

于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2015. 2007 年 12 月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征 [J]. 大气科学, 39 (1): 47–58, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13284. Yu Huaying, Niu Shengjie, Liu Peng, et al. 2015. Evolution of the macro- and microphysical properties of precipitation fog in december 2007 in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 47–58.

2007 年 12 月南京六次雨雾过程 宏、微观结构演变特征

于华英^{1,2,3} 牛生杰^{1,3} 刘鹏⁴ 刘畅⁵ 陆春松³ 黄佳欢³

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

3 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

4 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

5 天津市气象局气象台, 天津 300074

摘 要 利用 2007 年冬季南京信息工程大学对雾的综合观测资料, 包括能见度仪、雨滴谱仪、雾滴谱仪、宽范围颗粒粒径谱仪 (WPS) 观测资料, 并结合地面常规气象观测资料和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料, 分析 2007 年 12 月南京六次雨雾过程的宏、微观结构演变特征。结果显示: (1) 南京 2007 年 12 月的六次雨雾过程主要是受天气系统的影响, 以雨中雾为主, 最低能见度均大于 250 m。雨雾多出现在偏东气流的作用下, 南京地区先发生弱降水, 空气近饱和, 随后受到来自北方的弱冷空气影响, 水汽凝结, 雾形成。

(2) 雨雾发生前贴地层多有逆温, 雨雾过程中 2 m 高度与地表温度差由正转为负, 逆温消失。但 900 hPa 以下, 雨雾发生前和过程中, 都少有逆温层, 雨雾结束后均无逆温结构。雨雾前中低层有云, 云状为高积云 Ac 或高层云 As 及层积云 Sc 或碎雨云 Fn, 低云高 0.3~2.5 km, 雨雾过程中, 600 hPa 以下都是饱和层, 多伴有 Fn, 低云高度明显下降, 雨雾过后, 近饱和层仍然有可能存在。雨雾前 900 hPa 附近有明显的风切变。(3) 雨雾形成初期, 大粒子 (粒子直径 $D \geq 10 \mu\text{m}$) 和小粒子 ($1 \mu\text{m} < D < 10 \mu\text{m}$) 数浓度均有明显增加。南京冬季雨雾过程对气溶胶粒子的湿清除, 主要是核模态气溶胶粒子的核化过程。气溶胶粒子数浓度的减少程度与风向和风速密切相关, 在较大的北风作用下, 气溶胶粒子浓度明显减少。

关键词 雨雾 宏微观结构 演变

文章编号 1006-9895(2015)01-0047-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13284

Evolution of the Macro- and Microphysical Properties of Precipitation Fog in December 2007 in Nanjing

YU Huaying^{1,2,3}, NIU Shengjie^{1,3}, LIU Peng⁴, LIU Chang⁵, LU Chunsong³, and HUANG Jiahuan³

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2013-10-15; 网络预出版日期 2014-04-09

资助项目 国家自然科学基金项目 41375138、41275151、41275152、41375137, 江苏省自然科学基金项目 BK2012860, 江苏高校优势学科建设工程项目 PAPP

作者简介 于华英, 女, 1979 年出生, 博士, 讲师, 主要从事云雾物理学研究。E-mail: cloudseas@hotmail.com

5 Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

Abstract Comprehensive observations of fog were conducted during winter 2007 in Nanjing University of Information Science and Technology, including the measurements of visibility, raindrop spectrum, fog, and aerosol spectrums. Salient synoptic-scale features were identified using conventional meteorological observations and NCEP reanalyses. We studied the synoptic situation and macro–micro evolutionary characteristics of six precipitation fog events that occurred in Nanjing during December 2007. The results show that (1) The six events were all mainly controlled by the synoptic system and were in the form of fog compared with light rain. The minimum visibility in these events was more than 250 m. In addition, the precipitation fog mostly occurred under the influence of an easterly airstream, and generally weak precipitation occurred first, when the air was close to saturation. An invasion of cold air from the north and vapor condensation finally caused the formation of precipitation fog. (2) An inversion layer was always present near the surface before most precipitation fogs, and the temperature difference between 2 m and the surface changed from positive to negative as inversion layer disappeared during fogs. However, the observation of inversions below 900 hPa was difficult. *Altostratus* (As) and *Stratocumulus* (Sc) and *Fractonimbus* (Fn) occurred in the middle and lower layer before precipitation fogs, while the height of low clouds was 0.3–2.5 km. During these processes, the layer below 600 hPa was nearly saturated, most events occurred with Fn, and the height of low clouds markedly decreased. After the fog, the nearly saturated layer may still have been present. In addition, there was significant wind shear near 900 hPa before precipitation fogs. (3) The number and concentration of larger and smaller fog droplets increased markedly in the early stages of precipitation fog formation. Aitken mode particles are more efficiently scavenged through nucleation by precipitation fogs in Nanjing, and the reduction in Aitken particles is closely related to wind direction and speed. Because of the influence of a stronger north wind, the concentration of aerosol particles decreased significantly.

Keywords Precipitation fog, Macro–microstructure, Evolution

1 引言

雾是大量微小水滴或冰晶浮游空中,使近地水平能见度小于 1.0 km 的天气现象,常呈乳白色(中国气象局,2007)。由于雾滴(直径 2~50 μm)对可见光有强烈的衰减作用,会造成视程障碍,从而危害交通安全、降低运输效率。同时,矿物粉尘、工业排放等污染物与雾水结合,长时间滞留在人们经常活动的边界层内,危害身体健康。近年来雾对人类直接和间接影响引起多学科的关注(Gultepe et al. 2007; Niu et al., 2010)。

近几年,诸多研究发现雾过程中会有弱降水发生,而且降水对雾的形成、维持以及消散(即能见度变化)存在重要影响(Tardif and Rasmussen, 2007, 2008, 2010; 吴兑等, 2009; 严文莲等, 2010; 李宏宇等, 2010; 岳岩裕, 2013)。宏观上主要体现在两方面:一是降水对雾滴数浓度的影响,当降水强度大于一定阈值时[孟蕾等(2010)给出 1.8 mm h^{-1}],由于雨滴的拖曳作用致使原本悬浮在空中的雾滴沉降;另一方面降水蒸发会增加空气湿度又有利于雾的形成和发展(Tardif and Rasmussen, 2010)。在国外,以降水类型发生转变为特征的温

带气旋区有一些雨雾过程(Stewart, 1992; Stewart and Yiu, 1993; Stewart et al., 1995),但是更多的雨雾发生在与暖锋相伴的液态降水区(George, 1940a, 1940b, 1940c; Byers, 1959; Petterssen, 1969)。以往对辐射雾,平流雾等研究比较多,而对雨雾中各种物理机制的作用却少有详细的研究。Tardif and Rasmussen (2008) 定义在雾形成前几小时至雾消散期间,如果出现降水,就称为雨雾,并详尽地分析了纽约雨雾的宏观特征,发现雨雾发生经常伴随云底降低、及地,在近地层的强逆温层中出现弱的液态降水。Tardif and Rasmussen (2010) 基于数值模拟和观测实例指出自由降落的雨滴处于非平衡态,雨滴的蒸发是雾形成的原因。Donaldson and Stewart (1993) 也认为雨雾的产生是由于雨水的蒸发。国内,邓雪娇等(2007)在研究广东一次锋面浓雾过程中,对雨雾的宏观特征做了简单的分析;严文莲等(2010)利用 2006~2008 年南京气象观测资料统计表明,雨雾出现的次数达总数的 20%以上,也是南京地区雾的一种重要类型,并分析了南京雨雾的天气形势和边界层特征。李宏宇等(2010)分析了 2007 年北京一次雨雾和一次雪雾过程的温、湿、风的变化特征。但总的来说,对雨雾的研究不

多, 尤其是对雨雾的微物理特征的观测分析更为少见。

鉴于已有雾的观测试验和数值模拟等研究对象大多为纯雾天气, 对雾和降水共生的天气研究较少, 南京地区降水和雾共存时气象要素的变化及降水对雾的理化特性的影响尚不十分明确。为此本文选取 2007 年 12 月南京六次雨雾共存的天气过程, 通过能见度仪、雾滴谱、气溶胶粒子谱、雨滴谱仪及气象自动站、浦口气象站地面观测资料和 NCEP 再分析资料等, 详细分析了伴有降水的雾过程地面及高空气象要素的变化, 并初步探讨了雨滴谱、雾滴谱和气溶胶谱的分布特征。

2 资料简介

南京信息工程大学地处南京市长江北岸, 东北方向约 10 km 是江北化学工业园, 工业园内有石化、钢铁、热电厂等污染较严重的企业。观测场设在南京信息工程大学, 海拔 22 m, 经纬度分别为 (32.2°N, 118.7°E)。

观测场架设仪器如表 1, 能见度仪 (ZQZ-DN), 每分钟一组数据, 架设高度距离地面 1.5 m。同时采用德国 OTT 公司生产的雨滴谱仪 Parsivel (Precipitation Particle Size and Velocity), 激光探头距地 1.8 m。仪器通过激光系统测量降水粒子的形态 (冰雹、雨滴、霰、雪、霜和融化的粒子)、速度和直径。下落速度和雨滴尺度大小的测量范围分别为 $0.1\sim 20\text{ m s}^{-1}$ 和 $0.25\sim 26\text{ mm}$, 每隔 10 s 一组数据。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, 可以每秒测量雾粒子数浓度、谱分布, 粒子直径范围为 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$, 最大数密度为 10^4 个 cm^{-3} , 距离地高度约 1 m。气溶胶粒子谱仪 (WPS-1000XP), 每 5 min 一组气溶胶粒径谱, 测量范围是 $10\sim 1000\text{ nm}$ 。地面常规气象要素的观测采用环境气象站 (EnviroStation™), 每隔 1 min 获得距离地面 1.5 m 高度的气温、气压、相对湿度、风速、风向五要素值。

结合业务网上的常规观测资料 (MICAPS) 和六小时一次的 NCEP 再分析资料。

3 2007 年 12 月南京六次雨雾过程及气象要素分布

3.1 雨雾过程

利用南京信息工程大学综合观测中能见度和雨滴谱资料, 由每小时平均能见度和过去一小时雨量给出图 1, 由图可将雨雾过程分为: 雨中雾 (先有雨, 后起雾) Case1 至 Case5 过程 [Case1: 10 日 02:00~09:00 (北京时, 下同); Case2: 11 日 19:00~12 日 01:00 和 12 日 07:00~16:00; Case3: 16 日 21:00~17 日 08:00; Case4: 22 日 02:00~10:00; Case5: 27 日 09:00~13:00] 和雾中雨 (先有雾, 后下雨) 的 Case6 过程 (28 日 00:00~09:00)。六次过程中的雨强大都在 2.5 mm h^{-1} 以下, 是小雨量级, 可以确定能见度的降低不是由于强降水产生 (刘西川等, 2010)。

雨中雾的 Case1、Case3、Case5 都是小雨发生后五个小时内, 能见度持续下降至 1 km 以内, 再经历小雨与雾共存的过程, 最后雨停雾散。Case2: 降水和雾同时发生, 随后雨强增加, 最大雨强达 6.5 mm h^{-1} , 雾散。随后, 雨强变弱, 三小时后能见度又小于 1 km, 小雨与雾持续共存并同时消散。Case4 发生在一次平流辐射雾之后 (刘端阳, 2011), 在此过程中雨强随时间有明显的增强 (最大为 2.6 mm h^{-1}) 和减弱, 雨强增强过程中能见度好转, 这是因为雨滴的拖曳作用致使悬浮在空中的雾滴沉降 (孟蕾等, 2010), 雾消散后, 弱降水仍持续了三小时。雾中雨的 Case6 是雾中有非常弱的降水。

3.2 雨雾环流形势分析

雾的形成需要满足一定的物质条件 (水汽和云凝结核), 热力条件和动力条件。天气系统是影响雾发生、发展的主要因素, 分析六次雨雾过程的天气形势: 从 500 hPa 的高空图上看, 六次过程都以浅的南支槽、西风槽或平直西风环流为主, 雾过

表 1 观测项目概况

Table 1 List of instruments used during the experiment

观测仪器	仪器生产商	观测项目及精度	时间分辨率	架设高度
能见度仪 ZQZ-DN	江苏无线电科学研究所	水平能见距离 ($<1\text{ km}$ 时 $\pm 10\%$)	1 min	1.5 m
雨滴谱仪 Parsivel	德国 OTT	降水粒子直径和下落速度	10 s	1.8 m
雾滴谱仪 FM-100	美国 DMT	雾滴直径和数密度	1 s	1 m
自动站 EnviroStation™	澳大利亚 ICT	温度、气压、相对湿度、风向和风速 ($1\%\sim 3\%$)	1 min	1.5 m
气溶胶粒子谱 WPS-1000XP	美国 MSP	气溶胶粒径谱 ($0.01\sim 10\text{ }\mu\text{m}$)	5 min	1 m

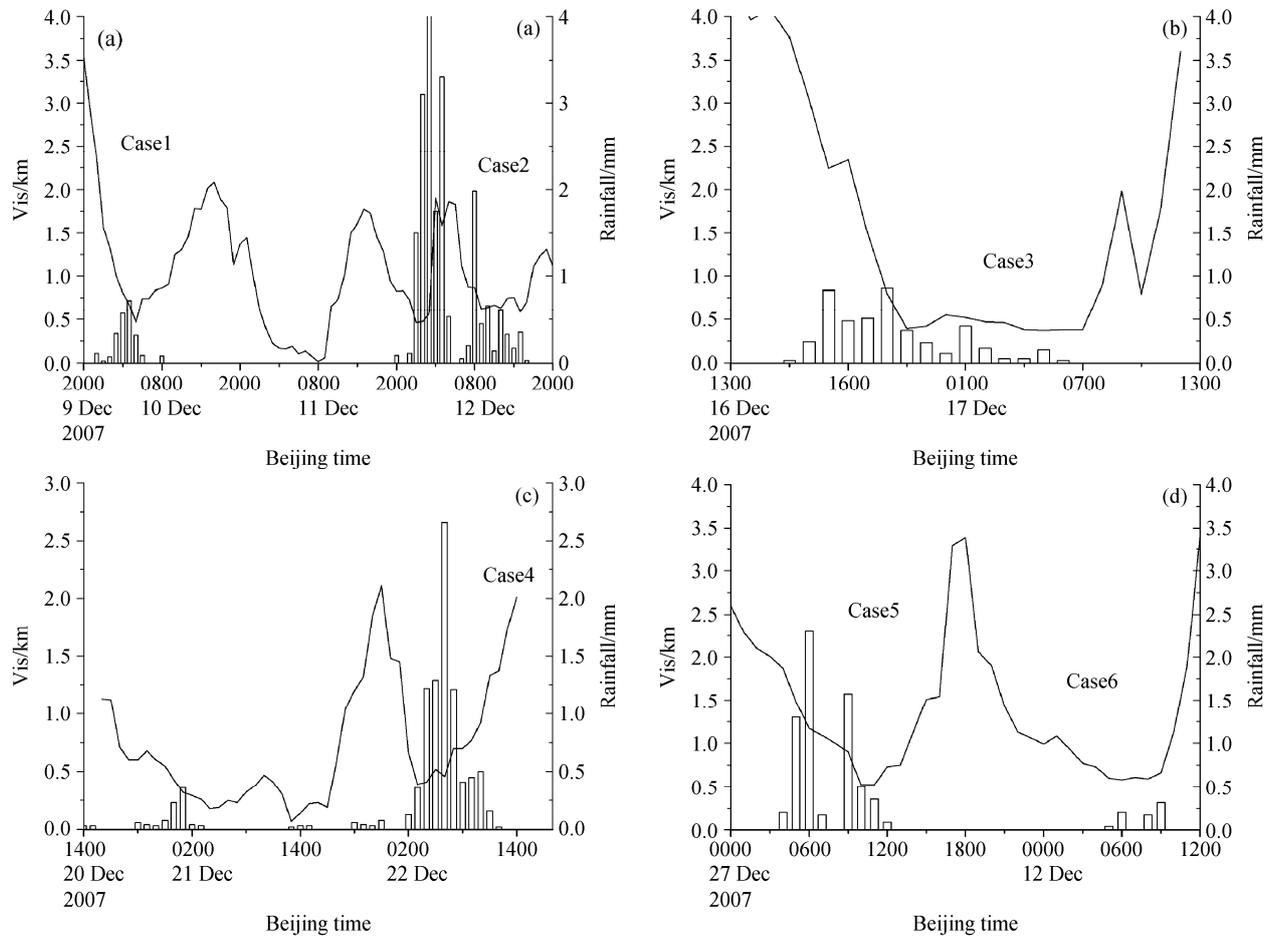


图1 2007年12月能见度(Vis, 黑色实线)和过去1小时累积雨量(柱状图)随时间的变化:(a) 09日20:00至12日20:00;(b) 16日13:00至17日13:00;(c) 20日14:00至22日18:00;(d) 27日00:00至28日12:00

Fig. 1 Visibility (Vis, black solid line) and past 1-h rainfall (histogram) variation with time in Dec 2007: (a) 2000 BJT (Beijing time, BJT) 9 Dec–2000 BJT 12 Dec, (b) 1300 BJT 16 Dec–1300 BJT 17 Dec, (c) 1400 BJT 20 Dec–1800 BJT 22 Dec, (d) 0000 BJT 27 Dec–1200 BJT 28 Dec

程发生时, 长江中下游基本以偏西气流或西南偏西气流为主。同时, 850 hPa 为弱的暖性结构(图略)。

2007年12月10日地面天气图上, 贝加尔湖以西始终维持一个高压系统, 华北地区为一均压区, 福建、浙江、江苏一线为一倒槽, 江苏处于倒槽中心的弱低压区, 05:00开始有弱的冷锋锋面过境, 但风速不大, 维持的在 2 m s^{-1} 。08:00的流场可以看出风速有弱辐合, 有利于近地面水汽凝聚。10日20:00均压区向南发展, 倒槽入海后在海上形成一低压中心, 南京处于均压区内, 天气转晴。11日17:00之前南京处在高压前部的均压场, 受偏东风影响。11日23:00南京转为高压控制, 随着西北路径冷空气渗透, 但强度较弱, 另外之前的弱降水使得地表的水汽条件很好, 因此能见度仍然维持较低。

16日17:00可以在地面图上看到, 南京地区处

在倒槽顶部, 一直维持偏东风, 16日11:00开始逐渐转为弱高压控制, 天空云量减少。受前期降水影响, 地面水汽条件好, 南京地区维持轻雾天气, 16日20:00开始有弱冷空气不断渗透下来, 受东北风影响(风速一直维持在 $2\sim 4\text{ m s}^{-1}$)以及辐射降温使得水汽达到饱和, 能见度降低。直到17日05:00开始, 南京转为偏北风控制, 强冷空气开始影响, 能见度随之转好。

21日20:00南京处于高压前部均压场, 降水前一直维持均压, 风速较小, 层结稳定, 而水汽不断积累, 22日凌晨降水开始, 破坏原有的稳定层结, 随着降水增加, 能见度逐渐转好。受强冷空气影响, 14:00降水趋于结束。

27日08:00南京处于高压前弱倒槽后, 受东北偏东风影响, 与高空的西南气流存在垂直切变, 明

显可以看到有冷平流开始影响南京地区, 冷空气不断渗透下来, 但是强度较弱, 同时受弱的降水影响, 水汽不断增加, 有利于雾的维持。13:00 后在冷空气影响下能见度较好, 但仍维持轻雾天气。27 日 20:00, 南京地区仍然处于高压前, 降水过程停止后, 层结恢复稳定状态, 弱冷空气使得水汽更容易达到饱和, 能见度下降。28 日 08:00, 南京转为受北风控制, 能见度转好。

图 2 是依据 3 小时一次的常规地面观测资料, 分析临近雨雾发生时的地面图, 按其给出六次雨雾

过程的天气形势, 见表 2。六次雨雾过程的天气系统有所不同, 但地面都处于均压区, 有利于水汽聚集并伴随弱的降温天气, 水汽易达到饱和, 有利于雾天气形成和维持。

3.3 雨雾过程中地面温、湿、风的变化

通过综合分析降水强度、能见度及地面自动气象站的观测资料, 给出图 3。可见, 六次雨雾过程多形成于夜晚或凌晨, 日出后消散, 但 Case2 和 Case5 是日出后形成, 午后消散。正如严文莲等 (2010) 所述: 一天中各时均有可能出现雨雾。雨

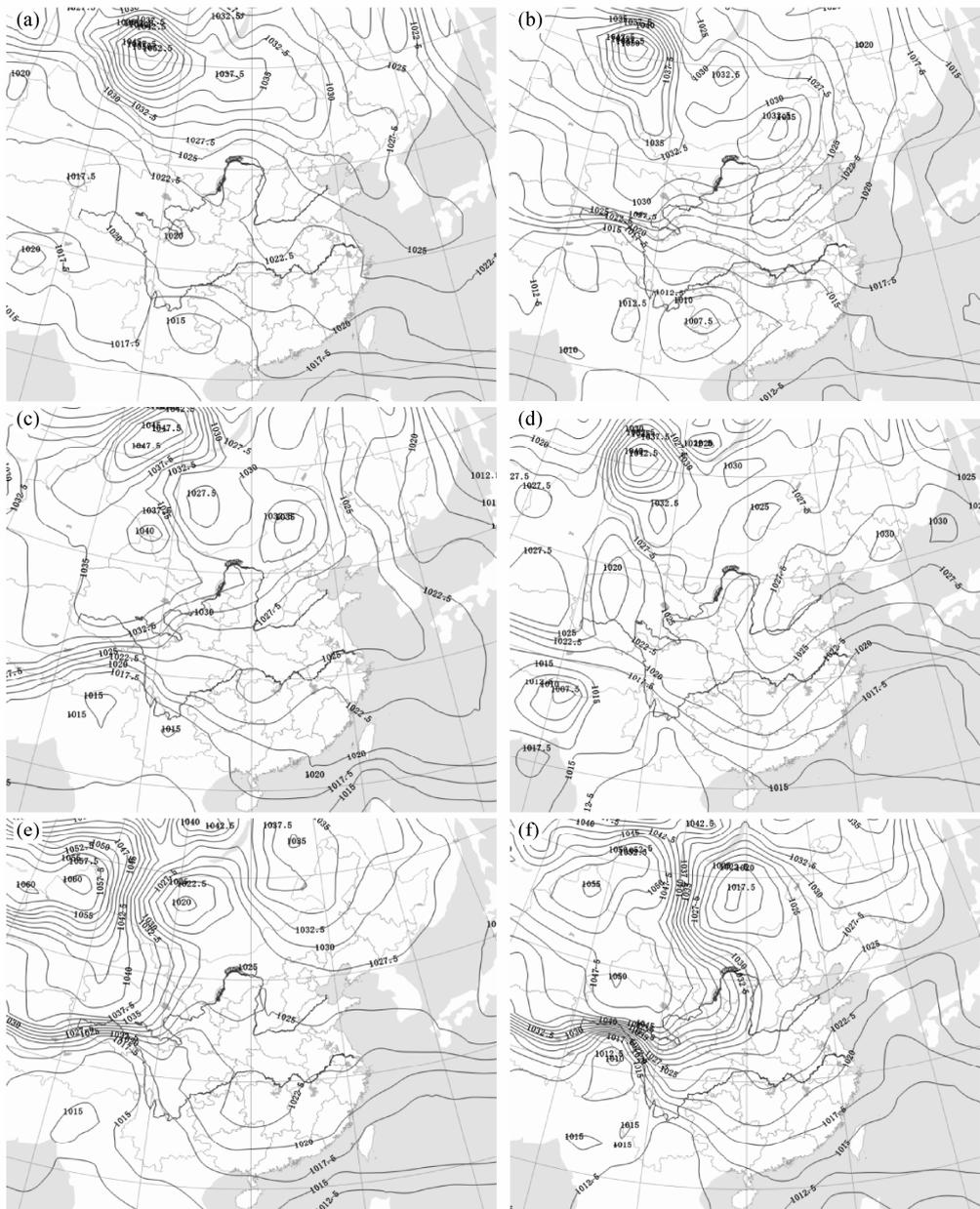


图 2 2007 年 12 月雨雾过程的海平面气压场: (a) 09 日 23:00; (b) 11 日 17:00; (c) 16 日 20:00; (d) 21 日 23:00; (e) 27 日 08:00; (f) 27 日 23:00
Fig. 2 Sea level pressure patterns of precipitation fog weather in Dec 2007: (a) 2300 BJT 9 Dec, (b) 1700 BJT 11 Dec, (c) 2000 BJT 16 Dec, (d) 2300 BJT 21 Dec, (e) 0800 BJT 27 Dec, (f) 2300 BJT 27 Dec

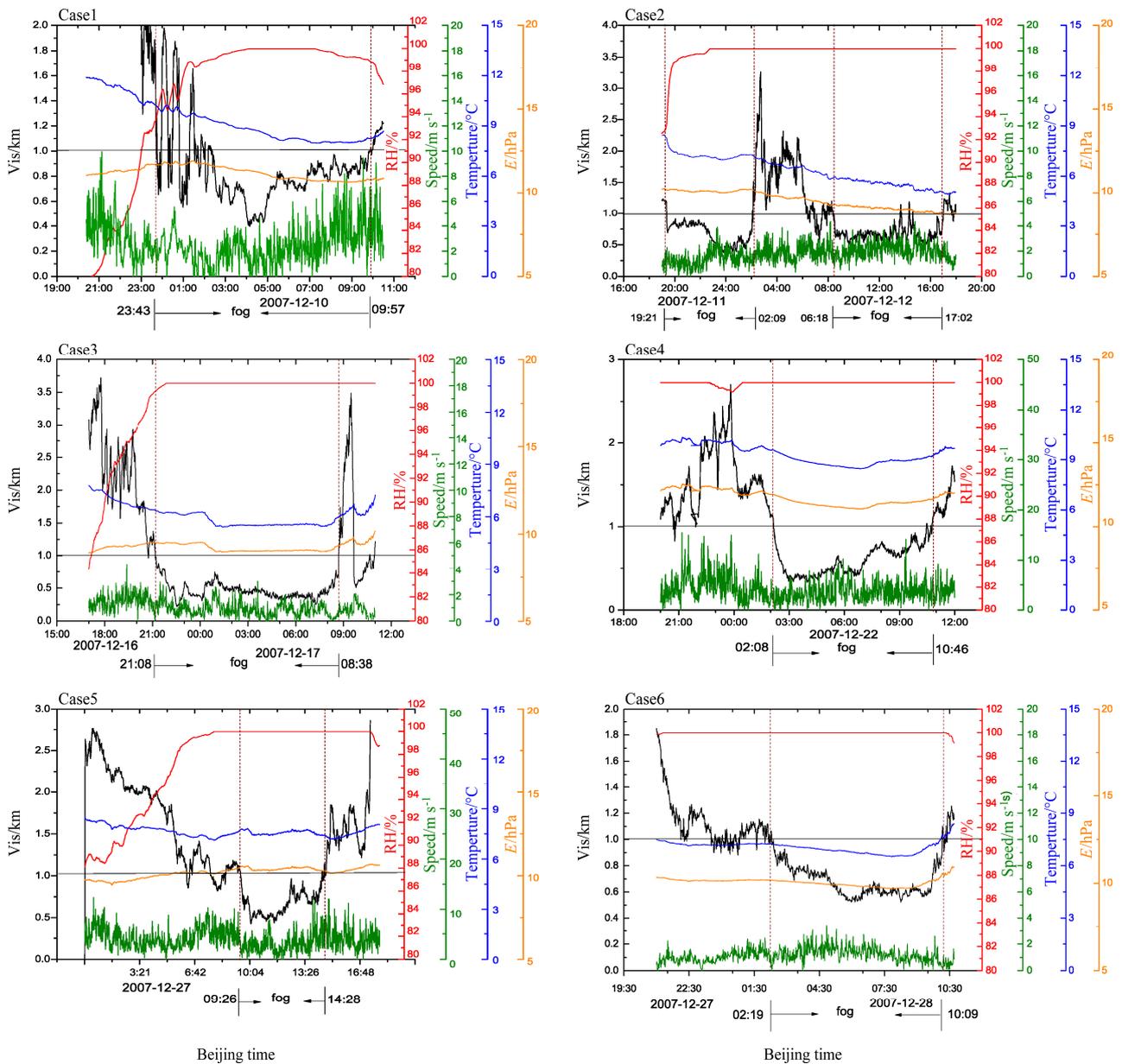


图3 六次雨雾过程中能见度、相对湿度、风速、温度、水汽压 (E) 随时间的变化

Fig. 3 Visibility, relative humidity, wind speed, temperature, and vapor pressure (E) variation with time in the six precipitation fog cases

雾的持续时间从 5.0 h (Case5) 至 11.5 h (Case3) 不等。雨雾形成前, 能见度有快速的波动变化 (严明良, 2011), 而且总有短时间内能见度迅速下降的现象, 并且由于水汽压上升 (或不变) 伴随温度的下降, 导致相对湿度很快接近 100% 并持续。雨雾发展阶段, 能见度也有波动性, 但是最低能见度都在 0.25 km 以上 (Case3), 达不到强浓雾的程度, 这与当地辐射雾或者平流辐射雾明显不同 (刘端阳, 2011), 且最低能见度出现在雨雾持续时间最长的条件下 (见表 2)。由于雨雾过程中空气温度变

化范围很小, 仅对雨雾过程的平均气温加以分析, 发现六次雨雾过程的平均温度介于 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间, 比当地同季节的其他雾过程偏高 (刘端阳, 2011)。6 次雨雾过程中相对湿度差异很小, 多在 98%~100% 的范围内 (表 2 未列出)。雨雾过程中最大风速不超过 4.5 m s^{-1} , 平均风速多小于 2 m s^{-1} 。五次雨中雾形成前能见度快速波动变化过程中, 风速也有较强的波动。雨雾发生、发展过程风向的变化很大, 与天气系统的移动变化紧密联系。雨雾形成前地面多为偏东气流, 为雾区提供水汽, 而能见

表 2 南京雨雾过程的气象条件

Table 2 Meteorological elements during the precipitation fog events

	起始时间 (LST)	消散时间 (LST)	天气形势	持续时 间/h	最小能见 度/m	温度/ °C	风速/ m s^{-1}		雾形成时的 风向
							最小	最大	
Case1	2007 年 12 月 10 日 02:23	2007 年 12 月 10 日 09:50	低压倒槽	7.5	394	8.4	0.08	2.63	西北
Case2	2007 年 12 月 11 日 19:22	2007 年 12 月 12 日 02:04	高压前部均压型	6.7	384	7.2	0.24	3.9	东北偏北
	2007 年 12 月 12 日 08:24	2007 年 12 月 12 日 17:01		8.8	499	5.5	0.49	4.35	北
Case3	2007 年 12 月 16 日 21:08	2007 年 12 月 17 日 08:38	弱倒槽	11.5	254	5.7	0.08	3.02	东北偏北
Case4	2007 年 12 月 22 日 02:09	2007 年 12 月 22 日 10:27	高压底前部	8.3	328	8.9	0.08	3.93	东北
Case5	2007 年 12 月 27 日 09:31	2007 年 12 月 27 日 14:29	高压底前部	5.0	426	7.6	0.08	3.45	东北偏北
Case6	2007 年 12 月 28 日 02:19	2007 年 12 月 28 日 10:09	高压底前倒槽后	7.8	524	6.9	0.09	3.46	北

度呈现快速的波动性并有陡然下降过程, 风向发生了大幅度的转变, 多以偏北风为主, 弱冷空气遇到充足的水汽, 使得水汽凝结, 雾形成。温度的回升导致能见度可以在很短的时间里迅速回升, 雨雾消散。

4 大气的垂直结构

由于雨雾过程中降水带来的下沉气流, 导致系留艇无法升空, 为此选用南京站单站常规探空资料和每日 02:00、14:00 的 NCEP 再分析资料, 从雾前、中、后三个阶段分析雨雾垂直的温湿结构 (如图 4) 和动力结构 (如图 5)。由此也可以了解到, 有必要引入遥感设备对雨雾过程的大气垂直结构进行监测。

4.1 温湿结构

利用 NCEP 再分析资料, 分析 1000 hPa 的温度与 2 m 高度的温度差异发现, 只有 Case1 在雨雾发生前有逆温结构, 其他雨雾的演变过程均无逆温。同时, 分析 2 m 高度的大气温度 (T_{2m}) 与地表温度 (T_{surface}) 的差异, 结果显示雨雾过程发生前贴地面存在逆温或等温的有 Case1 至 Case4 四次过程, 最大逆温 ($T_{2m} - T_{\text{surface}}$) 为 $0.5^\circ\text{C}/2\text{ m}$; 雨雾过程中 $T_{2m} - T_{\text{surface}}$ 由正转为负, 逆温消失; 雨雾过后贴地面均无逆温或等温层结 (图略)。

图 4 是六次雨雾过程的探空图, 可以发现: 900 hPa 以下, 雨雾发生前, 有明显逆温层的只有 Case1, 反而是中高层 (600 hPa 至 850 hPa) 多存在逆温或等温层, 同时中高层都有近饱和层。根据地面观测记录, 雨雾过程发生前都有高积云 Ac 或高层云 As, 同时存在层积云 Sc 或碎雨云 Fn, 低云高 0.3~2.5 km, 总云量均为 10。雨雾过程中, 有逆温或等温

的只有 Case2, 而且几乎 600 hPa 以下都是饱和层, 多伴随 Fn, 低云高度明显下降。这与 Westcott and Kristovich (2009) 统计美国中西部 1951~1996 年的地面观测资料, 得到 57% 的雾过程伴随低云的现象相似。雨雾过后, 低层均无逆温结构, 但湿度明显减弱的是 Case1、Case3 和 Case6, 其他三次过程的饱和层仍然存在, 低云状除了 Fn 也多发生 Sc, 低云高除 Case5 以外都略有抬升。

六次雨雾过程的 0°C 层均在 700~850 hPa 间, 比晴天的 0°C 层位置明显偏高, 这可能与中低层的水汽相变释放潜热有关, 另外可能由于中低层有云, 长波辐射使得 0°C 层位置偏高, 同时阻挡地面的长波辐射向外传播, 导致雾前、中、后的地面温度均在 $6\sim 10^\circ\text{C}$, 无明显变化。 0°C 层的高度偏高也说明这几次雨雾过程中高空冷平流弱。综合分析可见南京多次雨雾都是液态降水, 而不是正在融化或冻滴, 与 Tardif and Rasmussen (2008) 在纽约的观测是一致的, 与其不同的是, 纽约的雨雾过程多存在强逆温层, 雨滴经过强逆温层, 落到较冷的近地层, 雨滴先蒸发 (增加大气湿度) 后凝结而成雾。Tardif and Rasmussen (2010) 从理论和个例的实际观测上都证实了雨雾的形成, 主要源于雨滴降落过程中蒸发, 增加大气的湿度。但是我们的观测发现逆温并不是雨雾的充要条件, 在没有逆温的条件下, 弱降水直接降落到地面, 近地面空气的湿度大, 当有冷平流过境时, 有利于水汽凝结, 即发生了冷却雾。

4.2 风场分析

图 5 是几次过程的垂直风场结构。对雨中雾的五次过程: 雨雾形成前, 地面以偏东气流为主, 风向随高度顺时针旋转, 代表雾前有弱暖平流, 且在

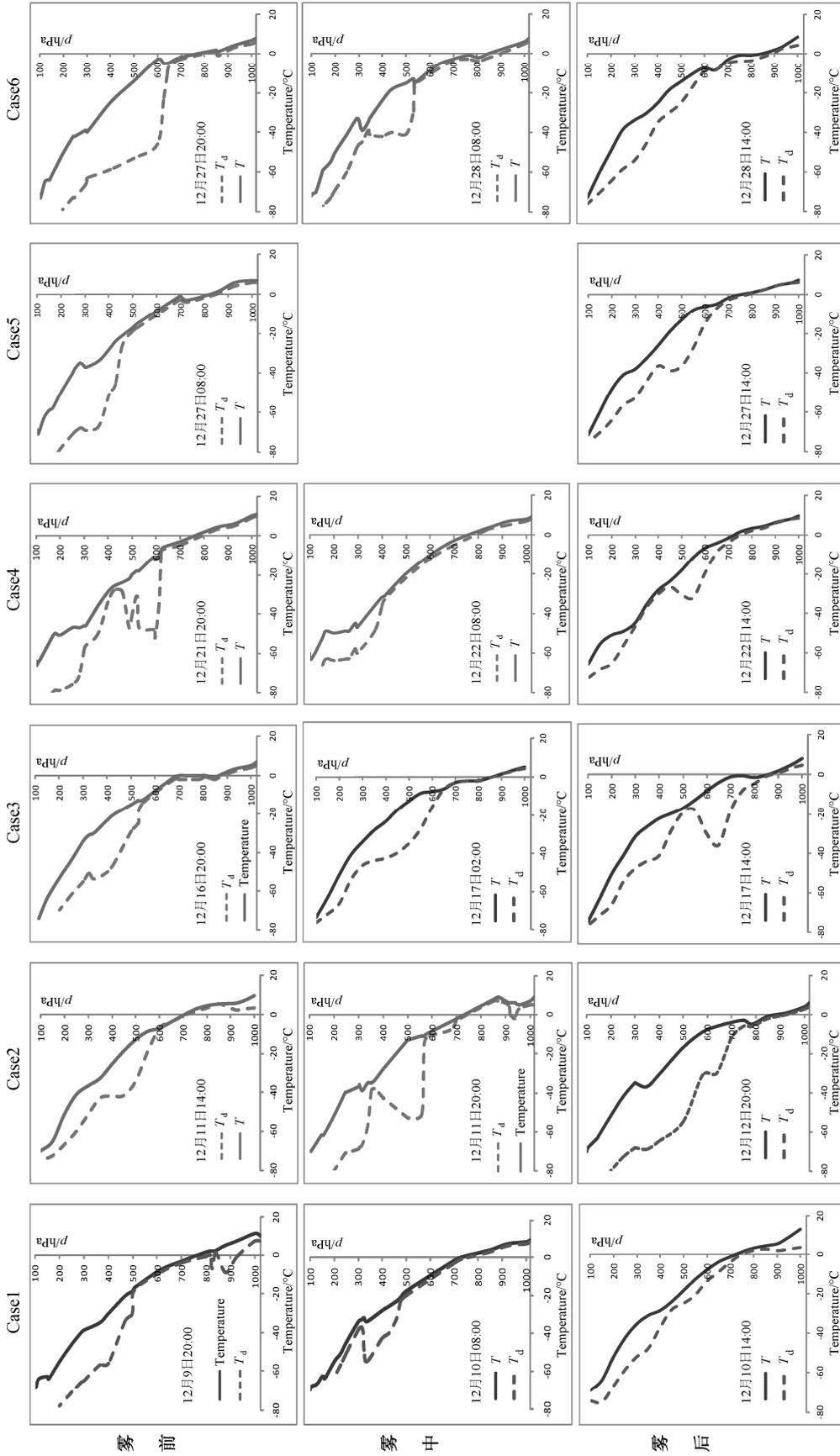


图 4 雨雾过程的 T-lnp 图

Fig. 4 T-lnp diagram of precipitation fog weather

900 hPa 高度附近均有明显的风切变。雨雾过程中, 低层风速都变小, 风向多转变成偏北风或西风 (Case1)。雨雾过程消散阶段, 风向随高度逆时针旋转, 有弱的冷平流。因 Case4 与 Case5 的风场结果相似, 故图 5 中略去 Case4。

5 雨雾的微物理过程分析

刘端阳 (2011) 分析了本文 Case2 至 5 过程的雾滴谱, 指出雨雾的数密度、含水量和平均直径与辐射雾、平流雾相比都要低很多, 而且雨雾的滴谱很窄, 谱分布成指数快速下降, 所以雨雾的最低能见度偏高。康汉青等 (2009) 利用与本文一致的观测资料定量分析了小雨、强浓雾、降雪三种降水过程对大气气溶胶的湿清除作用, 但该文中五次小雨过程中有三次是雨中有雾的过程, 即本文的 Case3 到 Case5。由宽范围颗粒粒径谱仪 (WPS)、雾滴谱

及雨滴谱资料给出图 6, 选取资料完整的三次雨雾过程, 分析微物理量的时间演变。

从图 6 的气溶胶粒子谱可见, 南京北郊大气细颗粒物数浓度比较高, 其中粒径 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 的核模态粒子对总粒子数浓度贡献较大, 与钱凌等 (2008) 分析结果一致。Case3 与 Case4 的气溶胶核模态粒子浓度的低值区都出现在夜间, 而且浓度很低, 持续时间长。相对前两次过程, Case5 的低值出现在午后, 浓度偏高、持续时间短。平均雨滴直径均为 $0.5\ \text{mm}$, 极少有直径大于 $1.5\ \text{mm}$ 的雨滴。雾滴谱中, 雾滴直径主要集中在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的小粒子, 少有大于 $10\ \mu\text{m}$ 的大雾滴 (刘端阳, 2011)。在雾形成初期, 小粒子和大粒子的数浓度都有明显增加, 并且伴随气溶胶粒子 (主要是核模态粒子) 数浓度的明显下降, 这反映了气溶胶粒子的核化过程。同时计算了两次雨中雾 Case4、Case5 及雾中雨

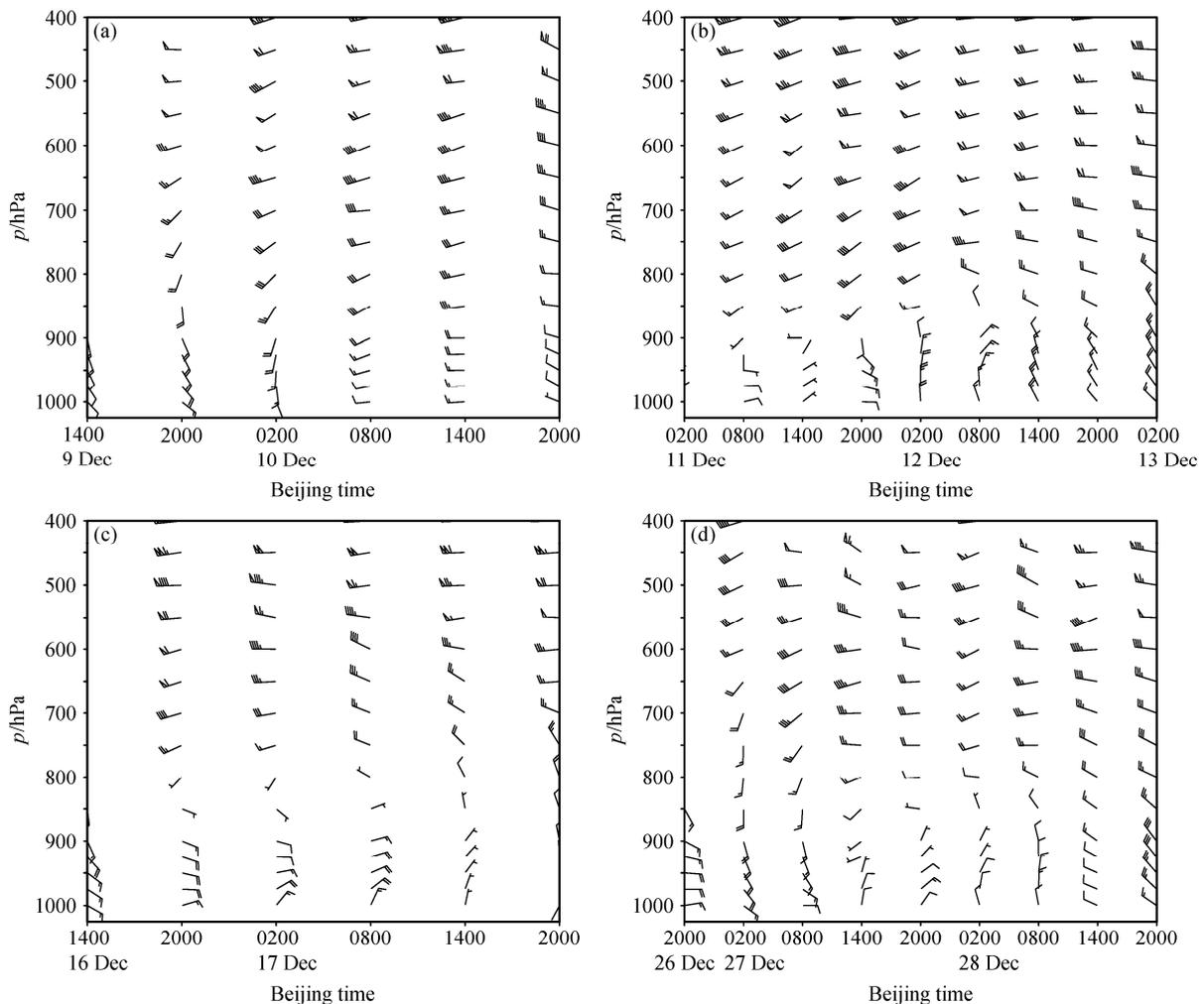


图 5 雨雾过程风矢量的高度—时间剖面图: (a) Case1; (b) Case2; (c) Case3; (d) Case5 和 Case6

Fig. 5 Wind vector as a function of height and time during the precipitation fog: (a) Case1, (b) Case2, (c) Case3, (d) Case5 and Case6

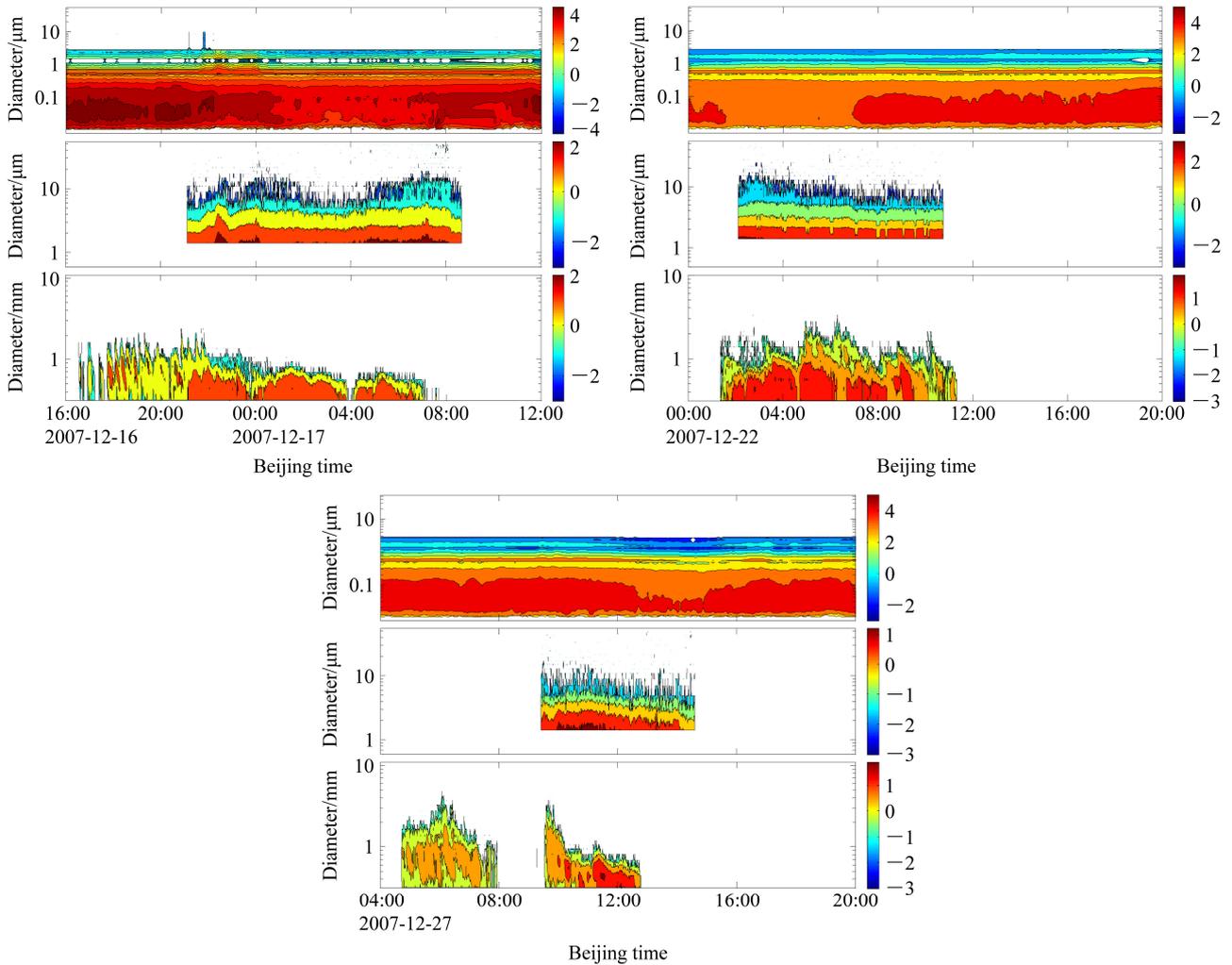


图6 气溶胶粒子谱(上)、雾滴谱(中)、雨滴谱(下)随时间的演变:(a) 16日 16:00~17日 12:00; (b) 22日 00:00~20:00; (c) 27日 04:00~20:00。气溶胶粒子谱和雾滴谱的色标是 $\lg n$, n 是每一档的数密度, 单位为 $\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$; 雨滴谱的单位为 $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$

Fig. 6 Evolutions of aerosol particle number size (top), fog drops spectrum (middle), and rain drops spectrum (bottom): (a) 1600 BJT 16 Dec–1200 BJT 17 Dec, (b) 0000 BJT–2000 BJT 22 Dec, (c) 0400 BJT–2000 BJT 27 Dec. Shadings of aerosol particle number size and fog drops spectrum are $\lg n$, n is the number concentration in every bin, units: $\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$; unit of rain drop spectrum are $\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$

Case6 的自动转化阈值函数 T (Lu et al., 2013), T 的取值范围为 $0 \sim 1$, T 越大, 碰并发生的概率越大。结果显示雨中雾和雾中雨的 T 值都为 0.0 , 与强浓雾过程有明显差异 (Lu et al., 2013)。

结合图 1 中雨强随时间的演变可以发现, Case3 在雾前 4 h 就有弱降水发生, 但核模态气溶胶粒子数浓度并没有明显减少, 因为雨滴小而少。而在雾出现后, 气溶胶核模态粒子浓度明显减少, 雨滴变小, 小雨滴数密度增加, 直到降水结束。这与 Flossmann et al. (1985) 认为核化过程是气溶胶最有效的清除机制相一致。另外, 刘奇俊等 (1992) 用理论模型分析出, 近地面层降水中的气溶胶浓度

大于云中雨水的气溶胶浓度。Case4 先有降水, 随后就起雾, 气溶胶核模态粒子浓度迅速减少, 小粒径的雨滴逐渐增多, 直到 22 日 08:00, 气溶胶核模态粒子浓度升高, 降水和雾都趋于结束。Case5 的过程有所不同, 雾前 4 h 有小雨发生, 雨滴小而少, 气溶胶粒子浓度没有明显变化, 直到雾的发生至发展, 气溶胶粒子浓度有下降趋势, 在弱降水结束后, 雾过程趋于结束, 气溶胶粒子浓度有所下降, 但与前两次过程相比, 下降的程度偏弱。

分析三次过程的风场可以发现: 雾形成前和消散后地面以偏东风为主。气溶胶细粒子数浓度持续低值的时段内: Case3 风向为北风, 平均风速 2.1

m s^{-1} , 最大雨强为 0.42 mm h^{-1} ; Case4 风向为北风, 平均风速 3 m s^{-1} , 最大雨强为 2.66 mm h^{-1} ; Case 5 东北风, 风速 2.1 m s^{-1} , 雨已停。由此可见气溶胶粒子数浓度的减少程度与风向和风速密切相关, 观测场的东北方向有污染源, 所以即使有弱降水和雾的情况下, Case5 的气溶胶粒子浓度减少的程度最弱。Case4 雨强最大, 同时在较大的北风作用下, 气溶胶粒子浓度减少的最明显。所以, 气溶胶与雾滴在大气中的存在主要是受天气过程的影响(吴兑等, 2009)。

6 结论

(1) 南京 2007 年 12 月的六次雨雾过程主要是受天气系统的影响, 以雨中雾为主, 而且最低能见度大于 250 m 。天气形势有所不同, 但地面都处于均压区。多出现在偏东气流的影响下, 南京地区先发生弱降水, 空气近饱和, 随后受到来自北方的弱冷空气影响, 水汽凝结, 雾形成。在雨雾发展阶段能见度存在波动性, 与之相对应, 风速大小和方向也不断变化, 说明雨雾的形成与发展和风向、风速关系密切。同时, 雨雾的消散受温度、降水以及风的共同作用。

(2) 由 NCEP 资料分析发现, 雨雾发生前贴地层多有逆温, 雨雾过程中 $T_{2\text{m}} - T_{\text{surface}}$ 由正转为负, 逆温消失。但从常规探空资料分析 900 hPa 以下, 雨雾发生前和过程中, 少有逆温层, 雨雾后低层均无逆温结构。雨雾发生前都有 Ac 或 As, 同时存在 Sc 或 Fn, 总云量均为 10。雨雾过程中, 600 hPa 以下都是饱和层, 多伴有 Fn, 低云高度明显下降。雨雾过后近地面的饱和层仍有可能存在。 0°C 层在 $700 \sim 850 \text{ hPa}$ 间, 位置偏高。雨雾形成前地面主要是偏东风, 雾形成过程以偏北风为主, 在 900 hPa 高度附近均有明显的风切变。

(3) 雾形成初期, 大粒子和小粒子数浓度均有明显增加。南京冬季雨雾过程对气溶胶粒子的湿清除, 主要是核模态气溶胶粒子的核化过程。气溶胶粒子数浓度的减少程度与风向和风速密切相关, 在较大的北风作用下, 气溶胶粒子浓度明显减少。

参考文献 (References)

Byers H R. 1959. General Meteorology [M]. New York: McGraw-Hill, 481.
Donaldson N R, Stewart R E. 1993. Fog induced by mixed-phase

precipitation [J]. Atmos. Res., 29 (1-2): 9-25.
邓雪娇, 吴兑, 唐浩华, 等. 2007. 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, 26 (4): 881-889. Deng Xuejiao, Wu Dui, Tang Haohua, et al. 2007. Analyses on boundary layer structure of a frontal heavy fog process in Nanling mountain area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (4): 881-889.
Flossmann A I, Hall W D, Pruppacher H R. 1985. A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part I: The redistribution of aerosol particles captured through nucleation and impaction scavenging by growing cloud drops [J]. J. Atmos. Sci., 42 (6): 583-606.
George J J. 1940a. Fog: Its causes and forecasting with special reference to eastern and southern United States (I) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 21: 135-148.
George J J. 1940b. Fog: Its causes and forecasting with special reference to eastern and southern United States (II) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 21: 261-269.
George J J. 1940c. Fog: Its causes and forecasting with special reference to eastern and southern United States (III) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 21: 285-291.
Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure. Appl. Geophys., 164 (6-7): 1121-1159.
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. Kang Hanqing, Zhu Bin, Fan Shuxian. 2009. Size distributions and wet scavenging properties of winter aerosol particles in north suburb of Nanjing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(5): 523-530.
李宏宇, 胡朝霞, 魏香. 2010. 雨雾、雪雾共生天气气象要素分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 843-852. Analysis of meteorological elements in rain/snow-mixed fogs [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(4): 843-852.
刘端阳. 2011. 南京冬季雾宏观物理结构的观测研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Liu Duanyang. 2011. Study on the winter fog physical structures and evolution characteristics in Nanjing [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
刘奇俊, 胡志晋, 丁国安, 等. 1992. 层状云清除气溶胶的数值模拟 [J]. 环境科学学报, 12 (3): 1590-1596. Liu Qijun, Hu Zhijin, Ding Guoan, et al. 1992. Numerical simulation on the aerosol scavenging of stratiform clouds [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 12(3): 1590-1596.
刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 2010. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响 [J]. 应用气象学报, 21 (4): 433-441. Liu Xichuan, Gao Taichang, Liu Lei, et al. 2010. Influences of precipitation on atmospheric extinction coefficient and visibility [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21(4): 433-441.
Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs [J]. Acta Meteor. Sinica, 27 (6): 832-848.
孟蕾, 周奇越, 牛生杰, 等. 2010. 降水对雾中能见度参数化的影响 [J]. 大气科学学报, 33 (6): 731-737. Meng Lei, Zhou Qiyue, Niu Shengjie, et al. 2010. Effect of rainfall on parameterization of fog visibility [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(6): 731-737.

- 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.
- Petterssen S. 1969. *Introduction to Meteorology* (3rd ed.) [M]. New York: McGraw-Hill, 333.
- 钱凌, 银燕, 童尧青, 等. 2008. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 28 (1): 18–22. Qian Ling, Yin Yan, Tong Yaoqing, et al. 2008. Characteristics of size distributions of atmospheric fine particles in the north suburban area of Nanjing [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 28 (1): 18–22.
- Stewart R E. 1992. Precipitation types in the transition region of winter storms [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73: 287–296.
- Stewart R E, Yiu D T. 1993. Distributions of precipitation and associated parameters across precipitation type transitions over southern Ontario [J]. *Atmos. Res.*, 29 (3–4): 153–178.
- Stewart R E, Yiu D T, Chung K K, et al. 1995. Weather conditions associated with the passage of precipitation type transition regions over eastern Newfoundland [J]. *Atmos. Ocean*, 33 (1): 25–53.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2007. Event-based climatology and typology of fog in the New York city region [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46 (8): 1141–1168.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2008. Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47 (6): 1681–1703.
- Tardif R, Rasmussen R M. 2010. Evaporation of non-equilibrium raindrops as a fog formation mechanism [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (2): 345–364.
- Westcott N E, Kristovich D A R. 2009. A climatology and case study of continental cold season dense fog associated with low clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48 (11): 2201–2214.
- 吴兑, 吴晓京, 朱小祥, 等. 2009. 雾和霾 [M]. 北京: 气象出版社. Wu Dui, Wu Xiaojing, Zhu Xiaoxiang, et al. 2009. *Fog and Hhazy (in Chinese)*[M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 严明良. 2011. 沪宁高速公路低能见度浓雾特征及其数值模拟研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Yan Mingliang. 2011. *The Characteristics and numerical simulations of heavy fog along Nanjing to Shanghai expressway* [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 严文莲, 刘端阳, 濮梅娟, 等. 2010. 南京地区雨雾的形成及其结构特征 [J]. *气象*, 36 (10): 29–36. Yan Wenlian, Liu Duanyang, Pu Meijuan, et al. 2010. Formation and structures characteristics of precipitation fog in Nanjing [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (10): 29–36.
- 岳岩裕. 2013. 春季南海海雾微观特征和雾水化学组分的观测研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Yue Yanyu. 2013. *Study on microphysical characteristics and fog water chemical composition of sea fog in spring of South China Sea* [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 中国气象局. 2007. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Bureau. 2007. *The Ground Meteorological Observation Specification (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.