

王庆,樊明月,王健捷. 济南冬季雾微物理结构特征[J].海洋气象学报,2019,39(3):84-95.
WANG Qing, FAN Mingyue, WANG Jianjie. Microphysical structure and characteristics of winter fog in Jinan[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(3):84-95. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.010. (in Chinese)

济南冬季雾微物理结构特征

王庆¹,樊明月¹,王健捷²

(1.山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031;2.南京信息工程大学,江苏 南京 210044)

摘要: 2016年12月19日—2017年1月9日,受静稳天气影响,济南接连出现了10次大雾天气过程,期间最低能见度不足50 m。利用10次冬季雾过程收集的雾滴谱资料、自动气象观测站加密资料、NCEP/NCAR再分析资料以及常规气象资料,分析了济南冬季雾期间的环流背景、雾类型以及微物理结构特征等。结果表明:济南冬季雾中以小滴为主,直径8 μm 以下的小滴占总数的88%以上,小滴数与数浓度具有较好的线性关系;谱型有“单峰窄谱”和“多峰宽谱”之分,“单峰窄谱”雾谱宽不超过13 μm ,小雾滴所占比例很高,液态含水量与数浓度具有较好的线性关系,各微物理量较小,“多峰宽谱”雾平均谱宽在34 μm 以上,液态含水量与直径12 μm 以上的大滴数具有较好的线性关系,各微物理量较大;平流辐射雾的数浓度和液态含水量最大,辐射雾次之,蒸发雾最小;冬季雾具有明显的地域性特征,与南京和上海相比,济南冬季雾数浓度明显偏小;辐射雾和平流辐射雾中液态含水量偏小1~2个数量级,且谱宽明显偏窄。

关键词: 济南; 冬季雾; 微物理特征

中图分类号: P426.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0084-12

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.010

Microphysical structure and characteristics of winter fog in Jinan

WANG Qing¹, FAN Mingyue¹, WANG Jianjie²

(1. Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031, China; 2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Affected by stable weather, 10 fog events occurred continuously in Jinan from 19 December 2016 to 9 January 2017, during which the minimum visibility was less than 50 m. The circulation pattern, fog type, and microphysical characteristics of winter fog in Jinan are analyzed by using the observation data of fog droplet spectrometers, intensified data of automatic weather stations, NCEP/NCAR reanalysis data, and conventional observation data during the 10 fog events. The results are as follows. 1) The winter fog in Jinan is dominated by small droplet with diameter equal to or less than 8 μm , which accounts for more than 88% and has a good linear relation with NC (number concentration). 2) The spectral pattern is divided into one-peak narrow spectrum and multi-peak wide spectrum. For one-peak narrow spectrum fog, its spectral width is less than 13 μm , the proportion of small droplet is very high, the LWC (liquid water content) has a good linear relation with NC, and each microphysical quantity is small. For multi-peak wide spectrum fog, the average spectral width is greater than 34 μm , the LWC has a good linear relation with the number of large droplet whose diameter is equal to or greater

收稿日期:2019-02-27; 修订日期:2019-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41275148);山东省气象局科研项目(2015sdqxm07)

作者简介:王庆,女,硕士,正高级工程师,主要从事人工影响天气业务及相关的科研工作,wq9813@sohu.com。

than 12 μm , and each microphysical quantity is great. 3) The advection-radiation fog in Jinan has the highest NC and LWC, followed by radiation fog, and evaporation fog is the least. 4) The winter fog has obvious regional characteristics. Compared with the winter fog in Nanjing and Shanghai, the NC of winter fog in Jinan is obviously lower. 5) The LWC in radiation fog and advection-radiation fog is one to two orders of magnitude less and the spectral width is obviously small.

Key words Jinan; winter fog; microphysical characteristics

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,而且由于能见度降低,而影响航班起降,易导致交通事故等,是一种灾害性天气现象,给社会经济和人民生活带来许多不利影响,特别是出现大雾以上天气时,往往会造成交通阻塞,甚至会发生交通事故。因此开展雾的研究对促进社会经济发展、保障人民生活具有重要作用,也得到了很多学者的重视。

雾滴谱是雾中不同大小雾滴数密度的分布,是表征雾结构特征的重要物理量,而且雾中的大气能见度与雾的微物理结构特征紧密相关,因此对雾的微物理特征研究一直是国内外关注的热点之一。MEYER et al.^[1]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 时,其谱分布在 5 min 间隔里发生了很大的变化,且在雾最浓的时候,雾滴谱出现了多峰分布。李子华等^[2]通过对重庆冬季雾的微物理结构研究发现,重庆冬季雾中含水量虽小,但雾中能见度却很低,导致能见度低的主要因素是雾中存在着数密度很大的小雾滴。LIU et al.^[3]通过对我国近 50 年来雾微物理特征进行综合分析,发现随着我国经济和城市化的快速发展,近 30 年来,雾微物理结构也出现了其他国家没有的特殊特征,城市化导致雾滴数量浓度增加,但雾滴液态水含量和雾滴尺寸减少,大城市能见度下降。黄建平等^[4]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。SCHMITT et al.^[5]通过对 2012 年 1—2 月阿拉斯加内陆两个观测点冰雾微物理特征的研究发现,冰雾中粒子峰值直径为 2~4 μm ,是先前报道的峰值直径的最低值,这是由观测点人类活动产生的高污染物所致。万齐林等^[6]通过对南岭地区 31 a 雾日气候资料的统计分析,发现南岭地区存在显著的小地形背风坡雾现象,在背风坡雾产生

的日数明显较多;数值模拟结果也表明,小地形动力作用对背风坡雾有重要作用。李子华等^[7]通过对南京冬季雾的宏微观物理结构研究发现,南京冬季雾多属于暖雾,各微物理参数以平流辐射雾最大,辐射雾次之,蒸发雾最小;辐射雾由浓雾发展为强浓雾的过程中,都具有爆发性增强的特征^[8]。陆春松等^[9]通过对南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征分析发现,雾顶的爆发性发展是湍流促使水汽向上输送,在上层逆温下累积并伴随大幅降温引起的;地面雾浓度爆发性增强时,近地层冷平流降温导致饱和水汽压减小,同时上层系统性的下沉增温引起逆温增强,水汽得以累积;下沉运动对雾生消的作用具有双重性。吕晶晶等^[10]通过对湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构特征分析,发现雾前 4 h 稳定层结及偏东南暖湿气流持续增湿可认为是雾层爆发性增长的酝酿阶段,雾滴谱拓宽是经过活跃—稳定—爆发 3 阶段完成,湍流混合对其影响不大。可见,不同的地形和生态,不同的环境条件和气候背景,不同的天气形势和层结条件,不同的雾类型以及不同的发展阶段,雾的宏微观结构会有很大的差异,并且雾的微物理特征具有明显的地域性特征。目前国内关于雾的研究范围遍及长江中下游、华北、西北、西南、中南和华南等地,针对山东内陆雾的研究主要集中在成因分析和数值预报方面^[11-15],对大雾天气的微物理结构和特征研究尚未涉及。近几年来,随着环境污染的加重,山东内陆冬季雾明显增多。2016 年 12 月 19 日—2017 年 1 月 9 日,受静稳天气的影响,济南接连出现了 10 次大雾天气过程,累计雾日 15 d,期间最低能见度不足 50 m,济南遥墙国际机场多班次航班暂停起降,多个高速路口临时关闭,持续的大雾天气严重影响了工农业生产和人民生活。

本文利用布设在山东省气象局院内的 FM-120 型雾滴谱仪观测的雾滴谱资料、自动气象站(无影山站 D6066)加密观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料(2.5°×2.5°)以及常规气象资料,对济南出现的 10 次大雾天气过程的环流背景、宏微观物理结构特

征等进行了分析,希望能为济南地区冬季雾的形成机理、发展机制提供微物理研究基础。

1 资料采集与处理

1.1 资料说明

所用地面雾滴谱资料是由美国 DMT 公司生产的 FM-120 型雾滴谱仪观测获取的,该仪器安装在山东省气象局(117°E,36.36°N,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 S 为 0.24 mm^2 、采样频率为 1 s^{-1} 。观测的物理量主要有空气温度、粒子数浓度、不同尺度粒子数量、液态含水量、粒子有效直径、中值体积直径等。2016 年 12 月 19 日—2017 年 1 月 9 日,共观测到 10 次大雾以上的天气过程,累计雾日达 15 d,共收集样本 618 737 个(表 1)。自动气象站(无影山站 D6066)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,加密观测为 5 min 1 次。

雾滴数浓度(number concentration, NC)的单位为 cm^{-3} ,它与液态含水量(liquid water content, LWC)都是根据观测的雾滴大小和数量计算得出的

单位体积数值,数浓度(NC)与气流抽取速度(Pas)和采样面积(S)具有以下关系:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{30} N(i)}{V} = \frac{\sum_{i=1}^{30} N(i)}{Pas \times S} \quad (1)$$

其中 $N(i)$ 为每档观测的雾滴数量,气流抽取速度(Pas)一般在 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,采样面积 $S = 0.24 \text{ mm}^2$,因此有:

$$NC \approx \frac{\sum_{i=1}^{30} N(i)}{3.6} \quad (2)$$

即总雾滴数($\sum_{i=1}^{30} N(i)$)约为数浓度(NC)的 3.6 倍。由于大雾滴数量很少,为了让数字更加清晰,在统计各档雾滴数时使用的是雾滴谱仪观测的雾滴数 $N(i)$ 。

1.2 资料处理与对比分析

FM-120 雾滴谱仪设定的采样频率为 1 s^{-1} ,但是在实际采集数据过程中有缺测,因此将雾滴谱资料进行了 1 min 平均,经过平均后获得样本数 10 554 个。

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进行了对比。从持续时间最长的一次雾过程(2017 年 1 月 3 日 22:20—6 日

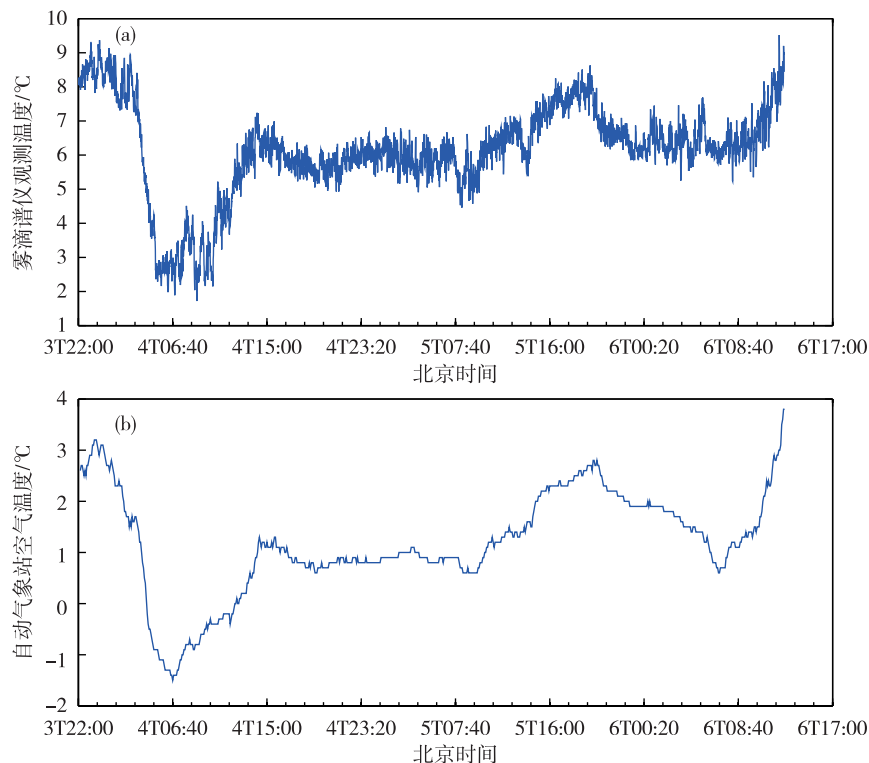


图1 雾滴谱仪观测的温度(a)与自动气象站空气温度(b)的对比(2017年1月3日22:20—1月6日12:40)

Fig.1 Comparison between temperature observed by fog droplet spectrometer (a) and air temperature of automatic station (b) (from 22:20 on 3 to 12:40 on 6 January 2017)

12:40)两者的对比情况(图1)来看,雾滴谱仪观测的温度要比自动气象站观测的空气温度明显偏高,这主要与雾滴谱仪抽气口的加热作用有关。当冬季温度低于 0°C 时,抽气口容易结冰堵塞从而影响采样,因此在雾滴谱仪抽气口设计增加了加热片对抽取的气流进行加热,导致雾滴谱仪检测的温度明显偏高。但是总体来看,自动气象站观测的空气温度与雾滴谱仪观测的抽气口空气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采用雾滴谱仪观测的温度。

2 大雾期间的环流背景

通过对大雾发生期间(2016年12月19日—2017年1月9日)不同高度层平均风场、温度场、湿度场以及海平面平均气压场、风场等分析可以发现,期间500 hPa(图2a)中纬度地区($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$)平均环流比较平直,山东受平直的西风气流或弱的西

北气流控制,700 hPa(图2b)平均场山东处于高压脊前部的西北气流控制,四川盆地一带有暖湿平流向北输送,山东处于南北两支气流的过渡地带,850 hPa、925 hPa和1000 hPa(图略)西南地区也有暖湿气流向北输送,山东处于高压脊前部,盛行西北气流,无明显的暖脊控制,但通过对大雾期间温度场的普查情况来看,大雾前期850 hPa和925 hPa山东大多受温度脊控制,后期随着冷空气的入侵,低层温度脊逐渐减弱并消失。从海平面平均气压场、风场(图2c)来看,巴尔喀什湖到贝加尔湖附近有一个弱的冷高压中心,中心强度为1032.5 hPa,山东处于冷高压前部,1027.5 hPa等压线穿过山东西部,山东境内等压线稀疏,以偏北风为主。济南章丘站08时、20时探空曲线(图略)显示,大雾期间济南地区层结比较稳定,近地层或低层均出现了明显的逆温结构。上述分析表明,大雾期间,山东处于冷暖气流的过渡地带,中低层西南地区有暖湿气流向北输送,同时贝加尔湖地区不断有弱冷空气从低层扩散南下,大气层结比较稳定,地面风速较小。

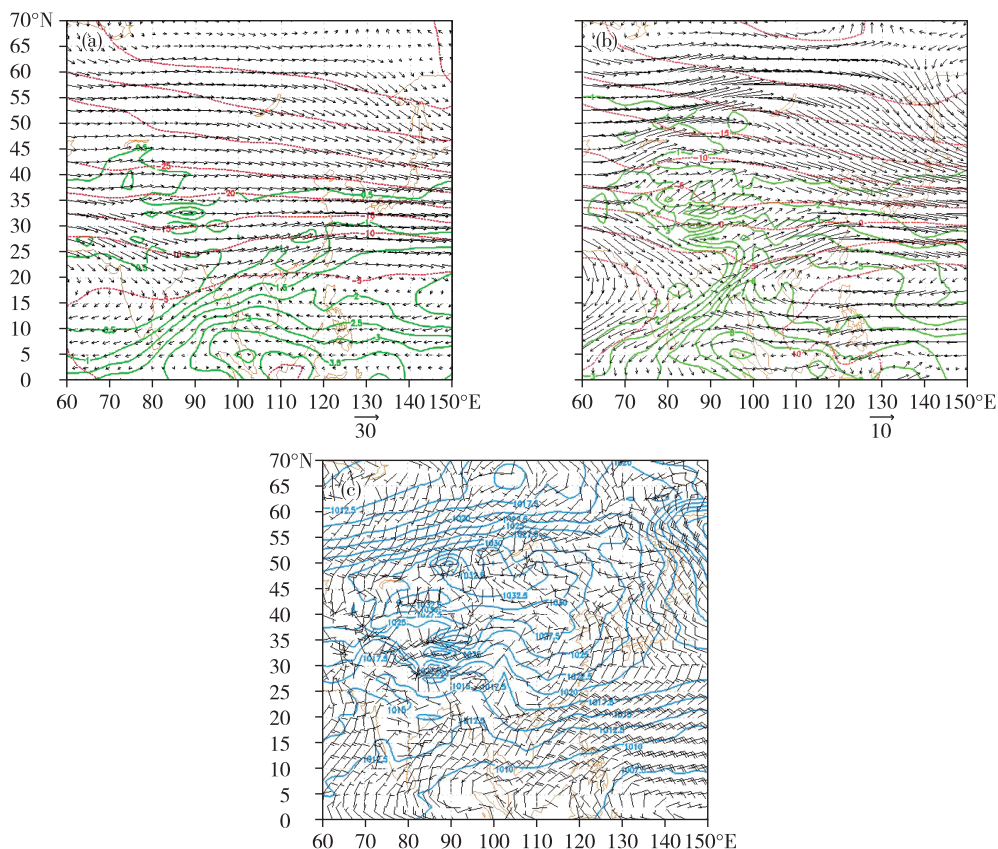


图2 大雾期间500 hPa(a)、700 hPa(b)平均湿度场(绿线,单位: $10^{-2}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、温度场(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和风场(箭头线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及海平面(c)气压场(蓝线,单位:hPa)、风场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)特征

Fig.2 Characteristics of mean humidity (green line, units: $10^{-2}\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), temperature (red line, units: $^{\circ}\text{C}$), and wind (arrow line, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 500 hPa (a) and 700 hPa (b), and sea-level (c) mean pressure (blue line, units: hPa) and wind (wind barb, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) from 19 December 2016 to 9 January 2017

在这种天气背景下,中低层盛行的暖湿平流提供了良好的水汽条件,夜间地面长波辐射和低层冷空气入侵非常有利于近地层的降温 and 逆温结构的形成,使大气稳定度增强,非常有利于大雾的形成和维持。

3 雾类型及其宏观特征

依据雾产生的物理成因,雾主要可分为冷却雾和蒸发雾^[16]。冷却雾包括辐射雾和平流雾,辐射雾由辐射降温引起,一般发生在反气旋和均压场内,晴夜、静风和高相对湿度有利于辐射雾的形成^[17-18]。平流雾是暖湿平流经过冷下垫面冷却形成,一般发生在地面气旋暖区、冷海面 and 海岸附近,风速较辐射雾要大。蒸发雾(雨雾)是冷平流移经暖湿下垫面,由暖湿下垫面蒸发的水汽进入冷区凝结形成,或者是降水在冷区蒸发冷却形成^[19]。通常,陆地上的平流雾和辐射雾很难严格区分,陆地雾在形成前期中低层往往伴随着暖湿平流,然后是近地层随之而来的辐射冷却,由于陆地上温度日变化较大,雾大多是夜晚形成,日出后消失,因此流经

陆地的平流雾一般与辐射降温相伴随,又称为平流辐射雾。依据上述标准,将济南10次冬季雾过程进行了分类。

表1列出的是济南10次过程的类型和宏观特征。其中,平流辐射雾有4次,辐射雾有3次,蒸发雾(雨雾)3次。雾发生时地面以偏北风为主,风速较小,一般不超过 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;平均相对湿度均在90%以上;持续时间差异较大,最长的持续了62.3 h,最短的不足1 h,持续时间最长的是平流辐射雾,最短的是蒸发雾(雨雾);3次蒸发雾都是由西南暖湿气流在北上过程中与冷空气结合产生的,均与降水相联系,即雨水下降到冷下垫面的空气中,空气中的水汽达到饱和而形成,其持续时间或长或短,主要与其伴随的天气系统有关;平流辐射雾和蒸发雾的起雾时间没有明显的规律性,有2次出现在下午,5次出现在夜间;3次辐射雾都形成于夜间,在清晨前后消散,具有较明显的日变化特征,形成时济南均处于500 hPa槽后,且前期均出现过降水,地面湿度较大。

表1 10次雾过程的宏观特征

Table 1 Macro-characteristics of the 10 winter fog events in Jinan

过程编号	类型	起止时间	雾开始	雾消散	地面主导风向	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对湿度/ %	采集 样本数	备注
1	平流辐射雾	20161219—21	15:30	16:50	NE	1.59	92.6	177 660	有降水,出现过强浓雾
2	平流辐射雾	20161221—22	20:00	12:45	NW	1.10	94.3	45 900	前期有降水,雾期间有弱降水
3	辐射雾	20161222—23	22:55	03:10	NE和NW	1.05	95.0	16 560	前期有降水,期间有冷空气过境
4	蒸发雾	20161225	16:25	17:10	E	1.63	92.7	4 560	雾期间有弱降水
5	蒸发雾	20161226	01:40	15:00	NE	2.10	94.5	48 060	雾期间有降水
6	辐射雾	20161229	02:55	10:00	NW	0.72	92.8	25 560	500 hPa槽后,无降水
7	平流辐射雾	20170102—03	01:30	06:45	NE和NW	1.11	94.8	19 697	无降水
8	平流辐射雾	20170103—06	22:20	12:40	NE和NW	1.13	94.8	224 520	本站无降水,周边伴有弱降水
9	蒸发雾	20170106—07	20:45	06:00	NE和NW	1.15	90.2	33 360	本站无降水,周边伴有弱降水
10	辐射雾	20170109	00:45	07:05	W	1.53	93.1	22 860	500 hPa槽后,无降水

4 济南冬季雾微物理特征分析

4.1 平均谱分布

图3给出了济南10次冬季雾每次过程的平均谱分布。从图中可以看出,10次雾过程的谱型存在着明显的差异,有“单峰窄谱”和“多峰宽谱”之分,有5次属于“单峰窄谱”雾,谱型呈现“单峰”结构,

谱偏窄,谱宽不超过 $13\text{ }\mu\text{m}$,其右侧间断的大滴直径不超过 $24\text{ }\mu\text{m}$,峰值直径为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 或 $5\text{ }\mu\text{m}$,数密度较小,峰值处数密度在 $10\text{ cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 以下;5次属于“多峰宽谱”雾,谱型呈现“多峰”结构,峰值直径分别为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $14\text{ }\mu\text{m}$ 、 $20\sim 22\text{ }\mu\text{m}$,谱明显偏宽,均在 $34\text{ }\mu\text{m}$ 以上,最大达 $50\text{ }\mu\text{m}$,数密度远大于“单峰窄谱”雾,第一峰值处数密度均在 $10\text{ cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 以上,最

高达 $147 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。两种不同类型的谱型具有相似之处,雾滴均偏向小滴一侧,小滴数量较多,大滴数量较少。由 10 次过程不同尺度雾滴数及其所占比例(表 2)来看,虽然谱型存在差异,但直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴数量均达到总数的 88% 以上,在“单峰窄谱”雾中,直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴占总数的 98.9%~100%,直径 $12 \mu\text{m}$ 以上的大滴非常少或几乎没有;在“多峰宽谱”雾中,直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴

占总数的 88.3%~95.5%,与“单峰窄谱”雾相比,小滴所占比例偏小,直径 $12 \mu\text{m}$ 以上的大滴所占比例增大,且出现了直径 $30 \mu\text{m}$ 以上的大滴。

结合表 1 可以发现,5 次“多峰宽谱”雾中有 3 次为平流辐射雾、2 次为辐射雾,3 次蒸发雾均为“单峰窄谱”雾。可见雾的类型不同,其微物理特征具有明显的差异。

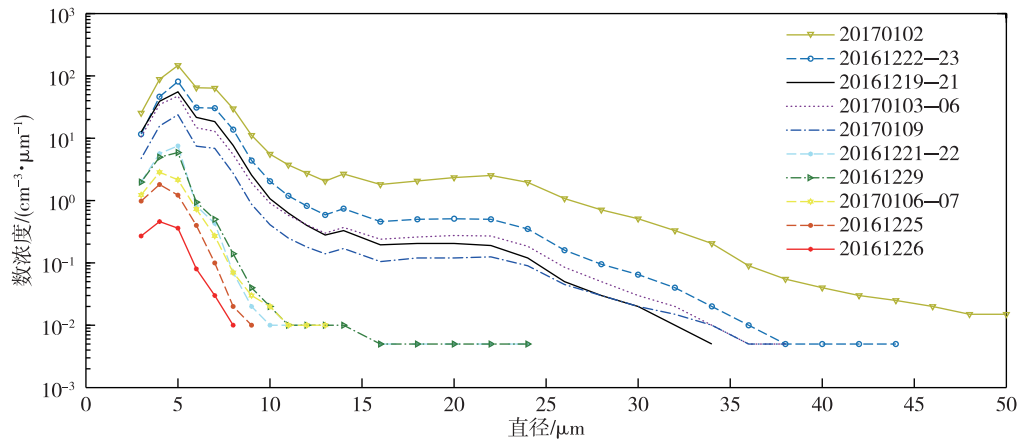


图 3 10 次雾过程平均谱分布

Fig.3 Average spectral distribution of the 10 winter fog events in Jinan

表 2 10 次雾过程各档雾滴数及所占的比例

Table 2 The number of fog droplet in each grade and its corresponding proportion for the 10 winter fog processes in Jinan

类型	雾过程时间	雾滴总数	$D \leq 8 \mu\text{m}$ 雾滴数(占比)	$D \geq 12 \mu\text{m}$ 雾滴数(占比)	$D \geq 30 \mu\text{m}$ 雾滴数(占比)
单峰窄谱雾	20161226	1.21	1.21(100%)	0(0)	0(0)
	20161225	4.54	4.53(99.8%)	0(0)	0(0)
	20170106—07	7.38	7.30(98.9%)	0.02(0.3%)	0(0)
	20161229	14.57	14.42(99.0%)	0.08(0.5%)	0(0)
	20161221—22	16.63	16.53(99.4%)	0.06(0.4%)	0(0)
多峰宽谱雾	20170109	64.69	61.29(94.7%)	1.87(2.9%)	0.11(0.20%)
	20170103—06	133.08	125.72(94.5%)	3.95(3.0%)	0.14(0.10%)
	20161219—21	162.16	154.83(95.5%)	3.07(1.9%)	0.07(0.04%)
	20161222—23	229.32	214.10(93.4%)	7.60(3.3%)	0.31(0.10%)
	20170102	473.93	418.42(88.3%)	35.09(7.4%)	2.67(0.60%)

注:2017 年 1 月 2 日 07:00 后因雾滴谱仪器故障缺失 11 h。

4.2 微物理结构特征

表 3 给出了 10 次冬季雾过程的主要微物理量,可以看出:1) 10 次雾过程的平均数浓度为 34.41 cm^{-3} ,最小的仅为 0.33 cm^{-3} ,最大的是 126.76 cm^{-3} ,相差 10^3 倍,平均液态含水量最小的为 $0.00002 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大的为 $0.0566 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,相差 10^3 倍;平均中值体积直径为 $6.87 \mu\text{m}$,最小的为 $2.52 \mu\text{m}$,最大的为 $20.12 \mu\text{m}$,相差 9 倍;平均有效

直径为 $5.67 \mu\text{m}$,最小的为 $2.44 \mu\text{m}$,最大的为 $14.71 \mu\text{m}$,相差 6 倍。对于同一次过程,各微物理量起伏变化也很大,数浓度相差 $10^1 \sim 10^3$ 倍,液态含水量相差 $10^1 \sim 10^4$ 倍,中值体积直径相差 0.5~9 倍,有效直径相差 0.5~6 倍。2) 对于“单峰窄谱”雾,各微物理量均值都较小,数浓度介于 $0.33 \sim 4.54 \text{ cm}^{-3}$ 之间,5 次过程的平均数浓度只有 2.42 cm^{-3} ,液态含水量介于 $0.00002 \sim 0.00027 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,中值体积

直径介于 2.52 ~ 5.30 μm 之间,有效直径介于 2.44 ~ 4.81 μm ;对于“多峰宽谱”雾,各物理量平均值较大,数浓度介于 17.56 ~ 126.76 cm^{-3} 之间,5次过程的平均数浓度达 57.54 cm^{-3} ,比“单峰窄谱”雾大 1 个数量级,液态含水量介于 0.003 46 ~ 0.056 6 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均液态含水量比“单峰窄谱”雾大 2 个数量级以上,中值体积直径介于 7.01 ~ 20.12 μm 之间,有效直径介于 5.70 ~ 14.71 μm ,均比“单峰窄

谱”雾明显偏大。3)中值体积直径与有效直径具有较好的一致性,中值体积直径越大,有效直径越大。对于“单峰窄谱”雾,平均中值体积直径和平均有效直径均较小,且两者的差值也较小,其差值比大多在 10%以下,对于“多峰宽谱”雾,平均中值体积直径和平均有效直径都较大,差值也较大,差值比均在 20%以上,最高达 36.8%。

表 3 济南 10 次雾过程的微物理特征

Table 3 Microphysical characteristics of the 10 winter fog events in Jinan

雾过程	数浓度/ cm^{-3}	液态含水量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	MVD/ μm	ED/ μm	MVD-ED/ED	
单峰窄谱雾	20161226	0.33 (0.05~1.80)	0.000 02 (0.000 00~0.000 39)	2.52 (0.68~5.02)	2.44 (0.68~4.74)	3.3%
	20161225	1.23 (0.72~1.91)	0.000 06 (0.000 02~0.000 25)	4.49 (3.68~5.27)	4.18 (3.49~4.85)	7.4%
	20170106—07	2 (0.90~5.21)	0.000 12 (0.000 04~0.000 38)	5.30 (4.20~6.63)	4.81 (3.94~5.93)	10.2%
	20161229	4 (0.54~37.1)	0.000 24 (0.000 02~0.002 78)	5.19 (3.87~12.26)	4.71 (3.7~8.66)	10.2%
	20161221—22	4.54 (0.33~38.46)	0.000 27 (0.000 01~0.006 68)	4.74 (2.51~17.43)	4.36 (2.44~10.36)	8.7%
	平均	2.42 (0.05~38.46)	0.000 142 (0.000 00~0.006 68)	4.45 (0.68~17.43)	4.1 (0.68~10.36)	8.5%
多峰宽谱雾	20170109	17.56 (0.75~248.43)	0.003 46 (0.000 02~0.062 23)	7.77 (3.81~21.9)	6.27 (3.63~14.54)	23.9%
	20170103—06	35.92 (1.26~1 238.25)	0.006 49 (0.000 04~0.373 45)	7.01 (4.01~22.21)	5.76 (3.91~16.00)	21.7%
	20161219—21	44.69 (0.30~820.98)	0.006 10 (0.000 01~0.146 18)	6.86 (2.25~20.94)	5.70 (2.19~14.69)	20.4%
	20161222—23	62.76 (0.77~343.27)	0.013 02 (0.000 03~0.084 80)	9.73 (3.56~21.51)	7.28 (3.41~15.29)	33.7%
	20170102	126.76 (0.92~521.01)	0.056 60 (0.000 05~0.187 59)	20.12 (4.76~26.1)	14.71 (4.41~20.75)	36.8%
	平均	57.54 (0.75~1 238.25)	0.017 13 (0.000 01~0.373 45)	10.30 (2.25~26.1)	7.94 (2.19~20.75)	29.7%
总平均	34.41 (0.05~1 238.25)	0.006 78 (0.000 00~0.373 45)	6.87 (0.68~26.1)	5.67 (0.68~20.75)	21.2%	

注:括号内的数值为最小值、最大值,2017年1月2日07:00后因雾滴谱仪器故障缺测11h。

综合图3、表2和表3分析,可以发现:对于“单峰窄谱”雾,表3中数浓度和液态含水量由小到大的顺序与图1中谱分布曲线小滴段(直径在8 μm 以下)自下而上的顺序具有较好的对应关系;对于“多峰宽谱”雾,表3中数浓度由小到大的顺序与图1中直径8 μm 以下的小滴段谱分布曲线自下而上

的顺序具有较好的对应关系,而液态含水量由小到大的顺序则与直径在12 μm 以上的大滴段谱分布曲线自下而上的顺序具有较好的对应关系。据此可得出如下初步结论:1)济南冬季雾的数浓度与直径8 μm 以下的小滴具有较好的正相关关系,小滴越多,数浓度越大;2)对于“单峰窄谱”雾,由于小雾

滴所占的比例非常大,直径大于 $12\ \mu\text{m}$ 的大雾滴很少或几乎没有,因此其液态含水量主要取决于雾滴数量的多少,即液态含水量与数浓度具有较好的正相关关系;3)对于“多峰宽谱”雾,虽然小雾滴仍占绝大多数,但大雾滴所占的比例明显增大,滴谱分布曲线变得平坦,液态含水量与直径 $12\ \mu\text{m}$ 以上的大滴数量具有较好的正相关关系,大滴数量越多,液态含水量越大。

为了验证上述结论,分别给出了 10 554 个样本数浓度与 $8\ \mu\text{m}$ 以下小滴数量的相关关系(图 4)、液态含水量与数浓度(图 5a)、液态含水量与 $12\ \mu\text{m}$ 以上大滴数(图 5b)的相关关系,图 6 给出了 5 次“单峰窄谱”雾和 5 次“多峰宽谱”雾液态含水量的谱分布特征。由图 4 可见,数浓度(y)与直径 $8\ \mu\text{m}$ 的小雾滴数量(x)具有较好的线性关系,满足 $y = 0.2997x - 1.195$,即数浓度主要取决于小雾滴的多少,小雾滴越多,数浓度越大,小雾滴越少,数浓度越小,这主要与雾中小滴数量所占的比例较大有

关。由图 5 可见,液态含水量(LWC)与数浓度(NC)和直径 $12\ \mu\text{m}$ 以上的大滴数均具有较好的线性关系,但是与数浓度(图 5a)相比,液态含水量与直径 $12\ \mu\text{m}$ 以上大滴数相关程度(图 5b)更高, $R^2 = 0.9512$,虽然液态含水量与数浓度的线性关系也通过了 0.05 的信度检验,且相关程度达到了 0.7997,但其相关性主要体现在数浓度较小时,随着数浓度的增大,两者的相关程度逐渐减弱。由图 6 可以看出:1)对于 5 次“单峰窄谱”雾过程,其液态含水量谱呈现出单峰型(图 6a),对液态含水量有贡献的是直径 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ 的小雾滴,因此液态含水量与数浓度具有较好的正相关关系;2)对于“多峰宽谱”雾,液态含水量谱呈现出双峰型(图 6b),第一峰值位于直径 $22\ \mu\text{m}$ 处,第二峰值位于直径 $7\ \mu\text{m}$ 处,且第一峰值(大滴)对液态含水量的贡献比第二峰值处(小滴)大 1 个数量级左右,可见大雾滴对液态含水量的贡献更大,大滴数越多,液态含水量越大,大滴数越少,液态含水量越小。

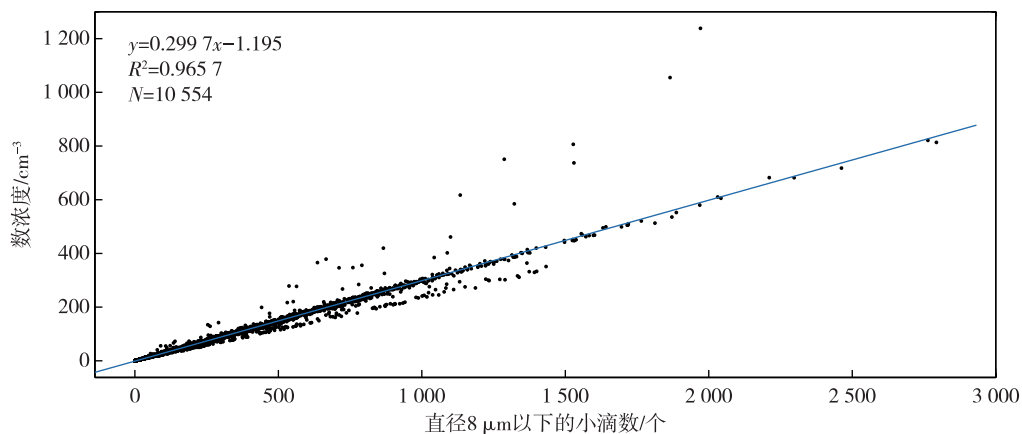


图 4 数浓度与直径 $8\ \mu\text{m}$ 以下的小雾滴数的相关关系

Fig.4 Correlation between NC (number concentration) and the number of small droplet ($D \leq 8\ \mu\text{m}$)

4.3 济南不同类型雾的微物理特征及与其他地区的对比

表 4 和图 7 分别给出了济南、南京、上海地区不同类型雾的主要微物理量和济南三类冬季雾谱分布特征,可以看出:

1)济南冬季雾中,平流辐射雾的数浓度和液态含水量最大,分别为 $38.95\ \text{cm}^{-3}$ 、 $0.00762\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,辐射雾次之,分别为 $23.75\ \text{cm}^{-3}$ 、 $0.00463\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,蒸发雾最小,分别为 $1.03\ \text{cm}^{-3}$ 、 $0.00006\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;对于中值体积直径、有效直径,辐射雾和平流辐射雾相差不大,分别是 $7.25\ \mu\text{m}$ 、 $5.91\ \mu\text{m}$ 和 $7.21\ \mu\text{m}$ 、 $5.93\ \mu\text{m}$,蒸发雾明显偏小,中值体积直径和有效直

径分别是 $3.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.45\ \mu\text{m}$ 。可见,雾的类型不同,其微物理参数差异很大。NIU et al. [20] 通过对南京不同类型冬季雾的微物理特征研究也得出了类似的结果。

2)济南冬季蒸发雾平均谱型呈现为“单峰”结构,雾滴谱最窄,谱宽仅为 $11\ \mu\text{m}$,峰值直径为 $4\ \mu\text{m}$,整个谱型分布偏向小滴一端,直径 $3\sim 8\ \mu\text{m}$ 的小滴占总数的 99.2%,且平均数密度最小,峰值处仅为 $1.46\ \text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$;辐射雾和平流辐射雾的平均谱型非常相似,均呈现出“多峰”结构,峰值直径分别为 $5\ \mu\text{m}$ 、 $14\ \mu\text{m}$ 和 $20\sim 22\ \mu\text{m}$,平均谱较宽,分别为 $38\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$,第一峰值直径处数密度分别

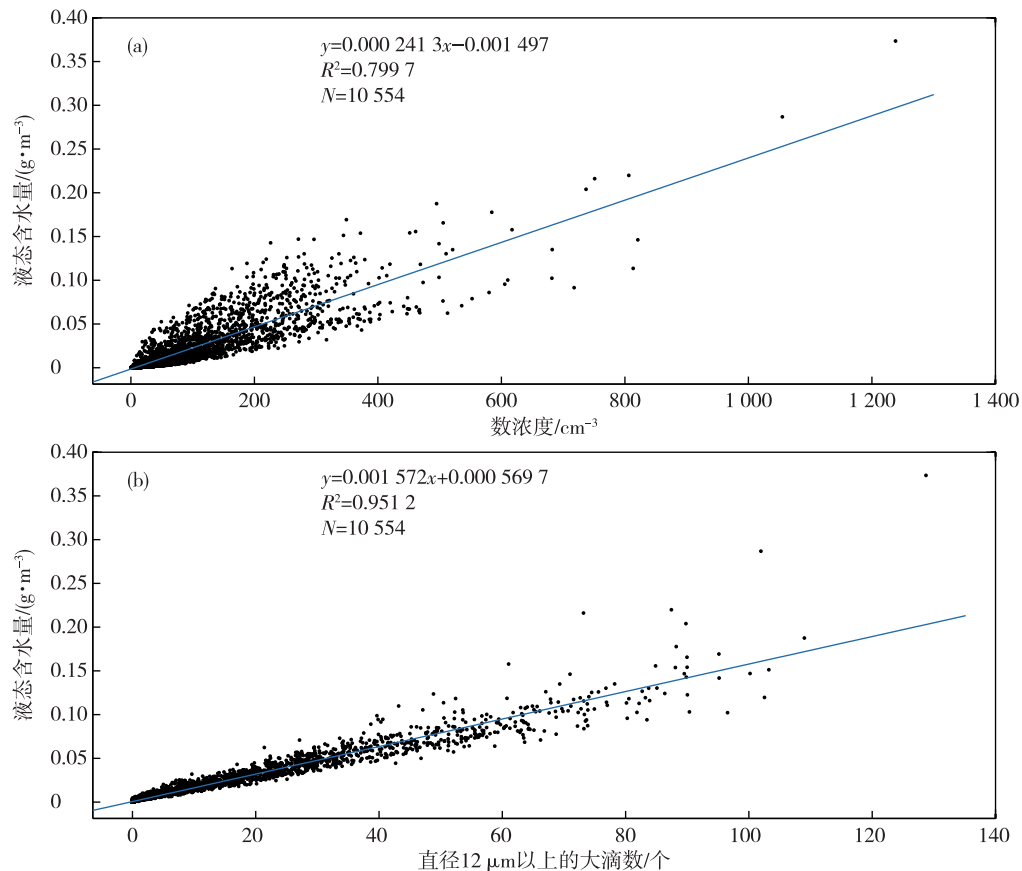


图5 液态含水量(LWC)与数浓度(NC)(a)以及直径12 μm 以上大滴数(b)的相关关系

Fig.5 Correlation between LWC (liquid water content) and NC (a) as well as that between LWC and the number of large droplet ($D \geq 12 \mu\text{m}$) (b)

为 $31.33 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $49.43 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 第二峰值直径处数密度分别为 $0.25 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 第三峰值直径处数密度分别为 $0.175 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 其中平流辐射雾平均谱最宽, 各档数密度最大; 辐射雾和平流辐射雾中, 直径 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的小滴分别占总数的 94.12% 和 94.11%, 与蒸发雾相比, 大滴数量明显增多。

3) 与南京相比, 济南冬季雾具有以下特点。蒸发雾平均谱型呈现“单峰”结构, 辐射雾和平流辐射雾均呈现“多峰”结构, 与南京冬季雾“谱型均呈现单调下降”的谱分布特征具有明显差异。蒸发雾的数浓度 (1.03 cm^{-3}) 比南京 (3.0 cm^{-3}) 偏小近 2 倍, 液态含水量 ($0.00006 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 比南京 ($0.000052 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 略偏大, 且峰值直径、谱宽 (分别为 $4 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$) 都比南京 ($3 \mu\text{m}$ 、 $7 \mu\text{m}$) 偏大, 说明济南冬季蒸发雾中小滴数量相对偏少、大滴数量相对偏多。辐射雾和平流辐射雾的数浓度 (分别为 23.75 cm^{-3} 、 38.95 cm^{-3}) 较小, 约为南京的 (分别为 89.1 cm^{-3} 、 182 cm^{-3}) 20%, 液态含水量更小 (分别为 0.00463

$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.00762 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 约为南京的 (分别为 $0.0278 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 10%; 谱宽 (分别为 $38 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$) 比南京 (均为 $50 \mu\text{m}$) 偏窄, 说明济南冬季辐射雾和平流辐射雾中的小滴数和大滴数均比南京明显偏少; 与上海相比, 济南冬季辐射雾平均数浓度偏小约 1 个数量级, 平均液态含水量偏小约 2 个数量级, 平均有效直径偏小约 2 倍, 谱宽仅为 $38 \mu\text{m}$, 明显小于上海 ($50 \mu\text{m}$)。对比分析表明, 冬季雾具有明显的地域性特点, 与局地的环境、生态以及环流背景等因素密不可分, 不同地区冬季雾的微物理结构具有明显的差异。

5 结论与讨论

利用济南 10 次冬季雾过程雾滴谱仪观测资料、自动气象站加密观测资料以及 NCEP/NCAR 再分析等资料, 分析了济南冬季雾发生的平均环流背景以及微物理结构等特征, 得出如下主要结论:

1) 大雾期间, 山东处于冷暖气流的过渡地带, 中低层西南地区向北输送的暖湿平流为大雾的形

成和维持提供了良好的水汽条件,从低层不断扩散南下的北方冷空气以及夜间地面长波辐射降温使

大气稳定度增强,在这种天气背景下,非常有利于大雾的形成和维持。

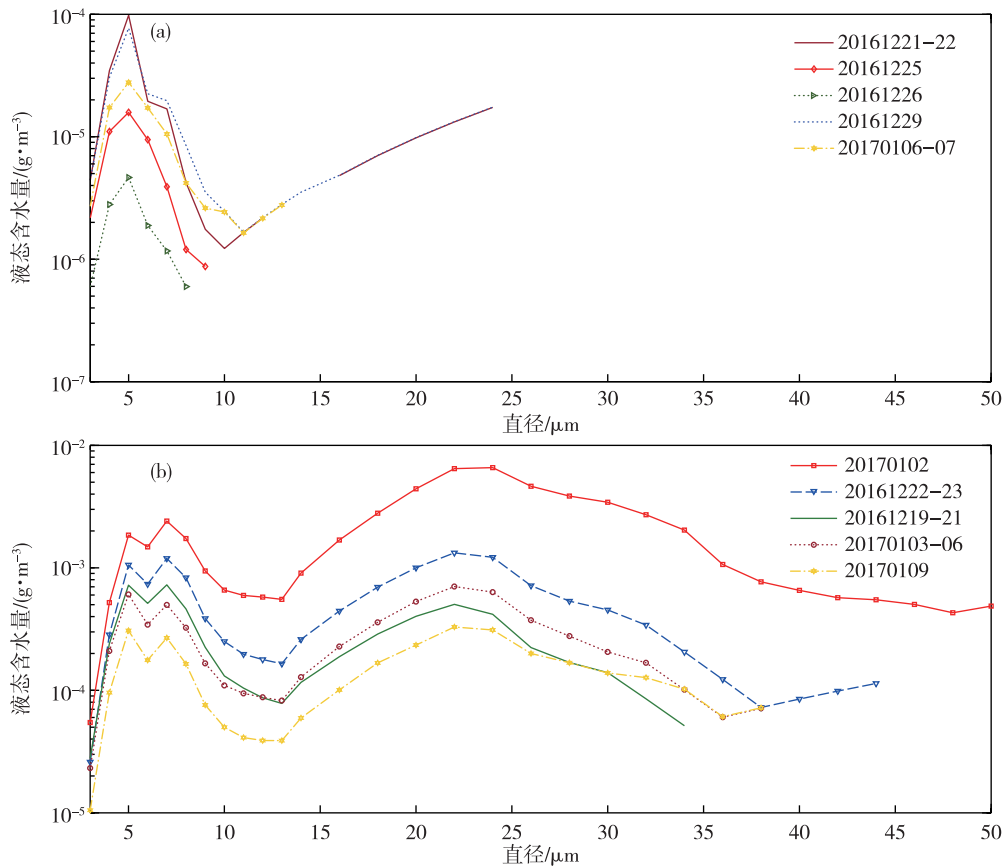


图6 两种类型雾液态含水量的谱分布特征(a.单峰窄谱雾,b.多峰宽谱雾)

Fig.6 Spectral distribution of LWC in two types of fog (a. one-peak narrow spectrum fog, b. multi-peak wide spectrum fog)

表4 济南、南京、上海不同类型雾的主要微物理量

Table 4 Main microphysical quantity of different types of winter fog in Jinan, Nanjing, and Shanghai

地区	雾类型	数浓度/cm ⁻³	液态含水量/g·m ⁻³	中值体积直径/μm	有效直径/μm	峰值直径/μm	谱宽/μm
济南	蒸发雾	1.03	0.000 06	3.7	3.45	4	11
	辐射雾	23.75	0.004 63	7.25	5.91	5、14、20	38
	平流辐射雾	38.95	0.007 62	7.21	5.93	5、14、20~22	40
南京 ^[21]	蒸发雾	3.0	0.000 052	—	—	3	7
	辐射雾	89.1	0.027 8	—	—	3	50
	平流辐射雾	182	0.11	—	—	3	50
上海 ^[22]	辐射雾	231	0.18	—	13.67	—	50

2)雾发生时地面以偏北风为主,风速较小,一般不超过 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;平均相对湿度均在90%以上;持续时间差异较大,最长的是平流辐射雾,持续了62.3 h,最短的是蒸发雾(雨雾),不足1 h;蒸发雾均与降水相联系,持续时间或长或短,主要与其伴随的天气系统有关;平流辐射雾和蒸发雾(雨雾)起雾时间没有明显的规律性;辐射雾形成于夜间,在清

晨前后消散,具有较明显的日变化特征,且前期均出现过降水,地面湿度较大。

3)济南冬季雾的平均数浓度为 34.41 cm^{-3} ,平均液态含水量最小的 $0.000\ 02\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均中值体积直径为 $6.87\ \mu\text{m}$,平均有效直径为 $5.67\ \mu\text{m}$ 。谱型可分为“单峰窄谱”和“多峰宽谱”两种类型。“单峰窄谱”雾峰值直径位于 $4\ \mu\text{m}$ 或 $5\ \mu\text{m}$,谱宽不超

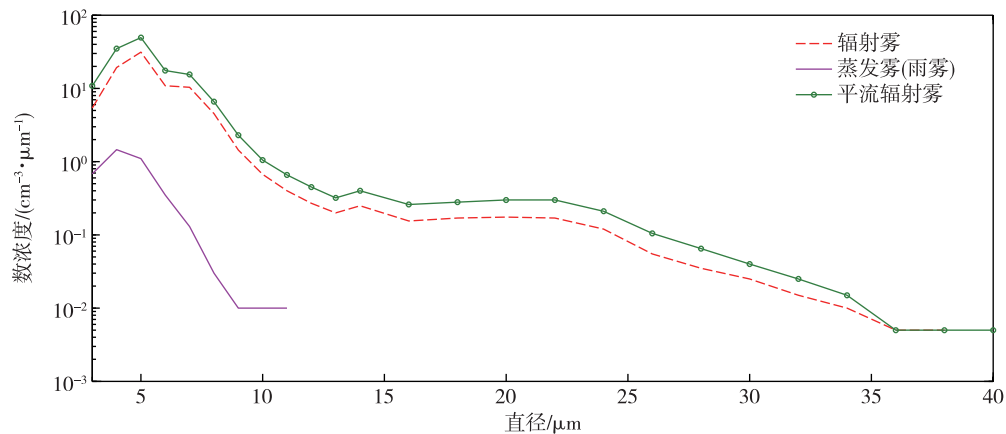


图7 蒸发雾、辐射雾和平流辐射雾平均谱分布特征

Fig.7 Characteristics of average spectral distribution of evaporation fog, radiation fog, and advection-radiation fog

过 $13 \mu\text{m}$; 小雾滴所占比例很高, 直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴占总数的 $98.9\% \sim 100\%$; 各微物理量平均值都较小, 平均数浓度只有 2.42 cm^{-3} , 平均液态含水量为 $0.000142 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。“多峰宽谱”雾峰值直径位于 $5 \mu\text{m}$ 、 $14 \mu\text{m}$ 、 $20 \sim 22 \mu\text{m}$, 平均谱宽在 $34 \mu\text{m}$ 以上, 最大达 $50 \mu\text{m}$; 直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴占总数的 $88.3\% \sim 95.5\%$, 直径 $12 \mu\text{m}$ 以上的大滴所占比例明显增大; 各微物理量平均值较大, 平均数浓度达 57.54 cm^{-3} , 比“单峰窄谱”雾大 1 个数量级以上, 平均液态含水量为 $0.017134 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比“单峰窄谱”雾大 2 个数量级以上。

4) 济南冬季雾中以小滴为主, 直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴数量占总数的 88% 以上, 数浓度与直径 $8 \mu\text{m}$ 以下的小滴数具有较好的线性关系; “单峰窄谱”雾液态含水量谱呈现“单峰”型, 液态含水量与数浓度具有较好的线性关系, “多峰宽谱”雾液态含水量谱呈现“双峰”型, 液态含水量与直径 $12 \mu\text{m}$ 以上的大滴数具有较好的线性关系。

5) 济南冬季雾中, 平流辐射雾的数浓度和液态含水量最大, 分别为 38.95 cm^{-3} 、 $0.00762 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 辐射雾次之, 分别为 23.75 cm^{-3} 、 $0.00463 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 蒸发雾最小, 分别为 1.03 cm^{-3} 、 $0.00006 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 对于中值体积直径、有效直径, 辐射雾和平流辐射雾相差不大, 分别为 $7.25 \mu\text{m}$ 、 $5.91 \mu\text{m}$ 和 $7.21 \mu\text{m}$ 、 $5.93 \mu\text{m}$, 蒸发雾明显偏小, 分别为 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $3.45 \mu\text{m}$ 。蒸发雾平均谱型呈现为“单峰”结构, 峰值直径为 $4 \mu\text{m}$, 雾滴谱最窄, 谱宽仅为 $11 \mu\text{m}$, 直径 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的小滴占总数的 99.2% ; 辐射雾和平流辐射雾平均谱型均呈现出“多峰”结构, 峰值直径分别为 $5 \mu\text{m}$ 、 $14 \mu\text{m}$ 和 $20 \sim 22 \mu\text{m}$, 直径 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的小滴分别

占总数的 94.12% 和 94.11% , 与蒸发雾相比, 大滴数量明显增多; 平流辐射雾平均谱最宽, 达 $40 \mu\text{m}$, 各档数密度最大; 辐射雾平均谱宽分别为 $38 \mu\text{m}$, 略窄于平流辐射雾。

6) 与南京和上海相比, 济南冬季雾微物理特征具有明显差异。数浓度明显偏小; 对于辐射雾和平流辐射雾, 液态含水量偏小 $1 \sim 2$ 个数量级, 且谱宽明显偏窄。分析表明, 冬季雾具有明显的地域性特征, 不同地区冬季雾的微物理结构具有明显的差异。

参考文献:

- [1] MEYER M B, JIUSTO J E, LALA G G. Measurements of visual range and radiation-fog (Haze) microphysics[J]. J Atmos Sci, 1980, 37(3): 622-629.
- [2] 李子华, 张利民, 楼小凤. 重庆市区冬季雾的宏微观结构及其物理成因[J]. 南京气象学院学报, 1993, 16(1): 48-54.
- [3] LIU D Y, LI Z H, YAN W L, et al. Advances in fog microphysics research in China[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 2017, 53(1): 131-148.
- [4] 黄建平, 梅清银, 靳永才, 等. 沪宁地区辐射雾的微物理结构及其演变[J]. 气象, 1998, 24(5): 3-8.
- [5] SCHMITT C G, STUEFER M, HEYMSFIELD A J, et al. The microphysical properties of ice fog measured in urban environments of Interior Alaska[J]. J Geophys Res, 2013, 118(11): 11136-11147.
- [6] 万齐林, 吴兑, 叶燕强. 南岭局地小地形背风坡增雾作用的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 709-713.
- [7] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征[J]. 气象学报, 2011, 69(4): 706-718.
- [8] 李子华, 刘端阳, 杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件[J]. 大气科学, 2011, 35(1): 41-54.

- [9] 陆春松,牛生杰,杨军,等.南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J].大气科学,2010,34(4):681-690.
- [10] 吕晶晶,牛生杰,张羽,等.湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征[J].气象学报,2014,72(2):350-365.
- [11] 梅婵娟,张灿.威海沿海地区雾的气候特征及相关影响因素分析[J].山东气象,2016,147(36):28-35.
- [12] 孙兴池,韩永清,李静,等.垂直运动对雾-霾及空气污染过程的影响分析[J].高原气象,2017,36(4):1106-1114.
- [13] 夏凡,杨晓霞.济南一次雾过程的数值模拟试验和成因分析[J].气象科技,2017,45(1):164-170.
- [14] 孙颖,马艳,高荣珍,等.山东一次持续性平流辐射雾过程特征及成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(4):128-135.
- [15] 王静菊,高小雨,高山红.一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究[J].海洋气象学报,2017,37(1):42-53.
- [16] 李子华,杨军,石春娥,等.地区性浓雾物理[M].北京:气象出版社,2008:13.
- [17] ROACH W T, BROWN R, CAUGHEY S J, et al. The physics of radiation fog I : A field study[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1976, 102(432):313-333.
- [18] MEYER M B, LALA G G. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York [J]. J Climate, 1990, 3(5):577-586.
- [19] KORACIND, DORMAN C E, LEWIS J M, et al. Marine fog: A review[J]. Atmos Res, 2014, 143:142-175.
- [20] NIU S J, LIU D Y, ZHAO L J, et al. Summary of a 4-Year fog field study in northern Nanjing, Part 2: Fog microphysics[J]. Pure Appl Geophy, 2012, 169(5/6), 1137-1155.
- [21] 刘端阳,杨军,李子华.南京冬季三类雾的微物理特征比较[C]//中国气象学会人工影响天气委员会,中国气象科学研究院,中国气象局人工影响天气中心,吉林省人工影响天气办公室.第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(II).北京:气象出版社,2008:644-647.
- [22] 陈国华,周婉君,高伟,等.上海辐射雾雾滴谱特征及微物理特性分析[C]//中国气象学会.第33届中国气象学会年会 S22 青年论坛论论文集.西安:中国气象学会,2016:6-11.