496.
- Reid J S, Hobbs P V, Rangno A L, et al. 1999. Relationships between cloud droplet effective radius, liquid water content, and droplet concentration for warm clouds in Brazil embedded in biomass smoke [J]. *J. Geophys. Res.*, D104: 6145–6153.
- 宋润田, 金永利. 2001. 一次平流雾边界层风场和温度场特征及其逆温控制因子的分析 [J]. *热带气象学报*, 17 (4): 443–451. Song Runtian, Jin Yongli. 2001. Analysis of control factors of temperature inversion of advection fog wind field and characteristics of temperature field [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (4): 443–451.
- Tachibana Y, Iwamoto K, Ogawa H, et al. 2008. Observational study on atmospheric and oceanic boundary-layer structures accompanying the Okhotsk anticyclone under fog and non-fog conditions [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86 (5): 753–771.
- 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 Haohua, Fan Shaojia, Wu Dui, et al. 2002. Research of the microphysical structure and evolution of dense fog over Nanling mountain area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 41 (4): 92–96.
- Tomasi C, Tampieri F. 1976. Features of the proportionality coefficient in the relationship between visibility and liquid water content in haze and fog [J]. *Atmosphere*, 14 (2): 61–76.
- 徐峰. 2011. 南海海雾理化特性及生消机理 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 76. Xu Feng. 2011. Study on physicochemical characteristics of sea fog on the Leizhou Peninsula [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 76.
- 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]. *海洋沼泽通报*, (2): 174–178. Xu Jingqi, Zhang Zheng, Wei Hao. 1994. Measurement and analysis of droplet spectrum and liquid water content of sea fog [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), (2): 174–178.
- 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 Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Biao. 1989. The formation and microphysics of sea fog in spring in Zhoushan area [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 11 (4): 431–438.