

王庆,李季,樊明月,等,2019. 济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象,45(9):1299-1309. Wang Q, Li J, Fan M Y, et al, 2019. Microphysical structure and evolution characteristics of an advection-radiation fog event in Jinan[J]. Meteor Mon, 45(9):1299-1309(in Chinese).

济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征^{*}

王 庆¹ 李 季² 樊明月¹ 王 洪¹

1 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031

2 山东省气象局大气探测技术保障中心, 济南 250031

提 要: 受静稳天气影响, 2017 年 1 月 3—6 日我国华北、黄淮、长江中下游以及华南等中东部地区出现了大范围的持续性大雾天气, 其中济南 70 m 以下的低能见度天气持续了 6 h 之久, 最低能见度只有 51 m。利用布设在山东省气象局院内的 FM-120 雾滴谱仪观测的微物理资料、自动气象站加密观测等资料, 分析了此次浓雾天气过程的微物理结构, 讨论了雾在 4 次“发展—减弱”过程中的主要特征, 研究了雾在不同发展阶段以及爆发性增强期间的演变规律, 探讨了雾的成因以及爆发性增强的原因。

关键词: 平流辐射雾, 微物理结构, 爆发性增强

中图分类号: P458, P426

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 09. 010

Microphysical Structure and Evolution Characteristics of an Advection-Radiation Fog Event in Jinan

WANG Qing¹ LI Ji² FAN Mingyue¹ WANG Hong¹

1 Weather Modification Office of Shandong, Jinan 250031

2 Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology, Shandong Meteorological Service, Jinan 250031

Abstract: A large-scale continuous heavy fog weather occurred in the central and eastern regions of China, including North China, Huanghuai Region, the middle and lower reaches of the Yangtze River, and South China during 3—6 January 2017. The low visibility below 70 m in Jinan lasted for more than 6 h and the minimum visibility was only 51 m. Based on the data from fog droplet collector and automatic weather station, the microphysical structure of the fog was analyzed, the main characteristics of fog in four “development-weakening” subprocesses were discussed, the evolution characters in different development and burst reinforcement phases of the fog were studied, and the causes of the dense fog and burst reinforcement were also discussed in this paper.

Key words: advection-radiation fog, microphysical structure, burst reinforcement

引 言

雾是近地层空气中悬浮着大量水滴、冰晶微粒而使水平能见度小于 1 km 的天气现象。雾不仅影

响工农业生产和人体健康, 而且会影响航班起降、诱发交通事故等, 是一种灾害性的天气现象。因此针对雾的研究受到了越来越广泛的关注。

自 Taylor(1917)首次用科学方法对辐射雾进行研究以来, 在过去的数十年中, 国内外曾进行过多

^{*} 国家自然科学基金项目(41275148)和山东省气象局气象科学技术研究项目(2015sdqxm07)共同资助

2018 年 7 月 13 日收稿; 2018 年 12 月 12 日收修定稿

第一作者: 王庆, 主要从事人工影响天气工作及研究。Email: wq9813@sohu.com

次关于雾的外场试验和研究 (Meyer et al, 1980; Roach et al, 1976; Bott et al, 1990; Gultepe et al, 2007; 杨中秋等, 1989; 黄玉生等, 1992; 李子华和吴君, 1995; 黄建平等, 1998; 李子华等, 1999)。近几年来, 随着探测设备和数值模式的发展, 对雾的研究更加深入和细致, 研究内容涉及不同类型雾的微物理结构特征 (刘端阳等, 2009; 严文莲等, 2010; 徐峰等, 2012; 岳岩裕等, 2013; 于华英等, 2015; 张悦等, 2015)、宏微观结构与能见度的关系 (吴兑等, 2007; 黄辉军等, 2010)、数值模拟 (何晖等, 2009; 彭双姿等, 2012; 崔驰潇等, 2018)、雾爆发性增强的微物理特征及成因分析 (李子华等, 2011; 刘霖蔚等, 2012; 吴彬贵等, 2014; 严文莲等, 2018)、冷雾催化试验 (马新成等, 2015)、雾发生的边界层和垂直结构特征 (蔡子颖等, 2012; 江玉华等, 2009; 黄彬等, 2014; 郭丽君和郭学良, 2016) 以及雾形成的天气学和发展机理 (贾星灿和郭学良, 2012; 田小毅等, 2018) 等方面, 并取得了许多研究成果。Meyer et al (1980) 通过对一次辐射雾 (霾) 的研究发现, 当能见度由 2.1 km 下降到 1.4 km 的时候, 其谱分布在 5 min 内发生了很大的变化, 且在雾最浓的时候, 雾滴谱出现了多峰分布。李子华和吴君 (1995) 发现, 空气严重污染地区存在雾滴数密度大、尺度小的特征, 气溶胶粒子会影响雾微物理结构。黄建平等 (1998) 对沪宁地区一次辐射雾的微物理结构及其演变分析, 发现雾的微物理结构与大气污染程度紧密相关, 逆温层的长时间存在可以影响雾的微物理结构。刘端阳等 (2009) 分析了南京一次连续 4 d 浓雾过程的微物理结构及演变特征, 发现近地面层持续存在的强盛水汽平流是造成本次大雾能见度长时间低于 50 m 的主要原因。Gulpepe et al (2007) 研究发现, 雾的形成过程比较复杂, 与大气辐射、颗粒物、周围环境、大气环流以及下垫面特征等许多因素有关。目前国内关于雾的研究涉及长江中下游、华北、西北、西南、中南和华南等地, 但是针对山东内陆大雾的研究主要集中在成因分析和数值预报方面 (张宗灏和王咏青, 2007; 梅婵娟和张灿, 2016; 孙兴池等, 2017; 夏凡和杨晓霞, 2017), 对大雾天气的微物理特征研究尚未见到。

近几年来, 随着环境污染的加剧, 大范围、持续性雾-霾天气明显增多。2017 年 1 月 3—6 日, 受静稳天气影响, 华北、黄淮、长江中下游以及华南等中

东部地区出现了大范围持续性大雾天气, 其中济南低于 70 m 的低能见度天气持续了 6 h 之久, 最低能见度只有 51 m, 大雾天气严重影响工农业生产和人民生活, 济南遥墙国际机场多次航班暂停起降, 多个高速路口临时关闭。本文对 2017 年 1 月 3—6 日整个大雾过程以及不同阶段的微物理结构及其演变特征等进行了分析, 希望能为冬季雾的形成、发展以及强浓雾临近预报等提供微物理基础。

1 资料说明和处理

本文所用的资料主要有地面雾滴谱资料、自动气象站 (无影山站) 加密观测资料、探空秒数据资料 (章丘站) 以及常规气象资料。

地面雾滴谱资料是美国 DMT 公司生产的 FM-120 雾滴谱仪观测的, 该仪器安装在山东省气象局 (36.36°N、117.00°E, 海拔高度: 170.3 m) 人工影响天气大楼楼顶, 观测时利用激光前向散射原理, 能够连续观测雾滴或低云云滴, 观测时分 30 档, 范围为 2~50 μm , 采样面积为 0.24 mm^2 , 频率为 1 s, 观测的物理量有空气温度、粒子数浓度、不同尺度粒子数量、大气液态含水量、粒子有效直径、中值体积直径等。无影山站位于山东省气象局院内, 与雾滴谱仪之间的直线距离约为 100 m。章丘站位于济南章丘区 (36.41°N、117.33°E, 海拔高度: 121.8 m), 与无影山站直线距离约 45 km。

对所用资料进行了如下处理和对比分析:

(1) FM-120 雾滴谱仪采样频率为 1 s, 但是在实际采集中有缺测, 因此将雾滴谱资料进行了 1 分钟平均。

(2) 无影山站加密观测资料为 5 分钟 1 次, 在分析能见度与温度和数浓度的对应关系时, 将温度和数浓度进行了 5 点滑动平均, 即 $P_i = \frac{P_{i-2} + P_{i-1} + P_i + P_{i+1} + P_{i+2}}{5}$ 。

(3) 对雾滴谱仪观测的抽气口空气温度与自动气象站观测的空气温度 (3 日 22:20 至 6 日 12:40) 进行对比 (图 1)。发现无影山站观测的温度和雾滴谱仪观测的温度在数值上虽有差异, 但两者在变化趋势上具有高度的一致性, 即雾滴谱仪观测的温度能较好地表征空气温度的变化趋势。因此本文在分析雾的微物理特征时使用雾滴谱仪观测的温度。

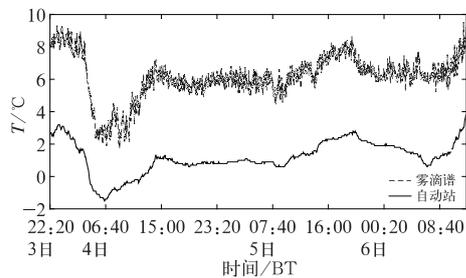


图1 2017年1月3日22:20至6日12:40雾滴谱仪观测的温度与自动站空气温度的对比
Fig. 1 Comparison between temperatures observed by fog drop spectrum and by automatic weather station from 22:20 BT 3 to 12:40 BT 6 January 2017

2 雾过程概况

由2017年1月3日08时地面图(图略)上可见长江中下游到华南地区已经出现了大片的雾区,20时,雾区进一步向北扩展到黄淮和华北地区。济南无影山站于3日22:20观测到能见度低于1000 m大雾(国家气象中心,2012),6日12:40随着地面温度的不断升高,大雾消散,共持续了62 h 20 min,经历了4次“增强—减弱”的变化过程。从无影山站能见度随时间的演变(图略)可以看出此次雾经历的4个子过程:(1)子过程1(3日22:20至4日14:00),能见度从1000 m左右缓慢下降,4日04:05—04:25,能见度在20分钟内急剧恶化,由670 m下降到99 m,大雾突变为强浓雾,之后低于70 m的低能见度维持了6 h,11:25能见度开始增大,14:00增大到500 m左右。(2)子过程2(4日14:00至5日18:00),能见度从500 m左右起伏下降到100 m左右,之后逐渐增大到800 m。(3)子过程3(5日18:00至6日05:40),能见度从800 m下降到约400 m,之后逐渐增大到约900 m。(4)子过程4(6日05:40至6日12:40),能见度从900 m下降到约400 m,之后逐渐增大,到12:40能见度增大到1000 m以上,济南大雾结束。

3 天气形势和层结条件

通过3—6日天气形势(图略)和济南章丘站近地层(1000 m以下)温度和相对湿度的演变(图2)来看:3日20时500 hPa中纬度环流比较平直,孟

加拉湾地区有宽广的南支槽存在;700和850 hPa山东处于西北气流控制之下,西南地区向北输送的暖湿气流已到达安徽、江苏一带;山东处于地面冷高压前部的均压场中,1025 hPa等压线前沿穿过河北、山西和陕西等地;近地层层结比较稳定,200 m以下贴地层形成了较强的逆温结构,逆温率达 $2.9^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,相对湿度达到90%左右。4日02时地面冷高压明显南压,1025 hPa等压线前沿到达鲁西北地区。4日08时,500 hPa仍受平直的西风气流控制,河套西部有短波槽东移;700和850 hPa西南气流加强北上,山东中西部地区转为偏南气流控制,850、925 hPa暖脊加强,山东受暖脊控制;地面温度下降,200 m以下逆温结构减弱,200~1000 m层逆温增强;400 m以上相对湿度迅速减小,表明此时雾顶高度大约在400 m。4日20时,500 hPa原来位于河套西部的浅槽东移到河套地区,山东处于槽前弱西南气流控制;700、850 hPa西南地区有切变线和低涡存在,700、850和925 hPa山东受西南或东南气流影响,850和925 hPa暖脊减弱;350 m以下逆温层消失,近地层逆温层顶高度下降到600 m左右,逆温强度减弱,雾顶高度仍在400 m左右。5日08时,500和700 hPa山东处于短波槽前偏西气流影响,850和925 hPa山东为偏东南风,925 hPa暖脊消失;近地层350~600 m层逆温强度继续减弱,雾顶高度仍为400 m;5日20时,500 hPa短波槽移过,山东处于槽后西北气流控制;700 hPa济南转为西北风;相对湿度减小,近地层逆温结构消失,500 m以下贴地层开始形成弱逆温结构。6日08时,500 hPa河套地区的西风槽在东移过程中加深,孟加拉湾南支槽东移发展,山东处于槽前西南气流控制;700和850 hPa西南地区有低涡北上,山东处于低涡切变线北侧的偏南气流控制;地面冷高压减弱;雨区自南向北逼近山东,鲁西南地区已经出现降水;贴地层逆温结构消失,200~600 m逆温结构重新建立,雾顶高度发展到300 m左右。08时以后,地面温度不断升高,大雾逐渐减弱,随后而来的降水和冷空气破坏了稳定的层结条件,此次大雾彻底结束。

综上分析可见:此次大雾过程是在静力稳定的天气背景下,地面长波辐射降温以及弱冷空气扩散南下在贴地层形成冷垫,低层盛行的暖湿平流叠加在冷垫上形成的平流辐射雾,期间平流和辐射作用同时或交替出现,每一个子过程均有阶段性的变化

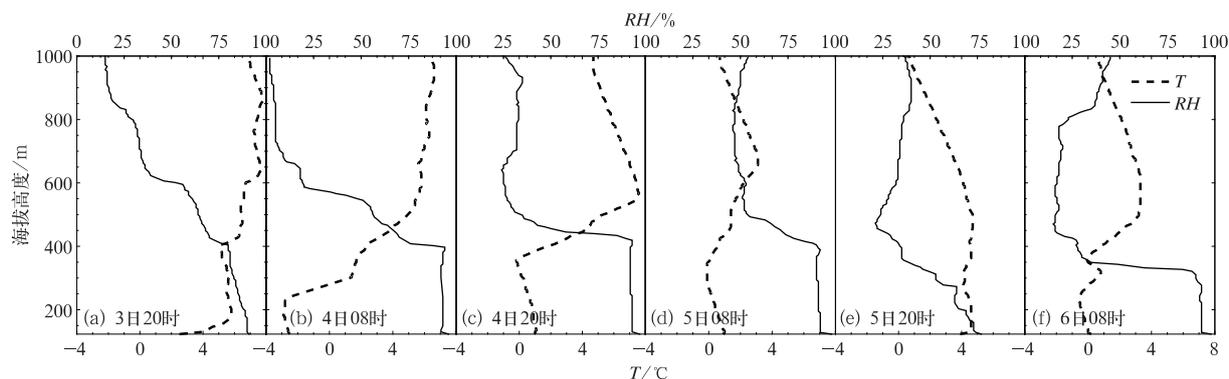


图 2 2017 年 1 月 3 日 20 时(a)、4 日 08 时(b)、4 日 20 时(c)、5 日 08 时(d)、5 日 20 时(e)和 6 日 08 时(f)章丘站温度(虚线)和相对湿度(实线)随高度的分布

Fig. 2 Distribution of temperature (dashed line) and relative humidity (solid line) with height at Zhangqiu Station at 20:00 BT 3 (a), 08:00 BT 4 (b), 20:00 BT 4 (c), 08:00 BT 5 (d), 20:00 BT 5 (e) and 08:00 BT 6 (f) January 2017

特征,子过程 1 是比较典型的平流辐射雾,子过程 2 和子过程 4 以平流雾为主,子过程 3 以辐射雾为主。夜间地面长波辐射降温是此次雾形成的起因,低层盛行的暖湿平流为雾的形成和维持提供了有利的水汽条件。

4 微物理结构及其演变特征

4.1 微物理特征分析

图 3 给出了整个过程数浓度(NC)和液态含水量(LWC)、中值体积直径(MVD)和有效直径(ED)、温度(T)和能见度(V)随时间的演变,可以发现:(1)数浓度、液态含水量、中值体积直径和有效直径随时间的变化趋势具有高度的一致性。(2)总的来看,能见度与数浓度、液态含水量、中值体积直径、有效直径等微物理量具有较好的对应关系,微物理量的大值区一般与较低的能见度相对应,小值区与较高的能见度相对应。(3)在雾持续的大部分时间里,温度与能见度具有较好的对应关系,即温度降低,能见度下降,温度升高,能见度增大。

上述分析表明,温度、数浓度等微物理量与能见度具有较好的相关性,是反映雾基本特征的重要因子,同时雾滴谱分布也是影响能见度的重要因子。通过对各物理量平均值和范围(表 1)、平均雾滴谱分布以及利用最小二乘法拟合的结果(图 4)分析,可以发现:(1)在整个过程中,各微物理量起伏变化

较大,其中平均数浓度为 $35.92 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,最小仅为 $1.26 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大达到 $1238.25 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,相差 3 个数量级;平均液态含水量为 $0.00649 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小的为 $0.00004 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大的为 $0.37345 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,相差 4 个数量级;平均中值体积直径和有效直径分别为 7.01 和 $5.76 \mu\text{m}$,最小值分别为 4.01 和 $3.91 \mu\text{m}$,最大值分别为 22.21 和 $16.00 \mu\text{m}$ 。(2)雾滴多集中在小滴一侧, $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴占总数的 90% 以上,大滴数量很少;平均谱型呈现“三峰”结构,峰值直径分别为 5 、 14 、 $20 \mu\text{m}$;谱较宽,平均最大直径达 $38 \mu\text{m}$ 。(3)平均谱大致满足 Deirmendjian 分布;对于直径 $15 \mu\text{m}$ 以下的小雾滴,大部分实测值比理论值偏少,对于 $15 \mu\text{m}$ 以上的大雾滴,实测值比理论值偏多。与南京冬季平流辐射雾相比(刘端阳等,2009),济南冬季雾数密度和液态含水量偏小。

4.2 不同阶段微物理量的演变特征

4 个子过程均存在着“发展—减弱”的变化过程,子过程 1 具有典型的平流辐射雾特征,其强度最大,期间还出现了爆发性增强现象,因此选取子过程 1 进行详细分析,分别对形成、发展、成熟和减弱阶段的物理特征进行分析。

表 2 和图 5 分别给出了 4 个阶段物理量的平均值、范围以及谱分布特征,结合图 3 各物理量演变可以发现:

(1) 形成阶段(3 日 22:20 至 4 日 03:20): 微物

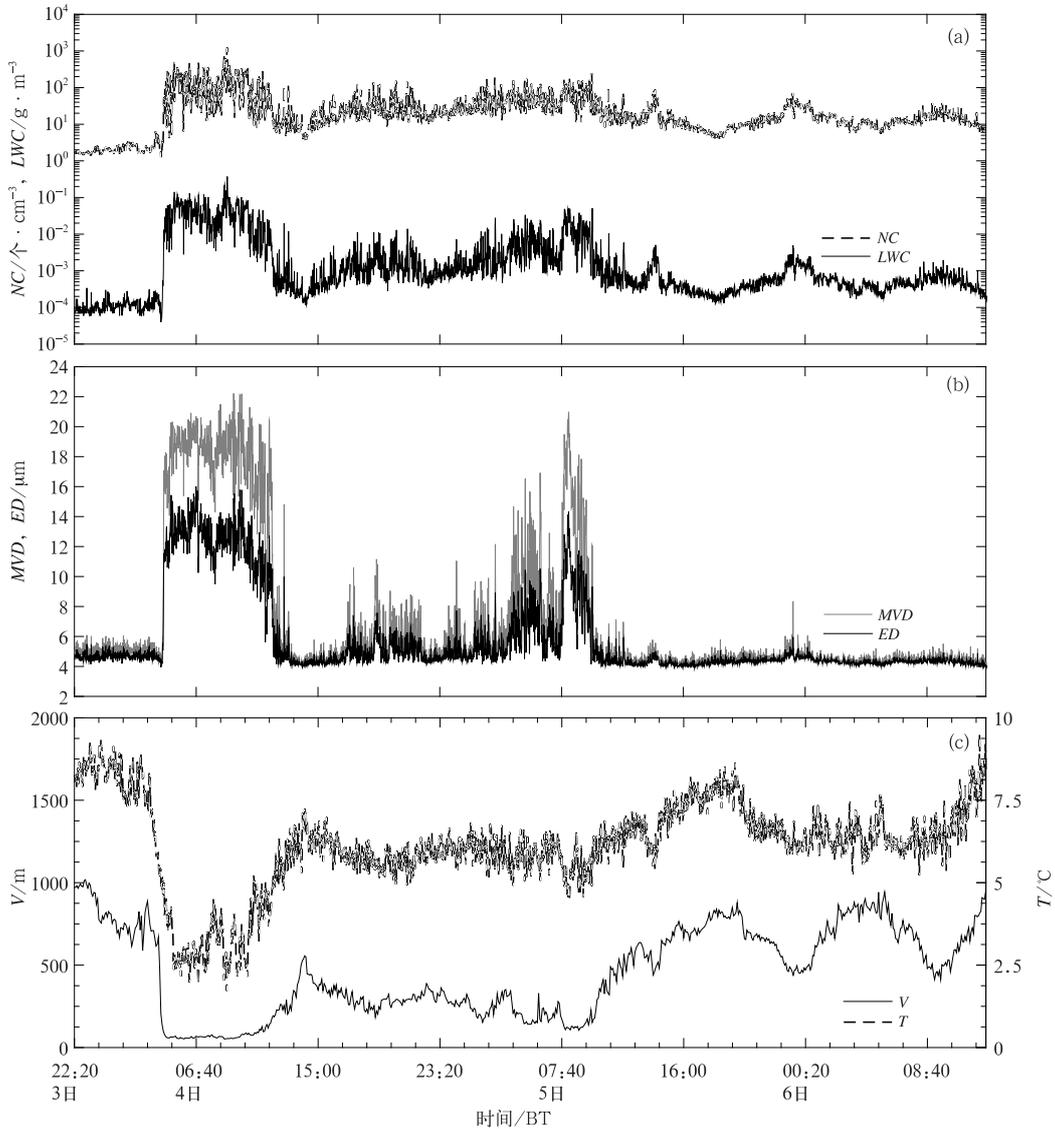


图 3 2017 年 1 月 3—6 日整个雾过程各种物理量随时间的演变
 (a) 数浓度(NC)和液态水含量(LWC), (b) 中值体积直径(MVD)和有效直径(ED), (c) 温度(T)和能见度(V)

Fig. 3 Temporal variation of physical parameters of the whole fog process in 3—6 January 2017
 (a) number concentration (NC) and liquid water content (LWC), (b) median volume diameter (MVD) and effective diameter (ED), (c) temperature (T) and visibility (V)

表 1 整个雾过程的物理量特征

Table 1 Physical parameters in the whole fog process

物理量	T/°C	V/m	NC/个·cm ⁻³	LWC/g·m ⁻³	MVD/μm	ED/μm
最小值	1.72	51	1.26	0.00004	4.01	3.91
最大值	9.52	1018	1238.25	0.37345	22.21	16.00
平均值	6.13	459	35.92	0.00649	7.01	5.76

理量变化比较平稳,起伏很小,数浓度等微物理量都很小,平均数浓度仅为 2.06 个·cm⁻³;温度、数浓度等微物理量与能见度具有较好的对应关系,温度

升高,微物理量减小、能见度增大,温度降低,微物理量增大、能见度减小;谱型呈现“单峰”结构,峰值直径为 5 μm,谱宽很窄,最大雾滴直径只有 12 μm,表

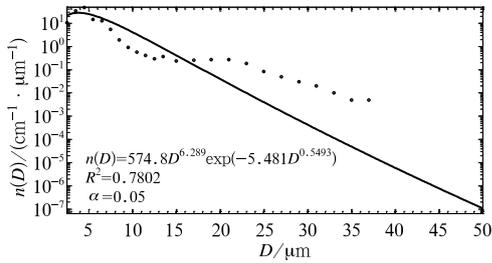


图 4 整个过程平均谱分布及其拟合曲线
Fig. 4 Average droplet spectrum distribution and its fitting curve of the whole fog process

明该阶段以小雾滴为主,核化和凝结增长过程并不活跃。

(2) 发展阶段(4 日 03:20—08:35):微物理量起伏变化较大,温度和能见度急剧下降,数浓度等微物理量急剧增长;平均数浓度和液态含水量分别达到 112.28 个·cm⁻³和 0.03551 g·m⁻³,比形成阶段约增加了 2 个数量级;温度、数浓度等微物理量与能见度均具有较好的对应关系;谱线明显上抬右移,呈现“三峰”结构,在 5、14 和 20 μm 处出现了峰值,最大雾滴直径达 46 μm。表明该阶段核化和凝结增

表 2 子过程 1 不同阶段的物理参量

Table 2 Physical parameters in various phases of Process 1

物理量	形成阶段 (3 日 22:20 至 4 日 03:20)	发展阶段 (4 日 03:20—08:35)	成熟阶段 (4 日 08:35—11:18)	减弱阶段 (4 日 11:18—14:00)
T/°C	8.28 (7.26~9.37)	3.79 (1.89~8.41)	3.40 (1.72~5.22)	5.5 (3.67~7.12)
NC/个·cm ⁻³	2.06 (1.39~3.31)	112.28 (1.26~806.32)	155.78 (7.84~1238.25)	18.86 (4.02~134.67)
LWC/g·m ⁻³	0.00011 (0.00006~0.00034)	0.03551 (0.00004~0.21985)	0.04209 (0.00175~0.37345)	0.00225 (0.00013~0.02538)
MVD/μm	5.14 (4.48~6.09)	15.78 (4.16~21.50)	17.81 (12.81~22.21)	7.2 (4.09~20.42)
ED/μm	4.67 (4.15~5.49)	11.25 (3.95~16)	11.98 (8.31~15.78)	5.66 (3.98~12.73)
平均最大直径/μm	12	46	50	34

注:括号内的数值为最小值和最大值。
Note: Values in parentheses are the maximum and minimum values.

长等微物理过程开始活跃,数浓度剧增,雾滴迅速增长,大滴增多,谱变宽。

(3) 成熟阶段(4 日 08:35—11:18):微物理量起伏变化最大,数浓度等微物理量最大值均出现在该阶段,平均数浓度等持续增长并达到最大,平均数浓度和液态含水量分别达到 155.78 个·cm⁻³和 0.04209 g·m⁻³;平均温度最低;温度、数浓度等微物理量与能见度对应关系不显著,虽然温度、数浓度等微物理量有明显的起伏变化,但能见度始终维持

在 50~70 m;谱型继续呈现“三峰”结构,谱分布曲线在直径小于 13 μm 的小滴段继续上抬,在 14~24 μm 的中滴段下降,在 24 μm 以上的大滴段继续上抬且明显右移,最大雾滴直径达 50 μm。表明该阶段核化和凝结增长仍比较活跃,小滴持续增多,同时还出现了明显的碰并增长过程,中滴减少,大滴明显增多。

(4) 减弱阶段(4 日 11:18—14:00):微物理量起伏变化趋于减弱,温度、数浓度等微物理量与能见度对应关系较好;温度升高,数浓度等微物理量减小,能见度增大;谱分布曲线下降且左移,最大雾滴直径只有 34 μm,谱宽变窄;谱型仍呈现出“三峰”结构,但数密度大大减小。表明该阶段随着温度的升高,雾滴蒸发,大滴沉降,谱宽变窄。

综上分析表明,在雾形成、发展和减弱阶段,能见度与温度、数浓度等微物理量具有较好的对应关系,但在成熟阶段,对应关系不明显。图 6 给出了子过程 1 中 189 个样本能见度与温度、数浓度的相关

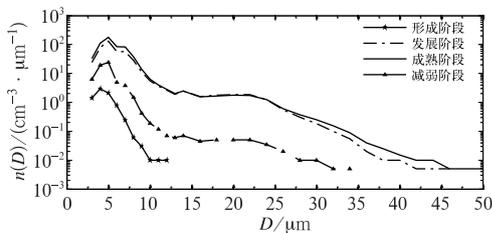


图 5 子过程 1 在不同阶段平均谱的分布
Fig. 5 Average droplet spectrum distributions in various phases of Process 1

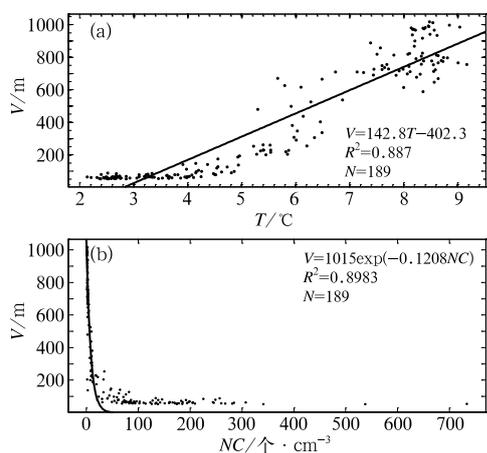


图6 子过程1中能见度(V)与(a)温度(T)、
(b)数浓度(NC)的相关关系
Fig. 6 Correlation between visibility (V) and
(a) temperature (T), and (b) number
concentration (NC) in Process 1

关系,可以看出,能见度与温度具有较好的线性关系,与数浓度具有较好的指数关系,相关程度较高, R^2 均在0.88以上,且都通过了0.05的显著性水平检验,但是深入分析可以发现,这主要体现在高能见度处,在 $V < 100$ m的低能见度处,虽然温度、数浓度均出现了很大的起伏变化,但能见度始终维持在50~100 m左右,这与前面的分析结果是一致的;在成熟阶段,核化、凝结和碰并增长等微物理过程非常活跃,数浓度等微物理量起伏变化很大,同时大量水汽凝结产生的潜热以及不断南下的弱冷空气又会使温度产生较大的起伏。

4.3 爆发性增强原因的探讨

雾爆发性增强,是指在很短时间内(一般 < 30 min)雾突变为浓雾($V < 500$ m),或浓雾跃增为强浓雾($V < 50$ m)(李子华等,2008)。4日04:05、04:10、04:15、04:20、04:25无影山站能见度分别为670、480、204、138、99 m,在20分钟内,能见度持续下降了571 m,大雾突变为强浓雾,因此可将04:05—04:25这段时间称为雾爆发性增强阶段。

4.3.1 微物理量的演变特征

从雾爆发性增强阶段雾滴谱(图7)以及各物理量(图略)逐分钟演变来看:04:05—04:07,温度连续下降,数密度、液态含水量、中值体积直径、有效直径以及谱宽略有增大,滴谱曲线缓慢上抬右移,谱宽由 $8 \mu\text{m}$ 增大到 $10 \mu\text{m}$,谱型呈现“单峰”结构,以小滴

为主;表明该阶段核化和凝结增长开始活跃,雾滴增多。04:07,滴谱曲线右侧开始出现不与谱分布曲线相连的间断大滴,表明除核化和凝结增长外,还出现了碰并增长。04:08—04:15,各物理量均出现了起伏变化的情况,但相对而言比较平稳,谱宽或增或减,曲线右侧不断有个别大滴出现,表明该阶段碰并增长比较活跃。04:16—04:19,数浓度和液态含水量开始增大,而谱宽、中值体积直径和有效直径04:19才开始增大,明显滞后于数浓度和液态含水量;滴谱曲线有所上抬,右侧的间断大滴明显增多。04:20温度持续下降,各微物理量持续增加,谱型由前期的“单峰”结构演变成“双峰”结构,在直径 $10 \mu\text{m}$ 处出现了第二峰值。04:21,由于潜热释放,温度升高,各物理量减小,滴谱变窄,谱型仍为“双峰”结构,第二峰值出现在 $9 \mu\text{m}$ 处。04:22滴谱曲线右侧出现很多的间断大滴,最大直径达 $28 \mu\text{m}$ 。04:23温度迅速下降,滴谱曲线出现了明显的右移,谱宽首先出现了跃增,从 $10 \mu\text{m}$ 增加至 $30 \mu\text{m}$,同时谱型演变为“多峰”结构。04:24,滴谱曲线明显上抬,各档雾滴数、数浓度和液态含水量等微物理量出现了跃增,数浓度由 $5.53 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $26.97 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,液态含水量由 $0.00096 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增大到 $0.006 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,同时其右侧出现 $32 \mu\text{m}$ 的间断大滴。04:25曲线再次上抬右移,各微物理量再次出现跃增,数浓度增加到 $50.02 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,液态含水量增大到 $0.01322 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,谱宽拓宽至 $36 \mu\text{m}$;中值体积直径和有效直径在1分钟内增大了2~3倍。可见在爆发性增强的20分钟内,核化、凝结和碰并增长等微物理过程异常活跃,数浓度、液态含水量以及谱宽在短时间内出现了2次明显的跃增,谱型由“单峰”结构,迅速演变为“双峰”“多峰”结构,大雾突变为强浓雾。

从气温下降开始到微物理量跃增之前的起伏增长过程(04:05—04:22),虽然能见度呈现直线下降的趋势,但温度和各微物理量都在一个相对稳定的范围起伏变化,谱型以“单峰”结构为主,因此可以认为该阶段为雾爆发性增强的酝酿阶段。酝酿阶段过后,在谱宽首先出现跃增、谱型突变为“多峰”结构之后,数密度、液态含水量、中值体积直径和有效直径等微物理量也随之出现明显的跃增。因此,当起伏变化相对平稳的微物理量突然出现显著变化时,往往预示着雾体将会出现爆发性增强现象,这对于强浓雾的临近预报是很有实际意义的(李子华等,2011)。

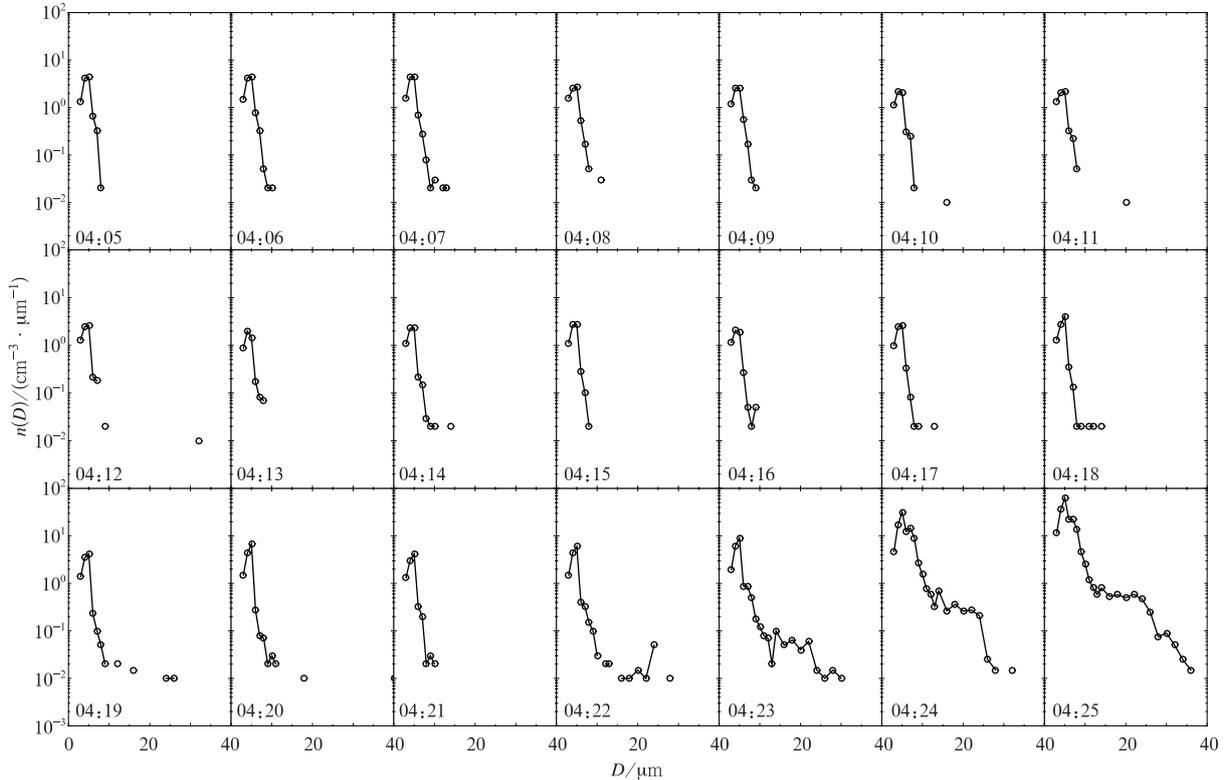


图 7 2017 年 1 月 4 日 04:05—04:25 雾爆发性增强阶段雾滴谱分布逐分钟演变

Fig. 7 Temporal variation of foggy droplet spectrum distributions in the burst reinforcement phase in 04:05—04:25 BT 4 January 2017

4.3.2 雾爆发性增强原因的探讨

吴兑(2006)指出,在近地层大气中每时每刻总是有霾存在,而雾滴的存在是少见或罕见的;霾滴要想通过吸湿增长成为雾滴,必须有足够的过饱和度,能够越过过饱和驼峰才行,这在自然界并不容易。在非饱和条件下,不但非水溶性的霾不能转化为雾滴,即便是水溶性的霾粒子一般也不可能吸湿转化为雾滴。降温是达到饱和和形成雾滴的最主要、最重要的物理过程,在自然界中的霾滴通过吸湿过程增长成雾滴基本不可能。濮梅娟等(2008)通过对南京三次冬季浓雾的分析发现,夜晚长波辐射增强或近地层出现冷平流造成的气温急剧下降,日出后地表水分蒸发或西南暖湿平流增强造成的湿度明显增大以及湍流混合作用,都能导致雾体爆发性增强。吴彬贵等(2014)发现,乐亭爆发性大雾的形成是由于低层暖湿气流受切变线的阻挡作用形成了弱水汽辐合,加上短波槽前弱冷空气和入夜后辐射降温共同影响所导致;副冷锋南下逼近天津境内时,渗透进低层的锋前弱冷空气是天津大雾爆发性发展的直接原因。刘霖蔚等(2012)通过对南京一次冬季浓雾过程

的分析发现,此次雾过程是在西南平流的增湿作用下触发生成,日出后,平流输送和地表蒸发提供了充足水汽来源,贴地层逆温因高空下沉增温而向上抬升且稳定存在,使大雾得以维持;两次地面雾爆发性增强均发生在夜间,其特征为各微物理参量明显增大,滴谱上抬拓宽;爆发性增强的原因是地表气温陡降、贴地层逆温增强及可充当雾滴凝结核的气溶胶大粒子数增多。严文莲等(2018)对江苏一次大范围爆发性强浓雾过程的研究发现,夜间天空打开、长波辐射降温作用加强是大范围强浓雾形成和爆发性发展的一个重要原因;雾前降雨为强浓雾的形成创造了基础条件,也是日出后部分站点雾爆发性增强的直接原因。可见,降温和增湿是雾形成、发展的重要条件,而降温是最主要的物理过程。

通过对雾爆发性增强期间无影山站和雾滴谱仪观测资料分析可见,在 20 分钟内(04:05—04:25)无影山站观测的相对湿度一直为 93%,并没有发生明显变化,地表温度由 -1.3°C 上升到 -0.8°C ,空气温度由 0.4°C 下降到 -0.5°C ,降温率达 $2.7^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$,同时风向由西北风(306°)转为偏北风(16°),雾滴谱

仪观测的抽取口的空气温度由 5.65°C 下降到 4.78°C 、降温率达 $2.61^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,两者观测的空气降温率大致相同。之后,相对湿度开始增大,空气温度继续下降,能见度也随之下降。可见,此次雾的爆发性增强并不是由短时间内的增湿触发的,主要与低层冷空气入侵导致的大气温度骤降有关。李子华等(2011)研究指出,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。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。这与本文前面的分析结果是一致的,可见低层冷空气入侵在短时间内造成的温度骤降是此次雾爆发性增强的触发机制。

5 结 论

综上所述可以得出如下结论:

(1) 本次大雾属于平流辐射雾,夜间地面长波辐射降温是雾形成的起因;低层盛行的暖湿平流为雾的形成和发展提供了良好的水汽条件;地面弱冷空气的入侵使温度急剧下降,触发了雾的爆发性增强。

(2) 在整个雾过程中,各微物理量起伏变化较大,其中平均数浓度为 $35.92\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,最小的仅为 $1.26\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大达到 $1238.25\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,相差3个数量级;平均液态含水量为 $0.00649\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小为 $0.00004\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大为 $0.37345\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相差4个数量级;平均中值体积直径和有效直径分别为 7.01 和 $5.76\mu\text{m}$,最小值分别为 4.01 和 $3.91\mu\text{m}$,最大值分别为 22.21 和 $16\mu\text{m}$ 。

(3) 数浓度、液态含水量、中值体积直径和有效直径随时间的变化趋势具有高度的一致性;数浓度、液态含水量、中值体积直径和有效直径大值区一般与较低的能见度相对应,小值区与较高的能见度相对应。

(4) 雾滴多集中在小滴一侧, $8\mu\text{m}$ 以下的小滴占总数的90%以上,大滴数量很少;平均谱型呈现“三峰”结构,大致满足 Deirmendjian 分布,与南京冬季平流辐射雾相比,济南冬季雾的数密度和液态含水量偏小。

(5) 形成阶段,微物理量变化比较平稳,数浓度等微物理量都很小;温度、数浓度等微物理量与能见

度具有较好的对应关系;谱型呈现“单峰”结构,谱宽很窄;核化和凝结增长并不活跃。发展阶段,微物理量起伏变化较大,数浓度等微物理量急剧增长;温度、数浓度等微物理量与能见度具有较好的对应关系;核化和凝结增长开始活跃,谱型呈现出“三峰宽谱”结构。成熟阶段,微物理量起伏变化最大,数浓度等微物理量最大值均出现在该阶段;温度、数浓度等微物理量与能见度对应关系不显著;谱型继续呈现“三峰”结构;核化、凝结和碰并增长比较活跃,小滴持续增多,中滴减少,大滴明显增多。减弱阶段,各物理量起伏变化趋于减弱,温度升高,数浓度等微物理量减小;温度、数浓度等微物理量与能见度对应关系较好;谱型仍呈现出“三峰”结构,谱宽变窄。

(6) 低层冷空气入侵在短时间内造成的温度骤降触发了雾的爆发性增强。雾爆发性增强期间,核化、凝结和碰并增长异常活跃,数浓度、液态含水量、谱宽等短时间内出现了2次跃增,滴谱曲线呈现阶梯式上抬右移,曲线右移前其右侧有间断的大滴出现,谱型由“单峰”结构很快演变成“双峰”“多峰”结构;从气温下降开始,到微物理量跃增之前的起伏增长过程称为雾爆发性增强的酝酿阶段,该阶段虽然能见度呈现直线下降的趋势,但温度和各微物理量都在一个相对稳定的范围起伏变化,谱型以“单峰”结构为主。酝酿阶段过后,当谱宽、数密度等微物理量出现跃增、谱型突变为“多峰”结构时,往往预示着雾体将会出现爆发性增强现象。

参考文献

- 蔡子颖,韩素芹,吴彬贵,等,2012.天津一次雾过程的边界层特征研究[J].气象,38(9):1103-1109. Cai Z Y, Han S Q, Wu B G, et al, 2012. Analysis on characteristics of atmospheric boundary layer during a fog process in Tianjin[J]. Meteor Mon, 38(9): 1103-1109(in Chinese).
- 崔驰潇,包云轩,袁成松,等,2018.不同边界层参数化方案对江苏地区一次平流雾过程的模拟影响[J].大气科学,42(6):1344-1362. Cui C X, Bao Y X, Yuan C S, et al, 2018. Influence of different boundary layer parameterization schemes on the simulation of an advection fog process in Jiangsu[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6): 1344-1362(in Chinese).
- 国家气象中心,2012.雾的预报等级:GB/T 27964-2011[S].北京:中国标准出版社. National Meteorological Centre, 2012. Grade of Fog Forecast: GB/T 27964-2011[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 郭丽君,郭学良,2016.北京2009—2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J].大气科学,40(2):296-310. Guo L J, Guo X L, 2016. The type, vertical structure and physical

- formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009–2013 in the Beijing Region[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):296–310(in Chinese).
- 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 H, Guo X L, Liu J Z, 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]. *Chin J Atmos Sci*, 33(6):1174–1186(in Chinese).
- 黄彬,王靖,陆雪,等,2014.黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析[J]. *气象*, 40(11):1324–1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Meteor Mon*, 40(11):1324–1337 (in Chinese).
- 黄辉军,黄健,毛伟康,等,2010.茂名地区海雾含水量的演变特征及其与大气水平能见度的关系[J]. *海洋学报*, 32(2):40–53. Huang H J, Huang J, Mao W K, et al, 2010. Characteristics of liquid water content of sea fog in Maoming Area and its relationship with atmospheric horizontal visibility [J]. *Acta Oceanol Sin*, 32(2):40–53(in Chinese).
- 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[J]. *气象*, 24(5):3–8. Huang J P, Mei Q Y, Jin Y C, et al, 1998. Microphysical structure features and evolution processes of radiation fog in Huning Region[J]. *Meteor Mon*, 24(5):3–8(in Chinese).
- 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(1):112–117. Huang Y S, Xu W R, Li Z H, et al, 1992. An observation and analysis on the radiation fog in Xishuangbanna[J]. *Acta Meteor Sin*, 50(1):112–117(in Chinese).
- 贾星灿,郭学良,2012.人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究[J]. *大气科学*, 36(5):995–1008. Jia X C, Guo X L, 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(5):995–1008(in Chinese).
- 江玉华,王强,王正兴,等,2009.一次平流辐射雾的边界层特征及雾水离子组分研究[J]. *气象*, 35(2):19–28. Jiang Y H, Wang Q, Wang Z X, et al, 2009. On the atmospheric boundary layer character of an advection-radiation fog process and the ionic species concentration of fog water[J]. *Meteor Mon*, 35(2):19–28 (in Chinese).
- 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[J]. *气象学报*, 57(5):622–631. Li Z H, Huang J P, Zhou Y Q, et al, 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. *Acta Meteor Sin*, 57(5):622–631(in Chinese).
- 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 Z H, Liu D Y, Yang J, 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(1):41–54(in Chinese).
- 李子华,吴君,1995.重庆市区冬季雾滴谱特征[J]. *南京气象学院学报*, 18(1):46–51. Li Z H, Wu J, 1995. Winter fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing[J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 18(1):46–51(in Chinese).
- 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:13. Li Z H, Yang J, Shi C E, et al, 2008. The Physics of Regional Dense Fog[M]. Beijing, China Meteorological Press:13 (in Chinese).
- 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(1):147–157. Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al, 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006[J]. *Acta Meteor Sinica*, 67(1):147–157(in Chinese).
- 刘霖蔚,牛生杰,刘端阳,等,2012.南京冬季浓雾的演变特征及爆发性增强研究[J]. *大气科学学报*, 35(1):103–112. Liu L W, Niu S J, Liu D Y, et al, 2012. Evolution characteristics and burst reinforcement of winter dense fog in Nanjing[J]. *Trans Atmos Sci*, 35(1):103–112(in Chinese).
- 马新成,韩光,焦生远,等,2015.天津一次浓强雾过程和液氮播入冷雾后微结构的变化[J]. *气象科技*, 43(5):958–963, 968. Ma X C, Han G, Jiao S Y, et al, 2015. Microstructure characteristics of a heavy cold fog before and after liquid nitrogen seeding[J]. *Meteor Sci Technol*, 43(5):958–963, 968(in Chinese).
- 梅婵娟,张灿,2016.威海沿海地区雾的气候特征及相关影响因子分析[J]. *山东气象*, 36(3):28–35. Mei C J, Zhang C, 2016. Climatic characteristics of fog and related influencing factor analysis in Weihai coastal area [J]. *J Shandong Meteor*, 36(3):28–35 (in Chinese).
- 彭双姿,刘从省,屈右铭,等,2012.一次大范围辐射雾天气过程的观测和数值模拟分析[J]. *气象*, 38(6):679–687. Peng S Z, Liu C S, Qu Y M, et al, 2012. Observations and numerical simulation of a wide range of radiation fog[J]. *Meteor Mon*, 38(6):679–687 (in Chinese).
- 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(5):1111–1118. Pu M J, Yan W L, Shang Z T, et al, 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing[J]. *Plateau Meteor*, 27(5):1111–1118(in Chinese).
- 孙兴池,韩永清,李静,等,2017.垂直运动对雾-霾及空气污染过程的影响分析[J]. *高原气象*, 36(4):1106–1114. Sun X C, Han Y Q, Li J, et al, 2017. Analysis of the influence of vertical movement on the process of fog and haze with air pollution[J]. *Plateau Meteor*, 36(4):1106–1114(in Chinese).
- 田小毅,朱承瑛,张振东,等,2018.长江江苏段江面雾的特征和预报着眼点[J]. *气象*, 44(3):408–415. Tian X Y, Zhu C Y, Zhang Z D, et al, 2018. Characteristics and forecasting focus for river fog in Jiangsu section of Yangtze River [J]. *Meteor Mon*, 44(3):408–415(in Chinese).
- 吴彬贵,马翠平,蔡子颖,等,2014.辐射雾局地爆发性增强原因探讨[J]. *高原气象*, 33(5):1393–1402. Wu B G, Ma C P, Cai Z Y, et al, 2014. Mechanisms of local explosive development of a

- radiation fog event[J]. *Plateau Meteor*, 33(5):1393-1402 (in Chinese).
- 吴兑, 2006. 再论都市霾与雾的区别[J]. *气象*, 32(4):9-15. Wu D, 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city[J]. *Meteor Mon*, 32(4):9-15 (in Chinese).
- 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(3):406-415. Wu D, Deng X J, Mao J T, et al, 2007. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(3):406-415 (in Chinese).
- 夏凡, 杨晓霞, 2017. 济南一次雾过程的数值模拟试验和成因分析[J]. *气象科技*, 45(1):165-171. Xia F, Yang X X, 2017. Numerical simulation and cause analysis of a fog event in Jinan[J]. *Meteor Sci Technol*, 45(1):165-171 (in Chinese).
- 徐峰, 王晶, 张羽, 等, 2012. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J]. *气象*, 38(8):985-996. Xu F, Wang J, Zhang Y, et al, 2012. Analysis on the climatic and microphysical characteristics of sea fog over the coast of West Guangdong[J]. *Meteor Mon*, 38(8):985-996 (in Chinese).
- 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 W L, Liu D Y, Pu M J, et al, 2010. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing[J]. *Meteor Mon*, 36(10):29-36 (in Chinese).
- 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等, 2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. *气象*, 44(7):892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. *Meteor Mon*, 44(7):892-901 (in Chinese).
- 杨中秋, 许绍祖, 耿骠, 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 Z Q, Xu S Z, Geng B, 1989. Formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan Area[J]. *Acta Oceanol Sin*, 11(4):431-438 (in Chinese).
- 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. Yu H Y, Niu S J, Liu P, et al, 2015. Evolution of the macro- and microphysical properties of precipitation fog in December 2007 in Nanjing[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(1):47-58 (in Chinese).
- 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等, 2013. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析[J]. *大气科学*, 37(3):609-622. Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, et al, 2013. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(3):609-622 (in Chinese).
- 张悦, 樊曙先, 张舒婷, 等, 2015. 海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究[J]. *热带气象学报*, 31(3):385-394. Zhang Y, Fan S X, Zhang S T, et al, 2015. The microstructure and characteristics of fluctuation of a sea fog along the west coast of Taiwan Strait [J]. *J Trop Meteor*, 31(3):385-394 (in Chinese).
- 张宗灏, 王咏青, 2007. 鲁西南雾的统计特征[J]. *气象*, 33(11):82-86. Zhang Z H, Wang Y Q, 2007. Statistic characteristic analysis of fog in Southwest Shandong Province [J]. *Meteor Mon*, 33(11):82-86 (in Chinese).
- Bott A, Sievers U, Zdunkowski W, 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics[J]. *J Atmos Sci*, 47(18):2153-2166.
- 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.
- Meyer M B, Jiusto J E, Lala G G, 1980. Measurements of visual range and radiation-fog (haze) microphysics[J]. *J Atmos Sci*, 37(3):622-629.
- Roach W T, Brown R, Caughy S J, et al, 1976. The physics of radiation fog: I - A field study[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102(432):313-333.
- Taylor G I, 1917. The formation of fog and mist[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 43(183):241-268.