

王羽飞, 齐彦斌, 李倩, 等. 一次长白山夏季雾的宏微观特征. 应用气象学报, 2022, 33(4): 442-453.
DOI: 10.11898/1001-7313.20220405

一次长白山夏季雾的宏微观特征

王羽飞¹⁾²⁾ 齐彦斌^{1)2)*} 李倩³⁾ 李健⁴⁾

¹⁾(吉林省气象灾害防御技术中心, 长春 130062)

²⁾(中国气象局吉林省人民政府人工影响天气联合开放实验室, 长春 130062)

³⁾(吉林省长春市气象局, 长春 130012)

⁴⁾(吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026)

摘要

2021 年夏季首次利用激光雾滴谱仪开展长白山主峰雾的观测研究。结合地面自动气象站、探空、葵花 8 号高分辨率卫星资料和 ERA5 再分析资料, 对 2021 年 7 月 31 日—8 月 1 日长白山主峰出现的持续时间达 19 h、最低能见度小于 100 m 的雾过程的宏微观特征分析表明: 此次雾过程具有持续时间长、环境风速大、能见度低、有短暂消散, 且数浓度低、有效直径和液态水含量小等特征。雾滴有效直径平均值为 5.7 μm , 数浓度平均值为 246.4 cm^{-3} , 液态水含量平均值为 0.05 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其微物理特征与海雾特征接近。雾过程开始为爬坡雾, 这是长白山主峰夏季典型的地形云雾, 随后由高空云层平流至长白山主峰而接地产生。在强浓雾的形成、发展和减弱阶段, 雾滴数浓度、液态水含量和有效直径的变化具有较好对应关系; 在成熟阶段, 雾滴数浓度、液态水含量和有效直径变化的对应关系不明显。

关键词: 长白山; 雾滴谱; 雾演变特征; 微物理结构; 高山雾

引言

雾是由于贴地层空气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒导致水平能见度降到 1 km 以内的天气现象。雾影响城市边界层和城市环境, 对航空飞行安全、城市交通不利^[1]。近年有关城市雾的类型判定、产生条件、微物理特征等研究较多。严文莲等^[2]发现 2007 年 12 月南京受天气系统影响出现多次雨雾过程; 郭丽君等^[3]指出北京地区持续性大雾天气以平流雾为主; 梁军等^[4]以大连为例研究城市雾的物理化学特性, 发现城市雾与地形、城市热岛效应、空气污染等因素有关; 李永平等^[5]基于上海地区数据, 将相对湿度、地气温差和风速大小等要素阈值作为雾的排空条件。有关雾的爆发性增强研究也逐步发展, 李子华等^[6]提出辐射雾由浓雾发展为强浓雾的

过程均具有爆发性增强特征, 其本质是雾滴谱爆发性拓宽、数密度和含水量骤然增大; 方春刚等^[7]基于河北涿州一次浓雾微物理特征研究揭示了有利于雾爆发性增强的正反馈效应; 苏正军等^[8]构建膨胀云室, 为进一步开展云雾室内试验奠定基础。

有关高山云雾的研究起步较早, 欧洲中部有已运行百年的高山站观测高山云雾^[9]。Tag 等^[10]指出雾也有可能是低云及地形成; Lee^[11]发现复杂的地势环境可以引起气流性质改变, 配合天气系统影响易产生地形云。郭学良等^[12-13]对我国高山雾的研究进行系统总结, 认为 20 世纪 60 年代后我国在对高山云雾形成的研究及云雾观测设备的研发方面取得重要进展。利用海拔优势高山观测可以实现对自然云雾的直接观测, 我国在江西庐山、广东大瑶山、安徽黄山和九华山、湖南衡山、山东泰山和宁夏六盘山等地均开展过云雾的气象观测^[14-22], 在高山

2022-03-11 收到, 2022-05-24 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41775140), 吉林省气象局技术发展专项(202110)

* 通信作者, 邮箱: qiyanbin88@qq.com

及山地雾的宏微观特征分析、形成机制研究方面取得了丰硕成果。此外,对高山雾水化学组分^[23]、云雾与降水关系^[24-26]等方面也有深入认识。普遍认为高山雾的形成机制主要是高空云层移动或低云沿坡抬升。如吴兑等^[19]研究南岭大瑶山山地冬季雾宏微观结构与能见度,发现南岭山地浓雾实质上是出现在相对较高海拔的低云,雾含水量与能见度呈明显的反相关关系。由于雾滴谱分布与雾的形成、发展及消散过程密切相关,因此雾滴谱仪成为雾观测研究的重要仪器。高山雾的雾滴谱分布具有一定共性特征。李子华^[15]提出山区雾的雾滴数浓度一般为 10^2 cm^{-3} ,介于城市雾(一般为 $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$)与海雾(一般为 $10^1 \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$)之间;就雾滴尺度而言,山区雾介于海雾($22.1 \mu\text{m}$)和大城市雾($10.0 \mu\text{m}$)之间。郭丽君等^[21]分析2015—2018年庐山云雾试验站雾的微观特征,认为庐山高山雾比城市雾的粒子数浓度低,有效直径大,这与李子华^[15]结论一致。

长白山地处吉林省东南部山区,主峰海拔为2623 m,是吉林省重要的旅游资源地,其地理、地形、区域气候独特,长白山主峰雾天气频发,年平均雾日数可达265 d。雾日多可引发气象及衍生灾害,同时会造成视程障碍,极大限制了旅游资源效益的发挥。1959年研究人员在长白山用燃烧法开展消暖雾试验,取得初步成效^[15]。关于长白山雾的宏微观特征研究鲜见报道。2021年7—8月吉林省气象灾害防御技术中心依托中国气象局吉林云物理野外科学试验基地与山东大学联合开展了长白山主峰首次云雾观测试验。本研究选取该观测试验中持续时间最长、雾滴谱分布最广、雾过程最强的个例作为研究对象,分析夏季长白山主峰雾的宏微观物理特征,以加强对长白山云雾的科学认识,对开展长白山云雾模拟、预报、人工消雾、气候与环境变化研究和应用具有重要意义。

1 资料说明和处理

本文所用资料包括地面雾滴谱资料,天池气象站气温、10 min 平均风速和分钟内最大瞬时风速等观测资料,临江气象站探空资料,ERA5再分析资料^[27]以及葵花8号高分辨率卫星资料^[28-29],时间为2021年7月31日—8月1日。地面雾滴谱资料来自国产中兵(中国兵器工业集团公司)人影 ZBT-LF-01 激光雾滴谱仪,该型号雾滴谱仪曾与美国

DMT(粒子测量技术)公司的 FM-100 型号同类设备进行对比试验^[30]。本次观测试验前后,均对雾滴谱仪进行了标准粒子标定。该雾滴谱仪安装在天池气象站,距离气象观测场直线距离不足100 m,实时测量 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内32个直径等级的雾滴粒子数量(最高分辨率为 $1 \mu\text{m}$),可实现对雾滴有效直径、平均有效直径、数浓度、体浓度、液态水含量等的测量。根据探测原理及仪器说明,ZBT-LF-01雾滴谱仪采样频率为1 s,因在实际采集中有缺测,故将雾滴谱数据进行10 min 滑动平均。雾滴谱仪数据中的体浓度与液态水含量计算方法相同,仅相差6个数量级,数据分析以液态水含量为主。根据观测结果,平均有效直径和有效直径数值差异较小,变化趋势基本一致,因此选择有效直径开展研究。

2 形成雾的天气形势和大气层结条件

雾的预报等级标准(GB/T 27964—2011)^[31]根据能见度(V)将雾分为大雾($500 \text{ m} \leq V < 1 \text{ km}$)、浓雾($200 \text{ m} \leq V < 500 \text{ m}$)、强浓雾($0 < V < 200 \text{ m}$)3个等级。长白山天池站每日5次人工能见度观测,分别在08:00(北京时,下同),11:00,14:00,17:00和20:00进行。2021年7月31日在14:00,17:00,20:00连续观测到能见度低于100 m的强浓雾,至8月1日08:00能见度恢复至12 km。

7月31日—8月1日500 hPa高空槽系统稳定少动,吉林省处于700 hPa西南气流控制下(图1),长白山位于急流右前侧,配合暖脊,存在暖湿气流的输送。根据气象站观测记录,31日吉林省部分地区出现小雨天气,12:09—12:14天池站出现短暂降水,12:00—13:00小时降水量为0.7 mm。全省空气湿度较大,但并未出现大范围雾天气,因此此次雾过程是由天池站特有的地理环境导致。根据天池的海拔特征,利用ERA5再分析资料分析天池站720 hPa以上高度温度和相对湿度的垂直结构,结果如图2所示。7月31日09:00低层相对湿度从85%增长至近95%,大于80%的湿层向上延展到700 hPa。14:00湿层厚度进一步增加,80%以上湿层达到660 hPa并维持,20:00后湿层厚度下降至700 hPa以下,8月1日06:00低层湿度已不足85%,且随高度增加迅速减小。雾过程发生时700 hPa受暖脊控制,由距离天池站最近的临江城秒级探空数据可见(图3),7月31日08:00,在天池

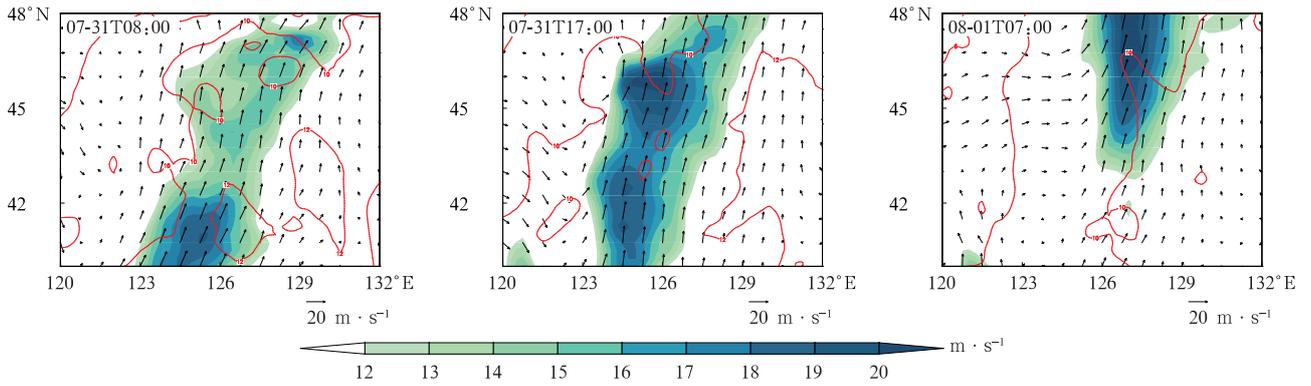


图1 2021年7月31日—8月1日700 hPa 温度场(红色实线,单位:℃)、风场(矢量)及12 m·s⁻¹以上全风速(填色)
 Fig. 1 Temperature(the red solid line, unit: ℃), wind(the vector) and full wind speed above 12 m·s⁻¹(the shaded) at 700 hPa from 31 Jul to 1 Aug in 2021

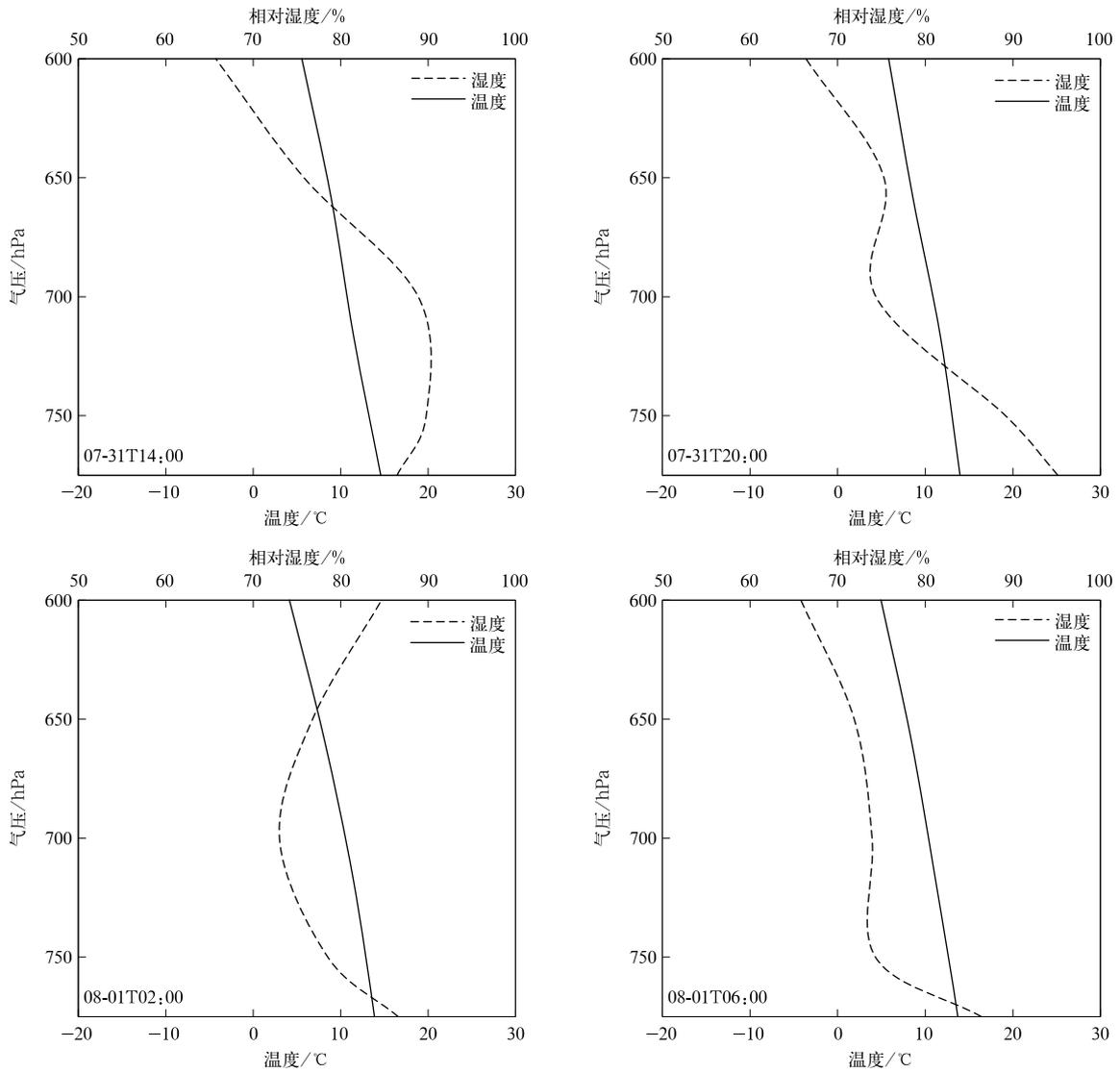


图2 2021年7月31日—8月1日长白山天池站温度和相对湿度的垂直分布
 Fig. 2 Vertical distribution of temperature and relative humidity at Tianchi Weather Station of Changbai Mountain from 31 Jul to 1 Aug in 2021

站附近 708 hPa 出现逆温,逆温层向上延展至 682 hPa,为午后出现的雾天气提供相对稳定的环境条件。8月1日凌晨,受冷空气影响,700 hPa 暖脊逐渐东退(图略),出现多层弱逆温结构,且由 700 hPa 风场(图1)可以看到,8月1日 07:00 急流核已明显北移并加强,07:11 此次雾过程结束,共持续 19 h。

根据雾滴谱仪观测结果将雾过程分为 2 个子过程,第 1 个子过程为 7 月 31 日 12:09—20:52,第 2 个子过程为 7 月 31 日 20:53—8 月 1 日 07:11。沿

41.5°N 的剖面(图略)显示,在子过程 1 中,受地形抬升影响,山前气流有明显爬升运动,由于近地面存在逆温层结构(图 3),大气处于稳定层结,爬升凝结形成的雾不能继续向上发展成云,该阶段雾过程符合爬坡雾原理。在子过程 2 中,随着西南急流带的北移,地形抬升引起的上升运动已不明显,更为明显的是受偏西气流引导在山顶引起的平流雾特征,至 8 月 1 日 06:00 山前盛行下沉运动,平流特征亦不明显,此次雾过程趋于结束。

由于天池站缺乏高分辨率能见度观测资料,利

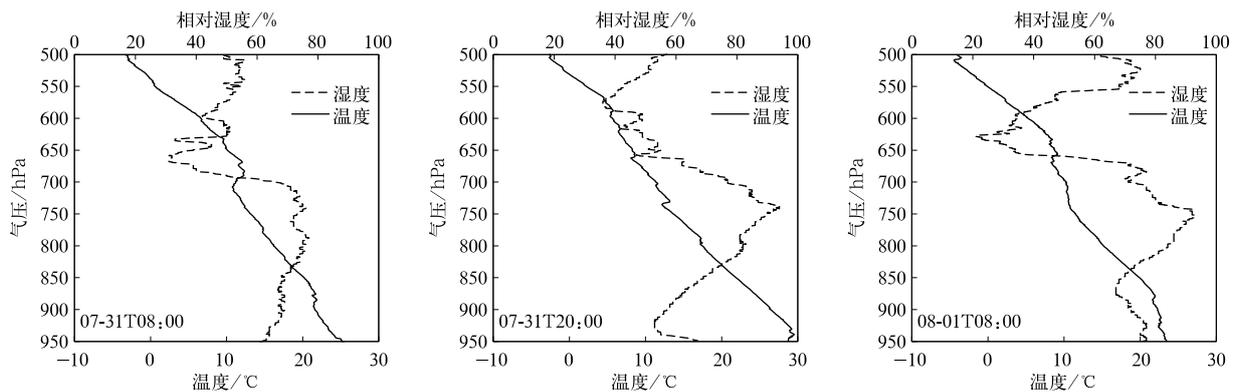


图3 2021年7月31日—8月1日临江站温度和相对湿度的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of temperature and relative humidity at Linjiang Station from 31 Jul to 1 Aug in 2021

用葵花 8 号高分辨率卫星资料,分析自然彩色合成卫星云图的演变(图 4),配合通道亮温差法反演长白山的雾过程,进一步研究雾过程及成因。对于子过程 1,7 月 31 日 13:00 长白山附近的云生成并发展,且受西南气流影响向东北方向移动,同时携带来自日本海的水汽。受地形阻挡,气流在山体迎风坡爬升,造成绝热膨胀冷却形成雾。降温和增湿是雾形成、发展的重要条件,根据雾的分类判定此为爬坡雾,也可理解为西南方暖湿气流遇长白山山体抬升成云,这是长白山常见的夏季地形云,由于地形云移速较快,不易形成有效降水,以雾的形式存在。其次,考虑雾在大气窗区的通道辐射特性类似于黑体,其比辐射率接近 1,而在短波红外通道比辐射率明显偏小。王宏斌等^[32]提出利用葵花 8 号卫星短波红外通道(3.9 μm)和大气红外窗区通道(11.2 μm)的亮温差对雾进行识别,这种方法不完全适用于高山地区。由于白天云层对太阳光的短波红外辐射有反射

作用,卫星观测的云短波辐射值是其本身发射的与反射的太阳短波辐射之和,因此计算的亮温较高,特别对于高云,其本身热红外温度较低,从而亮温差为正值且数值较大。分析 7 月 31 日 13:00—18:00 葵花 8 号卫星短波红外通道(3.9 μm)和大气红外窗区通道(11.2 μm)云顶亮温差(图略)发现,长白山主峰雾滴谱仪观测到雾滴的大部分时间内,卫星观测亮温差小于零;17:00 左右亮温差较大,判定为高云,这与此时雾滴浓度为 0、雾有短暂消散的时间吻合。ERA5 再分析资料显示 17:00 长白山附近 700 hPa 急流核北移加强(图 1),18:00 急流核减弱南退(图略),这为雾的短暂消散和再次生成提供动力条件。

对于子过程 2,低层湿度变小,湿层变薄,已不具备爬坡雾形成的大气层结条件,且与辐射雾具有逆温层、静小风等特征亦不同。葵花 8 号高分辨率卫星自然彩色合成云图无法观测夜间的云,8 月 1 日 05:00—06:00 云图显示(图略)长白山区及其周

边有大面积的云,因此判定高空云层移动至长白山主峰接地而产生雾,这与平流雾的形成原理较相近。

子过程2中雾滴数浓度间断出现的零值,是由于活动云系、云团空间分布不均匀,存在缝隙。

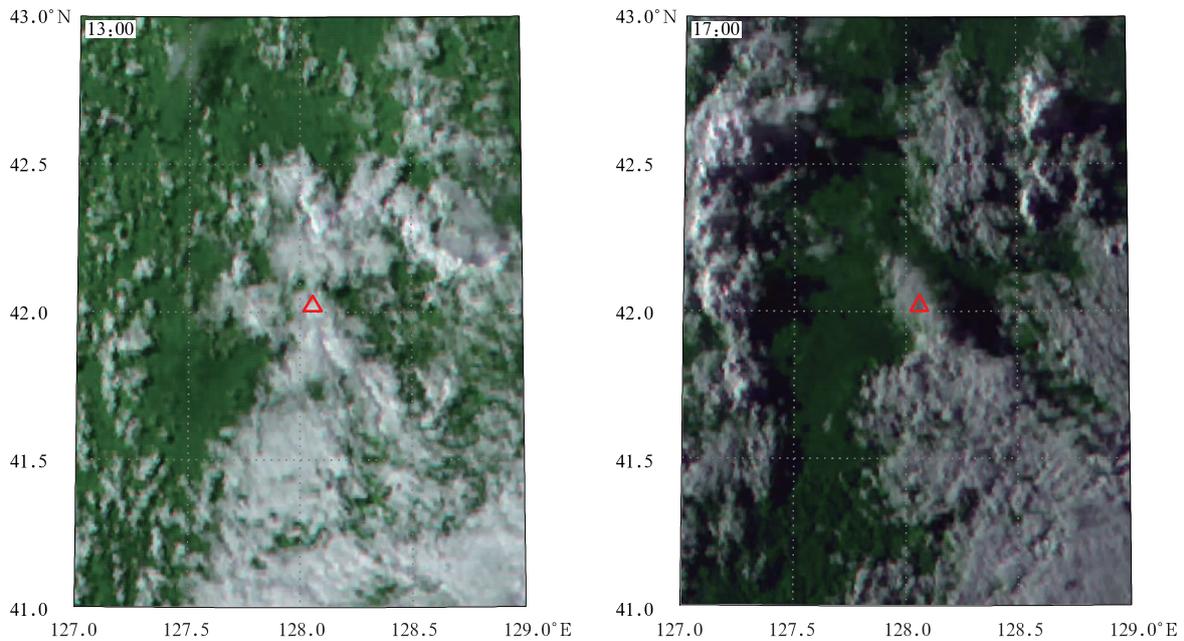


图4 2021年7月31日13:00和17:00葵花8号卫星高分辨率自然彩色合成云图(△代表雾滴谱仪位置)

Fig. 4 High-resolution natural color composite cloud images of the Himawari-8 Satellite at 1300 BT and 1700 BT on 31 Jul 2021(△ denotes the location of fog droplet spectrometer)

3 雾的微物理特征

由图5可知,子过程1(2021年7月31日12:09—20:52)粒子数浓度变化较大,12:09粒子数浓度迅速上升,在30 min内逐秒数浓度观测值超过 1000.0 cm^{-3} ,雾出现爆发性增强。13:45逐秒数浓度观测峰值达到 1261.7 cm^{-3} ,10 min滑动平均值峰值为 895.0 cm^{-3} (出现在13:55),此后10 min滑动平均值为 500.0 cm^{-3} 以上,并持续了约90 min。16:30雾滴数浓度迅速下降,16:59—17:41雾滴数浓度出现零值;17:58达到第2次峰值,逐秒数浓度观测峰值为 1070.9 cm^{-3} ,10 min滑动平均值峰值为 597.0 cm^{-3} ,随后缓慢降低。子过程2(2021年7月31日20:53—8月1日07:11),粒子数浓度较子过程1明显偏低,03:42达到逐秒数浓度观测峰值为 296.6 cm^{-3} ,10 min滑动平均值峰值为 131.0 cm^{-3} ,出现在05:30。

由图5可以看到,数浓度、体浓度、液态水含量随时间变化的总趋势较为一致。数浓度较高时,有

效直径与数浓度的变化趋势一致性较好。雾过程气温整体呈下降趋势,降温幅度超过 $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。雾过程风速较大,最大瞬时风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,10 min平均风速最大值为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于子过程1,大部分时间10 min平均风速超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且平均风速变化与数浓度变化大体相反,平均风速上升时,数浓度往往下降,平均风速下降时,数浓度往往上升;对于子过程2,风速波动更大,且与数浓度的对应关系不明显,这与平原的平流雾差异明显。

雾过程中各物理量的统计特征见表1。由表1可见,各微物理量起伏变化较大,其中数浓度平均值为 246.4 cm^{-3} ,最小值仅为 0.14 cm^{-3} ,最大值为 1261.7 cm^{-3} ,最大值与最小值相差4个数量级;液态水含量平均值为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最小值为 $5.94 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值为 $0.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值与最小值相差6个数量级;有效直径平均值为 $5.7 \text{ }\mu\text{m}$,最小值为 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$,最大值为 $34.0 \text{ }\mu\text{m}$,最大值与最小值相差1个数量级。由雾滴谱分布图(图6)发现,子过程1的雾滴谱分布广,为 $2.0 \sim 46.0 \text{ }\mu\text{m}$,峰值直径为 $4 \text{ }\mu\text{m}$;子过程2的雾滴谱为 $2.0 \sim 28.0 \text{ }\mu\text{m}$,

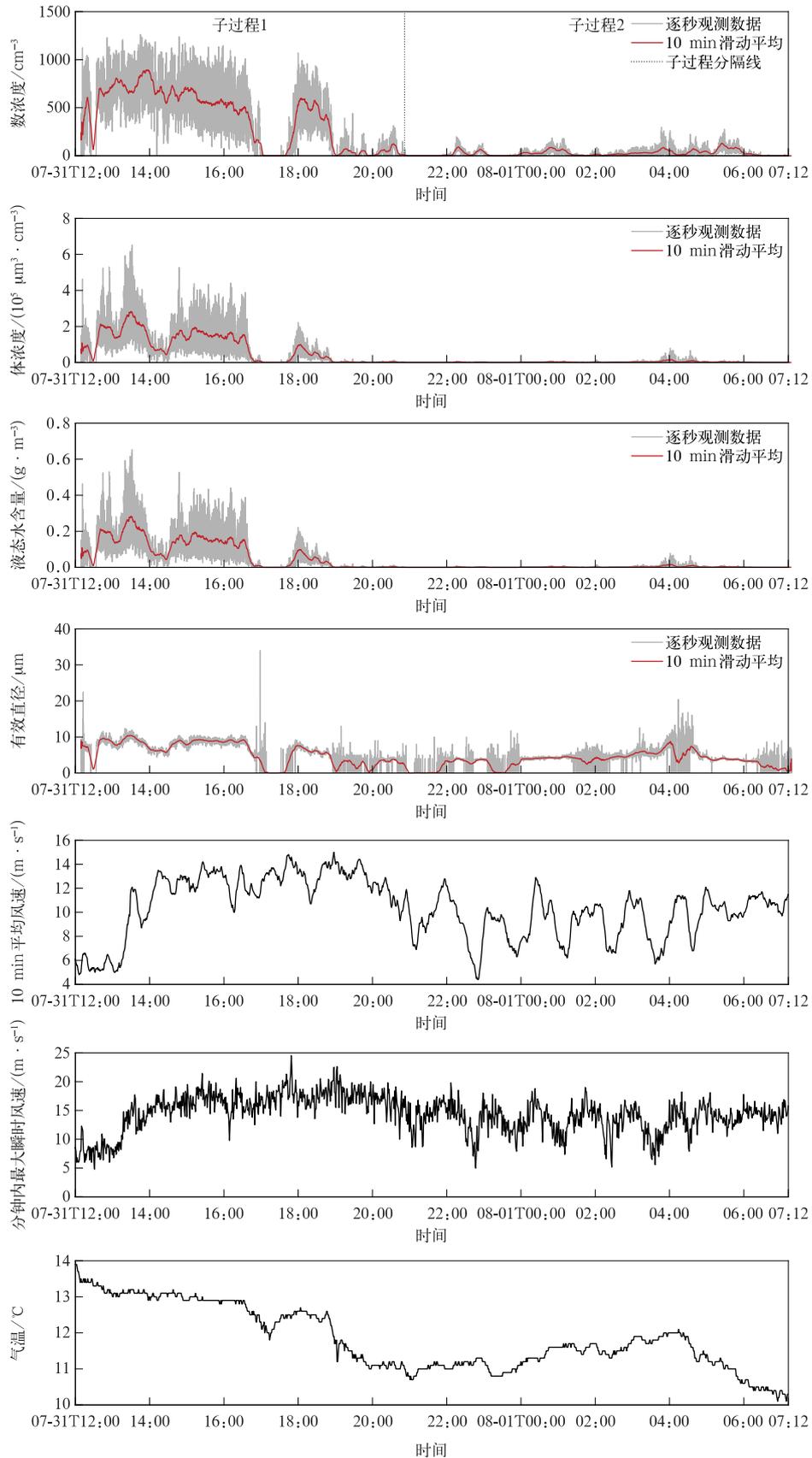


图 5 2021 年 7 月 31 日—8 月 1 日物理量演变

Fig. 5 Evolution of physical quantities from 31 Jul to 1 Aug in 2021

表 1 雾过程的物理量统计值

Table 1 Statistics of physical quantities in fog process

时段	统计量	气温/℃	数浓度/cm ⁻³	液态水含量/(g·cm ⁻³)	有效直径/μm
全过程	最小值	10.1	0.14	5.94×10 ⁻⁷	2.0
	最大值	13.5	1261.7	0.65	34.0
	平均值	11.8	246.4	0.05	5.7
子过程 1	最小值	11.0	0.1	5.94×10 ⁻⁷	2.0
	最大值	13.5	1261.7	0.65	34.0
	平均值	12.5	477.1	0.10	7.1
子过程 2	最小值	10.1	0.1	5.94×10 ⁻⁷	2.0
	最大值	12.1	296.6	0.08	20.4
	平均值	11.2	35.3	0.20×10 ⁻²	4.5

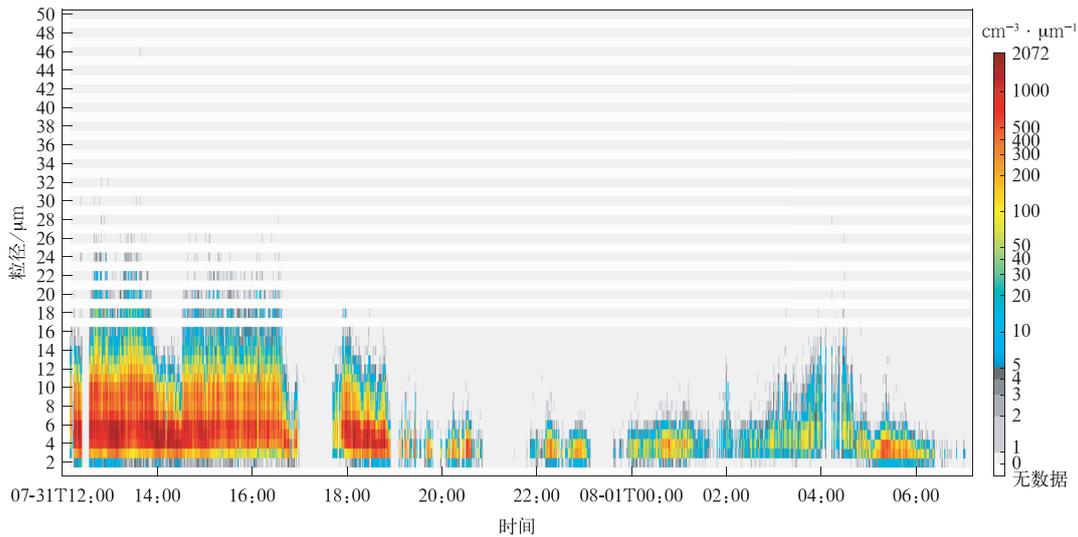


图 6 2021 年 7 月 31 日—8 月 1 日雾滴谱分布

Fig. 6 Droplet spectral distribution from 31 Jul to 1 Aug in 2021

前期雾滴谱分布窄,04:00 雾滴谱有所拓宽。

长白山主峰雾的微物理特征与其他地区雾的对比见表 2。由表 2 可见,长白山主峰雾的数浓度比南岭大瑶山高,较衡山、泰山、庐山山区观测明显偏

低;数浓度介于南京和济南城市雾之间,与安徽寿县雾的观测值相近,且比厦门翔安海雾观测值高。长白山主峰雾的有效直径平均值及液态水含量均比较小,在表 2 中最低,峰值直径与南岭大瑶山一致,比

表 2 长白山主峰雾与其他地区雾的微物理特征比较

Table 2 Comparison of microphysical characteristics of fog on the main peak of Changbai Mountain and other areas

地点	海拔/m	时间	数浓度平均值/cm ⁻³	有效直径平均值/μm	峰值直径/μm	液态水含量平均值/(g·cm ⁻³)
长白山主峰	2623	2021-07-31—08-01	246.4	5.7	4.0	0.05
南岭大瑶山 ^[18]	815	1998-12—1991-01 2001-02—03	167.8	8.4	4.0	0.16
衡山 ^[17]	1266	1962-05	359.3	12.1	8.0	0.40
庐山 ^[13]	1500	1962-07—08	453.5	15.2	10.0	0.86
泰山 ^[17]	1100	1981-02—04	395.5	11.7	9.0	0.66
济南 ^[33]		2017-01-03—06	35.9	5.8		0.65×10 ⁻²
安徽寿县 ^[34]		2019-01-07—08;2019-01-11—13	195.6	5.9		0.09
南京 ^[35]		2006-12-24—27	488.7	5.8		0.35
厦门翔安 ^[36]		2019-04-07	100.0			0.17

衡山、庐山、泰山低,液态水含量较上述山区观测值明显偏低。整体上,与其他山区雾的微物理特征相比,长白山主峰雾的有效直径和液态水含量平均值偏小、数浓度平均值偏低。长白山雾的浓度较低,微物理特征与南岭大瑶山类似,因二者较其他高山更接近海面或水面,所以雾滴具有海洋性特征。雾滴直径小与长白山自然生态环境保护较好、受城市气溶胶的影响小有关。长白山山体、植被及主峰天池水表、地表下垫面的粗糙程度差异巨大,近地层水平风速存在明显垂直切变,使得水滨近地层湍流运动发展旺盛,湍流混合和湍流输送强烈等因素可能是导致其数浓度和液态水含量小的原因。

4 强浓雾期间微物理量演变

2021年7月31日12:09—16:59雾最强烈,具有典型的爬坡雾特征,可认为是以雾的形式存在的地形云,具有一定代表性,故详细分析强浓雾期间雾的微物理特征演变,表3和图7分别是该段过程各阶段微物理量的平均值、范围以及谱分布,结合图5可得到:

①形成阶段(7月31日12:09—12:32):该阶段10 min平均风速约为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气温下降约 0.2°C ,有效直径和液态水含量出现1次较小峰值后降至最低值,数浓度迅速升高,出现1次短暂且明显的峰值,平均数浓度为 482.7 cm^{-3} ,谱型呈单峰结构,峰值位于 $6.0 \mu\text{m}$ 处,有效直径平均值为 $7.5 \mu\text{m}$,有效直径最大值为 $22.5 \mu\text{m}$,最大雾滴直径达 $50.0 \mu\text{m}$ 。表明该阶段雾滴已达到一定谱宽,核化和凝结增长过程已开始。

②发展阶段(7月31日12:32—13:45):微物理量起伏变化较大,气温下降明显,数浓度等微物理量急剧上升,数浓度、液态水含量、有效直径的10 min滑动平均峰值均出现在该阶段,具有爆发性特征。平均数浓度和液态水含量分别达到 712.6 cm^{-3} 和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,约为形成阶段的2倍。谱线明显上抬,但仍呈单峰结构,峰值位于 $6.0 \mu\text{m}$ 处, $10.0 \mu\text{m}$ 以上的雾滴明显增多。表明该阶段核化和湍流碰并过程活跃,数浓度剧增,雾滴迅速增长,大滴增多。

③成熟阶段(7月31日13:45—16:00):该阶段持续时间最长,微物理量起伏变化大。平均数浓度和液态水含量分别达到 655.4 cm^{-3} 和 $0.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,气温整体平稳且略有降低,谱型仍呈单峰结构,峰值直径为 $5.0 \mu\text{m}$,谱分布曲线下沉,大尺度雾滴数量较发展阶段减少,最大雾滴直径达 $44.0 \mu\text{m}$ 。表明该阶段雾滴核化凝结增长减弱,并出现沉降直至持续稳定。

④减弱阶段(7月31日16:00—16:59):气温继续降低,1 h内降低 0.3°C ,平均数浓度下降至 405.6 cm^{-3} ,液态水含量降低至 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。谱型仍呈单峰结构,峰值直径为 $5 \mu\text{m}$,谱分布线继续下移,最大雾滴直径为 $42.0 \mu\text{m}$,谱宽变窄。

上述分析表明:长白山主峰典型爬坡雾在形成、发展和减弱阶段的数浓度、液态水含量与有效直径具有较好的对应关系,在发展阶段具有爆发性特征,但在成熟阶段,上述对应关系不明显。这是因为成熟阶段的核化、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。此外,雾爆发性增长阶段也是风速大幅增加的阶段,在强浓雾时段10 min平均风速始终较大,这是与平原雾的差别。

表3 2021年7月31日12:09—16:59强浓雾期间各物理量演变

物理量	形成阶段 12:09—12:32	发展阶段 12:32—13:45	成熟阶段 13:45—16:00	减弱阶段 16:00—16:59
气温/ $^\circ\text{C}$	13.4 (13.3~13.5)	13.1 (13.0~13.4)	13.0 (12.8~13.2)	12.7 (12.3~12.9)
数浓度/ cm^{-3}	482.7 (0.2~1125.2)	712.6 (253.6~1228.6)	655.4 (6.2~1261.7)	405.6 (0.173~1095.9)
液态水含量/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.09 (5.97×10^{-6} ~0.46)	0.20 (0.03~0.65)	0.14 (2.00×10^{-4} ~0.53)	0.10 (2.45×10^{-6} ~0.44)
有效直径/ μm	7.5 (3.6~22.5)	9.2 (6.3~12.4)	8.0 (4.4~10.5)	7.6 (3.0~34.0)

注:括号内数据表示不同阶段各物理量变化范围。

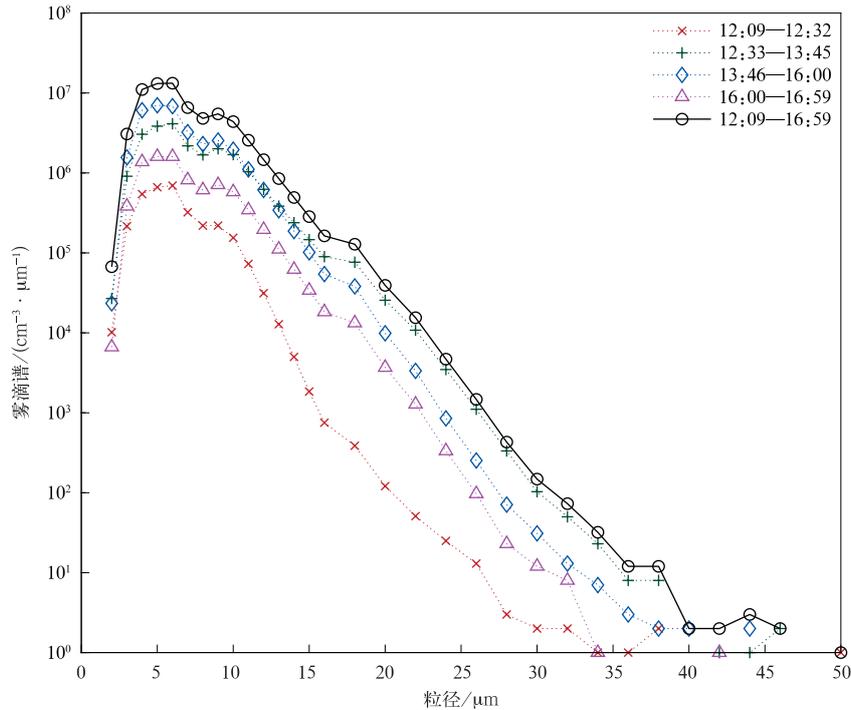


图7 2021年7月31日12:09—16:59雾滴谱分布

Fig. 7 Droplet spectrum distribution from 1209 BT to 1659 BT on 31 Jul 2021

5 结论与讨论

2021年7—8月在长白山主峰天池站附近开展雾的外场观测试验,对7月31日—8月1日一次因特殊地理环境发生的局地雾天气的宏微观物理特征进行分析,结论如下:

1) 雾过程前半段是在稳定逆温层结条件下,由持续性西南暖湿气流沿地形爬升形成持续雾天气,其特点是西南风较大,水汽充足,这也是长白山夏季常见地形云雾的动力配置;后半段为高空云层移动至长白山主峰高海拔地区接地产生。此次雾过程具有持续时间长、能见度低、环境风速大、有短暂消散的特征,特别在强浓雾时段风速始终较大,与平原雾差别显著。

2) 雾滴有效直径平均值为 $5.7 \mu\text{m}$, 数浓度平均值为 246.4 cm^{-3} , 液态水含量平均值为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与其他山区雾的微物理特征相比,长白山主峰雾的有效直径平均值和液态水含量平均值偏小,数浓度偏低,微物理特征与南岭大瑶山类似,两者均较其他高山更接近海面及水面,雾滴具有海洋性特征。强浓雾阶段最低能见度小于 100 m , 由于湍流碰并过程造成雾滴谱的快速拓宽,形成单峰结构。

3) 爬坡雾过程中出现的雾滴数浓度零值与 700 hPa 急流核的变化有关。基于白天云层对太阳光短波红外有反射作用的原理,利用葵花8号卫星短波红外通道 ($3.9 \mu\text{m}$) 和大气红外窗区通道 ($11.2 \mu\text{m}$) 亮温差表明 $17:00$ 长白山上空存在高云,佐证雾滴数浓度出现零值的合理性,并通过 ERA5 再分析资料发现雾短暂消散与 700 hPa 急流核强度及移动有关。

4) 对微物理结构演变特征分析发现,强浓雾形成阶段 10 min 平均风速高,气温下降;发展阶段微物理量起伏变化较大,数浓度等微物理量急剧上升,具有爆发性特征;成熟阶段持续时间最长,气温变化平稳、略有降低;减弱阶段气温继续降低,数浓度平均值、液态水含量平均值明显下降。上述4个阶段平均谱型均呈现单峰结构,雾滴粒子峰值直径为 $6.0 \mu\text{m}$, 该尺寸的粒子对此次长白山主峰夏季雾的形成贡献明显。

雾的形成受宏观大气环流影响,同时也受海拔高度、地形、地表覆盖物等地域因素影响,雾滴谱分布、微物理过程演变与能见度、气溶胶密切相关。长白山地区由于地理环境复杂,长白山主峰的雾既有高山雾和云雾共存机制,在液态水含量、雾滴数浓度等方面也具有诸多特殊之处。考虑国产雾滴谱仪在

技术性能及稳定性上仍处于试用检验阶段,且本文仅用该雾滴谱仪对长白山的1次持续性雾进行研究,长白山云雾形成和演变的微物理机制还需基于综合外场观测试验开展更深入分析。

致谢:感谢吉林省长白山气象局对野外观测的大力支持。感谢山东大学环境学院薛丽坤教授、王新锋教授对野外观测和论文撰写给予的悉心指导,特别向山东大学环境学院单业博士及其野外观测团队表示感谢。

参考文献

- [1] 梁爱民,张庆红,申红喜,等.北京地区一次平流雾过程的分析和数值模拟.应用气象学报,2009,20(5):612-621.
Liang A M, Zhang Q H, Shen H X, et al. The analysis and simulation of an advection fog event in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(5): 612-621.
- [2] 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.气象,2010,36(10):29-36.
Yan W L, Liu D Y, Pu M J, et al. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing. *Meteor Mon*, 2010, 36(10): 29-36.
- [3] 郭丽君,郭学良.北京2009—2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因.大气科学,2016,40(2):296-310.
Guo L J, Guo X L. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009—2013 in the Beijing region. *Chinese J Atmos Sci*, 2016, 40(2): 296-310.
- [4] 梁军,张胜军,隋洪起,等.大连地区大雾特征.应用气象学报,2009,20(1):28-35.
Liang J, Zhang S J, Sui H Q, et al. Characteristics of heavy fog in Dalian. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(1): 28-35.
- [5] 李永平,刘晓波,葛伟强,等.一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法.应用气象学报,2012,23(3):340-347.
Li Y P, Liu X B, Ge W Q, et al. A fog nowcast method based on satellite remote sensing and numerical products from meso-scale atmospheric model. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(3): 340-347.
- [6] 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.大气科学,2011,35(1):41-54.
Li Z H, Liu D Y, Yang J. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening. *Chinese J Atmos Sci*, 2011, 35(1): 41-54.
- [7] 方春刚,郭学良.华北一次浓雾过程爆发性增强的微物理特征.应用气象学报,2019,30(6):700-709.
Fang C G, Guo X L. The microphysical structure of a heavy fog event in North China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 700-709.
- [8] 苏正军,郭学良,诸葛杰,等.云雾物理膨胀云室研制及参数测试.应用气象学报,2019,30(6):722-730.
Su Z J, Guo X L, Zhuge J, et al. Developing and testing of an expansion cloud chamber for cloud physics research. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 722-730.
- [9] Stekl J, Podzimek J. Old mountain meteorological station Milesovka (Donnersberg) in Central Europe. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74(5): 831-834.
- [10] Tag P M, Peak J E. Machine learning of maritime fog forecast rules. *J Appl Meteor*, 1996, 35: 714-724.
- [11] Lee R R. Two case studies of wintertime cloud systems over the Colorado Rockies. *J Atmos Sci*, 1984, 41(5): 868-878.
- [12] 郭学良,方春刚,卢广献,等.2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展.应用气象学报,2019,30(6):641-650.
Guo X L, Fang C G, Lu G X, et al. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 641-650.
- [13] 郭学良,付丹红,郭欣,等.我国云降水物理飞机观测研究进展.应用气象学报,2021,32(6):641-652.
Guo X L, Fu D H, Guo X, et al. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 641-652.
- [14] 俞香仁.云雾对激光传播及能见度的影响.气象,1982,8(5):24-26.
Yu X R. Influence of cloud and fog on laser propagation and visibility. *Meteor Mon*, 1982, 8(5): 24-26.
- [15] 李子华.中国近40年来雾的研究.气象学报,2001,59(5):616-624.
Li Z H. Studies of fog in China over the past 40 years. *Acta Meteor Sinica*, 2001, 59(5): 616-624.
- [16] Wu D, Deng X J, Mao J T, et al. Macro- and micro-structures of heavy fogs and visibility in the Dayaoshan expressway. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 21(3): 324-352.
- [17] 汪学军,王新来,姚叶青.九华山雾日时间变化特征及其形成的气象条件分析.暴雨灾害,2012,31(3):287-292.
Wang X J, Wang X L, Yao Y Q. Analysis on the temporal change features and meteorological conditions of fog day in Jiuhua Mountain. *Torrential Rain Disaster*, 2012, 31(3): 287-292.
- [18] 詹丽珊,陈万奎,黄美元.南岳和泰山云中微结构起伏资料的初步分析.我国云雾降水微物理特征的研究.北京:科学出版社,1965:30-40.
Zhan L S, Chen W K, Huang M Y. Preliminary Analysis of Microstructure Fluctuation Data in Nanyue and Taishan Clouds. Research on the Microphysical Characteristics of Cloud and Fog Precipitation of China. Beijing: Science Press-1965:30-40.
- [19] 吴兑,邓雪娇,毛节泰,等.南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究.气象学报,2007,65(3):406-415.
Wu D, Deng X J, Mao J T, et al. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 65(3): 406-415.
- [20] 银燕,陈晨,陈魁,等.黄山大气气溶胶微观特性的观测研究.大气科学学报,2010,33(2):129-136.

- Yin Y, Chen C, Chen K, et al. An observational study of the Microphysical properties of atmospheric aerosol at Mt. Huang. *Trans Atmos Sci*, 2010, 33(2): 129-136.
- [21] 郭丽君, 郭学良, 楼小凤, 等. 庐山云雾及降水的日、季节变化和宏微观物理特征观测研究. *气象学报*, 2019, 77(5): 923-937.
- Guo L J, Guo X L, Lou X F, et al. An observational study of diurnal and seasonal variations, and macroscopic and microphysical properties of clouds and precipitation over Mount Lu, Jiangxi, China. *Acta Meteor Sinica*, 2019, 77(5): 923-937.
- [22] 党张利, 桑建人, 常倬林, 等. 六盘山两次大雾过程宏微观物理特征分析. *宁夏工程技术*, 2020, 19(3): 200-204; 210.
- Dang Z L, Sang J R, Chang Z L, et al. Analysis of macro and microphysical characteristics of two heavy fog in Liupan Mountain Area. *Ningxia Eng Tech*, 2020, 19(3): 200-204; 210.
- [23] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. *气象学报*, 2004, 62(4): 476-485.
- Wu D, Deng X J, Ye Y X, et al. The study on fog-water chemical composition in Dayaoshan of Nanling Mountain. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 62(4): 476-485.
- [24] Rosenfeld D, Dai J, Yu X, et al. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation. *Science*, 2007, 315(5817): 1396-1398.
- [25] 程鹏, 罗汉, 常祎, 等. 祁连山一次地形云降水微物理特征飞机观测. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 691-705.
- Cheng P, Luo H, Chang Y, et al. Aircraft measurement of microphysical characteristics of a topographic cloud precipitation in Qilian Mountains. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 691-705.
- [26] 常祎, 郭学良, 唐洁, 等. 青藏高原夏季对流云微物理特征和降水形成机制. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 720-734.
- Chang Y, Guo X L, Tang J, et al. Microphysical characteristics and precipitation formation mechanisms of convective clouds over the Tibetan Plateau. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(6): 720-734.
- [27] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [28] Takenaka H, Sakashita T, Higuchi A, et al. Development of geolocation correction for geostationary satellite observation by phase only correlation method using visible channel. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2472.
- [29] Yamamoto Y, Ichii K, Higuchi A, et al. Geolocation accuracy assessment of Himawari-8/AHI imagery for application to terrestrial monitoring. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1372.
- [30] 史晓丁, 伍波, 樊冬. 基于前向 Mie 散射的激光雾滴谱仪. *激光杂志*, 2020, 41(4): 116-119.
- Shi X D, Wu B, Fan D. Laser fog droplet spectrometer based on forward Mie scattering. *Laser J*, 2020, 41(4): 116-119.
- [31] 国家气象中心. 雾的预报等级 GB/T 27964—2011. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- National Meteorological Centre. Grade of Fog Forecast GB/T 27964—2011. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [32] 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等. 基于葵花 8 号新一代静止气象卫星的夜间雾识别. *高原气象*, 2018, 37(6): 1749-1764.
- Wang H B, Zhang Z W, Liu D Y, et al. Detection of fog at night by using the new geostationary satellite Himawari-8. *Plateau Meteor*, 2018, 37(6): 1749-1764.
- [33] 王庆, 李季, 樊明月, 等. 济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征. *气象*, 2019, 45(9): 1299-1309.
- Wang Q, Li J, Fan M Y, et al. Microphysical structure and evolution characteristics of an advection-radiation fog event in Jinan. *Meteor Mon*, 2019, 45(9): 1299-1309.
- [34] 张浩, 石春娥, 杨军, 等. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系. *大气科学*, 2021, 45(6): 1217-1231.
- Zhang H, Shi C E, Yang J, et al. Microphysical characteristics of fog with difference intensities and their relationship with visibility in Shouxian County. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(6): 1217-1231.
- [35] 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. *气象学报*, 2009, 67(1): 147-157.
- Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006. *Acta Meteor Sinica*, 2009, 67(1): 147-157.
- [36] 张伟, 陈德花, 胡雅君, 等. 闽南沿海一次春季海雾过程微物理特征分析. *气象*, 2021, 47(2): 157-169.
- Zhang W, Chen D H, Hu Y J, et al. Microphysical structure analysis of a spring sea fog event in southern coastal area of Fujian. *Meteor Mon*, 2021, 47(2): 157-169.

Macro and Micro Characteristics of a Fog Process in Changbai Mountain in Summer

Wang Yufei¹⁾²⁾ Qi Yanbin¹⁾²⁾ Li Qian³⁾ Li Jian⁴⁾

¹⁾ (Jilin Provincial Technology Center for Meteorological Disaster Prevention, Changchun 130062)

²⁾ (Joint Open Laboratory for Weather Modification of Jilin Provincial People's Government, China Meteorological Administration, Changchun 130062)

³⁾ (Changchun Meteorological Service of Jilin Province, Changchun 130012)

⁴⁾ (College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026)

Abstract

In the summer of 2021, the fog droplet spectrum observation is carried out on the main peak of Changbai Mountain for the first time. From 31 July to 1 August, there is a fog process that lasts for 19 hours, and the minimum visibility in the extremely dense fog stage is less than 100 m. Using the observations of laser fog droplet spectrometer, combined with the ground automatic weather station, GPS balloon sounding, Himawari-8 satellite and ERA5 data, the macro and micro physical characteristics of the fog are studied, the causes of the fog are discussed, and the microphysical characteristics evolutions of the extremely dense fog period are analyzed.

The results show that the fog process lasts for a long duration with occasional short dissipation, and during the process the ambient wind speed is high, the visibility is low, the number concentration of the droplets is low, with small effective diameter and low liquid water content. The wind speed is always high in the period of extremely dense fog, which is significantly different from that of plain fog. In the early stage the fog is arisen from windward slope, which is a typical topographical cloud and fog on the main peak of Changbai Mountain in summer. It is formed by the continuous southwest warm and humid airflow climbing along the terrain under the condition of stable temperature inversion stratification. While the latter process of the fog is generated by the advection to the main peak of Changbai Mountain. The temporary dissipation of fog is related to the intensity and movement of the jet core at 700 hPa. The average effective diameter of fog droplets is $5.7 \mu\text{m}$, the average number concentration is 246.4 cm^{-3} , and the average liquid water content is $0.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. The microphysical characteristics are similar to those of sea fog.

For the extremely dense fog, the minimum visibility is less than 100 m. The extremely dense fog is characterized by explosive enhancement. Due to the rapid expansion of the droplets through the turbulent collision process, a single peak structure is formed. The peak diameter of the droplet particles is $6.0 \mu\text{m}$, which has a significant contribution to the formation of the summer fog on the main peak of Changbai Mountain. In the formation, development and weakening stages of the extremely dense fog, the changes of droplet number concentration, liquid water content and effective diameter have a good corresponding relationship, but it is not obvious in the mature stage.

Key words: Changbai Mountain; fog droplet spectrum; fog evolution characteristics; microphysical structure; mountain fog