

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.

Lü Jing-jing, Niu Sheng-jie, Zhao Li-juan, et al. 2014. Microphysical characteristics of a sea fog influenced by a cold front in Zhanjiang[J]. Trans Atmos Sci, 37(2): 208-215. (in Chinese)

湛江地区一次冷锋型海雾微物理特征

吕晶晶¹, 牛生杰¹, 赵丽娟¹, 张羽², 徐峰³

(1.南京信息工程大学 大气物理学院,江苏 南京 210044;2.湛江市气象局,广东 湛江 524001;
3.广东海洋大学 海洋与气象学院,广东 湛江 524088)

摘要:利用 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日冷锋天气系统影响下湛江海雾综合观测资料,分析了海雾的微物理特征及海雾过程中气溶胶粒子谱的演变特征。结果表明,海雾的生成与风场密切相关,海雾生成和发展与较强的 ESE 气流相联系,而弱的 NE 气流则会促使海雾减弱或消散。湛江海雾的雾滴数浓度为 $10^0 \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$,液态含水量为 $0.001 \sim 0.232 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,雾滴平均半径小于 $10 \mu\text{m}$,雾滴峰值半径多位于 $1.4 \mu\text{m}$ 。海雾雾滴谱分布以单调递减谱为主,谱宽超过 $20 \mu\text{m}$,且雾发展过程中雾滴谱谱宽存在突然增宽和迅速减小的现象。海雾过程中雾滴数浓度的变化主要是由半径小于 $5 \mu\text{m}$ 的雾滴数密度变化引起的。海雾过程对气溶胶粒子的湿清除效果并不显著,雾过程中粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 和大于 $4 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度显著减少,但在雾消散后又迅速恢复到雾发生前的水平。

关键词:海雾;微物理特征;雾滴谱;气溶胶粒子谱

中图分类号:P426 文献标志码:A 文章编号:1674-7097(2014)02-0208-08

Microphysical characteristics of a sea fog influenced by a cold front in Zhanjiang

LÜ Jing-jing¹, NIU Sheng-jie¹, ZHAO Li-juan¹, ZHANG Yu², XU Feng³

(1.School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China; 2.Zhanjiang Meteorological Bureau, Zhanjiang 524001, China;
3.College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Based on the observational data at Zhanjiang from 31 March to 2 April 2010, microphysical characteristics and evolution of aerosol particle size distribution for a sea fog which was influenced by cold front were analyzed. The results showed that the formation and dissipation of sea fogs was closely related to wind field. The formation and development of sea fogs usually occurred in east southeast wind, while weak northeast wind was the main factor to dissipate the persistent sea fog. The variation range of fog droplet number concentration and liquid water content were $10^0 \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$ and $0.001 \sim 0.232 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The mean radius was less than $10 \mu\text{m}$ and the peak radius was mostly near $1.4 \mu\text{m}$. The fog droplet size distribution of the sea fog events was mainly of a monotonically decreasing type with the spectrum width larger than $20 \mu\text{m}$. The fog droplet spectrum width presented abrupt broadening and rapid reducing phases during the sea fog events whereas the change in fog droplet number concentration was mainly caused by the number density variation of fog droplets with radiuses of less than $5 \mu\text{m}$. Sea fogs exerted insignificant wet scavenging effect on aerosols. The number density of aerosol particles with diameters of less than $0.1 \mu\text{m}$ or more than $4 \mu\text{m}$ decreased dramatic-

收稿日期:2012-09-04;改回日期:2013-03-14

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY20070626);国家自然科学基金资助项目(41275151);江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究创新团队”资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者:吕晶晶,博士生,研究方向为云雾降水物理,lvjj@nuist.edu.cn.

ally during sea fogs, but quickly returned to their normal levels before the formation of sea fogs.

Key words: sea fog; microphysical characteristics; fog droplet size distribution; aerosol particle size distribution

0 引言

雾是近地层大气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒,使得近地层水平能见度低于 1.0 km 的天气现象,是发生在近地层大气中的一种常见的灾害性天气。海雾是特指在海洋影响下,发生在海面、岸滨和岛屿的雾(王彬华,1983)。海雾过程对远洋运输、海洋捕捞、水产养殖及沿海地区的交通运输、生产生活 and 人体健康都有重要影响。外场观测和数值模拟结果表明,影响海雾形成和发展的因子主要包括:天气形势、大气稳定性、下沉运动、海气温差、辐射冷却、平流输送、湍流混合等(王彬华,1983;Leipper, 1994;Lewis et al., 2003, 2004;傅刚等,2004;江海英等,2005;胡瑞金等,2006;Fu et al., 2006;Gao et al., 2007;Heo and Ha, 2010;Heo et al., 2010;王帅等,2012)。雾害的主要影响是低能见度,而雾滴数浓度、含水量、有效半径、平均半径等微物理参量是能见度参数化方案的主要因子(唐浩华等,2002;Gultepe et al., 2006, 2009)。自然界中雾层分布是不均匀的,雾微物理参量的演变也存在显著的高频变化特征,这种高频的随机变化过程中又存在低频的准周期变化特征(Goodman, 1977; Garcia et al., 2002)。此外,受雾滴核化过程、凝结增长过程、重力沉降过程、湍流碰并和重力碰并过程的影响,不同地区、不同雾过程、雾发展的不同阶段,雾滴谱的变化也非常显著(Roach, 1976;Gultepe et al., 2007;Niu et al., 2010)。目前,对陆地雾微物理特征和气溶胶特征的观测研究已取得了丰硕成果,但对南海海雾微物理特征和气溶胶特征的研究相对较少(黄玉生等,2000;邓雪娇等,2007;张苏平和鲍献文,2008;黄辉军等,2009;樊曙先等,2010;银燕等,2010;Niu et al., 2010;盛立芳等,2011;刘霖蔚等,2012)。

湛江位于雷州半岛东北部,是中国南方最重要的港口、交通中心和物流中心之一。雷州半岛东临南海,西接北部湾,年平均雾日超过 20 d,是中国沿海最主要的五个多雾区之一(张苏平和鲍献文,2008;徐峰等,2011)。雷州半岛海雾主要出现在每年的 1—4 月和 12 月,尤以 3 月最多(徐峰等,2011)。本文对湛江冷锋型海雾的微物理特征进行深入分析,有助于深入了解南海海雾的宏观特征

及生消机理。

1 观测资料

本文选用 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日广东省湛江市东海岛(110°32'5"E, 21°35'N, 海拔 15 m)春季海雾综合观测资料,对一次冷锋天气过程影响下的海雾微物理特征进行深入分析。观测内容包括雾微物理结构、大气气溶胶粒子谱及常规气象观测项目。

雾微物理参量(雾滴谱、雾滴数浓度、液态含水量、平均半径、峰值半径、有效半径、最大半径等)由 FM-100 雾粒子谱仪(美国 DMT 公司)的测量结果计算得到。FM-100 雾粒子谱仪可测量的粒子数浓度范围是 0~5 000 cm⁻³,所测雾滴粒径范围是 2~50 μm,粒子尺度分 20 档,数据输出频率设置为 1 Hz。能见度观测采用 VPF-730 能见度及现在天气现象仪(英国 BIRAL 公司),每 30 s 获得一组数据,可测量的能见度范围是 10 m~75 km;能见度小于 16 km 或介于 16~30 km 之间时,仪器的测量误差分别为 ±10% 和 ±20%。气溶胶粒子谱由 WPS-1000XP 宽范围粒径谱仪(美国 MSP 公司)观测,可分 96 档对粒径范围在 10 nm~10 μm 的气溶胶粒子进行自动计数和粒径分级,每 5 min 可获取一组数据,观测期间对进气口吸入的空气进行干燥。地面的气象要素(如温、压、湿、风等)利用架设在东海岛上的 WP3103 型自动气象站来观测,由广东省气象技术装备中心研制生产。

2 海雾过程概述

2.1 天气背景

2010 年 3 月 30 日 500 hPa 副热带高压比较稳定,脊线维持在 15°N 附近,华南地区受副热带高压西北侧的 WSW 风场控制;3 月 31 日随着贝加尔湖南侧低槽东移,大气环流形势逐渐调整为比较平直的纬向型环流,副热带高压脊线继续维持在 15°N 附近,华南地区转受南支槽区影响;4 月 1 日副热带高压逐渐加强西伸,华南受多小槽活动的偏西流场影响。2010 年 3 月 30 日 850 hPa 受副热带高压后部 S 到 SW 风场影响;3 月 31 日切变线南压,850 hPa 受切变线影响;4 月 1 日切变线减弱向东南移

动。2010年3月30日地面场湛江处于低压前部,受偏南风场控制;4月1日北方冷空气南下,转受锋面低槽影响。在此次冷锋天气过程影响下湛江东海岛出现了两次海雾过程:case1(2010年3月31日18:52—4月1日06:19,北京时间,下同)、case2(2010年4月1日18:39—2日05:49)。4月2日白天冷锋过境,转为偏北风场控制。

2.2 地面雾过程

根据能见度、相对湿度和雾滴液态含水量(图1、2)随时间的演变特征,可以将case1和case2海雾过程分为以下8个阶段。

1)雾生成前的酝酿阶段(第i阶段:2010年3月31日17:00—18:52)。此阶段空气温度逐渐降低、空气相对湿度增大至100%;风速为 $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向由ENE转为ESE后稳定维持;低层大气水平能见度逐渐减小,并降至1000 m以下。

2)case1过程的形成阶段(第I阶段:2010年3月31日18:53—20:40)和发展阶段(第II阶段:2010年3月31日20:41—23:37)。此阶段空气温度变化很小,相对湿度稳定保持在100%;风速 $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向为稳定的ESE气流;低层大气水平能见度先有两次明显的起伏变化,而后稳定在500 m

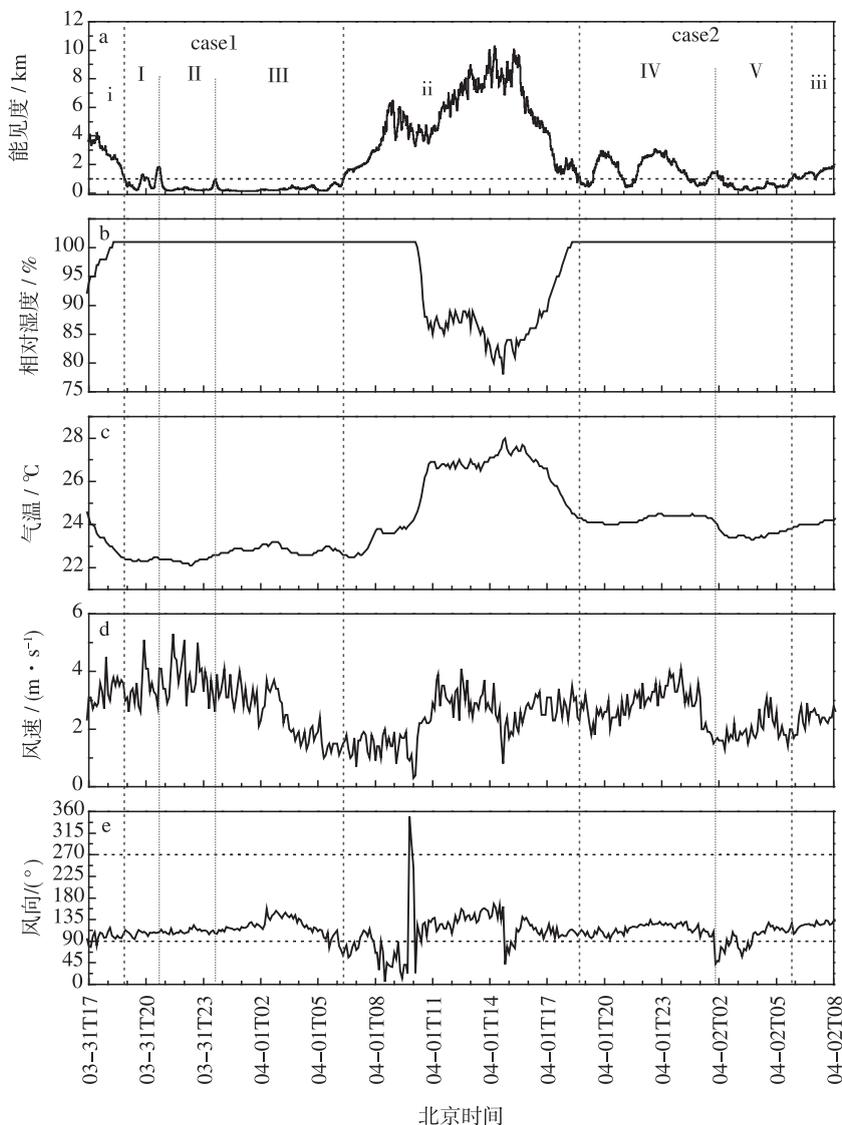


图1 2010年3月31日—4月2日地面气象要素随时间的变化 a.能见度(km);b.相对湿度(%);c.气温($^{\circ}\text{C}$);d.风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);e.风向($^{\circ}$)

Fig.1 The time variations of meteorological elements at surface during the fog events during 31 March—2 April 2010 a.horizontal visibility(km);b.relative humidity(%);c.air temperature($^{\circ}\text{C}$);d.wind speed($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);e.wind direction($^{\circ}$)

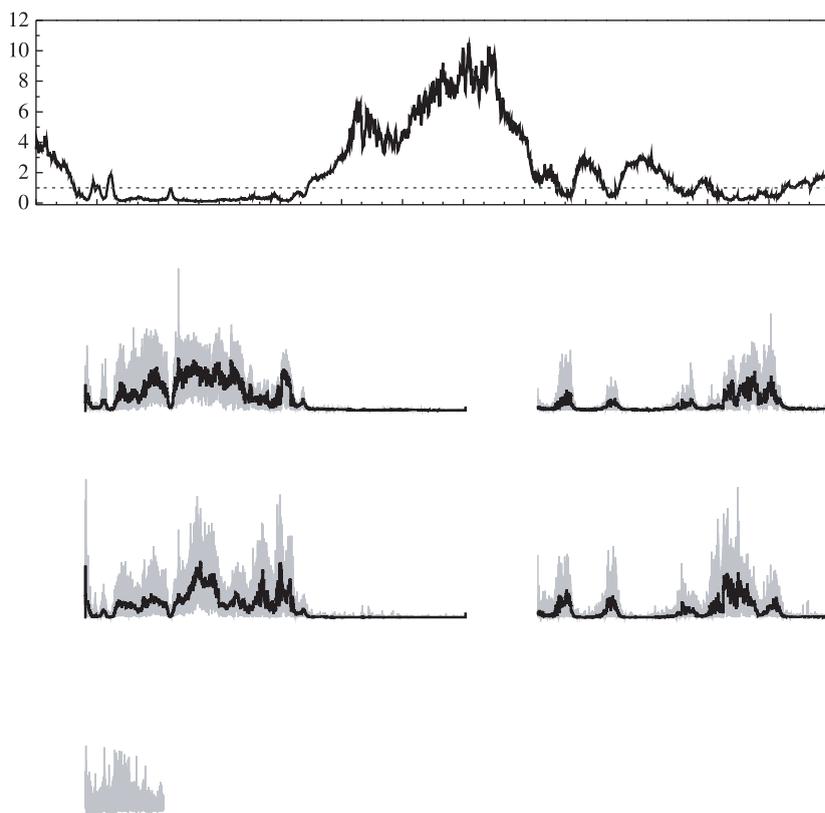


图 2 2010 年 3 月 31—4 月 2 日海雾过程中能见度及各微物理参量的瞬时值(灰色实线)和 1 min 平均值(黑色实线)随时间的演变特征 a.能见度(km);b.雾滴数浓度(cm^{-3}); c.液态含水量($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$);d.雾滴平均半径(μm);e.雾滴有效半径(μm)

Fig.2 Time evolutions of instantaneous value(gray solid line) and 1 min average data(black solid line) of visibility and microphysical properties of the sea fog events during 31 March—2 April 2010 a. visibility (km); b. number concentration (cm^{-3}); c. liquid water content ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); d. mean radius (μm); e. effective radius (μm)

以下。

3) case1 过程的成熟和消散阶段(第Ⅲ阶段:2010年3月31日23:37—4月1日06:19)。此阶段空气湿度继续维持在100%;空气温度先缓慢升高,然后起伏下降;风速逐渐减小,风向先由ESE转为SE,然后在雾消散阶段转为NE。在case1过程中,海雾的生消与风场密切相关,海雾生成和发展与较强的ESE气流相联系,风场转为NE气流控制后

海雾消散。这说明本次海雾过程是雾先在海面生成,然后在ESE气流作用下影响岸滨区。

4) case1 和 case2 过程的间歇期(第Ⅱ阶段:2010年4月1日06:20—18:39)。

5) case2 过程的形成阶段(第Ⅳ阶段:2010年4月1日18:40—2日01:48)和发展消散阶段(第Ⅴ阶段:2010年4月2日01:49—05:49)。与case1类似,岸滨区海雾的生消主要受风场影响,海雾的形成

和发展与较强的 ESE 气流场密切相关,而弱的 NE 气流则会促使海雾强度减弱或消散。雾消散后(第 iii 阶段:2010 年 4 月 2 日 05:50—08:00),空气温度缓慢增加,风场为稳定的 ESE 气流,风速为 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3 海雾微物理特征

3.1 基本微物理参量

微物理参量可以定量地描述海雾的微物理特征,并可与其他地区的观测结果进行对比分析,以了解研究区域海雾的特点。表 1 给出了 case1 和 case2 过程中海雾不同发展阶段雾滴数浓度(N)、液态含水量(L)、雾滴平均半径(r_m)、最大半径(r_{\max})和峰值半径(r_p)的统计值。湛江海雾的雾滴数浓度为表 1 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日海雾微物理参量统计值

Table 1 Mean values, standard deviations and variations of key microphysical variables of sea fogs on 31 March—2 April 2010

	N/cm^{-3}		$L/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$		$r_m/\mu\text{m}$		$r_{\max}/\mu\text{m}$		$r_p/\mu\text{m}$	
	平均值 (标准差)	变化范围	平均值 (标准差)	变化范围	平均值 (标准差)	变化范围	平均值 (标准差)	变化范围	平均值 (标准差)	变化范围
case1 全阶段	73.0(50.2)	1.4~470.3	0.029(0.024)	0.001~0.232	2.5(0.7)	1.5~9.6	14.1(3.6)	4.5~24.5	1.4(0.1)	1.4~8.5
case1 I	29.6(22.3)	1.5~216.5	0.013(0.015)	0.001~0.232	2.6(0.6)	1.6~7.0	11.6(3.7)	4.5~24.5	1.4(0.1)	1.4~7.5
case1 II	64.8(43.9)	1.4~275.6	0.021(0.014)	0.001~0.120	2.4(0.5)	1.6~6.7	13.8(3.4)	4.5~24.5	1.4(0.1)	1.4~4.5
case1 III	80.6(51.9)	1.4~470.3	0.033(0.026)	0.001~0.207	2.6(0.7)	1.5~9.6	14.5(3.6)	4.5~24.5	1.4(0.1)	1.4~8.5
case2 全阶段	40.4(34.8)	1.0~322.0	0.022(0.021)	0.001~0.219	3.1(0.9)	1.6~9.8	12.9(3.7)	4.5~24.5	1.4(0.2)	1.4~10.7
case2 IV	24.8(21.1)	1.4~200.6	0.017(0.015)	0.001~0.120	3.2(0.8)	1.7~9.2	12.7(3.3)	4.5~24.5	1.4(0.1)	1.4~5.5
case2 V	50.9(38.1)	1.0~322.0	0.026(0.024)	0.001~0.219	3.0(1.0)	1.6~9.8	13.0(3.9)	4.5~24.5	1.4(0.3)	1.4~10.7

对微物理参量的统计分析只能从整体上了解海雾的微物理特征,而分析雾微物理参量随时间的演变可以进一步认识海雾微物理结构的演变特征(图 2)。在 case1 和 case2 过程中雾滴数浓度和液态含水量与能见度呈明显反相变化,case2 过程中雾滴平均半径和有效半径与能见度反相变化显著,而在 case1 过程中,雾滴平均半径随时间变化较小。这说明在 case1 过程中,雾滴核化(雾滴数浓度升高,雾滴平均半径变化很小)对液态含水量的贡献较大,而在 case2 过程中雾滴核化(雾滴数浓度升高)和凝结增长(雾滴平均半径增大)对液态含水量的贡献都很重要。

3.2 雾滴谱

case1 过程的平均雾滴谱为单调递减谱,雾滴谱峰值位于 $1.4\ \mu\text{m}$,谱宽超过 $20\ \mu\text{m}$ (图 3a)。当雾滴半径小于 $3\ \mu\text{m}$ 时,随着雾滴半径增大,雾滴数密度(N_r)呈指数规律迅速递减;雾滴半径介于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 时,雾滴数密度变化很小;当雾滴半径超过 $5\ \mu\text{m}$,随着雾滴半径增大,雾滴数密度逐渐减小。雾

$10^0\sim 10^2\ \text{cm}^{-3}$,液态含水量为 $0.001\sim 0.232\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,雾滴平均半径小于 $10\ \mu\text{m}$,雾滴峰值半径多位于 $1.4\ \mu\text{m}$ 。湛江海雾微物理参量的平均值与茂名的观测结果一致(黄辉军等,2009),但与国内其他区域的海雾相比,湛江海雾的雾滴数浓度较高、液态含水量较小、雾滴尺度也较小(杨连素,1985;杨中秋等,1989;徐静琦等,1994)。海雾发展的不同阶段,微物理参量的统计值也存在显著差异。雾形成阶段(第 I、IV 阶段)雾滴数浓度较低,液态含水量较小、雾滴谱谱宽较窄;雾的发展、成熟和消散阶段(第 II、III、V 阶段)雾滴数浓度显著增大、液态含水量增大,雾滴谱谱宽也有所增加。

形成后,随着雾过程的发展,各粒径段的雾滴数密度均有所增加;半径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的雾滴数密度增幅显著。与 case1 不同,case2 过程的雾滴谱在 $5\ \mu\text{m}$ 附近有一很弱的峰值;在雾的发展过程中,小粒子端($r<5\ \mu\text{m}$)和大粒子端($r>20\ \mu\text{m}$)雾滴数密度显著增大,而雾滴谱中段($5\ \mu\text{m}<r<20\ \mu\text{m}$)的雾滴数密度在雾过程中变化较小(图 3b)。

图 4 给出了 case1 和 case2 过程中雾滴谱随时间的演变,可见在海雾过程中雾滴谱都以单调递减谱为主,仅出现短时的双峰型或多峰型雾滴谱。在海雾的形成和消散阶段,雾滴谱的谱宽存在突然增宽或迅速减小的现象;与地面气象要素结合分析发现,雾滴谱的演变与风场的变化密切相关,说明这两次过程中海雾微物理结构的变化主要是由平流导致的。在海雾发展过程中,半径小于 $5\ \mu\text{m}$ 和半径大于 $10\ \mu\text{m}$ 雾滴数密度变化显著;而雾滴数浓度的变化主要是由半径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的雾滴数密度变化造成的。

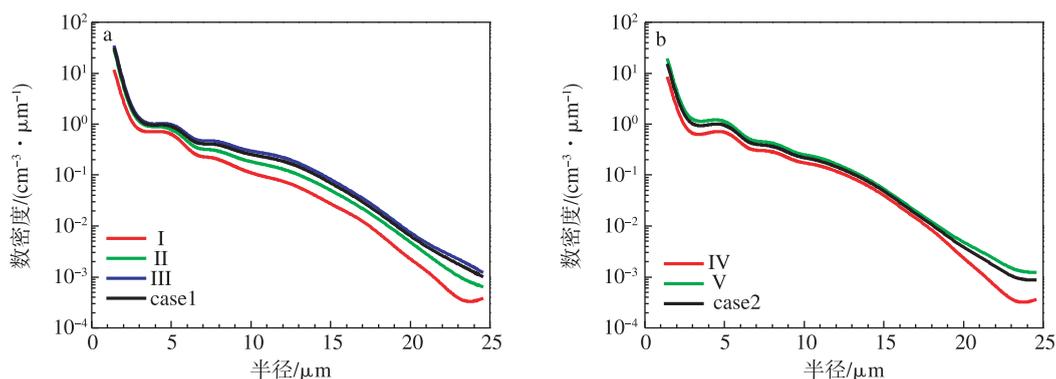


图 3 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日海雾过程各阶段平均雾滴谱分布 a.case1;b.case2

Fig.3 Average droplet size distributions in different phases of the sea fog events during 31 March—2 April 2010
a.case1;b.case2

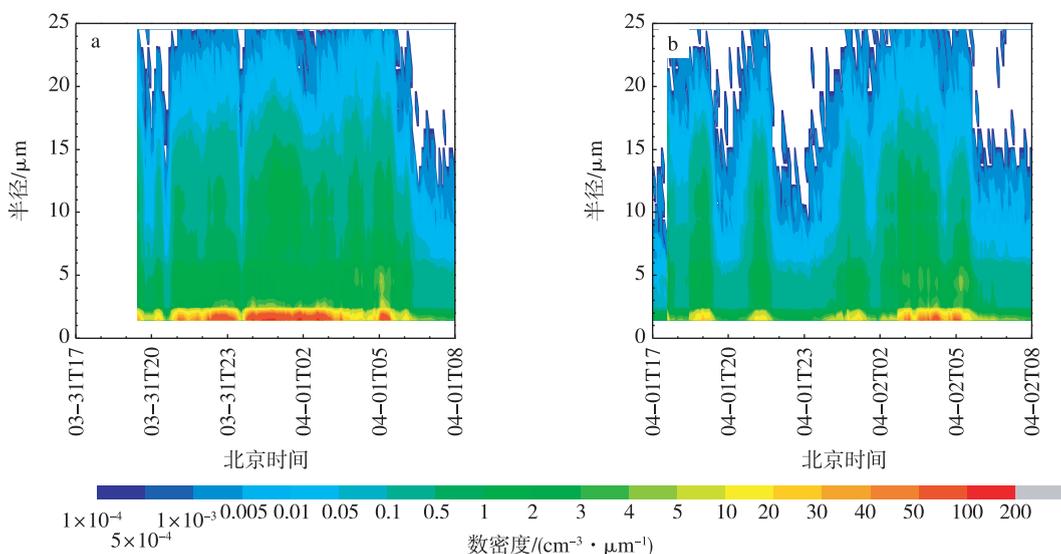


图 4 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日两次海雾过程雾滴谱随时间的演变 a.case1;b.case2

Fig.4 Time evolutions of fog droplet size distribution of the two sea fog events during 31 March—2 April 2010
a.case1;b.case2

3.3 气溶胶粒子谱

雾作为气溶胶粒子的一种湿清除机制,对气溶胶粒子的理化特性有重要影响(康汉青等,2009;樊曙先等,2010)。从 case1 和 case2 过程中气溶胶粒子平均谱分布可以发现,湛江气溶胶粒子数密度分别在粒径 $0.041 \sim 0.045 \mu\text{m}$ 和 $6.5 \mu\text{m}$ 处存在两个峰值(图 5)。在 case1 的形成阶段(第 I 阶段),雾的湿清除作用主要表现在粒径小于 $0.02 \mu\text{m}$ 和粒径大于 $6.7 \mu\text{m}$ 处的气溶胶粒子。随着雾过程的发展(第 II 阶段)粒径小于 $0.06 \mu\text{m}$ 和大于 $2.6 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数也明显减小。进入成熟阶段后(第 III 阶段),粒径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 和粒径大于 $1.8 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度均显著减少。但在整个雾过程中粒径介于 $0.4 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度在雾发展

阶段有所增加。雾消散后(第 ii 阶段),粒径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 和大于 $2.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度显著增加,迅速恢复到雾发生前的水平,而粒径介于 0.5 和 $2.0 \mu\text{m}$ 间的气溶胶粒子数密度略有减小。与 case1 有所不同,case2 过程形成阶段(第 IV 阶段)海雾对气溶胶巨粒子的清除作用不显著,仅粒径小于 $0.023 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度有所减小,而粒径介于 $0.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 间的气溶胶粒子数密度增加。进入第 V 阶段后,粒径小于 $0.2 \mu\text{m}$ 和大于 $3.9 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度显著下降。雾消散后(第 iii 阶段),粒径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度迅速增加并恢复到雾发生前的水平,而气溶胶巨粒子数密度增加较少。不同海雾过程对气溶胶粒子的清除效果有所差异,雾过程中粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 和大于 $4 \mu\text{m}$ 的

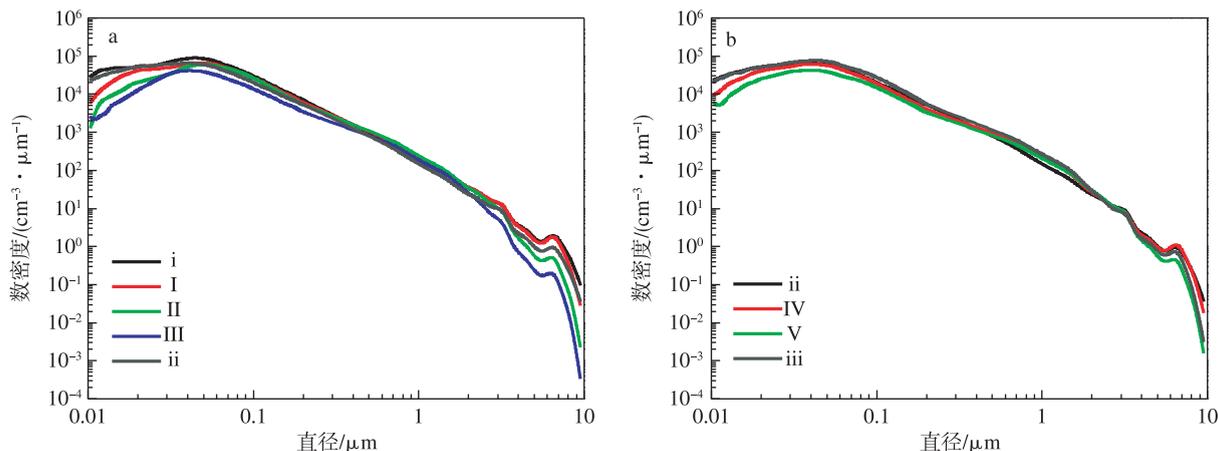


图 5 case1(a) 和 case2(b) 不同阶段气溶胶粒子平均谱分布

Fig.5 Average aerosol particle size distribution in different phases in (a) case1 and (b) case2

气溶胶粒子数密度显著减小,但在雾过程结束后又迅速恢复到雾发生前的水平;即海雾过程对气溶胶粒子的湿清除效果并不显著。

4 结论

本文对 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日冷锋天气系统影响下湛江海雾过程的天气背景、微物理特征和气溶胶粒子谱特征进行了深入分析,得到以下主要结论。

1) 海雾的生消与风场密切相关,湛江海雾生成和发展与较强的 ESE 气流相联系,而弱的 NE 气流则会促使海雾减弱或消散。

2) 湛江海雾的雾滴数浓度为 $10^0 \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$,液态含水量为 $0.001 \sim 0.232 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,雾滴平均半径小于 $10 \mu\text{m}$,雾滴峰值半径多位于 $1.4 \mu\text{m}$;与国内其他区域的海雾相比,湛江海雾的雾滴数浓度较高、液态含水量较小、雾滴尺度也较小。

3) 湛江海雾的雾滴谱分布以单调递减谱为主,谱宽超过 $20 \mu\text{m}$;雾发展过程中雾滴谱谱宽存在突然增宽和迅速减小的现象;雾过程中雾滴数浓度的变化,主要是由半径小于 $5 \mu\text{m}$ 的雾滴数密度变化引起的。

4) 海雾过程对气溶胶粒子的湿清除效果并不显著,雾过程中粒径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 和大于 $4 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度显著减少,但在雾过程结束后又迅速恢复到雾发生前的水平。

参考文献:

邓雪娇,吴兑,史月琴,等.2007.南岭山地浓雾的宏微观物理特征综合分析[J].热带气象学报,23(5):424-434.

樊曙先,黄红丽,顾凯华,等.2010.雾过程对大气气溶胶 PM_{10} 中多环芳烃粒径分布的影响[J].高等学校化学学报,31(12):2375-2382.

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:自然科学版,34(5):720-726.

胡瑞金,董克慧,周发琇.2006.海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验[J].海洋科学进展,24(2):156-165.

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.

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,55(6):715-725.

江海英,张初,刘科峰.2005.青岛海雾的自适应神经模糊推理系统建模[J].海洋科学,29(2):26-31.

康汉青,朱彬,樊曙先.2009.南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J].气候与环境研究,14(5):523-530.

刘霖蔚,牛生杰,刘端阳,等.2012.南京冬季浓雾的演变特征及爆发性增强研究[J].大气科学学报,35(1):103-112.

盛立芳,梁卫芳,屈文军,等.2011.海雾过程中大气气溶胶谱变化及消光作用[J].中国海洋大学学报:自然科学版,41(6):1-8.

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.

王彬华.1983.海雾[M].北京:海洋出版社.

王帅,傅聃,陈德林,等.2012.2009 年春季一次黄海海雾的观测分析及数值模拟[J].大气科学学报,35(3):282-294.

徐峰,牛生杰,张羽,等.2011.雷州半岛雾的气候特征及生消机理[J].大气科学学报,34(4):423-432.

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.

杨连素.1985.青岛近海海雾微物理结构的初步观测[J].海洋科学,9(4):49-50.

杨中秋,许绍祖,耿骠.1989.舟山地区海雾的形成和微物理结构[J].海洋学报,11(4):431-438.

银燕,陈晨,陈魁,等.2010.黄山大气气溶胶微观特性的观测研究[J].大气科学学报,33(2):129-136.

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:自然科学版,38(3):359-366.
- Fu G, Guo J, Xie S, et al. 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea [J]. *Atmos Res*, 81(4): 293-303.
- Gao S, Lin H, Shen B, et al. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005; Analysis and numerical modeling [J]. *Adv Atmos Sci*, 24(1): 65-81.
- Garcia-Garcia F, Virafuentes U, Montero-Martinez G. 2002. Fine-scale measurements of fog-droplet concentrations: A preliminary assessment [J]. *Atmos Res*, 64: 179-189.
- Goodman J. 1977. The microstructure of California coastal fog and stratus [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 16(10): 1056-1067.
- Gultepe I, Muller M D, Boybey Z. 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(11): 1469-1480.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 164(6/7): 1121-1159.
- Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(3): 341-359.
- Heo K Y, Ha K J. 2010. A coupled model study on the formation and dissipation of sea fogs [J]. *Mon Wea Rev*, 138(4): 1186-1205.
- Heo K Y, Ha K J, Mahrt L, et al. 2010. Comparison of advection and steam fogs: From direct observation over the sea [J]. *Atmos Res*, 98(2/3/4): 426-437.
- Leipper D F. 1994. Fog on the US West Coast: A review [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 75: 229-240.
- Lewis J, Koracion 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(D15), 4457. doi: 10.1029/2002JD002833.
- Lewis J M, Koracin 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(3): 395-408.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. *Adv Atmos Sci*, 27(3): 639-662.
- Roach W T. 1976. On the effect of radiative exchange on the growth by condensation of a cloud or fog droplet [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102: 361-372.

(责任编辑:刘菲)