

严文莲,刘端阳,濮梅娟,等. 南京地区雨雾的形成及其结构特征[J]. 气象,2010,36(10):29-36.

# 南京地区雨雾的形成及其结构特征<sup>\*1</sup>

严文莲<sup>1</sup> 刘端阳<sup>2</sup> 濮梅娟<sup>1</sup> 李子华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 江苏省气象台, 南京 210008

<sup>2</sup> 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

**提 要:** 为研究南京冬季雾的物理化学过程,揭示空气污染与雾水化学结构的关系及建立雾的预报方法,2006—2007年冬季在南京信息工程大学进行了雾的外场综合观测试验。利用所获得的资料及南京观测站2006—2008年的常规观测资料,对雨雾天气下的天气形势和雨雾的宏、微观结构特征进行了分析。结果表明:南京地区出现雨雾的地面形势主要有锋面型、冷高压底部型和低压倒槽型;弱冷空气入侵是雨雾形成的重要条件;较强的逆温层存在,且边界层上层气温高于近地层,是形成雨雾的又一个重要的条件;雨势增强或地面风速加大,干冷空气的不断侵入,都可能造成雨雾消散。雨雾的本质就是蒸发雾。雨雾的数密度、含水量和平均直径与其他种类雾相比都较小;雾滴谱很窄,其曲线变化成指数快速下降。

**关键词:** 雨雾, 宏微观结构, 天气形势

## Formation and Structure Characteristics of Precipitation Fog in Nanjing

YAN Wenlian<sup>1</sup> LIU Duanyang<sup>2</sup> PU Meijuan<sup>1</sup> LI Zihua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

<sup>2</sup> Key Laboratory for Atmospheric Physics & Environment, NUIST, Nanjing 210044

**Abstract:** In order to study the physical and chemical processes of Nanjing winter fog, reveal the relationship between air pollution and the chemical structure of fog water and establish fog forecasting methods, a comprehensive observation of fog during the winter of 2006 and 2007 was made in NUIST (Nanjing University of Information Science and Technology). Based on the obtained fog data and conventional meteorological observation data during 2006 to 2008 at Nanjing Meteorological Observatory, the synoptic situations and macro-microstructure characteristics of precipitation fog were analyzed. Results show that: The weather situation when precipitation fog happened can be divided into 3 kinds: frontal surface pattern, pattern under high pressure, and low pressure pattern with inverted trough; Invasion of weak cold air is an important condition for the formation of precipitation fog; Another important condition is that a strong inversion layer exists, namely the temperature is higher in upper of the boundary layer than it near the surface; Rain enhancement or increasing surface wind speed, intrusion of the durative dry cold air are likely to result in dissipation of precipitation fog, the nature of which is evaporation fog. Compared with other types of fog, the number density, water content and average diameter of precipitation fog are smaller. Fog droplet spectrum is very narrow, and its curve exponentially rapidly decreases.

**Key words:** precipitation fog, macro-microstructure, synoptic situation

\* 国家自然科学基金(40975085)、江苏省重大科技支撑与自主创新示范工程项目(BE2008618), 科技部行业(气象)专项(GYHY(QX)2007-6-26)共同资助

2009年10月12日收稿; 2010年4月21日收修定稿

第一作者:严文莲,主要从事云雾物理与大气污染研究. Email:yike-112@163.com

## 引言

雾是在特定天气背景下形成的水平能见距离低于 1 km 的天气现象。它不仅妨碍飞机起降,给船舶航行带来困难,也容易诱发公路交通事故,对工农业生产和人民生活带来很多不便。30 多年来国外多次对雾进行综合外场观测<sup>[1-4]</sup>,揭示了雾的物理化学特性;并加深了对雾生消的动力和热力过程的认识。近期, Ma, Eugster, Fahey 及 Klemm 等都对雾进行了观测研究<sup>[5-8]</sup>,深化了对雾的物理过程、数值模拟的参数化方面的研究。国内在上海、重庆、南京沪宁高速公路、云南西双版纳、浙江舟山、成都双流机场、广东南岭、南京市郊及北京等地对雾也进行了观测试验研究<sup>[9-24]</sup>。这些研究揭示了中国城市雾的物理化学特性,基本搞清了雾生消物理过程及其相关的影响因子,并发现雾与地形、城市热岛效应、空气污染等因素有关。许多学者还对雾出现时的大气环流形势、气象要素场以及物理量场等许方面进行了研究<sup>[25-29]</sup>。童尧青等<sup>[26]</sup>对南京地区雾天气的气候特征及其与气象要素关系进行了分析,指出雾天气出现的气象条件是近地面为弱风、高湿并为弱高压控制。毛冬艳等<sup>[28]</sup>统计了华北平原雾发生时大气低层部分气象要素的特征。王玮等<sup>[29]</sup>还对我国中部的一次大范围持续性大雾进行了诊断分析,指出边界层在低层辐合上升和高层辐散下沉的界面中形成逆温层,是浓雾产生的重要因素。这些研究为雾的预报提供了有益的参考价值。

雨雾(precipitation fog)是雨滴下落到云层以下的干空气中后,水滴蒸发为水汽,水汽冷却到露点温度后发生凝结而形成的雾<sup>[30]</sup>。由于其低能见度且伴有降水,同样对交通运输等带来很大的不便。国外一些学者指出雨雾常形成于锋面前后,并将雨雾分成锋前雾、锋后雾和锋际雾<sup>[31-32]</sup>,确认雨雾的产生是由于雨水的蒸发<sup>[33]</sup>。Tardif<sup>[34]</sup>研究了纽约地区雨雾发生时环境条件的变化特征,认为雨雾大都发生在连续的小雨或毛毛雨出现后云底不断下降的条件下;同时对非平衡态下的雨滴蒸发对雨雾形成的贡献也进行了模拟研究<sup>[35]</sup>。邓雪娇等<sup>[18]</sup>对南岭山地一次锋面浓雾过程进行了分析,指出浓雾维持期间,出现小到中雨时,雨强峰值时间段都出现能见

度短时好转的现象,否则则反之。可见,对雨雾的形成及其特点已有许多的认识,并有了轮廓概念,但对雨雾的边界层结构及微物理特征的观测分析还不多见。

根据 2006—2008 年南京气象观测资料统计表明,南京地区以辐射雾为主,其中约 74% 的雾集中出现在 11 月至次年的 3 月,而雨雾出现的次数达总数的 20% 以上。可见,雨雾也是南京地区雾的一种重要类型。为此,本文将针对南京地区秋末至春初时期(11 月至次年的 3 月)的雨雾,重点在环流形势、边界层和宏观、微观结构特征等方面进行深入的探讨。

## 1 资料概况

本文所用的资料部分来自 2006—2007 年冬季在南京信息工程大学观测场进行雾的外场综合观测试验。其中大气边界层探测采用芬兰维萨拉(Vaisala)公司生产的 DigiCORA 系留气球低空探测系统,包括温、压、湿、风等十几个参数;并利用 MFASAN 型平面相控阵声雷达系统测量了 30~1000 m 大气边界层三维风场;雾微物理结构的观测利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪,可以连续测量雾粒子数浓度、谱分布,粒径范围为 2~50  $\mu\text{m}$ ,最大数密度为  $10^4$  个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ ,观测连续进行,每秒钟产生一组数据。同步观测的仪器还有自动气象站和能见度仪。另外,本文还用到了南京气象观测站 2006—2008 年高空和地面常规观测资料,高空观测资料为一天两次(08 和 20 时)的探空资料;地面观测资料为逐时的地面气象要素资料。在综合观测期间出现雨雾时,所用雨量资料为临近观测地的浦口站点雨量。

2006—2008 年 11 月至次年 3 月共有 14 次雨雾过程(表 1),其中综合观测期间测得 5 次雨雾过程资料。本文对出现雨雾天气时的环流形势进行了分析,并对雨雾过程中的边界层结构和微观结构进行了深入探讨,以此获得对雨雾较全面的认识,为雨雾的预报提供一些科学依据。

## 2 雨雾环流形势分析

分析所有雨雾过程发现,冬春季高空 500 hPa

表 1 2006—2008 年 11 月至次年 3 月 14 次雨雾过程

Table1 Fourteen precipitation fog processes from November to March next year during the year 2006 to 2008

次数	雾过程/年.月.日时	持续时间/h	最低能见度/m	次数	雾过程/年.月.日时	持续时间/h	最低能见度/m
1	2006.12.6	19	46	8	2008.11.23 12—13	2	800
2	2007.12.10 01:00—10:00*	9	394	9	2007.3.2 06—08	3	800
3	2007.12.16 21:07—17 08:39, 09:39—10:56*	12.9	214	10	2007.12.11 19:21—23:10; 12.12 08:59—17:07*	12	500
4	2008.1.11 08—10	3	400	11	2007.3.23 18—3.24 01	8	400
5	2008.1.26 09—11	3	600	12	2006.2.5 13—17	5	700
6	2008.2.5 10—19; 2.5 22—2.6 02	15	400	13	2007.12.22 02:07—10:46*	8.7	328
7	2008.11.7 03	1	800	14	2007.12.27 09:25—14:36*	5.2	426

\* 为综合观测期间测得

\* denotes the comprehensive observation of fog

和 700 hPa 形势图上均表现为西风槽或南支槽东移靠近江苏省,南京处于槽前西南气流控制下,同时

850 hPa 多伴有弱切变,在这种大的天气背景下(图 1),南京出现了降水。

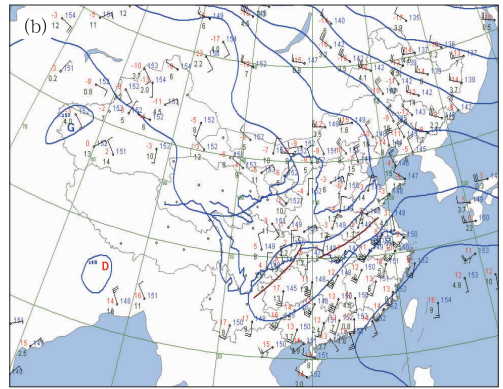
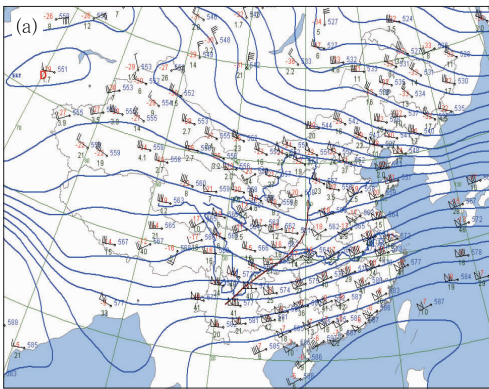
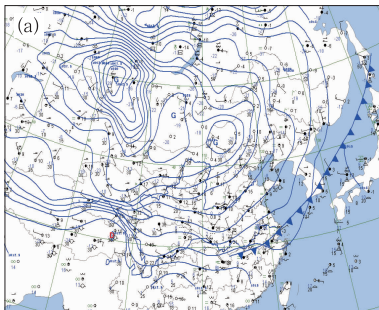


图 1 雨雾天气下 500 hPa(a)和 850 hPa(b)天气形势(2007 年 12 月 11 日 20 时)

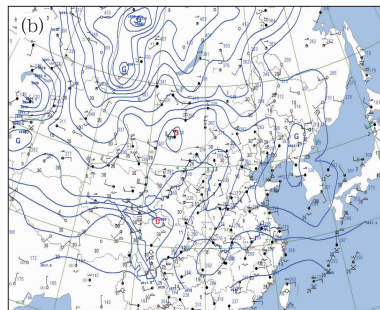
Fig.1 Synoptic situations of 500 hPa (a) and 850 hPa (b) of precipitation fog weather (at 20 BT 11 December, 2007)

从地面形势看,南京出现雨雾的天气形势主要有以下 3 种:①锋面型(冷高压前部型)(图 2a),这

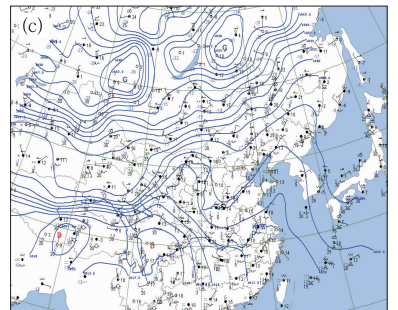
类形势出现的最多,具体时间见表 1 中的第 1~8 次,达总过程数的一半以上。在冬季冷空气南下时,



2007年11月20日20时



2006年2月5日14时



2007年3月2日08时

图 2 雨雾天气三种地面形势

(a) 锋面型; (b) 高压底部型; (c) 低压倒槽型

Fig.2 Three types of surface synoptic situations of precipitation fog weather

(a) frontal surface pattern, (b) pattern under high pressure, and (c) low pressure pattern with inverted trough

以西北路冷空气居多,冷高压主体处于贝加尔湖以西,冷空气前锋越过南京前后这段时间,都有可能出现雨雾,这与 Stewart<sup>[32]</sup>提到的锋前、锋后和锋际雾类似。南京雨雾多出现在锋后,此时,南京近地层受弱的偏北风控制。随着冷空气大举南下,高空槽东移过境,高空转为槽后的西北风控制。在北方干冷空气的快速南下后,雾也逐渐消散,此时的降水也逐渐停止。②冷高压底部型(图 2b),共 3 次(表 1 中第 9~11 次),大多是在秋冬季,冷空气偏北,高压主体处于 30°N 以北,南京市位于高压底部偏东气流中,有时也伴有弱的冷空气下来;③低压倒槽型(图 2c),共 3 次(表 1 中第 12~14 次),这种天气形势出现雨雾时,南京处于倒槽的西侧,地面吹弱的东北风。据统计,南京霾日多以偏东风为主,可见这两种天气形势下,空气中的颗粒物较多,加上水汽条件好,也有利于雨雾天气的形成。

### 3 雨雾宏观特征

#### 3.1 雨雾天气的一些基本特征

雨雾各季节都有出现,以冬季最多,约占总数的

69%。图 3 给出了不同天气形势的雨雾过程逐时雨量与能见度的演变情况。可以看出,与同期观测到的辐射雾和平流辐射雾<sup>[20]</sup>相比,雨雾天气能见度相对要高,大多在 400 m 以上(表 1)。一天中各时段均有可能出现雨雾,以夜晚至早上这段时间居多。雨雾期间雨量不大,多为小雨天气(其中有两次过程:2006 年 2 月 5 日和 2008 年 1 月 26 日,出现了降雪),时降水量一般小于 1 mm,个别时次超过 2 mm·h<sup>-1</sup>。而随着雨强的增大,雨滴会对雾滴产生清除作用,相应的雾也减弱至消散。可见,雨雾出现在非强天气过程中。随着降雨的持续,能见度起伏变化,总体呈下降趋势,特别是在雨强短时增大时,能见度可出现短时的好转现象(图 3c)。进一步分析发现,当雨强相对较大且降雨时间持续较长时,雨雾逐渐消散(图 3b)。随着高层转为槽后西北气流控制,整个降雨过程结束时,雨雾也随之减弱(图 3d),能见度逐渐转好。这说明产生雨雾的一个条件是小雨天气,雨强不能太大。

总的来看,雨雾期间雨强不大。当雨势增强或地面风速加大,干冷空气的不断侵入,湿度下降,都会导致雨雾的减弱或消散。

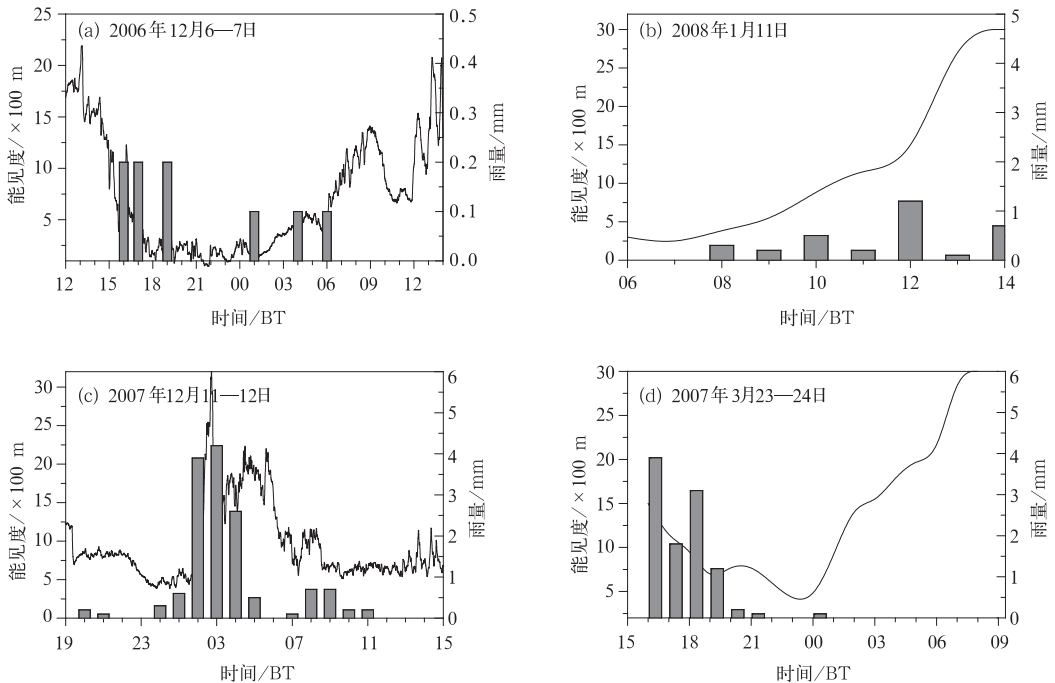


图 3 雨雾的能见度和雨量随时间变化情况

Fig. 3 Changes of visibility and rainfall with time in precipitation fog weather

### 3.2 边界层结构特征

#### 3.2.1 温度层结特征

很多气象观测分析表明,雾发生时,大气层结通常是稳定的,并伴有逆温。为了了解雨雾的大气边界层结构,图 4 给出了雨雾过程中雾前、雾期间和雾后的温度层结曲线。可以看到,在雨雾前,没有明显的逆温层结(图 4a),气温近似按干绝热递减率递减;而在雨雾期间,1000 m 以下高度层都有逆温存在(图 4b)。由于逆温的存在,使得上层温度高于近地层,这样就形成了一个上层暖而下层冷的结构;暖雨滴下落到近地层冷空气中后,形成雨雾,这是一种

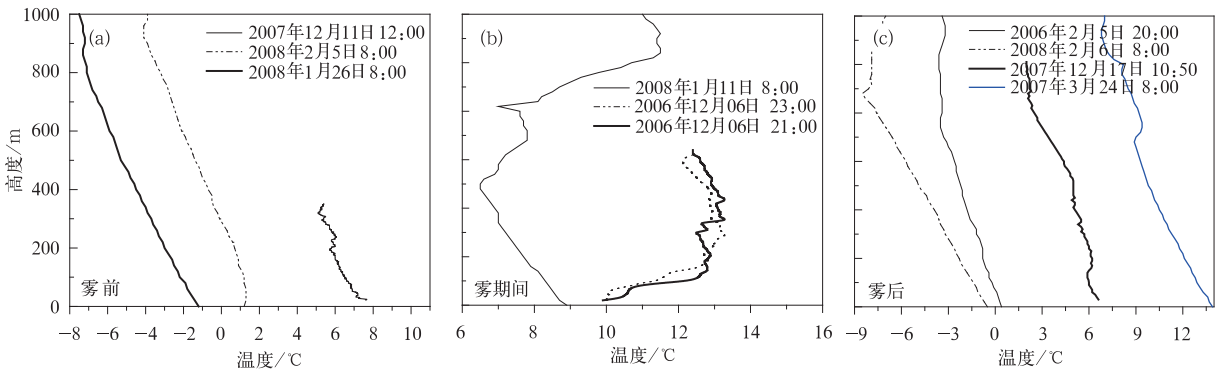


图 4 雨雾前(a)、雨雾期间(b)和雨雾后(c)的温度层结曲线

Fig. 4 The temperature profiles before (a), during (b) and after (c) the precipitation fog

由此可见,稳定的边界层层结,即较强的逆温层存在,且边界层上层气温高于近地层,是形成雨雾的一个重要的条件。

#### 3.2.2 风场特征

从雨雾期间地面风向风速分析看(图略),雾发生时风速一般在  $0 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间,最大不超过  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 5 是 2007 年两次雨雾期间风场特征,包括锋面型和高压底部型。分析发现,整个雾过程中近地面 100 m 以下风速都较小,以东到东北风为主,近地层有明显的弱冷空气存在。弱冷空气使气温下降,从而进一步使环境饱和水汽压下降,相对湿度增大。近地面没有明显的暖湿空气输送,水汽主要来源于下落暖雨滴的蒸发。风速随高度的升高明显增大,雾初期,100 m 以上风向以东到东南的风为主,而从形势上看,高空由于槽未过境,850 hPa 至 700 hPa 吹西南风,可见风向随高度的增加呈顺时针旋转,有明显的暖平流,上层的暖湿空气也为降水

蒸凝过程<sup>[36]</sup>。当上空暖雨滴落到近地面时,雨滴和凝结核共存,由于雨滴温度高,表面饱和水汽压高,而贴地气层凝结核温度低,其表面要求饱和水汽压相对低。由于雨滴表面饱和水汽压比环境大气实际水汽压要大,雨滴将蒸发变小。随着雨滴不断下降,连续蒸发,环境大气水汽分子不断增多,水汽压也逐渐增大。当环境大气水汽达到饱和时,凝结核核化凝结,即雨雾形成。可见,雨雾的形成过程,就是高温雨滴蒸发,低温凝结核核化、凝结增长的过程。所以雨雾的本质就是蒸发雾。在雨雾结束后,逆温层结逐渐减弱甚至消失(图 4c)。

的形成提供了源源不断的水汽条件;而高层的西南气流使得上层暖下层冷,这样有利于稳定层结的形成。随着系统的东移,100 m 以上风向逐渐转为东北风,而锋面型在雾形成不久风向就开始发生转变。整个 500 m 以下的偏北风都逐渐加大,接近雾散时,锋面型都转为西北风,并且在后期,风向随高度逆转,冷平流明显,高压底部型上下都转为偏北风。可以看到,整个风场的变化与系统的移动变化是紧密联系的。

## 4 雨雾微观结构特征

雨雾发生时的能见度强度虽不及强盛期的辐射雾、平流辐射雾,但仍然可以对民航、高速公路等产生危害和影响。在雨雾发生时,影响能见度的要素主要是小雾滴以及小雨滴。所以分析雨雾过程中的雾滴谱可以更好地理解雨雾产生低能见度的原因。



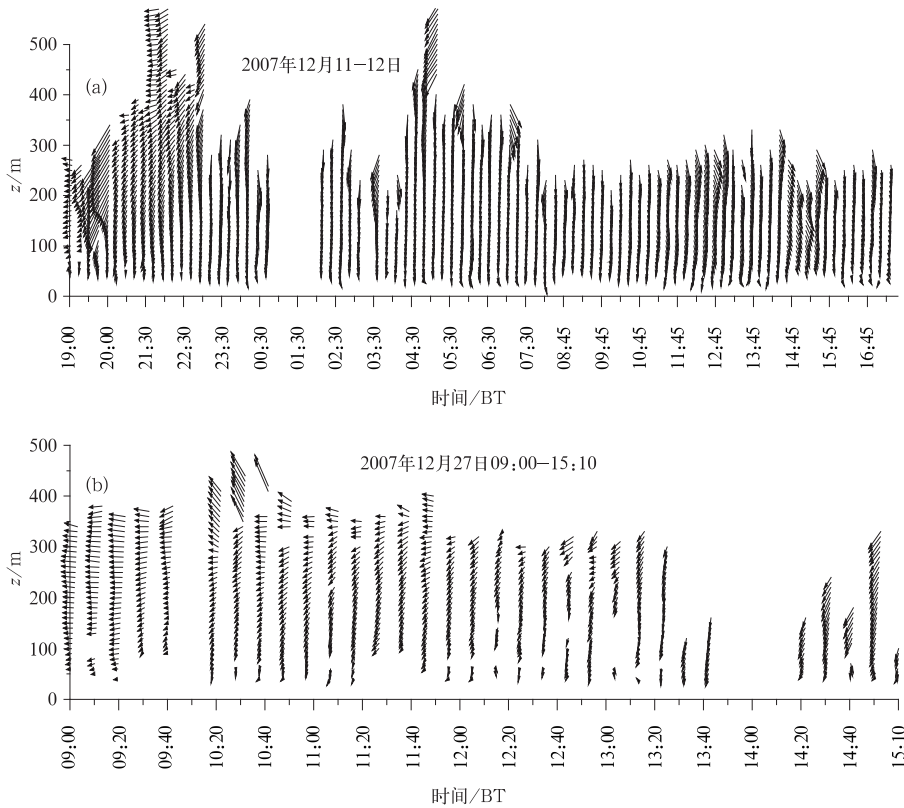


图 5 雨雾期间风场特征

(a) 锋面型; (b) 高压底部型

Fig. 5 Wind characteristics of the precipitation fog

(a) frontal surface pattern, and (b) pattern under high pressure-type

表 2 给出了 2007 年观测到的 4 次雨雾过程的微物理参量, 其中 2007 年 12 月 11—12 日和 16—17 日过程由于中间有一段能见度大于 1 km, 在此分开计

算了相关的物理量。由表可以看出, 雨雾的平均数密度在  $0.5 \sim 3.7$  个  $\cdot \text{cm}^{-3}$  之间, 最大数密度达 15 个  $\cdot \text{cm}^{-3}$  (12 月 16 日), 而最小仅 0.025 个  $\cdot \text{cm}^{-3}$

表 2 南京冬季雨雾的微物理参量(样本为每 10 秒平均)

Table 2 Microphysical parameters of winter precipitation fog in Nanjing (Each sample is an average of every 10 seconds)

起止时间/ 年.月.日时	样本数	数密度/ 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$	液水含量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	平均直径/ $\mu\text{m}$	峰值直径/ $\mu\text{m}$	最大直径/ $\mu\text{m}$	能见距离/ m	
2007.11.26	3054	平均值	2.73	0.00007	3.356	3	5.728	589
03:09—11:37		范围	0.65~6.43	0.000011~0.00035	3~4.24	3	3~15	377~1000
2007.12.11	1377	平均值	3.66	$5.85 \times 10^{-5}$	3.047	3	3.999	823
19:21—23:10		范围	0.312~9.595	$6.6 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-4}$	2.7~3.9	3	3~11	532~1000
2007.12.12	2930	平均值	3.4	0.00005	2.94	3	3.81	677
08:59—17:07		范围	0.026~8.2	0.000004~0.000117	0.3~3.833	3	3~11	500~1000
2007.12.16	4157	平均值	1.8	$3.68 \times 10^{-5}$	3.13	3	4.476	465
21:07—17 08:39		范围	0.08~15.0	$1.12 \times 10^{-6} \sim 0.001$	0.9~4.286	3	3~13	214~1000
2007.12.17	468	平均值	1.9	0.000036	3.11	3	4.517	739
09:39—10:56		范围	0.21~4.025	0.000003~0.00013	2.1~3.73	3	3~11	506~1000
2007.12.22	3120	平均值	3.7	0.000065	3.08	3	4.513	594
02:07—10:46		范围	0.45~8.8	0.0000066~0.00028	2.7~3.5	3	3~11	328~1000
2007.12.27	1872	平均值	0.52	$8.35 \times 10^{-6} \sim 0.06$	2.6	3	2.98	666
09:25—14:36		范围	0.025~1.78	$3.6 \times 10^{-7} \sim 0.00008$	0.3~3.67	3	3~9	426~1000

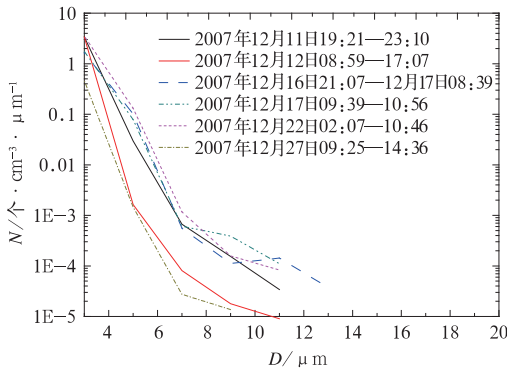


图 6 2007 年观测期间雨雾的谱分布

Fig. 6 The spectral distribution of several precipitation fog processes in 2007

(12月27日);雨雾的平均含水量大都在  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  量级,最大含水量  $0.001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  (12月16日),最小仅  $3.6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  (12月27日);从能见度看,16日最低能见距离达 214 m,而此时出现了这几次雨雾过程中最大的雾滴数密度及液水含量。雨雾的谱宽在  $10 \mu\text{m}$  左右,最大不超过  $15 \mu\text{m}$ ,平均直径较为均匀,多为  $3 \mu\text{m}$  上下。可见,雨雾的数密度、含水量和平均直径与同期观测到的平流辐射雾<sup>[21]</sup>相比都要低很多。从图 6 的谱分布也可以看出,能见度低于 400 m 的几次雾过程,其大滴段的雾滴数密度都要高于其他几个雾过程,最大含水量也都比较高,均超过  $10^{-4}$  量级,因此,雾滴数密度(尤其大滴段的数密度)高是造成雨雾低能见距离的主要因素。另外,雨雾的雾滴谱很窄,其曲线成指数快速下降(图 6)。

## 5 总 结

(1) 南京地区秋末至春初出现雨雾时,高空 500 hPa 处于槽前西南气流控制下,850 hPa 常伴有弱的切变,地面形势主要有锋面型、冷高压底部型和低压倒槽型 3 种情况。

(2) 雨雾出现在非强天气过程中,一天当中任何时段均可出现,雨强总体不大,能见度多在 400 m 以上;当雨势增强或地面风速加大,干冷空气不断侵入,都可能造成雨雾消散。

(3) 稳定的边界层层结,较强的逆温层存在,且边界层上层气温高于近地层,是形成雨雾的一个重要的条件;近地层常有弱的冷空气入侵,风力一般在

$0 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间;雾初期有明显的暖平流存在。整个风场的变化与系统的移动变化是紧密联系的。

(4) 雨雾的形成过程,就是高温雨滴蒸发,低温凝结核化、凝结增长的过程。雨雾的本质就是蒸发雾。

(5) 雨雾的数密度、含水量和平均直径与其他种类雾相比都要低很多;雾滴谱很窄,其谱分布曲线成指数快速下降。

## 参考文献

- [1] Roach W T, Brown R, Caughy S J, et al. The physics of radiation fog. Part I: A field study [J]. *Quart J R Meteor Soc*, 1976, 102(432): 313-333.
- [2] Pilié R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. The life cycle of valley fog Part I: Micrometeorological characteristics [J]. *J App Meteor*, 1975, 14: 347-363.
- [3] Jiusto J E, Lala Grieser J G G. Radiation fog field programs, recent studies [J]. ASRC-SUNY, Publ. 1983, No. 869.
- [4] Fuzzi S, Facchini M C et al. The Po Valley fog experiment 1989. An overview [M]. *Tellus Ser B-Chem Phys Meteorol*, 1992, 44: 448-468.
- [5] Ma C-J, Kasahara M, Tohno S. Application of polymeric water absorbent film to the study of drop size-resolved fog samples[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 3749-3756.
- [6] Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Ricanelfin cloud forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139: 288-306.
- [7] Fahey K M, Pandis S N, Jr J L C, et al. The influence of size-dependent droplet composition on pollutant processing by fogs[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 4561-4574.
- [8] Klemm O, Wrzesinsky T, Scheer C. Fog water flux at a canopy top: Direct measurement versus one-dimensional model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 5375-5386.
- [9] 鲍宝堂, 束家鑫, 朱炳权. 上海城市雾理化特性的研究[J]. *南京气象学院学报*, 1995, 18(1): 114-118.
- [10] 李子华, 彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特征[J]. *气象学报*, 1994, 52: 477-483.
- [11] Li Z H, Zhang L M, Zhang Q H. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process [J]. *Acta Meteorol Sin*, 1994, 8(3): 316-328.
- [12] 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1996 南京连续 5 天浓雾的物理结构特征[J]. *气象学报*, 1999, 57(5): 622-631.
- [13] Li Z H, Huang J P, Huang Y S, et al. Study on the physical process of winter valley fog in Xishuangbanna region [J]. *Acta Meteorol Sin*, 1999, 13(4): 494-508.
- [14] 杨中秋, 许绍祖, 耿骝. 舟山地区春季海雾的形成和微物理

- 结构[J]. 海洋学报, 1989, 11: 431-438.
- [15] 郭恩铭, 俞香仁, 李炎辉, 等. 双流机场雾宏微观结构研究 [A]. 全国云物理和人工影响天气会议文集[C]. 北京: 气象出版社, 1989.
- [16] 吴兑, 邓雪娇, 毛节奏, 等. 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, 2007, 65(3): 406-414.
- [17] 唐浩华, 范绍佳, 吴兑, 等. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. 中山大学学报, 2002, 41(4): 92-96.
- [18] 邓雪娇, 吴兑, 唐浩华, 等. 南岭山地一次锋面浓雾过程的边界层结构分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 881-889.
- [19] 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 地区性浓雾物理[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [20] 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1111-1118.
- [21] 刘端阳, 濮梅娟, 杨军, 等. 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, 2009, 67(1): 147-157.
- [22] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京及周边地区雾形成的边界层特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(增刊): 73-83.
- [23] 王凯, 张宏升, 王强, 等. 北方地区春冬季雾天边界层结构及其演变规律的对比研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 55-60.
- [24] 江玉华, 王强, 王正兴, 等. 一次平流辐射雾的边界层特征及雾水离子组分研究[J]. 气象, 2009, 35(02): 19-28.
- [25] 康志明, 尤红, 郭文华, 等. 2004年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(12): 51-56.
- [26] 童尧青, 银燕, 许遐祯, 等. 南京地区雾的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 115-120.
- [27] 曹志强, 方翔, 吴小京, 等. 2007年初一次雪后大雾天气过程分析[J]. 气象, 2007, 33(9): 52-58.
- [28] 毛冬艳, 杨贵名. 华北平原雾发生的气象条件[J]. 气象, 2006, 32(1): 78-83.
- [29] 王玮, 黄玉芳, 孔凡忠, 等. 中国东部一场持续性大雾的诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(9): 84-90.
- [30] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fog>.
- [31] Petterssen S. Introduction to Meteorology [M]. Third Edition, (McGraw-Hill Publ. Inc., New York 1969) 333p.
- [32] Stewart, R E, Yiu D T, Chung K K, et al. Weather conditions associated with the passage of precipitation type transition regions over Eastern Newfoundland[J]. Atmos Ocean, 1995, 33: 25-53.
- [33] Donaldson N R, Stewart R E. Fog induced by mixed-phase precipitation [J]. Atmos Res, 1993, 29: 9-25.
- [34] Tardif R, Rasmussen R M. Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City Region [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2008, 47(6): 1681-1703.
- [35] Tardif R, Rasmussen R M. Evaporation of non-equilibrium raindrops as a fog formation mechanism. American Meteorological Society[G]. doi:10.1175/2009JAS3149.1
- [36] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1989.