

2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的 微物理结构及演变特征^{* 1}

刘端阳¹ 濮梅娟² 杨 军¹ 张国正³ 严文莲¹ 李子华¹

LIU Duanyang¹ PU Meijuan² YANG Jun¹ ZHANG Guozheng³ YAN Wenlian¹ LI Zihua¹

1. 南京信息工程大学大气物理学与大气环境重点实验室, 南京, 210044

2. 江苏省气象台, 南京, 210008

3. 南京农业大学, 南京, 210095

1. *Key Laboratory for Atmospheric Physics & Environment of NUIST, Nanjing 210044, China*

2. *The Observatory of Jiangsu Province, Nanjing 210008, China*

3. *Nanjing University of Agriculture, Nanjing 210095, China*

2007-07-23 收稿, 2007-12-21 改回.

Liu Duanyang, Pu Meijuan, Yang Jun, Zhang Guozheng, Yan Wenlian, Li Zihua. 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(1):147–157

Abstract Persistent heavy fogs occurred in Nanjing during 24–27 December 2006, and the super dense fog with a visibility below 50-meter persisted for more than 40 hours. Many studies have been done based on the observation data of the fog process from automatic weather station, ZQZ-DN visibility meter and FM-100 fog particle spectrometer. The microphysical characteristics of the persistent fogs were analyzed based on the continual fog droplet size, number concentration, liquid water content (LWC) data as well as the temperature, humidity, and visibility observations, and compare the results of the micro-physical parameters with those of fogs in Nanjing in 29–30 December 1996. The average LWC and diameter of the fogs are equivalent to those of 1996, yet the maximum LWC is four times and the number concentration is smaller than that of 1996, respectively. It is the high number concentration and LWC in the first and second processes that led to the bad weather of the long-duration super dense fogs in Nanjing. Combining with the data of tether sonde, it was found that the continuous strong vapor advection resulted in the persistent heavy fogs, and therefore it possessed the characters of advection fog. According to the variations of the micro-physical parameters, the whole process was divided into four fog processes, and the average droplet spectrum distributions of the four processes were analyzed and compared, and the results indicate that the average droplet spectrum distributions of both the whole process and the four processes obeyed the Deirmendjian distribution, i. e. the number concentration declined exponentially with the increase of droplet diameter and droplets with a smaller diameter dominated. At last, the micro-physical parameters of fogs in the first process were analyzed in more detail, it was found that the fog formed after the radiation cooling in the clear night sky (December 24), reached its peak intensity in the midnight and then weakened gradually along with temperature rise after the sunrise next day (December 25), reflecting the diurnal variation character of radiation fog. In addition, it was also found that the fog did not change much after its formation, but along with further radiation cooling, the fog masses formed incessantly on the ground, then the fog explosively developed into a super dense fog.

Key words Nanjing, Heavy fog, Advection-radiation fog, Fog droplet spectrum

摘 要 2006 年 12 月 24—27 日南京地区出现了连续 4 天的浓雾天气, 其中能见度小于 50 m 的强浓雾持续了 40 多个小时。

^{*} 资助课题: 中国气象局研究型业务项目(YW200601), 江苏省重大科技支撑与自主创新示范工程项目(BE2008618)和江苏省自然科学基金重点招标项目(BK2007727)。

作者简介: 刘端阳, 主要从事大气物理学与大气环境研究。E-mail: liuduanyang2001@126.com

通讯作者: 濮梅娟, pumeijuan@126.com

利用 FM-100 型雾滴谱仪,连续观测了雾滴谱、数密度和含水量等微物理参量。结合自动气象站及能见度仪观测资料,分析了这次浓雾过程的微物理特征,并与 1996 年观测结果进行对比;雾滴的平均含水量和平均直径与 1996 年观测结果相当,含水量最大值比 1996 年观测结果大 4 倍,数密度比 10 年前小。认为前 2 个子过程的雾滴数密度、含水量很高,造成了南京本次大雾能见度长时间低于 50 m 的恶劣天气。结合边界层探空资料,认为形成这种强浓雾的主要原因是近地层持续存在强盛的水汽平流,具有平流雾的特征。根据雾微物理参量的起伏变化,将浓雾过程分成 4 个子过程,分析并比较了 4 个子过程的雾滴谱分布,总过程的谱分布及 4 个子过程的谱分布都服从 Deirmendjian 分布,谱型都基本呈指数下降,雾滴主要集中在小滴段。最后,对第一个子过程微物理参量的变化特征进行了细致分析。发现这次浓雾是在夜间晴空辐射降温后形成的,午夜最强,日出后随着气温的升高逐渐减弱,反映了辐射雾的日变化特征。另外,还发现雾形成以后,开始变化不大,但随着进一步辐射降温,地面雾团不断产生,雾爆发性发展。

关键词 南京,持续浓雾,辐射平流雾,雾滴谱

中图法分类号 P426.4

1 引言

江苏省年雾日大约 110 天,南京市每年浓雾日 30 天左右(濮梅娟,2001)。雾和空气污染相互作用对全省社会经济发展、交通和人民身体健康造成了很大的危害。开展雾的研究,弄清雾的生消规律,具有重要的科学意义和应用价值。

国外对雾的研究始于 1917 年,Taylor(1917)通过对雾的野外实验研究,指出了辐射雾形成的必要条件。Eldridge(1961)通过雾的观测,分析了雾滴谱分布、含水量以及能见度的变化特征。Kunkel(1971)利用激光全息照相机对雾进行了采样,分析并讨论了不同样本之间雾滴谱分布的变化,介绍了几次雾过程的平均滴谱特征。Kumai(1973)在美国阿拉斯加州的巴罗,对北冰洋夏季平流雾进行了观测,对雾滴平均半径、数密度、含水量及能见度进行了分析。Pilie 等(1975)在美国纽约附近的埃尔迈拉山谷对山谷雾进行了包括温度、露点温度、气压、风速、风向、辐射、垂直风速、能见度以及雾滴谱分布、含水量、数密度和凝结核的外场综合观测。1971 年 Roach(1976)在英国贝福德郡卡丁顿对辐射雾进行了观测和研究,发现了微物理参量呈准周期振荡变化的特征。Francesco 等(1976)对雾滴及云滴的谱分布进行了拟合分析,讨论了云雾滴对光的散射和吸收。

Hudson(1980)在美国西海岸的不同地点,观测了雾滴谱分布、云凝结核。发现雾微物理特征随着凝结核浓度的变化发生巨大的变化。Meyer 等(1980)在一次辐射浓雾中,发现了许多有趣的现象:(1)直径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的霾粒子有很强的转化成雾滴的能力。(2)在雾的整个生命周期中,直径在 $0.3\text{--}1.0\ \mu\text{m}$ 的霾粒子亚微粒的数浓度维持恒定的量。

(3)当能见距离从 2.1 km 下降到 1.4 km 时,两者的谱分布在 5 min 间隔里有很大的变化,并认为这种变化主要是气溶胶转化成雾滴的缘故。(4)在雾最浓的时候,雾滴谱出现多峰分布。

近些年来,许多学者(Gerber, 1981; Arends, et al, 1992; Schell, et al, 1992; Wendisch, et al, 1998; Podzimek, 1997; Ma, et al, 2003)都对雾滴谱进行了观测和分析。Fahey(2005)、Klemm(2005)把实际观测的雾的各种微物理特征与数值模拟结果进行对比分析,研究了雾水沉降。Eugster(2006)利用涡动协方差方法测量雾的总含水量沉降为 4.36 mm/d,而同一时间内的降雨量为 28 mm/d。

中国在雾的微物理方面做过大量的观测和分析:1962 年,詹丽珊等(1965)在南岳和泰山开始对雾滴谱进行观测;1968 和 1969 年,中国南方有关省做过一次雾的普查,对云、贵、川、皖、浙、闽、粤等省雾的微结构做过初步观测;王庚辰(1981)观测并分析了北京雾微物理特征,说明了雾滴谱分布是雾体演变的主要表征量,认为雾滴谱加宽是雾体发展的主要特点;郭恩铭等(1989)对成都双流机场雾的宏观微观结构进行了研究;郭恩铭等(1990)、鲍玉堂等(1995)分别对上海城市雾进行了包括微物理特征的研究;李子华等(1993、1994、1995)对重庆雾的微物理特征进行了详细介绍;黄玉生等(1992、2000)、濮梅娟等(2001)对西双版纳的雾微物理特征进行了观测分析;李子华等(1999)、黄建平等(1998)分析了南京及邻近地区雾的微物理特征;杨连素(1985)、杨中秋等(1989)、徐静琦等(1994)对海雾微物理结构进行了观测和分析;唐浩华等(2002)和邓雪娇等(2002)研究了南岭山地平流雾的微物理结构及其演变特征。吴兑等(2004、2007)对南岭大瑶山高速公路浓雾的宏观微观结构与能见度进行了研究。李子华(2001)回顾

了中国1960—2001年雾的研究进展,对中国雾的研究进行了总结。

但是,过去国内所使用的雾滴谱观测仪器为三用滴谱仪,时间分辨率较低,样本少,反映不出雾微物理特征的细微变化,不能很好地把雾在发生、发展直至消亡过程中的详细信息记录下来。国外近年来虽然使用了较先进的自动观测仪器,但也没有几十小时的连续观测,不能反映雾的微物理持续演变特征。

2006年12月24—27日一场罕见大雾突袭南京,大雾持续了64 h之久,为近56年来持续时间最长的浓雾过程,对全市交通和人民生活造成了严重影响,南京禄口机场暂停飞机起降,通往城外的高速公路关闭,长江轮渡停航,因灾死亡8人,伤数人。江苏省气象台2次升级大雾预警信号,首次发布了大雾红色预警信号。为了研究这次持续性浓雾过程,江苏省气象台和南京信息工程大学联合进行了外场综合观测试验,包括大气边界层、雾微物理特征、雾水化学成分、气溶胶、能见度等观测。雾微物理观测从24日晚雾生开始至27日下午雾消为止,共获得了63 h的雾滴谱资料,包括了整个生消过程。本文首先对观测场地及仪器进行了介绍,并把整个雾过程分成4个子过程,对整个雾过程及各个子过程的雾微物理参量、谱分布进行了分析。

2 仪器与观测概况

观测场设在南京信息工程大学的大操场草坪,距离长江北岸约3 km。2006年12月24—27日在此进行的综合探测^①,主要包括雾的宏、微观物理结构、雾含水量的观测、能见度观测、大气气溶胶物理化学性质、雾水与雨水的化学特征等方面。使用的部分仪器见表1,如FM-100型雾滴谱仪、DigiCORA系留气球低空探测系统(芬兰Vaisala)等。雾滴谱观测仪器离地高度约1 m,周围无高大建筑物及树木。雾微物理结构的观测是利用FM-100型激光前向散射雾滴谱仪。雾滴谱仪包括光学底座、信号处理器,以及对经过光学窗口的粒子进行除尘用的真空部件。首先光学底座接收经过光学窗口粒子的前向散射光,信号处理器把光脉冲转化成电压,放大并滤波,然后传输给数据处理系统。根据大小不同的雾滴对激光散射强度的不同,对雾滴进行分档、计数,分别计算出每一档内的雾滴数量,并实时记录相应的空气流速、气压、温度等。滴谱仪可以连续测量雾粒子数浓度、谱分布,粒径范围为2—50 μm,最大数密度为10⁴个/cm³。观测连续进行,每秒钟产生一组数据。

表1 南京地区浓雾观测仪器一览表
Table 1 Instruments used in the fog field observation experiment in Nanjing in 24—27 December 2006

观测要素	仪器	分辨率	观测频率	备注
雾含水量	FM-100型雾滴谱仪,DMT公司,USA	0.000001 g/m ³	1 s (0.1—10 s)	
雾滴谱	FM-100型雾滴谱仪,DMT公司,USA	2—50 μm	1 s (0.1—10 s)	
数密度	FM-100型雾滴谱仪,DMT公司,USA	1—10 ⁴ 个/cm ³	1 s (0.1—10 s)	
器测能见度	ZQZ-DN能见度自动气象站 (江苏省无线电科学研究所)	≤1000 m ±10%; >1000 m ±20%	10 min	
气溶胶粒子谱	WPS-1000XP型宽范围粒谱仪 (USA,MSP Corporation)	粒径分辨率: >120 通道	300 s	
雾水成分	自制尼龙网主动式雾水捕集器			
温度廓线	系留探空,Vaisala DigiCORA Tethersonde System(芬兰,Vaisala Inc.)	0.1 ℃	1—2 s	热敏电容
湿度廓线	系留探空,Vaisala DigiCORA Tethersonde System(芬兰,Vaisala Inc.)	0.1%	1—2 s	湿敏电容
气压	系留探空,Vaisala DigiCORA Tethersonde System(芬兰,Vaisala Inc.)	500—1080 hPa; 精度:0.1 hPa	1—2 s	压力传感器
风向	系留探空,Vaisala DigiCORA Tethersonde System(芬兰,Vaisala Inc.)	1°	1—2 s	
风速	系留探空,Vaisala DigiCORA Tethersonde System(芬兰,Vaisala Inc.)	0.1 m/s	1—2 s	
温度	自动气象站(澳大利亚,ICT International),	±0.1 ℃	30 min	
湿度	自动气象站(澳大利亚,ICT International)	±2%	30 min	
气压	自动气象站(澳大利亚,ICT International)	<±1 hPa (25 ℃时)	30 min	

① 参加此项观测的还有:王巍巍,叶芳,崔振雷,吴建成,李一,陆春松,程穆宁,章秋英,许丹等。

3 雾过程简况

本次雾过程的观测从12月24日22:08开始。起初,雾比较小,能见距离在250 m左右;以后能见度逐渐增大到500 m,雾渐渐变薄;25日00:00开始,贴地层不断有白色雾团产生、漂浮、消失,能见度逐渐降低;00:40左右雾瞬时变浓,能见度降到15 m,雾爆发性发展;一直到26日13:00,以及26

日19:00到23:30,能见度一直维持在50 m以下,为强浓雾,累计的持续时间为41 h,为历史罕见。本次浓雾过程持续到27日14:14消散。各个微物理参量在雾发生、发展、成熟及消亡过程中变化比较明显(图1),其中数密度、含水量、平均直径有4个非常显著的起伏变化,根据这些变化,将整个雾过程分成4个子过程(表2)。

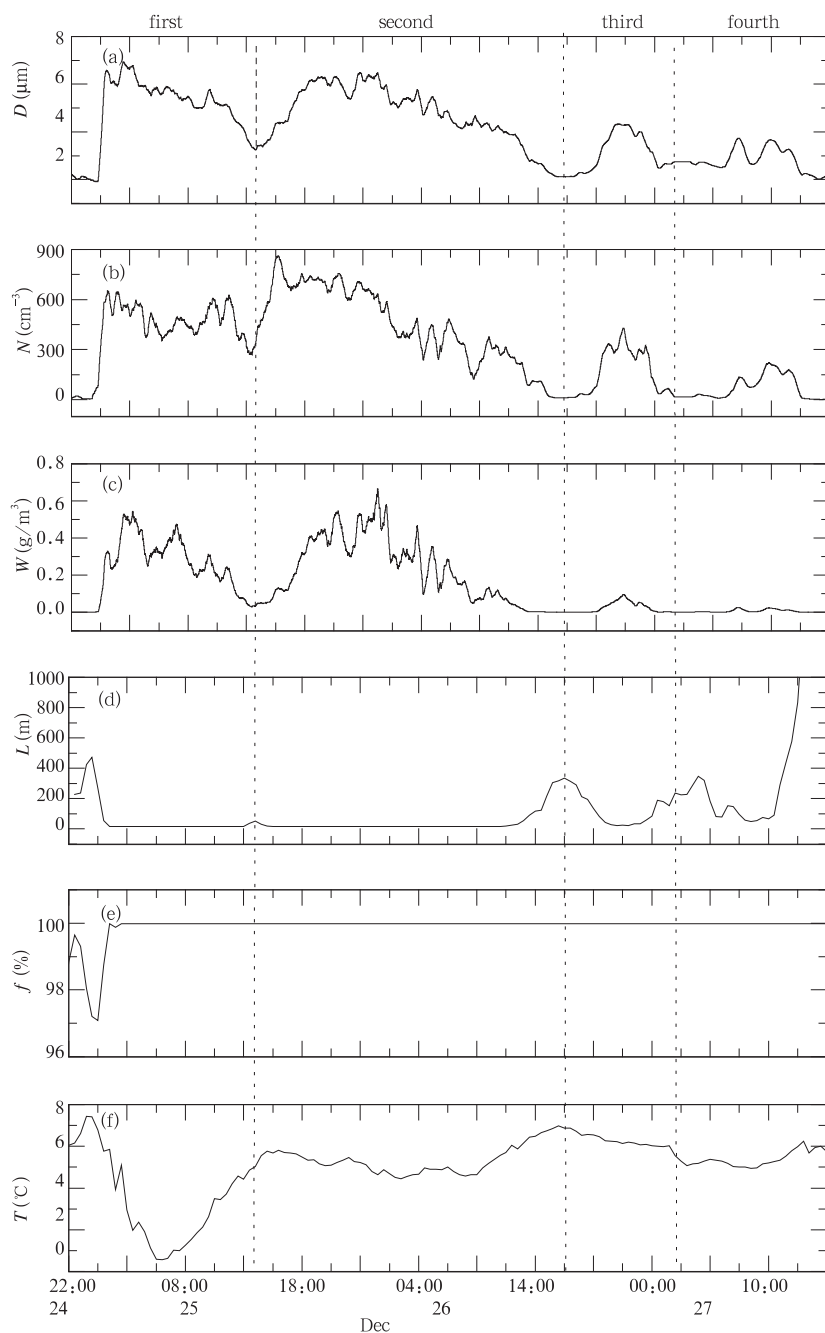


图1 整个雾过程的物理参量随时间演变

(a. 平均直径, b. 数密度, c. 含水量, d. 能见度, e. 相对湿度, f. 温度;每30 min的平均值)

Fig. 1 Temporal variation of the physical parameters of the whole process

(a. average diameter, b. concentration, c. LWC, d. visibility, e. relative humidity, f. temperature; 30 minutes average)

表 2 雾的子过程
Table 2 Four processes of the fogs in
24—27 December 2006

	阶段	起始时间	终止时间
第 1 个子过程	生成阶段	24 日 22:08	25 日 00:39
	爆发阶段	25 日 00:39	25 日 01:11
	成熟阶段	25 日 01:11	25 日 10:06
	减弱阶段	25 日 10:06	25 日 13:49
第 2 个子过程	第 2 次发展	25 日 13:49	25 日 19:45
	成熟阶段	25 日 19:45	26 日 09:52
	减弱阶段	26 日 09:52	26 日 14:56
第 3 个子过程	生成阶段	26 日 14:56	26 日 19:23
	爆发阶段	26 日 19:23	26 日 20:38
	成熟阶段	26 日 20:38	26 日 23:35
	减弱阶段	26 日 23:35	27 日 00:30
	生成阶段	27 日 00:30	27 日 06:19
第 4 个子过程	发展阶段	27 日 06:19	27 日 07:14
	减弱阶段	27 日 07:14	27 日 08:18
	再次发展阶段	27 日 08:18	27 日 09:45
	成熟阶段	27 日 09:45	27 日 11:40
	减弱阶段	27 日 11:40	27 日 12:33
	雾消失	27 日 14:14	

由能见度的变化曲线可见,这 4 个子过程之间,雾并没有消散,仅仅是强度的减弱。在 4 个子过程中,每次过程都有非常明显的生成、发展、成熟和减弱阶段。根据这次雾过程的天气图和边界层结构分析(另文),这次雾是在辐射降温条件下形成的,而后在暖湿平流的影响下加强维持,属于辐射-平流雾。

4 雾的微物理结构特征

雾的微物理参数是反映雾的基本特征的重要参量,其中含水量、雾滴谱分布、数密度等也是影响能见度的重要因子。表 3 给出了南京这次雾总过程及各子过程的主要微物理参数,同时列出南京 1996 年大雾及其他各地雾的微物理参量。从表 3 中可以看到:

(1) 雾过程为数密度,平均为 320.335 个/cm³,范围从 1.132—1261.87 个/cm³。平均数密度比上海市以及沪宁线上的汤山、阳澄湖都大得多。而与重庆市相比,平均值比重庆渝中区的石板坡、陈家坪要小,但比沙坪坝大。比南岭山地的数密度大,这是由于南岭山地的雾实际上是云接地造成的(唐浩华等,2002;邓雪娇等,2002;吴兑等,2007),没有城市可吸入颗粒物的影响。雾滴数密度的大小,可以反映空气中颗粒物污染的多少。在 4 个子过程中,前

2 个子过程的数密度都很大,远大于总过程的平均数密度;而后 2 个子过程的数密度很小,不到总过程平均值的一半。

(2) 在整个雾过程中,含水量最小 6.18 × 10⁻⁶ g/m³,最大 1.018 g/m³,平均值为 0.1530 g/m³。与南京 1996 年的观测相比,平均值相当,但最大含水量比 1996 年要大得多,超过 4 倍,这与本次雾过程有持续的水汽平流输送有关。4 个子过程中,前 2 个子过程的含水量远远高于后 2 个子过程。就平均值而言,这次雾过程的含水量比重庆市中区、云南勐养和广东南岭山地都要大。

(3) 平均直径 4.157 μm,变化范围 1.338—8.102 μm,与 1996 年观测结果基本一致。4 个子过程的平均直径相差不大,后 2 个子过程的最大值减小。比重庆渝中区要大,但比南岭山地和云南勐养要小。

(4) 谱宽(最大直径)在整个雾过程中最小为 7.5 μm,最大为 49.5 μm,而平均值为 43.6635 μm,可见谱宽维持在 43.6635 μm 以上的时间比较长,大雾滴出现和维持的时间比较长。

(5) 峰值直径始终维持在 1.5—3.0 μm,说明小雾滴始终占绝对多数,与上海、重庆渝中区的两个测站相当,比重庆郊区及勐养的要小。

以上分析可见,这次雾过程含水量、数密度都比较大,特别是前 2 个子过程、高的含水量和高的数密度造成了南京本次大雾能见度长时间低于 50 m 的恶劣天气(图 1d)。

5 雾滴谱分布特征

雾滴谱分布是反映雾的微物理特征的另一个重要参数,图 2 是南京 2006 年 12 月 24—27 日整个大雾过程的平均谱分布。根据实测资料,利用最小二乘法拟合了平均雾滴谱公式,满足 Deirmendjian 分布,即

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

实测值(虚线)与拟合曲线十分接近,表明该雾滴直径分布函数能反映这次南京雾平均微物理结构特征。由图 2 可见,谱型基本呈指数下降,整个谱分布偏向小滴一端,直径小于 3.5 μm 的小滴占总雾滴数的 55% 以上,小于 9.5 μm 的小滴占 90% 以上,

表3 南京冬季雾的微物理结构参量特征及与各地的比较

Table 3 Microphysical parameters of winter's fog in Nanjing and intercomparison of fogs between different areas

观测地点	观测日期时间	数密度 N (个/ cm^3)	计算含水量 $W(\text{g}/\text{m}^3)$	平均直径 $D(\mu\text{m})$	最大直径 $D_{\text{max}}(\mu\text{m})$	峰值直径 $D_p(\mu\text{m})$	样本数 (个)
南京 信息 工程 大学	2006.12.24—27						
	总过程	320.335	0.1530	4.157	43.86353	3.4038	
	(24日22:08—27日14:14)	(1.132—1261.87)	(6.18×10^{-6} —1.018)	(1.338—8.102)	(7.5—49.5)	(1.5—3)	
	第1个子过程	405.26	0.2637	5.035	44.10403	2.809	
	(24日22:08—25日13:49)	(2.17—858.9)	(1.05×10^{-5} —0.8996)	(1.338—8.102)	(11.5—49.5)	(1.5—3)	
	第2个子过程	459.46	0.2186	4.78	47.70338	3.744	
	(25日13:49—26日14:56)	(14.601—1261.87)	(0.00015165—1.019)	(2.163—7.539)	(13.5—49.5)	(1.5—3)	
	第3个子过程	158.4397	0.02372	3.053	36.88174	3.206957	
	(26日14:56—27日00:30)	(5.438—611.224)	(0.000041—0.1955)	(1.911—4.931)	(9.5—49.5)	(1.5—3)	
南京 盘城	第4个子过程	70.6248	0.00549	2.8319	41.04895	3.630769	
	(27日00:30—27日14:14)	(1.132—298.015)	(6.18×10^{-6} —0.06838)	(1.436—4.332)	(7.5—49.5)	(1.5—3)	
	1996.12.29						
江苏 汤山	(07:50—10:40)	152.6	0.09	6.0	39.5		12
	(21:40—00:20)	1517.0	0.17	4.6	29.3		13
	1996.12.30						
江苏 阳澄湖	(07:15—11:25)	2047.7	0.25	4.5	32.4		31
	1996.12.27	48.4	0.14	12.4	57.5		
	05:20—11:15						
上海	1997.1.21	268.6	0.04	4.8	31.7		7
	1989.1	173	0.26	5.0	54.8	3.7	
		(23.6—518.4)	(0.01—1.53)	(4.4—9.9)	(14.9—125.8)	(3.7—3.7)	
重庆 (石板坡) (陈家坪) (沙坪坝)		529.0	0.02	4.4	21.9	3.5	
		(35—2026)	(0.00—0.12)	(3.5—7.5)	(7.0—35)	(3.5)	
	1989.12.15—1990.1.15	453	0.10	4.8	40.4	3.3	
		(31.1—1635.7)	(0.01—0.30)	(3.9—5.9)	(23.1—66.0)	(3.3)	
		188.0	0.19	9.4	42.9	6.1	
南岭 山地		(38—1436.6)	(0.02—0.67)	(4.0—16.4)	(22.4—03.6)	(3.5—9.8)	
	1998.12.31—1999.1.2	47.3	0.104	13.3			
	1999.1.11—15	170.2	0.186	7.5			
	1999.1.18—20	78.7	0.166	11.1			
	2001.2.24—28	191.4	0.173	8.2			
云南 勐养	2001.3.7—8	201.7	0.140	7.2			
	1997.11.26	81.7	0.082	9.2	41.0	5.3	40
		(10.9—388.5)	(0.003—0.258)	(4.6—27.2)	(19.2—78.4)	(3.2—19.2)	
	1997.11.28	313	0.116	7.3	40.0	3.8	44
		(2.2—955.2)	(0.001—0.568)	(4.0—17.6)	(14.4—80.0)	(3.2—11.9)	
	1997.11.29	315	0.174	7.6	31.5	5.4	18
		(16.4—2437.7)	(0.007—0.667)	(4.0—16.5)	(12.8—60.8)	(3.2—19.2)	

注：表中括号内数字为该参量的最大与最小观测值。表中除本次雾的观测仪器为FM-100型雾滴谱仪外，其他均为三用滴谱仪。

超过 $19.5\mu\text{m}$ 的雾滴仅占总雾滴数的 2.5%。整个雾滴谱分布与重庆沙坪坝的观测结果相似。

为了研究每个子过程雾微物理特征的差异,图3给出了4个子过程雾滴谱分布,它们都满足 Deirmendjian 分布。

为了比较4个子过程雾滴谱的差异,我们将它们实际雾滴谱分布绘在一张图上(图4)。由图可

见,第1、第2个子过程雾滴谱差异不大,但在直径大于 $29.5\mu\text{m}$ 的一段,第2个子过程雾滴数明显增多,因而含水量明显增大(表2),第3、第4个子过程谱分布曲线明显下降,而且呈下凹形,特别是在直径大于 $9.5\mu\text{m}$ 的大滴段,与第1、第2个子过程相比,各档粒子数几乎小了一个量级,所以后2个子过程的含水量比前2个子过程约小一个量级,能见度也

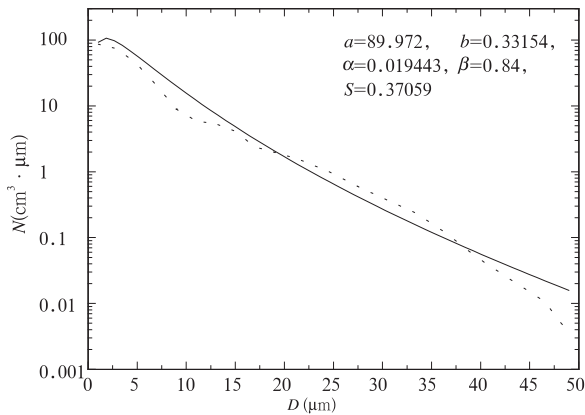


图2 2006年12月24—27日南京雾总过程
平均雾滴谱分布

(虚线为实测值,实线为由公式计算得到的谱分布)

Fig. 2 Average droplet spectrum distribution of
the whole fog process in Nanjing in 24—27
December 2006 (dash line: observed spectrum;
solid line: simulated spectrum)

明显上升(图1)。

4个子过程雾滴谱差异非常明显(图4),结合由飞艇探空得到的比湿时间高度剖面图(第1个及第2个子过程,图5),可以发现:从25日07时开始,近地面比湿逐渐增大,16时达最大值。26日入夜后,近地面比湿持续增大,16时达到6.0 g/kg,由风的时间高度剖面图(图略)得知,近地层水汽来自西南气流。源源不断的水汽平流,使得雾体得到了充分的水汽供应。雾滴核化、凝结、碰并等微物理过程得到了充分发展,因而雾滴数密度、含水量长时间维持在较高水平。到第3个子过程,水汽平流已不明显,第4个子过程,北边冷空气已经逼近,雾体进入消散阶段。这就是4个子过程谱分布曲线出现差异的主要原因。在第4个子过程期间,即从27日午夜开始直到雾消,已断续下毛毛雨。这期间,雾顶明显升高,27日06时达900 m以上,以后变成低云。

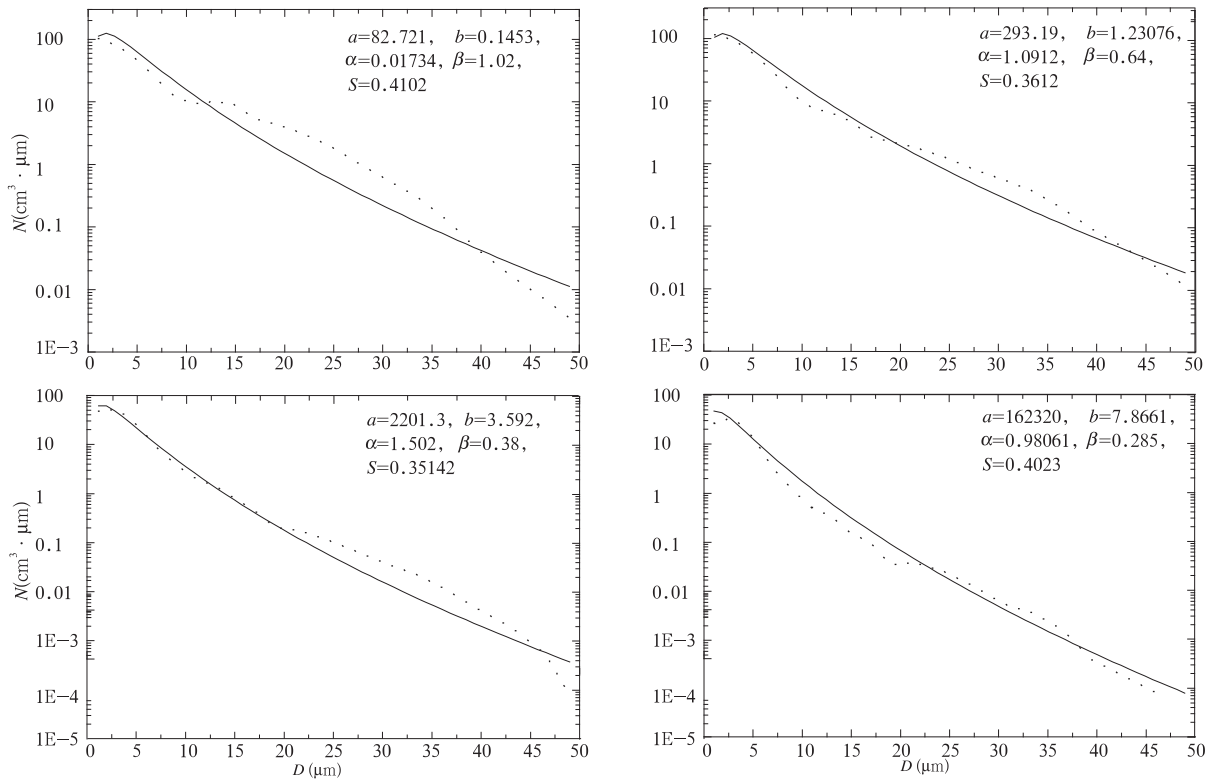


图3 南京雾各个子过程平均雾滴谱分布

(虚线为实测线,实线为拟合线; a. 第1个子过程, b. 第2个子过程, c. 第3个子过程, d. 第4个子过程)

Fig. 3 Average droplet spectrum distributions for the four fog processes in 24—27 December 2006 in Nanjing
(dash line: observed spectrum, solid line: simulated spectrum;
a. first process, b. second process, c. third process, d. forth process)

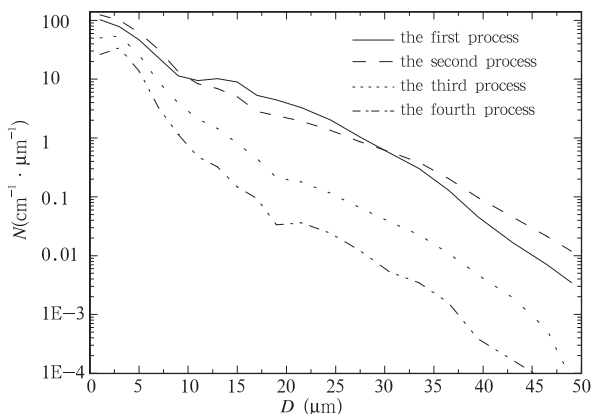


图4 4个子过程雾滴谱比较
Fig. 4 Intercomparison of the fog droplet size distributions in the four processes in 24–27 December 2006

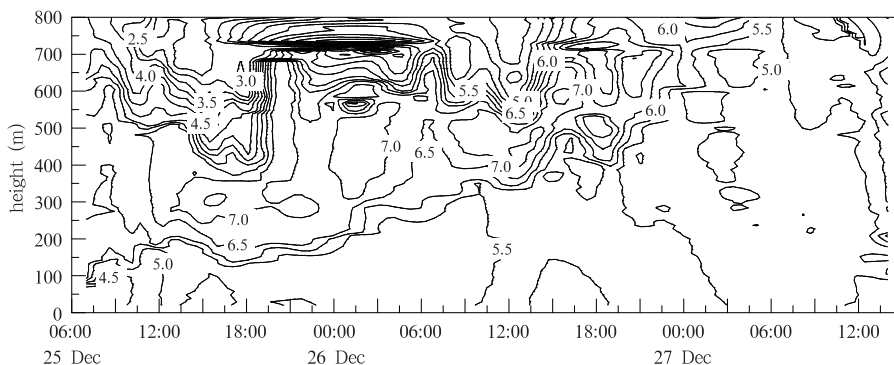


图5 比湿时间高度剖面图
Fig. 5 Height-time cross-section of specific humidity in 25–27 December 2006

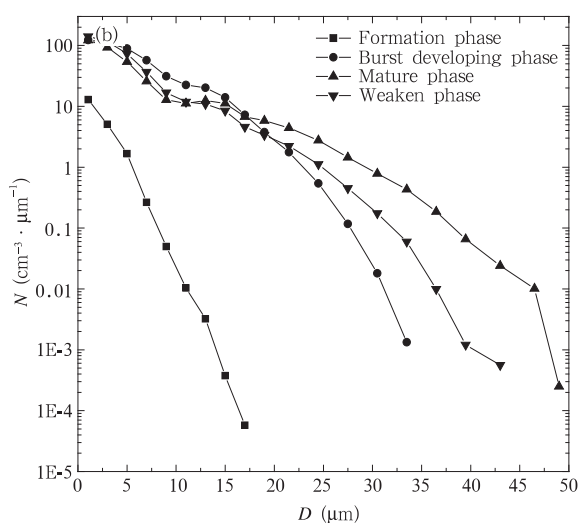
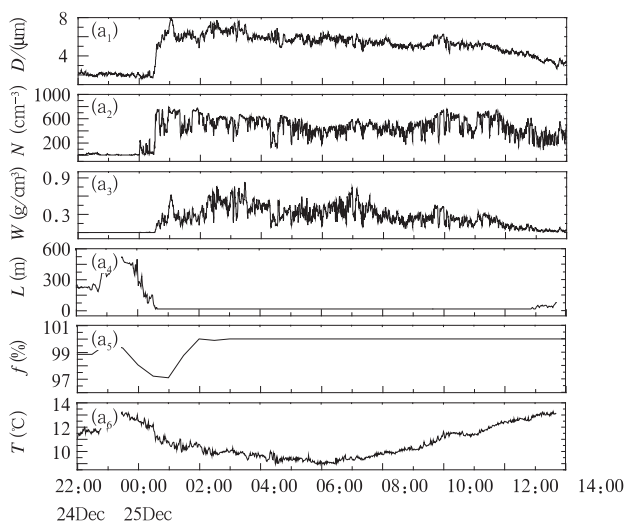


图6 第1个子过程的微物理参数(a)和谱分布(b)随时间的变化
(a₁. 平均直径, a₂. 数密度, a₃. 含水量, a₄. 能见度, a₅. 相对湿度, a₆. 温度)

Fig. 6 Temporal evolution of the microphysical parameters in the first process (22:00 BST 24–14:00BST 25 December 2006) and spectrum distributions (b) in various phases of the first fog process

6 微物理参数的演变特征

这里选取第1个子过程进行详细分析,图6给出了第1个子过程南京雾平均直径(D)、数密度(N)、含水量(W)、能见度(L)、相对湿度(f)、温度(T)随时间的变化曲线和谱分布。根据这些参数的变化特征,将第1个子过程分为生成、发展、成熟和减弱4个阶段。表4给出了该子过程各个阶段微物理结构的特征参量。由图6和表4可以看到:

(1) 生成阶段,含水量很小且几乎没有起伏变化,温度有较小起伏,主要受水汽凝结潜热释放的影响,先上升而后辐射降温,能见度升温时增大,温度下降时减小。此时,数密度及平均直径都很小,含水量仅有 0.0005 g/m^3 。此时间段贴地层有明显的白

表4 第1个子过程各个阶段雾微物理结构参量
Table 4 Microphysical parameters of the fog in various phases of the first process

	生成阶段			发展阶段			成熟阶段			减弱阶段		
	24日22:08—25日00:39			25日00:39—01:11			25日01:11—10:06			25日10:06—13:49		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
数密度 $N(\text{cm}^{-3})$	25.04	667.5	2.172	580.65	858.9	104.46	488.65	786.69	95.85	535.45	794.077	158.061
含水量 $W(\text{g}/\text{m}^3)$	0.0005	0.03328	1.05×10^{-5}	0.2238	0.6296	0.03828	0.3474	0.8996	0.0327	0.1983	0.429916	0.036
平均直径 $D(\mu\text{m})$	2.04	3.118	1.338	5.845	8.102	2.812	5.814	8.024	3.848	5.22	6.251	4.102
最大直径 $D_{\text{max}}(\mu\text{m})$	23.5	443	11.5	40.97	46.5	30.5	48.33	49.5	30.5	47.44	49.5	40.5
峰值直径 $D_p(\mu\text{m})$	1.5	1.5	1.5	3.04	3	1.5	2.165	3	1.5	3.51435	3	1.5

色雾团陆续出现,为浓雾发展酝酿条件。

(2) 爆发性发展阶段:25日00:38开始温度急剧下降(图6),能见度从500 m下降到150 m,含水量开始增大。从00:38经过6 min的发展,温度下降1℃,能见度骤降至15 m,数密度从55个/cm³增长到761个/cm³,含水量从0.002 g/m³增长到0.1176 g/m³,平均直径从2.9 μm变化到7.65 μm。直到01:11,雾滴谱线上抬、加宽,呈上凸型(图6b)。这表明这一阶段凝结核化、凝结增长微物理过程特别活跃,造成数密度剧增,雾滴谱曲线上抬并向大滴端变化,使谱加宽,从而含水量及平均直径都急剧增长。这30 min是雾爆发性发展阶段。

(3) 成熟阶段:从25日01:11开始,直到10:06,气温先是持续下降,日出后持续上升, N 、 W 、 D 都在较大的水平上起伏变化,而能见距离始终维持在15 m以下。这一阶段的谱分布曲线大滴段明显上抬(图6b),而小滴段有所降低,滴谱在4、16 μm出现两个峰值,最大直径、含水量达到最大。这表明,除核化、凝结过程之外,出现了明显的雾滴碰并增长过程。由于碰并,使得大滴增长,小滴减少。

(4) 减弱阶段:从25日10:06开始,随着温度继续升高,数密度、含水量及平均直径都在减小,13:10能见度开始变大并逐渐达到80 m。这主要受太阳辐射影响,雾滴蒸发,大滴沉降,从而使雾减弱。在图6b中看到,这一阶段谱分布曲线明显下降,特别是大滴一端下降特别明显,谱宽减小。

总体看来,这次浓雾是夜晚随着温度的下降而发展起来的,午夜达到最强,日出后随着气温的升高逐渐减弱,中午开始明显减弱。其他3个都有类似的变化特征,这种变化反映了辐射雾日变化的特征。

7 结 论

(1) 本次浓雾过程雾滴平均数密度为320.335

个/cm³,变化范围1.132—1261.87个/cm³;含水量最小 6.18×10^{-6} g/m³,最大1.018 g/m³,平均值为0.1530 g/m³;平均直径4.157 μm,变化范围1.338—8.102 μm;雾滴的平均含水量和平均直径与1996年观测结果相当,含水量最大值比1996年观测结果大4倍,数密度比10年前小。

(2) 前2个子过程的雾滴数密度、含水量很高,造成了南京本次大雾能见度长时间低于50 m以下的恶劣天气。形成这种强浓雾的主要原因是近地层持续存在强盛的水汽平流,具有平流雾的特征。

(3) 总过程的谱分布及4个子过程的谱分布都服从Deirmendjian分布,谱型都基本呈指数下降,雾滴主要集中在小滴段。

(4) 这次浓雾是在夜间晴空辐射降温后形成的,午夜最强,日出后随着气温的升高逐渐减弱,反映了辐射雾的日变化特征。

(5) 雾形成以后,开始变化不大,但随着进一步辐射降温,地面雾团不断产生,雾爆发性发展,仅半个小时,含水量由0.002 g/m³突增到0.117 g/m³,雾迅速变成强浓雾。

References

Arends B G, Kos G P A, Wovrock W, et al. 1992. Comparison of techniques for measurements of fog liquid water content. *Tellus*, 44B:604-611

Bao Baotang, Shu Jiaxin, Zhu Binqun. 1995. Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai. *J Nanjing Inst Meteor* (in Chinese), 18(1):114-118

Deng Xuejiao, Wu Dui, Ye Yanxiang. 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling Mountain region. *J Tropical Meteor* (in Chinese), 18(3):227-236

Eldridge R G. 1961. A few fog drop-size distributions. *J Atmos Sci*, 18:671-676

Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. 2006. Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest.

- Agri Forest Meteor, 139:288-306
- Fahey, K M, Pandis S N, Collett Jr J L, et al. 2005. The influence of size-dependent droplet composition on pollutant processing by fogs. *Atmospheric Environment*, 39:4561-4574
- Francesco T, Claudio T. 1976. Size distribution models of fog and cloud droplets and their volume extinction coefficients at visible and infrared wavelengths. *Pure Appl Geophysics*, 114(4):571-586
- Gerber H E. 1981. Microstructure of a radiation fog. *J Atmos Sci*, 38(2):454-458
- Guo Enming, Yu Xiangren, Li Yanhui, et al. 1989. The study on macro-and micro-structures of Shuangliu Airport fog. The Disquisition Volume of China Cloud Physics and Weather Modification (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 246pp
- Guo Enming, Liu Yangang, Shu Jiaxin. 1990. The study on macro-and micro-structures of Huangpu River fog. *J Beijing Inst Meteor (in Chinese)*, 1:46-49
- Huang Jianping, Mei Qingyin, Jin Yongcai, et al. 1998. Micro-physical structure features and evolution processes of radiation fog in Huming Region. *Meteor Mon (in Chinese)*, 24(5):3-8
- Huang Yusheng, Xu Wenrong, Li Zihua, et al. 1992. An observation and analysis on the radiation fog in Xishuangbanna. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 50(1):112-117
- Huang Yusheng, Huang Yuren, Li Zihua, et al. 2000. The micro-physical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 58(6):715-725
- Hudson J G. 1980. Relationship between fog condensation nuclei and fog microstructure. *J Atmos Sci*, 37(8):1854-1867
- Klemm O, Wrzesinsky T, Scheer C. 2005. Fog water flux at a canopy top: Direct measurement versus one-dimensional model. *Atmos Environ*, 39:5375-5386
- Kumai M. 1973. Arctic fog droplet size distribution and its effect on light attenuation. *J Atmos Sci*, 30(4):635-643
- Kunkel B A. 1971. Fog drop-size distributions measured with a laser Hologram Camera. *J Applied Meteor*, 10(3):482-486
- Li Zihua, Zhang Limin, Lou Xiaofeng. 1993. The macro-and micro-structure of winter fog in the Chongqing urban district and the physical cause of its formation. *J Nanjing Inst Meteor (in Chinese)*, 16(1):46-54
- Li Zihua, Peng Zhonggui. 1994. Physical and chemical characteristic of the Chongqing winter fog. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 16(1):46-54
- Li Zihua, Wu Jun. 1995. Winter fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing. *J Nanjing Inst Meteor (in Chinese)*, 18(1):46-51
- Li Zihua, Huang Jianping, Zhou Yuquan, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 57(5):622-631
- Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 59(5): 616-624
- Ma C J, Kasahara M, Tohno S. 2003. Application of polymeric water absorbent film to the study of drop size-resolved fog samples. *Atmos Environ*, 37:3749-3756
- Meyer M B, Justo J E, Lala G G. 1980. Measurements of visual range and radiation-fog (Haze) microphysics. *J Atmos Sci*, 37(3):622-629
- Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975. The life cycle of valley fog. Part I: micrometeorological characteristics. *J Appl Meteor*, 14(3):347-363
- Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975. The life cycle of valley fog. Part II: Fog microphysics. *J Appl Meteor*, 14(3): 364-374
- Podzimek J. 1997. Droplet concentration and size distribution in haze and fog. *Studia Geoph et Geod*, 41:277-296
- Pu Meijuan, Li Liangfu, Li Zihua. 2001. Study of physical process of the Xishuangbanna valley fog in winter. *Scientia Meteorological Sinica (in Chinese)*, 21(4):425-431
- Pu Meijuan, Shen Shuqin. 201. The weather and climat character of fog in Jiangsu and the primary weather system of forming heavy fog. The Weather Services Enchiridion of Jiangsu Decision-Making (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 91-95
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. On some quasi-periodic oscillations observed during a field investigation of radiation fog. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102:355-359
- Schell D, Georgii H W, Maser R, et al. 1992. Intercompation of fog water samplers. *Tellus*, 44B:62-631
- Tang Haohuagn, Fan Shaojia, Wu Dui, et al. 2002. Research of the microphysical structure and evolution of dense fog over Nanling Mountain Area. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 41(4):92-96
- Taylor G I. 1917. The formation of fog and mist. *Quart J Roy Met Soc*, 43:241-268
- Wang Geng-chen. 1981. An analysis of the microphysical structure of fog. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 39(4):452-459
- Wendisch M, Mertes S, Heintzenberg J, et al. 1998. Drop size distribution and LWC in Po valley fog. *Contril Atmos Phys*, 71: 87-100
- Wu Dui, Deng Xuejiao, Mao Jietai, et al. 2007. A study on macro-and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayao Mountain. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(3):406-41
- Wu Dui, Deng Xuejiao, Ye Yanxiang, et al. 2004. The study on fog water chemical composition in Dayaoshan of Nanling Mountain. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 62(4):476-485
- Xu Jingqi, Zhang Zheng, Wei Hao. 1994. Measurement and analysis of droplet spectrum and liquid water content of sea fog. *Transactions Oceanology Limnology (in Chinese)*, 16(2):174-178
- Yang Liansu. 1985. A preliminary observations of the microphysical

structure of fog in Qingdao Area. Marine Sciences (in Chinese), 9(4):49-50

Yang Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Biao. 1989. The forming and microphysical structure of sea fog in spring in Zhoushan Region. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 11(4):431-438

Zhan Lishan, Chen Wankui, Huang Meiyuan. 1965. The Preliminary analysis of cloud micro structure undulation data in Nanyue and Taishan. The Study of Microphysical Characteristics in Cloud, Fog and Precipitation of China (in Chinese), Beijing: Science Press, 30-40

附中文参考文献

鲍宝堂, 束家鑫, 朱炳权. 1995. 上海城市雾理化特征的研究. 南京气象学院学报, 18(1):114-118

邓雪娇, 吴兑, 叶燕翔. 2002. 南岭山地浓雾的物理特征. 热带气象学报, 18(3):227-236

郭恩铭, 俞香仁, 李炎辉等. 1989. 双流机场雾宏微观结构研究//全国云物理和人工影响天气会议文集. 北京: 气象出版社, 246pp

郭恩铭, 刘延刚, 束家鑫. 1990. 黄浦江雾宏微观结构研究. 北京气象学院学报, 1:46-49

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. 气象, 24(5):3-8

黄玉生, 许文荣, 李子华等. 1992. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. 气象学报, 50(1):112-117

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. 气象学报, 58(6):715-725

李子华, 张利民, 楼小凤. 1993. 重庆市冬季雾的宏微观结构及其物理成因. 南京气象学院学报, 16(1):46-54

李子华, 彭中贵. 1994. 重庆市冬季雾的物理化学特征. 气象学报, 52(4):477-483

李子华, 吴君. 1995. 重庆市冬季雾滴谱特征. 南京气象学院学报, 18(1):46-51

李子华, 黄建平, 周毓荃等. 1999. 1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征. 气象学报, 57(5):622-631

李子华. 2001. 中国近40年来雾的研究. 气象学报, 59(5):616-624

濮梅娟, 李良福, 李子华. 2001. 西双版纳地区雾的物理过程研究. 气象科学, 21(4):425-431

濮梅娟, 沈树勤. 2001. 江苏大雾天气气候特征及形成大雾的主要天气系统//江苏省决策气象服务手册. 北京: 气象出版社, 91-95

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. 中山大学学报(自然科学版), 41(4):92-96

王庚辰. 1981. 雾微物理结构的观测分析. 气象学报, 39(4):452-459

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. 气象学报, 65(3):406-41

吴兑, 邓雪娇等. 2004. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. 气象学报, 62(4):476-485

徐静琦, 张正, 魏皓. 1994. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析. 海洋湖沼通报, 16(2):174-178

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

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. 海洋学报, 11(4):431-438

詹丽珊, 陈万奎, 黄美元. 1965. 南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析//我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社, 30-40