

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 Zihua, Liu Duanyang, Yang Jun. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 41–54.

辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件

李子华 刘端阳 杨军

南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

摘 要 为研究南京雾的物理化学过程, 2006~2007 年冬季, 在南京信息工程大学(原南京气象学院)院内进行了雾的外场综合观测实验, 共获得 27 次雾过程资料, 其中有 22 次过程进行了全过程不间断的雾滴谱和湍流观测。根据雾滴谱分布特征可以将辐射雾分为宽谱辐射雾(都为强浓雾, 最大直径大于 $40\ \mu\text{m}$)和窄谱辐射雾(多为浓雾, 最大直径小于 $22\ \mu\text{m}$)两类。辐射雾由浓雾发展为强浓雾的过程中, 都具有爆发性增强特征, 其本质就是雾滴谱爆发性拓宽, 数密度和含水量骤然增大。本文详细分析了爆发性拓宽的宏观条件和微物理过程。结果指出, 雾滴谱爆发性拓宽是在降温速率加大(即过饱和度加大)条件下出现的, 浓雾阶段地面的弱冷平流及日出后湿地表水分蒸发都易引起雾滴谱爆发性拓宽。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。雾滴谱的“拓宽”具有阶梯式的特征; 当降温速率很大, 即过饱和度很大时, 各档雾滴数可不断增多, 谱宽可连续增大。湍流不仅对动量、热量和水汽的垂直输送起着重要作用, 也是雾滴碰并增长过程不可缺少的条件。

关键词 辐射雾 雾滴谱 拓宽 南京

文章编号 1006-9895(2011)01-0041-14

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Microphysical Processes and Macroscopic Conditions of the Radiation Fog Droplet Spectrum Broadening

LI Zihua, LIU Duanyang, and YANG Jun

School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract In order to study the physical-chemical processes of fog in Nanjing, field observations were conducted in Nanjing University of Information Science & Technology during the winters of 2006 and 2007, when 27 fog cases were acquired, including 22 cases of contiguous fog droplet spectrum data. According to the droplet spectrum distribution the radiation fog could be divided into wide-spectrum one, which is all extremely dense fog with the maximum diameter more than $40\ \mu\text{m}$, and narrow-spectrum one, most of which is dense fog with the maximum diameter less than $22\ \mu\text{m}$. During developing from dense fog to extremely dense fog, the radiation fog is characterized by the explosive deepening, whose nature is the fog droplet spectrum burst broadening, and the increase of number concentration and LWC. The macroscopic condition and microphysical process of the fog droplet spectrum burst broadening were detailedly analyzed in this paper, and the result shows that: the fog droplet spectrum burst broadening occurred during the period of temperature rapid decline (Super-saturation increase). The weak cold advection or the water evaporation from the wet surface after sunrise during the dense fog episode is apt to cause the burst broadening.

收稿日期 2009-12-27, 2010-07-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40975085, 公益性行业(气象)专项 GYHY(QX)2007-6-26、GYHY200906012, 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题项目(2009006), 江苏省自然科学基金重点招标项目 BK2007727

作者简介 李子华, 男, 教授, 长期从事云雾物理学教学和研究。E-mail: lizihua1936@sina.com

ning of the fog droplet spectrum. Early fog droplet spectrum broadening was mainly based on nucleation and condensation, but coalescence and condensation during the late period. The droplet spectrum “widening” has the characteristic of a ladder-type, but when the cooling rate and the degree of supersaturation are very large, the number of fog drops in all bins could increase, and the maximum diameter could enlarge continuously. The turbulence not only plays an important role in the vertical transmission of momentum, heat, and water vapor, but also is the important condition for fog droplet collision broadening.

Key words radiation fog, fog droplet spectrum, broadening, Nanjing

1 引言

雾的微物理结构特征量主要包括含水量、平均直径、雾滴数密度以及雾滴谱分布等,观测研究其变化规律,对了解雾的微物理过程十分重要。雾物理中基本问题之一,就是雾滴谱的形成问题,而雾滴谱的拓宽又是浓雾(能见度小于 500 m)和强浓雾(能见度小于 50 m)形成和发展的关键问题。不仅需要了解雾形成和发展中宏观条件的作用,更需要研究宏观过程和微观过程的相互制约、相互作用,尤其要综合研究凝结过程和碰并过程,以解决实际雾滴谱的拓宽问题。这可以了解雾滴谱的形成机理,而且对雾的预报和人工消雾都有重要意义。

国内外对雾的微物理特征研究比较多。早期, Eldridge (1961) 观测分析了雾滴谱分布、含水量以及能见度的变化特征。1970 年, Pilie et al. (1975a, 1975b) 在美国纽约附近的埃尔迈拉山谷对山谷雾进行了包括雾滴谱分布、含水量、数密度、霾、云凝结核以及多种常规气象要素的外场综合观测。1971 年, Roach (1976)、Roach et al. (1976) 对辐射雾进行的观测研究中发现了微物理参量呈准周期振荡变化的特征。Kunkel (1971) 利用激光全息照相机对雾进行了采样,分析讨论了不同样本之间雾滴谱分布的变化,以及几次雾过程的平均滴谱特征。Meyer et al. (1980) 分析了一次辐射雾的霾—雾转化过程,研究了霾雾转化过程中雾微物理参量的变化特征。Goodman (1977) 于 1974、1975 年夏季在旧金山半岛,研究美国西海岸平流雾微物理特征量的垂直分布时发现,每次雾过程中的平均雾滴半径、含水量都随高度增加,而且在雾朝海岸方向发展时滴谱有加宽的现象。Gerber (1981) 在研究中发现,湍流混合是造成雾的形成和雾滴谱加宽的主要原因,但对雾的拓宽微物理机制却未加以讨论。近年来, Podzimek (1997)、Ma et al. (2003)、

Eugster et al. (2006) 都对雾的微物理参量进行了观测研究, Fahey et al. (2005)、Klemm et al. (2005) 还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。以上对雾微物理特征的研究,极少提到雾滴爆发性拓宽问题。

中国许多学者(王庚辰, 1981; 郭恩铭, 1989, 1990; 黄玉生等, 1992, 2000; 李子华等, 1992, 1993, 1999a, 1999b, 2008; 李子华和彭中贵, 1994; 鲍宝堂, 1995; 李子华和吴君, 1995; 黄建平等, 2000; 李子华, 2001; 邓雪娇等, 2002, 2007; 唐浩华等, 2002; 吴兑等, 2004, 2007; 刘端阳, 2008; 何晖, 2009; 刘端阳等, 2009; 吴彬贵, 2010) 都对内陆不同地区雾的微物理特征进行了研究, 杨连素 (1985)、杨中秋等 (1989)、徐静琦等 (1994) 还分析了海雾微物理结构的特征。通过这些研究,基本搞清了中国各地雾的微物理结构特征,发现城市发展后对雾微物理结构影响较大(李子华等, 2008)。在观测的基础上,张利民和李子华 (1993)、Shi et al. (1996)、黄建平等 (2000) 还进行了数值模拟研究,研究辐射雾发展的物理过程及城市发展对雾的影响。研究结果还表明,在雾发展过程中,雾滴谱是在不断变化的,而这种变化又与宏观物理过程密切相连,相互依赖、相互促进、相互影响。特别提出的是,雾在发展过程中,常有爆发性发展特征(李子华等, 1999a)。进一步研究表明,雾体爆发性发展,本质上就是雾滴爆发性增多、增大,使雾滴谱拓宽(濮梅娟等, 2008),从而使浓雾变为强浓雾。但由于过去所使用的雾滴谱观测仪器时间分辨率不高,故对雾滴谱如何拓宽的微物理过程无法观测研究。

暖云降水的主要机制是云滴碰并增长,但大滴是如何产生的,始终是云降水科学工作者最为关注的问题。云和雾的本质是一样的,直接在云中观测云滴增长过程却很困难,而雾发生于地面,随着现

代化雾滴谱观测仪器的出现, 直接观测雾滴增长的微物理过程已成为可能。研究雾滴谱爆发性拓宽的规律, 不仅具有理论意义, 且具有重大的实际应用价值。各种重大的交通事故, 多在强浓雾中尤其在浓雾突然增强为强浓雾时发生, 2006 年 12 月 24~27 日的平流辐射雾过程, 宁靖盐高速泰兴段上 8 辆车追尾翻车, 造成 7 人死亡 5 人受伤, 还有两艘 4000 吨船在长江南京段相撞, 造成“宣城货 3859”沉没、4 人落水 (南京晨报, 2006), 就是发生在雾爆发性增强时段。

我们于 2006 年和 2007 年冬季, 在南京郊区 (南京信息工程大学田径场) 进行了雾的综合观测实验。观测内容包括雾物理和化学结构以及动力和热力过程。共获得 27 次雾过程资料, 其中有 22 次过程进行了不间断的雾滴谱和湍流观测。在雾发生发展过程中, 雾滴谱连续观测, 每秒 1 个样本, 共获得 923640 样本。本文利用雾滴谱资料, 重点分析了辐射雾雾滴谱拓宽的宏观条件及微物理过程, 研究了雾滴谱拓宽的机制。

2 仪器介绍及资料处理

雾微物理结构的观测是利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪。雾滴谱仪的工作原理是: 用一功率强大的风扇以约 13 m/s 的速度抽取空气, 使空气通过激光束。为了不扰乱风场, 风扇被放在地上一个不受天气影响的箱子里, 通过一 10 m 长的真空吸尘器管把 FM-100 与风扇连接起来 (Eugster et al., 2006)。仪器根据前向散射原理测量雾滴的数量和大小。雾滴谱仪分 20 档, 测量的粒径范围 0~50 μm (表 1), 最大数密度为 10^4cm^{-3} 。观测连续进行, 从雾生成开始到雾消散终止, 每秒钟产生一组数据。所有观测, 雾滴谱都选择了 20 档。由于第一档的起始范围不确定 (小于 2 μm), 并且该档中干气溶胶粒子占多数, 影响了雾滴的测量, 本文在资料分析中去除了该档。去除第一档后的分析结果与未去除前的进行了对比, 除数密度减小较大外, 含水量变化不大, 平均直径增大较多。系留汽艇探测边界层温度、气压、相对湿度、风向和风速, 有雾时每小时观测一次。CSAT3 超声风速仪测量三维风速和超声虚温, 多普勒声雷达探测边界层三维风的垂直分布, 观测数据均采用每分钟平均。

表 1 雾滴谱仪各档采样范围

Table 1 The sample scope of each bin of the fog monitor

档号	每档尺度/ μm	档号	每档尺度/ μm
1	0~2	11	20~23
2	2~4	12	23~26
3	4~6	13	26~29
4	6~8	14	29~32
5	8~10	15	32~35
6	10~12	16	35~38
7	12~14	17	38~41
8	14~16	18	41~45
9	16~18	19	45~48
10	18~20	20	48~50

由于是综合观测实验, 观测现场还安装有气溶胶、大气化学、大气辐射以及常规气象等观测仪器, 详细情况可参阅刘端阳等 (2009)。

3 辐射雾滴谱分布

进行雾滴谱观测的 22 次雾过程中, 辐射雾占 13 次。图 1 为 13 次辐射雾过程的平均谱分布特征。由图 1 可见, 这 13 次辐射雾出现了两类不同类型的谱分布型, 一类雾滴谱较宽, 最大滴直径大于 40 μm , 各档粒子数密度都比较大 (谱分布在粗实线之上), 峰值出现在 2 μm 、13 μm 和 21 μm 左右; 另一类雾滴谱较窄, 最大滴仅 22 μm , 各档粒子数密度比较小, 且呈指数快速递减, 没有出现第二个峰值 (谱分布曲线在粗实线之下)。两类辐射雾平均谱分布如图 2 所示。滴谱比较宽的雾, 都经历了强浓雾 (能见距离小于 50 m) 的发展过程; 滴谱比较窄的雾, 一般为浓雾 (能见距离小于 500 m), 能见度最低在 100~200 m 之间, 个别过程中也出现过短暂的强浓雾。

表 2 给出了这两类辐射雾从生成到消散整个过程平均的微物理参数, 由表可见, 从平均值来看, 宽谱辐射雾的雾滴数密度要比窄谱辐射雾大 1 个量级, 含水量要大 2 个量级。最大的差别是, 宽谱辐射雾的谱宽要比窄谱辐射雾大 1 倍以上。

4 雾滴谱拓宽的爆发性特征

雾滴谱拓宽的基本特征是什么? 这个问题就是浓雾怎样转变为强浓雾的关键问题, 也是人们特别关注的问题。

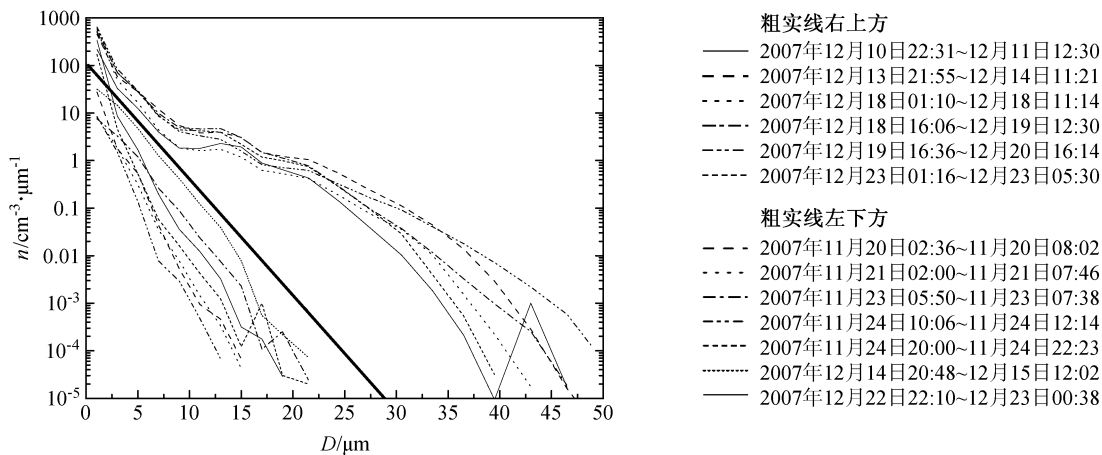


图 1 每个辐射雾过程的平均谱分布特征 (北京时, 下同)。n: 雾滴数密度; D: 直径
Fig. 1 Average droplet spectrum distribution of each radiation fog. n: fog droplet number concentration; D: diameter

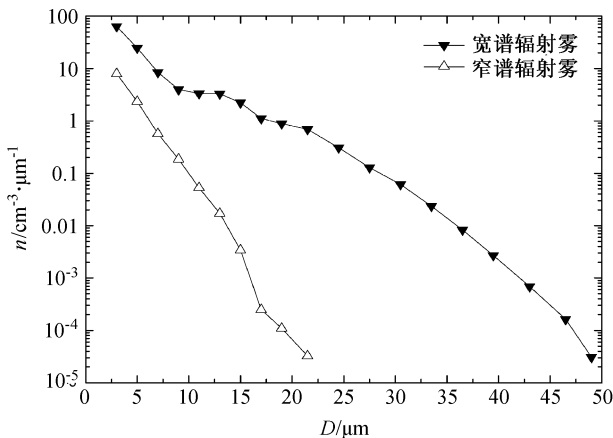


图 2 两类辐射雾的平均谱分布特征
Fig. 2 Average droplet spectrum distribution of two types of radiation fog

	宽谱辐射雾		窄谱辐射雾	
	平均值	范围	平均值	范围
数密度/cm ⁻³	121	1~1213	12	1~723
液态含水量/ g·m ⁻³	0.039	1.82×10 ⁻⁵ ~ 0.479	0.00056	5.47×10 ⁻⁶ ~ 0.059
算术平均直 径/μm	3.98	3~8.60	3.20	3~4.67
峰值直径/μm	3.0	3.0	3.0	3.0
最大直径/μm	16.12	2.0~50.0	6.7	4.0~23.0
样本数 (个)	30434	12724		

为了研究这个问题, 我们对 13 次辐射雾过程做了微物理参数随时间连续变化图。图 3 选用了几

个代表性的例子, 其中图 3a 为拓宽的雾滴谱, 图 3b 为窄的雾滴谱。由图 3a 可见, 雾滴谱拓宽, 都有爆发性发展的特征。即在很短时间 (约 30 分钟) 内, 雾滴数密度明显增加, 雾滴谱明显增宽, 冲过 20 μm, 一般可达到 30~40 μm 甚至 50 μm。结果含水量明显增大, 能见距离减小到 50 m 以内, 浓雾突变为强浓雾。强浓雾持续时间都在 1 小时以上, 多为 4~5 小时。在图 3b 中, 谱比较窄的雾, 没有出现爆发性发展过程, 有的虽有短时的增强 (如 12 月 23 日雾), 但大滴始终在 22 μm 以内。

为了详细分析雾滴谱爆发性拓宽的特征, 我们将爆发性发展的一段时间分辨率放大, 同时给出同步变化的气象参量和雾滴谱特征参数 (能见度、算术平均直径、数密度、含水量、风速、风向、气温、最大直径) (图 4)。由图 4 可见, 2007 年 12 月 11 日雾最先变化的微物理参数是数密度 (N), 约 07:14, N 增大, 随之平均直径稍有增大, 能见距离下降。而后, 这几个参数起伏变化。07:30 之后, 数密度快速增长, 与此同时, 平均直径和含水量上升, 能见度骤降到 50 m 以下。07:55 时, 数密度、平均直径、含水量几乎同时达到峰值。表 3 列出了 07:30 和 07:55 的微物理参数平均值和能见距离, 由表可见, 仅仅 25 分钟的发展, 雾滴数密度和含水量分别增加了 8 倍和 2 个数量级, 雾滴平均直径增大了 1 倍, 谱宽从 11.4 μm 骤增到 46.5 μm, 能见度由 96 m 减小到 15 m, 浓雾变成强浓雾。所以可以将 07:30~07:55 这段时间称为雾的爆发性发展阶段。表 3 中还列出了其它几次辐射雾爆发性

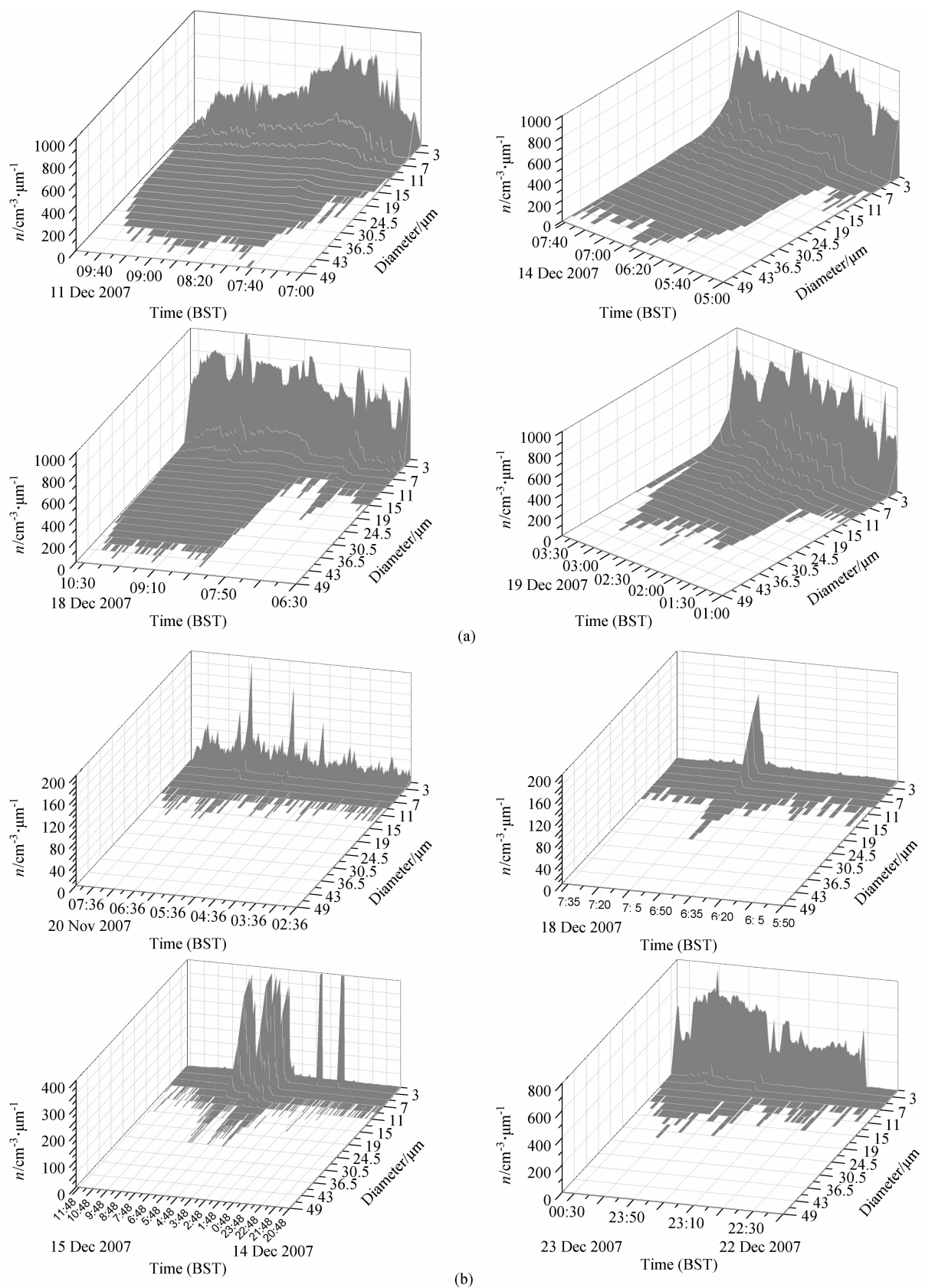


图 3 辐射雾谱分布随时间变化图：(a) 宽谱；(b) 窄谱
Fig. 3 The time evolution of radiation fog droplet spectrum (BST: Beijing Standard Time): (a) Broad spectrum; (b) narrow spectrum

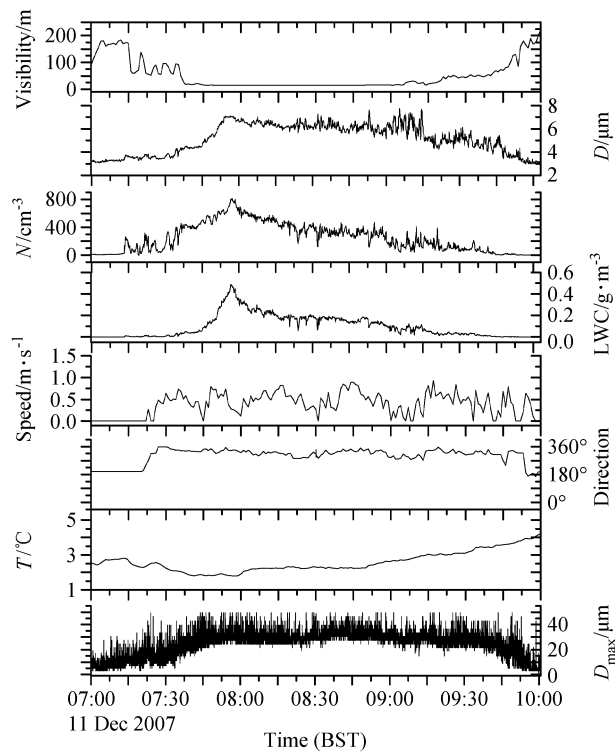


图4 2007年12月11日强浓雾前后的微物理参量(能见度、算术平均直径、数密度 N 、含水量、风速、风向、气温、最大直径 $D_{\max}$)变化特征

Fig. 4 Temporal variation of microphysical parameters (visibility, average diameter D , number concentration N , LWC, wind speed, wind direction, air temperature, maximum diameter $D_{\max}$) for the extremely dense fog on 11 Dec 2007

增强前后微物理参量的变化,由表可见,经过近30分钟(2007年12月23日午夜仅用11分钟)的爆发性发展,雾体都由浓雾(能见度小于500 m)骤变为强浓雾(能见距离小于50 m),其本质是雾滴谱谱宽由10 μm 左右拓宽到30~50 μm ,雾滴数密度增加一个数量级,含水量增大2个数量级。

5 雾滴谱爆发性拓宽的宏观条件

雾滴谱爆发性拓宽是怎样发生的,在什么样的宏观条件下才能拓宽?濮梅娟等(2008)曾详细讨论过这个问题。夜晚长波辐射增强,气温急剧下降可使雾爆发性加强;日出后湿地表水分蒸发和近地层冷平流作用,可使雾骤然加浓;上层暖平流、地面层冷平流以及湍流混合作用,可使雾滴谱爆发性增宽。以上几种的共同特点,就是爆发时地面雾层明显降温或增湿,过饱和度增大。

表3列出了2007年7次雾爆发性发展时的宏观条件。由表可见,这7次雾爆发性发展时气温都明显下降。下降速度最快的为12月19日午夜的一次,在12分钟时间里,气温下降了1.5 $^{\circ}\text{C}$,一般的是10分钟内下降0.5 $^{\circ}\text{C}$ 左右。表3中给出了气温下降时风向风速的变化。可见多数都是在偏南风转为偏北风时而使气温下降的,风速多在1 m/s以内。也就是说,当浓雾区内有弱冷空气侵入时,易发生爆发性增强,使浓雾骤变为强浓雾。表3最

表3 拓宽前后的微物理参数和能见度以及爆发时的风向、风速和温度变化

Table 3 Microphysical parameters before/after fog droplet spectrum broadening and the changes of wind speed, wind direction, and temperature during the fog explosion

日期	爆发时段	N/cm^{-3}	$\text{LWC}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$D/\mu\text{m}$	$D_{\max}/\mu\text{m}$	能见度/m	风向变化/ $^{\circ}$	风速变化/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	气温变化
2007-12-11	07:30 开始	81.5	0.00233	3.44	11.4	96	199→359	0.64→0.39	−1.1 $^{\circ}\text{C}/26\text{min}$
	07:55 结束	675	0.412	7.05	46.5	15			
2007-12-14	05:45 开始	50	0.0018	3.44	9	176	229→345	0.40→0.39	−0.9 $^{\circ}\text{C}/22\text{min}$
	06:07 结束	510	0.251	6.57	39.5	15			
2007-12-18	08:17 开始	35.3	0.000975	3.33	7	258	244→350	0.66→0.72	−0.5 $^{\circ}\text{C}/25\text{min}$
	08:45 结束	471	0.179	6.33	43	16			
2007-12-19	01:40 开始	12.9	0.000275	3.14	5	160	188→342	0.28→0.46	−1.5 $^{\circ}\text{C}/12\text{min}$
	01:52 结束	700	0.22	5.90	30.5	16			
2007-12-19	04:40 开始	10.5	0.00025	3.23	5	342	147→340	0.6~0.2	−1.2 $^{\circ}\text{C}/20\text{min}$
	05:00 结束	459.5	0.187	5.72	46.5	20			
2007-12-19	22:47 开始	20.4	0.000475	3.25	7	182	156→143	2.31→1.61	−0.5 $^{\circ}\text{C}/23\text{min}$
	23:10 结束	296.1	0.024	4.14	30.5	15			
2007-12-23	01:41 开始	14	0.00043	3.37	7	132	50→50	0.2→0	−0.7 $^{\circ}\text{C}/11\text{min}$
	01:52 结束	580	0.0672	4.84	30.5	20			

下面的两次雾降温是在午夜辐射冷却增强时发生的。

举两个例子,如图 5a 所示,2007 年 12 月 19 日 01:26 以后南风转为偏北风,气温开始下降,雾滴开始起伏增长,能见度下降到 100 m。随着凝结潜热释放,气温一度小幅上升,能见距离随之增大到 250 m。在持续的偏北风影响下,加上夜晚长波辐射冷却作用,气温又快速下降,从 01:40 到 01:51 气温下降了 1.5℃。随着气温的快速下降,雾滴谱迅猛发展,数密度从 13 cm^{-3} 增大到 700 cm^{-3} ,含水量增大 3 个数量级,平均直接增大近 1 倍,最大直径由 $5\text{ }\mu\text{m}$,拓宽到 $30.5\text{ }\mu\text{m}$,能见度骤降为 15 m (表 3)。

03 时以后,风向转为东南风,气温也随之上升,雾滴谱明显变窄,能见度又升到 200 m 以上 (图 5 a)。04:30 以后又转为西北风,气温又急速下降,如图 5b 所示,雾又出现快速发展过程。所以在冷气流影响下,雾过程中可以有几次爆发性发展过程。

在 2007 年 12 月 11 日例中,爆发性发展不仅与降温有关,还与增湿相联。从图 4 气温变化曲线中可以看到,从 07:14 到 07:40 在不到半个小时

里,气温约下降了 1℃。仔细分析温度曲线,可以将这段时间的气温下降分为两个阶段:第一阶段 (07:14~07:20) 气温下降了 0.5℃ ($2.8\sim2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$),这是 06:55 日出后地面蒸发引起的。在后面的分析 (图 9) 中可以看到,这种蒸发一度达到 $0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,从而使雾区水汽明显增多。由于降温增湿,雾滴数明显起伏增多 (量级从 10^1 增大到 10^2),这又引起了潜热的释放,从而在气温变化曲线图中气温短暂升高。第二阶段 (07:25~07:40) 的气温下降与风向由南风转为西北风有关,而风速则由静风加大为 $0.4\sim0.8\text{ m/s}$,偏冷的西北风使气温快速下降,气温由 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而使雾体爆发性增强,能见距离骤降为 15 m 以内。

由以上分析可见,在浓雾区内,风向转为较冷的偏北风,风速则在 1 m/s 以内,即出现弱冷平流时,可以使雾爆发性发展;日出后地面蒸发增强,既使气温下降,又使浓雾区内水汽增加,从而导致雾体爆发性增强。雾体内空气本已饱和 (相对湿度 100%),在降温增湿时,无疑会使过饱和度加大。所以,雾滴谱爆发性拓宽实际是在过饱和度增大条件下发生的。遗憾的是,我们目前还没有仪器具体测定过饱和度。

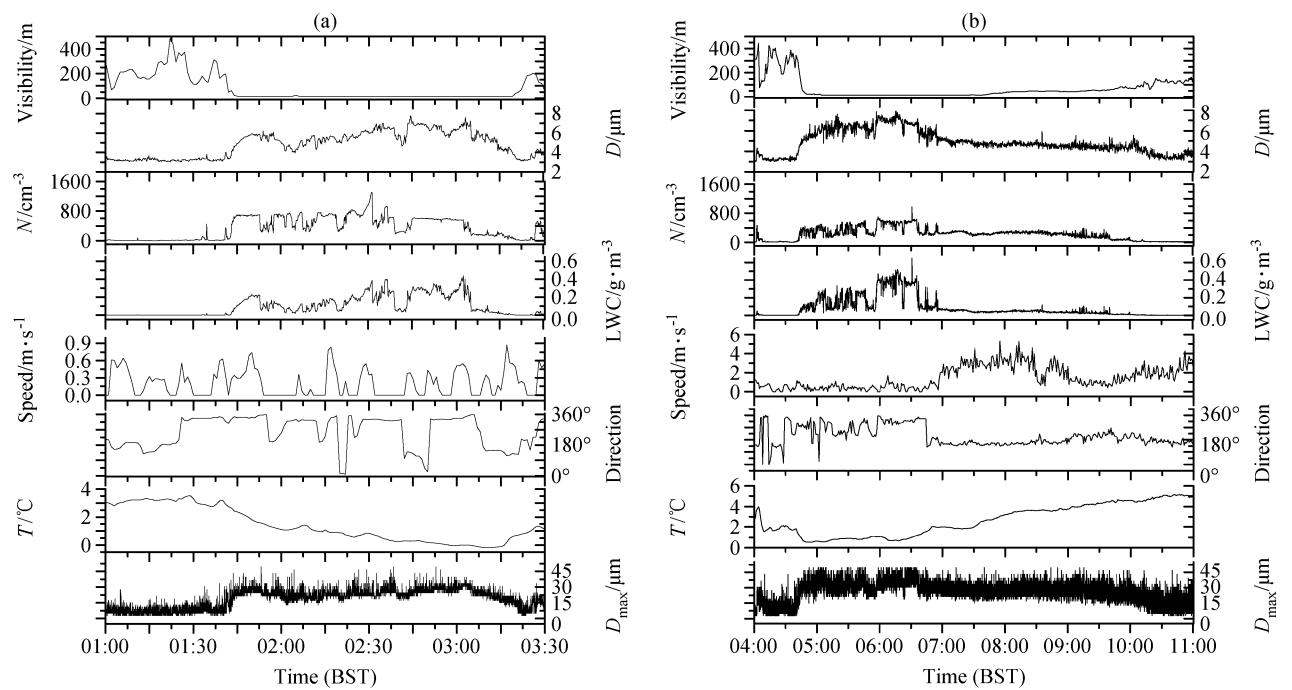


图 5 2007 年 12 月 19 日强浓雾前后的微物理参量变化特征: (a) 01:00~03:30; (b) 04:00~11:30

Fig. 5 Temporal variation of microphysical parameters of extremely dense fog on 19 Dec 2007: (a) 0100–0330 BST; (b) 0400–1130 BST

6 雾滴谱拓宽的微物理过程

雾滴谱是如何爆发性拓宽的？其微物理过程是什么？在李子华等（1999a）、黄玉生等（2000）的文章中揭示了雾体爆发性发展、雾滴谱快速拓宽的现象，但由于当时雾滴谱观测资料时间分辨率不高，没有给出详细雾滴谱拓宽的微物理过程。随着观测技术的发展，现在有可能通过雾滴谱连续变化的分析来讨论这个问题。

图 6 为在第 4 节中论述的 2007 年 12 月 11 日 07:28~07:55 期间爆发性增强的雾滴谱连续变化情况。比较 07:29 与 07:28 的谱分布曲线，可以看到 07:29 的雾滴谱开始拓宽，谱宽由 $10\ \mu\text{m}$ 增大到 $13\ \mu\text{m}$ ，而且整个曲线上抬，表示各档雾滴数都在增多。雾滴数的增多是凝结核化而成，雾滴的增大是凝结增长的结果。从 07:30 开始，谱分布曲线又明显上抬，而且出现了 $21\ \mu\text{m}$ 的个别大滴，1 分钟之后，大于 $10\ \mu\text{m}$ 的雾滴明显增多，谱宽拓宽到

$24\ \mu\text{m}$ ，而且在 $13\ \mu\text{m}$ 处增多明显。由此可见，拓宽的初期，雾滴谱分布曲线的变化特征是：先是整个分布曲线明显上抬，并且出现个别 $20\ \mu\text{m}$ 左右大滴而后迅速拓宽。这表明爆发开始时段，凝结核化和凝结增长过程异常活跃，并有碰并现象产生。07:32~07:34 为雾滴谱的相对稳定时段，没有明显的变化。从 07:35 开始，大于 $10\ \mu\text{m}$ 的雾滴数又明显增多，紧接着（07:38）谱又拓宽，出现了 $28\ \mu\text{m}$ 的谱宽。这是雾滴谱拓宽的关键时段，这个时段的特点是：先是大于 $10\ \mu\text{m}$ 一端谱曲线上抬，紧接着谱拓宽。这表明大滴一端雾滴数增多后，出现了碰并过程。雾滴谱拓宽到 $28\ \mu\text{m}$ 后，出现了约 6 分钟的相对稳定时段，07:45 开始，仅用 2 分钟时间，雾滴谱又拓宽到 $33\ \mu\text{m}$ ，并且在 $13\ \mu\text{m}$ 处出现了峰值。以后，又进一步拓宽，07:55 最大滴达 $40.0\ \mu\text{m}$ 。在图 3a 中更能直观地看到这段时间雾滴谱快速拓宽的情况。

总体来看，这次雾在不到半个小时时间里，谱

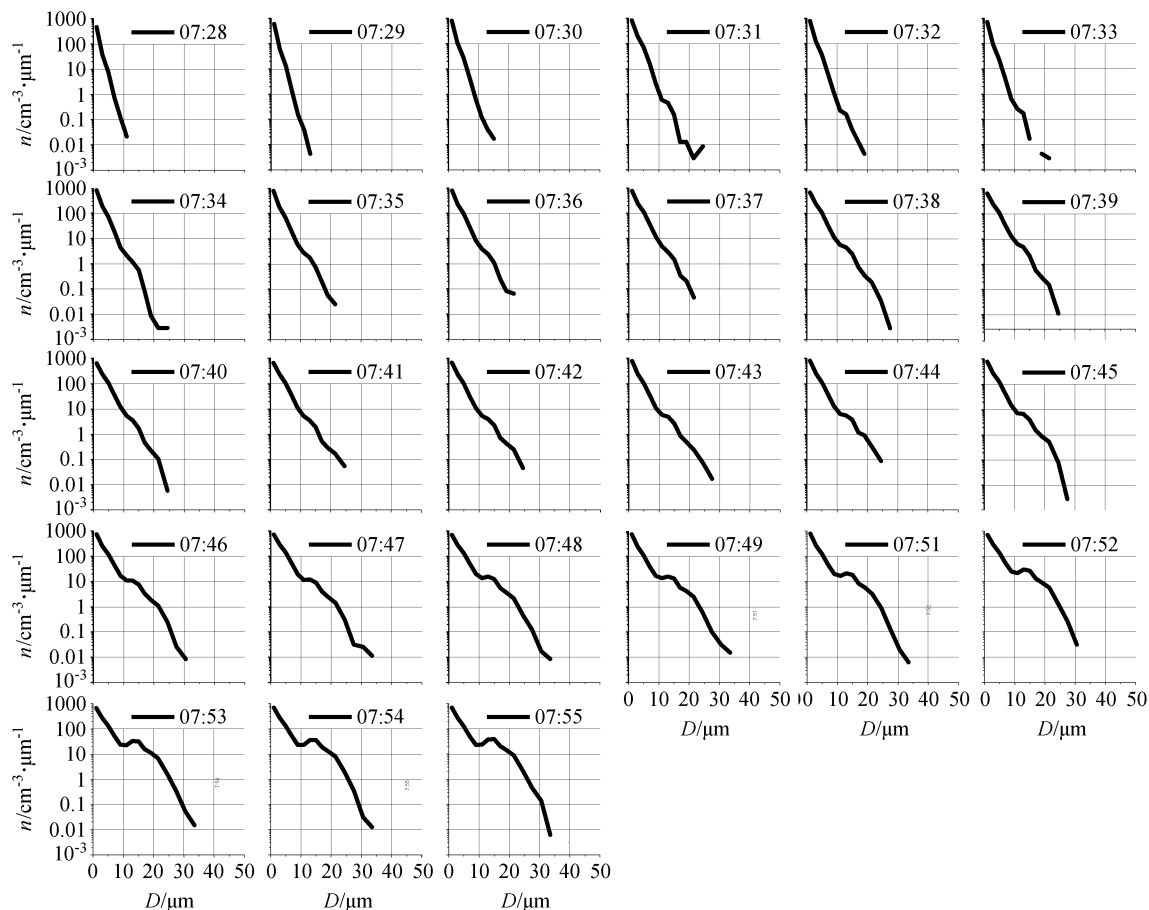


图 6 2007 年 12 月 11 日 07:28~07:55 雾滴谱逐分钟的连续变化情况

Fig. 6 Minute-to-minute continuous changes of fog droplet spectrum from 0728 BST to 0755 BST 11 Dec 2007

宽由 10 μm 拓宽到 40 μm , 雾滴数密度和含水量大幅度上升。细分起来, 这种拓宽也是阶梯式的。本次雾过程大体经历了三级阶梯 (图 3a1), 每达到一个阶梯后, 都有一段相对平稳的时段 (2~6 分钟)。拓宽的初期, 以核化、凝结过程为主, 各种大小雾滴骤增, 紧接着雾滴谱拓宽到 20 μm ; 拓宽中期, 同时存在碰并、凝结和核化过程, 先是大于 10 μm 雾滴明显增多, 而后出现 30 μm 左右的大滴; 拓宽后期类似过程再次出现, 使雾滴谱拓宽到 40 μm 。

再举一个例子。2007 年 12 月 18 日 (图 3a、图 7) 08:14 雾滴谱很窄, 谱宽不到 10 μm , 1 分钟后出现个别大于 10 μm 的滴, 且不与谱分布曲线相连, 2 分钟后才与谱分布曲线相连并上抬 (表示雾滴增多), 紧接着谱分布曲线拓宽到 20 μm 。值得注意的是, 此时 (08:18) 在分布曲线右侧, 又出现了个别大滴 (24 μm), 之后又与谱分布曲线相连, 并上抬。经过 2 分钟后, 谱宽发展到 28 μm 。08:23 在谱分布曲线右侧又出现个别大滴 (33 μm), 3 分钟后还出现了大于 40 μm 的特大滴, 经过 3 分钟的起伏, 即 08:29, 谱分布曲线谱宽达到 40 μm 。总体来看, 这次雾滴谱的拓宽也是阶梯式的跃增过程, 只不过每次跃增, 先是出现个别大

滴, 而后大滴增多, 并与谱分布曲线相连, 经过约 3 分钟左右的起伏后, 再出现更大滴, ……。从 08:14 开始, 到 08:29 为止, 谱宽由 9 μm 拓宽到 40 μm , 仅用 15 分钟时间, 谱宽增大了 31 μm , 数密度增大 10 倍, 含水量增大了 2 个量级, 能见度由 260 m 突降为 15 m。由此看来, 每次跃增前个别大滴的产生, 是不能用凝结增长来解释的, 它可能是湍流碰并的结果。

当降温速率很大, 过饱和度很大时, 雾滴谱拓宽速率也很大, 基本看不到上述“阶梯”情况, 即谱宽连续增大, 各档雾滴数不断增多。如 2007 年 12 月 19 日 01:40 至 01:51 的雾滴谱就是这样变化的 (图 8, 表 3)。01:40 开始, 气温以 1.5 $^{\circ}\text{C}/12\text{ min}$ 的速率下降, 01:41, 谱宽由 10 μm 增大到 21 μm 。以后, 谱分布曲线连续上抬, 谱宽不断增大, 01:47 最大滴达到 30 μm 。以后 5 分钟, 基本上维持相对稳定状态。在这个例子里, 雾滴谱拓宽速率相当快, 仅用 7 分钟, 使谱宽从 10 μm 拓宽到 30 μm 。而且各档雾滴数都在增多, 使雾滴数密度增大 50 多倍, 含水量增大 3 个量级 (表 3)。这说明不仅存在碰并过程, 而且核化和凝结过程也在快速进行。若无碰并增长, 10 μm 雾滴由凝结增长方

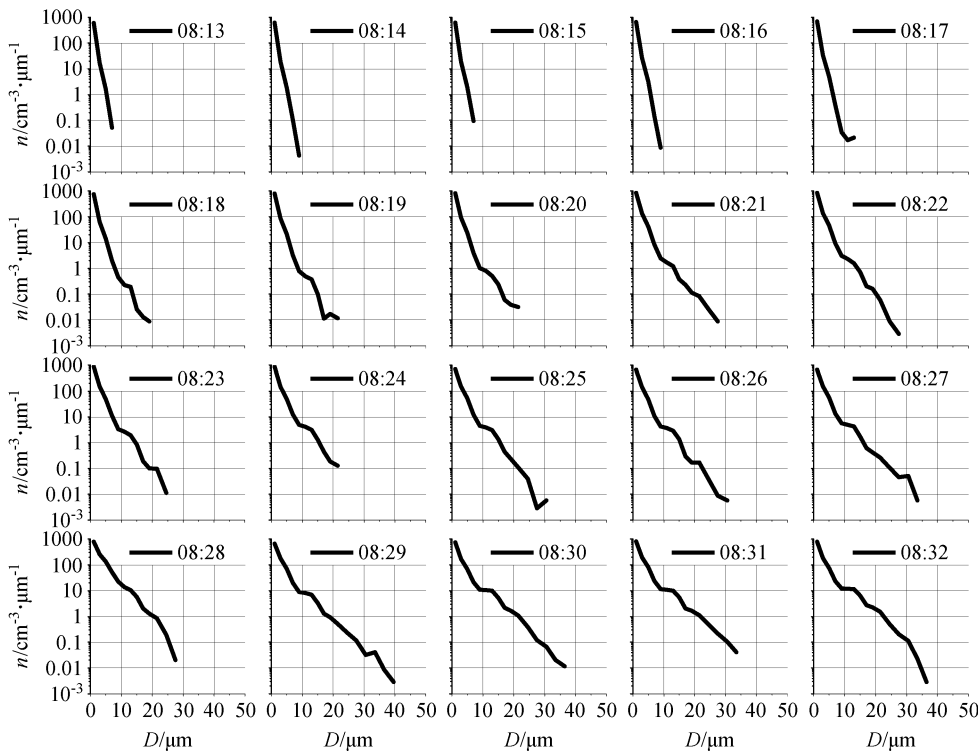


图 7 2007 年 12 月 18 日 08:13~08:32 雾滴谱逐分钟的连续变化情况

Fig. 7 Minute-to-minute continuous changes of fog droplet spectrum from 0813 BST to 0832 BST 18 Dec 2007

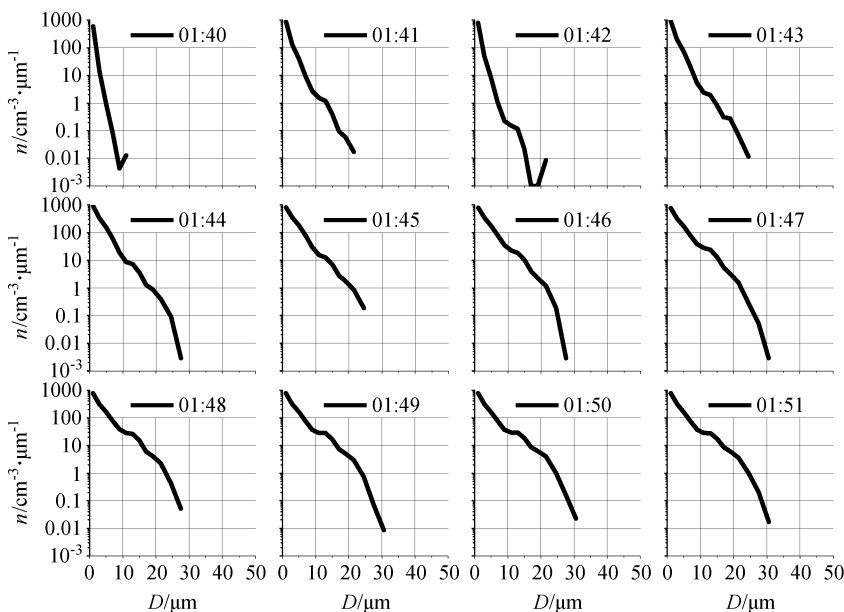


图8 2007年12月19日01:40~01:51雾滴谱逐分钟连续变化情况

Fig. 8 Minute-to-minute continuous changes of fog droplet spectrum from 0140 BST to 0151 BST 19 Dec 2007

程计算, 在7分钟内是得不到30 μm 大滴的。

由以上分析可见, 雾滴谱拓宽一般是阶梯式的, 每次拓宽前, 雾滴谱曲线都明显上抬(即各档数密度增加), 并在其右侧出现个别大滴, 而后拓宽, 出现几分钟的相对平稳或起伏后, 雾滴谱曲线继续上抬, 再度拓宽, 直至40~50 μm 。当降温速率很大时, 谱宽也可连续快速增大。

7 湍流在雾滴谱拓宽中的作用

李子华等(1999a)指出, 湍流混合引起的热量、动量及水汽的垂直输送, 对辐射雾爆发性发展起着重要作用。为了研究湍流在雾滴谱拓宽中的作用, 我们利用超声风速仪观测资料, 分析雾过程中湍流的变化。

图9为2007年12月11日雾滴谱爆发性拓宽前后(07:00~08:00)微结构参量及各湍流量逐分钟的变化情况, 由图可见, 07:14开始, 气温以0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度下降, 与此同时, 各微结构参量随之上升, 表明凝结核化过程活跃。由于凝结潜热的释放, 6分钟之后气温又回升, 因此微结构参量出现波动。从07:25开始, 气温又快速下降, 到07:35, 大约降温1 $^{\circ}\text{C}$, 从这次降温开始, 到07:55为止, 各微结构参量又迅速上升, 雾滴谱明显拓宽, 出现了爆发性增长过程。从第一次降温开始,

到爆发性增长之前的起伏增长过程(07:15~07:30), 可以认为是爆发性增长前的酝酿阶段, 即爆发性增强的前兆(濮梅娟等, 2008), 这对于强浓雾的临近预报是很有实际意义的。

分析湍流的变化曲线可以看出, 从07:05开始, 雾滴微结构参量缓慢增大, 湍强(I)也是缓慢增大的。进入爆发前的酝酿阶段, 微结构参量起伏上升, 湍强也明显起伏增大, 07:20左右, 湍强第一次达到峰值, 以后逐渐减小, 07:30进入低谷, 与各微结构参量进入低谷大体同步。在07:30以后与各微结构参量迅速上升同步, 湍强曲线亦起伏上升, 07:40~07:45, 湍强又第二次进入峰区。湍强增强后, 使雾滴谱又迅速增宽。

湍流对雾的爆发性增强起何作用? 首先, 湍流扩散对动量、热量和水汽的垂直输送起着重要作用。从图9中可见, 湍强第一次达到峰值以后, 感热通量(H_s)由负转为正值, 并达到极大值($H_s > 10 \text{ W}/\text{m}^2$), 表示地面热量向上传输。与此同时, 向上输送的水汽也达极大值($E = 0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 表明日出后地面水分蒸发, 并通过湍流扩散向上输送。这种输送为雾滴谱爆发性拓宽准备了条件。其次, 湍流扩散在雾滴碰并增长中起着重要作用。进入爆发性增强阶段以后, 湍流不仅向上输送热量和水汽, 从而使大量凝结核化增长, 而且通过湍流

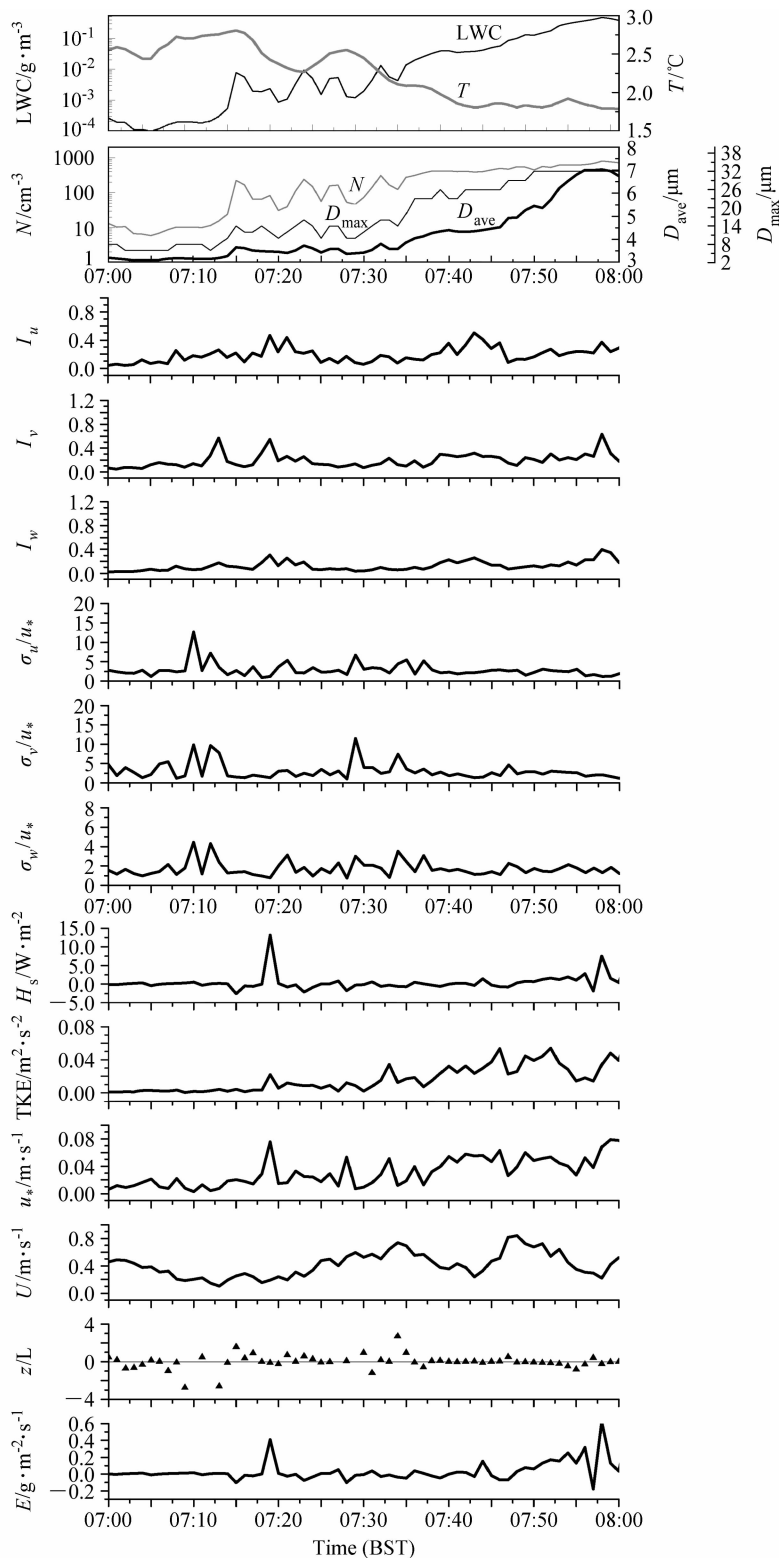


图9 2007年12月11日07:00~08:00各微结构参量和湍流逐分钟的变化。LWC: 液态含水量; T : 气温; I : 湍强; $\sigma_{u,v,w}$: 归一化标准差; H_s : 显热通量; TKE: 湍流平均动能; u_* : 摩擦风速; U : 平均水平风速; z/L : 稳定度参数; E : 水汽通量

Fig. 9 Minute-to-minute continuous changes of fog microphysical parameters and turbulence from 0700 BST to 0800 BST 11 Dec 2007. LWC: liquid water content; T : temperature; I : turbulence intensity; $\sigma_{u,v,w}$: standard deviation of wind speeds; H_s : sensible heat flux; TKE: mean turbulence kinetic energy; u_* : friction velocity; U : mean horizontal wind speed; z/L : stability parameter; E : vapor flux

作用,发生了雾滴之间的碰并,从而使大滴显著增长,07:55出现了 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的大滴。这种增长速度靠凝结增长是不可能的,它主要是湍流碰并的结果。所以核化、凝结、湍流碰并在过饱和条件下的快速进行,应是雾滴谱拓宽的主要微物理过程。有关这个问题,有待深入理论研究。

8 结论

通过以上观测资料分析,可以得出:

(1) 根据雾滴谱分布特征,辐射雾雾滴谱可以分为两类,一类是宽谱辐射雾,最大直径大于 $40\text{ }\mu\text{m}$,另一类雾滴谱较窄,最大直径仅仅 $22\text{ }\mu\text{m}$ 。滴谱宽的雾,都是发展最强时的强浓雾(能见距离 $L < 50\text{ m}$),而滴谱较窄的雾,一般为浓雾($L < 500\text{ m}$)。

(2) 雾滴谱拓宽都有爆发性发展特征。即在很短时间(约30分钟)内,雾滴数密度明显增大,雾滴谱明显拓宽,含水量明显增大,浓雾突变为强浓雾。

(3) 雾滴谱爆发性拓宽都是在降温(即过饱和度加大)条件下出现的。浓雾阶段,当地面有弱冷平流时,最易爆发性增强;日出后湿地表水分蒸发也易引起雾滴谱爆发性拓宽。

(4) 浓雾雾滴谱爆发性拓宽的微物理过程是:在过饱和度增大的条件下,核化、凝结过程快速进行,雾滴数密度大量增加,在较强的湍流扩散条件下,雾滴间相互碰并,从而使雾滴不断增大,大滴继续碰并小滴,致使雾滴谱拓宽,浓雾增强为强浓雾。这种“拓宽”具有阶梯式的特征。但当降温速率很大,即过饱和度很大时,各档雾滴数可不断增多,谱宽可连续增大。

(5) 在雾滴谱拓宽过程中,湍强的变化与之同步。湍流扩散对动量、热量和水汽的垂直输送起着重要作用,湍流碰并是大滴增长的重要机制。

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.

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 Yan-

xiang. 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling Mountain region [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (3): 227–236.

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 (05): 423–434. Deng Xuejiao, Wu Dui, Shi Yueqin, et al. 2007. Comprehensive analysis of the macro- and micro-physical characteristics of dense fog in the area south of the Nanling Mountains [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (05): 423–434.

Eldridge R G. 1961. A few fog drop-size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 18 (5): 671–676.

Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. 2006. Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 139: 288–306.

Fahey K M, Pandis S N, Collect J L, et al. 2005. The influence of size-dependent droplet composition on pollutant processing by fogs [J]. Atmospheric Environment, 39: 4561–4574.

Gerber H E. 1981. Microstructure of a radiation fog [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 38 (2): 454–458.

Goodman J. 1977. The microstructure of California Coastal fog and stratus [J]. Journal of Applied Meteorology, 16 (10): 1056–1067.

郭恩铭,俞香仁,李炎辉. 1989. 双流机场雾宏微观结构研究 [M]. 北京: 气象出版社. Guo Enming, Yu Xiangren, Li Yanhui. 1989. Study of Macro- and Micro-physical Structure of Shuangliu Airport (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

郭恩铭,刘延刚,束家鑫. 1990. 黄浦江雾宏微观结构研究 [J]. 北京气象学院学报, 1: 46–49. Guo Enming, Liu Yan'gang, Shu Jiaxin. 1990. Study of macro- and micro-physical structure of Huangpu Jiang [J]. Journal of Beijing Institute of Meteorology (in Chinese). 1: 46–49.

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.

黄建平,李子华,黄玉仁,等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (6): 821–834. Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (6): 821–834.

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 [J]. 气象学报, 50 (01): 112–117. Huang Yusheng, Xu Wenrong, Li Zihua, et al. 1992. An observation and analysis on the radiation fog in Xishuangbanna [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 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 [J]. 气象学报, 58 (6): 715–725. Huang Yush-

- eng, Huang Yuren, Li Zihua, et al. 2002. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (6): 715–725.
- Klemm O, Wrzesinsky T, Scheer C. 2005. Fog water flux at a canopy top: Direct measurement versus one-dimensional model [J]. *Atmospheric Environment*, 39 (29): 5375–5386.
- Kunkel B A. 1971. Fog drop-size distributions measured with a laser hologram camera [J]. *J. Appl. Meteor.*, 10 (3): 482–486.
- 李子华, 仲良喜, 俞香仁. 1992. 西南地区 and 长江下游雾的时空分布和物理结构 [J]. *地理学报*, 47 (3): 242–251. Li Zihua, Zhong Liangxi, Yu Xiangren. 1992. The temporal-spatial distribution and physical structure of land fog in Southwest China and the Changjiang River basin [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 47 (3): 242–251.
- 李子华, 张利民, 楼小凤. 1993. 重庆市冬季雾的宏观结构及其物理成因 [J]. *南京气象学院学报*, 16 (1): 48–54. Li 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]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 16 (1): 48–54.
- 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 Zihua, Peng Zhonggui. 1994. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 52 (4): 477–483.
- 李子华, 吴君. 1995. 重庆市冬季雾滴谱特征 [J]. *南京气象学院学报*, 18 (1): 46–51. Li Zihua, Wu Jun. 1995. Winter fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 18 (1): 46–51.
- 李子华, 黄建平, 孙博阳, 等. 1999a. 辐射雾发展的爆发性特征 [J]. *大气科学*, 23 (5): 623–631. Li Zihua, Huang Jianping, Sun Boyang, et al. 1999. Burst characteristics during the development of radiation fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 23 (5): 623–631.
- 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1999b. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征 [J]. *气象学报*, 57 (5): 622–631. Li Zihua, Huang Jianping, Zhou Yuquan, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (5): 622–631.
- 李子华. 2001. 中国近 40 年来雾的研究 [J]. *气象学报*, 59 (5): 616–624. Li Zihua. 2001. Studies of fog in China over the past 40 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (5): 622–631.
- 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 2008. 地区性浓雾物理 [M]. 北京: 气象出版社. Li Zihua, Yang Jun, Shi Chun'e, et al. 2008. *The Physics of Regional Dense Fog* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 刘端阳. 2008. 南京地区冬季雾的微物理特征[D]. 南京信息工程大学硕士毕业论文. Liu Duanyang. 2008. Microphysical characteristics of winter fog in Nanjing [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 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 (01): 147–157.
- Liu Duanyang, Pu Meijuan, Yang Jun, et al. 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (1): 147–157.
- Ma C-J, Kasahara M, Tohno S. 2003. Application of polymeric water absorbent film to the study of drop size-resolved fog samples [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 3749–3756.
- Meyer M B, Justo J E, Lala G G. 1980. Measurements of visual range and radiation-fog (haze) microphysics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37 (3): 622–629.
- 南京晨报. 2006. 罕见浓雾多少年一遇无从考证[N/OL]. 南京晨报, 2006-12-27. <http://news.sohu.com/20061227/n247282902.shtml> [2006-12-27]. Nanjing Morning News. 2006. A rare extremely dense fog could not know how many years once happen (in Chinese) [N/OL]. Nanjing Morning News, 2006-12-27. <http://news.sohu.com/20061227/n247282902.shtml> [2006-12-27].
- Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975a. The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 14 (3): 347–363.
- Pilie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975b. The life cycle of valley fog. Part II: Fog microphysics [J]. *J. Appl. Meteor.*, 14 (3): 364–374.
- Podzimek J. 1997. Droplet concentration and size distribution in haze and fog [J]. *Studia Geoph. et Geod.*, 41: 277–296.
- 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 (05): 1–8. Pu Meijuan, Yan Wenlian, Shang Zhaotang, et al. 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (05): 1–8.
- Roach W T. 1976. On some quasi-periodic oscillations observed during a field investigation of radiation fog [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102 (432): 355–359.
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog. I: A field study [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102 (432): 313–333.
- Shi Chun'e, Sun Xuejin, Yang Jun, et al. 1996. 3D model study on fog over complex terrain. Part I: Numerical study [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 10 (4): 493–506.
- 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 (04): 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.
- 王庚辰. 1981. 雾微物理结构的观测分析 [J]. *气象学报*, 39 (4): 452–459. Wang Gengchen. 1981. An analysis of the micro-

- physical structure of fog [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 39 (4): 452–459.
- 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 2010. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征 [J]. *大气科学*, 34 (2): 440–448. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. 2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (2): 440–448.
- 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 2004. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究 [J]. *气象学报*, 62 (4): 476–485. Wu Dui, Deng Xuejiao, Ye Yanxiang, et al. 2004. The study on fog-water chemical composition in Dayaoshan of Nanling Mountain [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (4): 476–485.
- 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 (03): 406–415. 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 Dayaoshan Mountain [J]. *Acta Meteorologica sinica* (in Chinese), 65 (03): 406–415.
- 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 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. Yang Liansu. 1985. A preliminary observations of the microphysical structure of fog in Qingdao area [J]. *Marine Sciences* (in Chinese), 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 [J]. *海洋学报*, 11 (4): 431–438. Yang Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Biao. 1989. The formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan area [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 11 (4): 431–438.
- 张利民, 李子华. 1993. 重庆雾的二维非定常数值模拟 [J]. *大气科学*, 17 (6): 750–755. Zhang Limin, Li Zihua. 1993. A two-dimensional time-integral numerical model of Chongqing fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17 (6): 750–755.