

文章编号: 2096-1618(2023)05-0595-07

# 六盘山春季雾微物理特征分析

余杰<sup>1,2</sup>, 舒志亮<sup>1,3,4</sup>, 林彤<sup>3,4</sup>, 杨玲<sup>1,2</sup>, 郭在华<sup>1,2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610072; 3. 宁夏气象灾害防御技术中心, 宁夏 银川 750002; 4. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002)

**摘要:**为探究六盘山春季雾的主要类型、形成原因以及微物理结构特征,利用2021年3–5月的12次雾滴谱资料、自动气象观测站资料和ERA5再分析资料,结合相关性分析和线性回归的方法,分析六盘山春季雾期间的天气背景、雾类型以及微物理结构特征,并与其他地区雾针对微物理特征进行对比。研究结果表明:六盘山春季雾主要是由暖湿气流影响导致的辐射–平流混合雾,12次个例雾的粒子浓度平均值为 $264 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最小值为 $108 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,平均直径为 $8 \mu\text{m}$ ,液态水含量平均为 $0.059 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。从4月18日的个例中发现,雾滴谱呈Deirmendjian分布,雾滴集中在约 $6 \mu\text{m}$ 的小滴段。与其他山区相比,六盘山雾滴平均粒子数浓度偏低,与南岭山地相近,其平均粒子直径与庐山、衡山接近;六盘山雾平均液态含水量相较于其他山区整体偏低。不同地理条件下,发现沿海地区海雾的粒子数浓度较山地雾微物理参数整体偏低。

**关键词:**雾滴谱;六盘山;春季雾;微物理特征

**中图分类号:**P426.4

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.015

## 0 引言

雾一般是在水汽充足、风速较小及大气相对稳定的条件下,相对湿度接近100%时,空气中的水汽液化成细微水珠或凝华成冰晶所组成。按照能见度的不同,可将雾分为强浓雾、浓雾、大雾和雾,其对应的能见度距离分别为小于50 m、50~200 m、200~500 m及500~1000 m;按照雾的形成机理可将雾分为辐射雾、平流雾、混合雾、蒸发雾等;按照地形条件可将雾分为高山雾、城市雾及海雾<sup>[1]</sup>。对雾的研究历史悠久,1917年Taylor<sup>[2]</sup>通过对雾的野外实验研究得出雾形成的必要条件。从20世纪50年代起中国对雾过程开始长期系统的观测,云降水物理的发展和人工消雾的需求推动了雾的宏微观结构观测,也为雾预报技术的发展奠定了基础<sup>[3]</sup>,张舒婷等<sup>[4–7]</sup>先后对雾的形成及宏微观物理结构进行研究,得到不同地区不同类型雾在生消过程中宏微观物理结构的变化特征,取得了丰富的研究成果。

六盘山为南北走向山脉,主峰海拔2942 m,东坡陡峭,西坡缓和,水汽条件充沛,年平均相对湿度69%,年平均雾日数154.3 d,水汽、对流、扩散、催化环境条件得天独厚,是研究地形云(雾)的天然实验室。开展六盘山山地雾以及云雾微物理结构特征研究,可为六盘山区山地雾预报、人工消雾以及人工增雨等提供科技支撑,对

有效防御雾害和开发云水资源有重要作用。本文对六盘山春季雾进行观测分析,探究六盘山春季雾的主要类型、形成原因以及微物理结构特征,揭示六盘山在雾多发季节(春季)的雾滴谱特征以及演变规律。

## 1 资料与方法

对雾的观测和研究的方法主要有宏微观物理结构观测实验<sup>[8–9]</sup>,统计分析及个例研究<sup>[10–12]</sup>和数值模拟研究<sup>[13–14]</sup>,本文主要使用观测实验和统计分析的方法,对宁夏六盘山国家基准气候站2021年春季(3–5月)12次雾过程进行研究。宁夏六盘山国家基准气候站经度 $106.2^\circ \text{E}$ ,纬度 $35.67^\circ \text{N}$ ,海拔2842 m,有30年以上连续气象资料,数据可靠,资料序列完整,为本文提供了风、温度、湿度、气压以及能见度数据,时间分辨率为1 min。雾的观测主要用美国DMT公司研发的FM120型雾滴谱仪开展,可以实时对粒径 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 分30个通道进行连续观测,时间分辨率为1 s(表1)

表1 观测仪器介绍

仪器名称	观测要素	分辨率	观测频率
FM-120 雾滴谱仪 (美国 DMT)	雾滴数浓度 液态水含量 粒子直径	$1 \sim 10^4 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ $0.000001 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ $2 \sim 50 \mu\text{m}$	1 s
能见度仪 DNQ1 (中国华云)	水平能见度	10~50000 m	1 min
六要素自动气象 站 DDZ4	温度、气压、湿度、 风速、风向、降水	$0.1^\circ \text{C}$ 、 $0.1 \text{ hPa}$ 、1% $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3^\circ$ 、1 mm	1 min

收稿日期:2022-08-02

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03802)

通信作者:舒志亮. E-mail:8633204@163.com

由于六盘山山顶常年风速较大,有些雾过程的生产速度很快,甚至在气象要素还没有明显变化时,一次雾过程就结束了,为了避免此类情况,本文对雾过程进行了筛选,筛选标准为:持续时间3 h及以上且能见度低于200 m(浓雾及以上)。根据上述标准,2021年春季,共筛选12次雾过程。通过能见度确定雾的强度,以及分析不同强度雾过程的微物理特征,统计分析期间降水、风速、相对湿度等变化情况。

2 雾特征分析

2.1 微物理特征分析

表2为2021年春季12次雾过程的多参量数据,可看出雾过程平均持续时间为9 h,最长可达22 h,几乎所有雾过程均伴随有风速 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的风,并且风的持续时长基本与雾维持时长相当或略偏少,风止时间在雾结束时间之前,由此可以推断雾过程大多为暖平流辐射雾。在雾过程期间相对湿度都接近饱和,达到96%以上。雾过程与降水之间没有必然联系,12

次雾过程伴随降水7次,无降水5次,且降水维持时长与雾维持时长没有直接关系。雾滴最大直径均在 $23\text{ }\mu\text{m}$ 以上,平均值为 $33.7\text{ }\mu\text{m}$ ,最大值为 $45.8\text{ }\mu\text{m}$ 。平均粒子直径在 $4.3\sim12\text{ }\mu\text{m}$ ,平均为 $8.8\text{ }\mu\text{m}$ ,大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的过程有5次。12次过程的液态水含量变化很大,最大达 $0.137\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最小的仅为 $0.011\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最大值为最小值的12.3倍。粒子平均浓度变化同样较大,最大为 $430\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最小为 $108\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最大值为最小值的近4倍。进一步分析发现,当雾过程中有降水 and 无降水时,雾滴粒子微物理参量有显著不同。有降水时,雾滴平均液态水含量为 $0.083\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,粒子平均直径为 $10.38\text{ }\mu\text{m}$ ,粒子最大直径平均为 $39.33\text{ }\mu\text{m}$ ;无降水时,雾滴平均液态水含量为 $0.036\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,粒子平均直径为 $6.48\text{ }\mu\text{m}$ ,粒子最大直径平均为 $25.83\text{ }\mu\text{m}$ ,上述3个物理量有降水时是无降水时的2.3倍、1.6倍和1.5倍,差值分别为 $0.047\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $3.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $13.5\text{ }\mu\text{m}$ 。有降水时和无降水时的雾滴浓度数相当,分别为 $267\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $256\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,而且在有降水 and 无降水时均有大值和小值出现,由此可见,雾滴浓度与是否有降水关系不大。

表2 六盘山春季12次雾过程微物理特征及宏观特征

日期	雾维持 时长/h	降雨 时长/h	风速 $\geq 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时长/h	相对 湿度/%	最大 直径/ $\mu\text{m}$	平均 直径/ $\mu\text{m}$	液态水含量/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	粒子 浓度/( $\text{N}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
3月7-8日	13	6	9	96	27	11.9	0.064	108.34
3月10日	10	7	0	97	42.7	10.47	0.085	110.027
3月25日	7.3	2	7	98	36.4	7.3	0.056	377.500
3月30-31日	22	12	16	99	45.8	11.4	0.137	428.018
4月13日	5	5	5	97	36.8	8.9	0.061	196.619
4月18日	10	0	10	98	26.6	6.9	0.029	175.495
4月20日	18	0	15	98	26.7	6.8	0.061	430.444
4月22日	4	0	2	98	19.8	7.4	0.057	253.722
5月2日	5	4	4	98	45.5	11.3	0.122	285.954
5月13日	5	0	5	98	33	7.1	0.026	275.150
5月19日	6.5	6	3.5	98	41	11.4	0.054	364.685
5月21日	3	0	3	98	23	4.3	0.011	147.58

2.2 对比分析

在同样的山地地形条件下,六盘山区与其他山区进行对比(表3)。六盘山的平均粒子数浓度相较于黄山<sup>[15]</sup>、衡山<sup>[16]</sup>、庐山<sup>[16]</sup>和泰山<sup>[17]</sup>偏低,与南岭山地<sup>[18]</sup>相近,其中泰山的粒子数浓度普遍居高。平均液态含水量比较,六盘山雾相较于其他山区整体偏低,其中庐山的平均液态含水量最大。对于平均粒子直径,六盘山区与庐山、衡山的结果接近,黄山山区雾的平均

粒子直径整体最低。山地地区的高山雾与舟山海域<sup>[14]</sup>、厦门海岸<sup>[19]</sup>、湛江<sup>[4]</sup>、茂名<sup>[20]</sup>的海雾比较可发现,沿海地区中海雾的粒子数浓度较山地地区的雾数值整体偏低。除舟山海域外,茂名、湛江、厦门地区的海雾的平均粒子数浓度较山地雾整体偏小。整体来看,山地雾以较大雾滴( $\sim10\text{ }\mu\text{m}$ )为主,而海雾以较小雾滴( $<10\text{ }\mu\text{m}$ )为主。该结果与张璐瑶<sup>[1]</sup>的结论一致。

表 3 六盘山与其他地区雾微物理参数对比表

观测地点	观测时间	最大直径/ $\mu\text{m}$	平均直径/ $\mu\text{m}$	平均含水量/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	平均粒子浓度/ $\text{N} \cdot \text{cm}^{-3}$
六盘山	2021 年 3 月 7-8 日	27	11.9	0.0643	108.3
	2021 年 4 月 18 日	26.61	6.9	0.0285	175.5
	2021 年 4 月 22 日	19.80	7.4	0.0569	253.7
	2021 年 5 月 2 日	45.56	11.3	0.1218	285.9
	2021 年 5 月 19 日	41	11.4	0.0541	364.7
黄山 <sup>[15]</sup>	2008 年 4-7 月	—	5.58	0.23	420.1
	2009 年 5-8 月	—	4.3	0.21	578.4
	2011 年 5-9 月	—	3.9	0.072	252.1
衡山 <sup>[16]</sup>	1962 年 5 月	58.0	12.1	0.40	359.3
庐山 <sup>[16]</sup>	1981 年 1-4 月	54.0	11.7	0.66	395.5
泰山 <sup>[17]</sup>	1981 年 2-4 月	—	11.7	0.66	453.5
南岭山地 <sup>[18]</sup>	2001 年 2 月 24-28 日	—	8.2	0.155	191.4
	2001 年 3 月 7-8 日	—	7.2	0.140	201.7
舟山海域 <sup>[14]</sup>	1985 年 4 月 21-22 日	50.86	24.08	0.151	43.1
	1985 年 5 月 6 日	55.88	17.79	0.082	53.5
	1985 年 5 月 12 日	84.42	18.85	0.086	25.2
	1985 年 5 月 19 日	52.95	22.88	0.134	35
厦门海岸 <sup>[19]</sup>	2013 年 4 月 17 日	48.48	9.12	0.178	121.8
湛江地区 <sup>[4]</sup>	2010 年 3 月 22-23 日	17	4.2	0.013	39.6
茂名地区 <sup>[20]</sup>	2008 年 3 月 16-19 日	—	3.6	0.032	206.3

3 典型个例分析

为分析雾过程中微物理参数、气象要素以及能见度随着雾生消过程的变化,特选取一次雾过程进行个例分析。为避免降水对气象要素及能见度的影响,选取一次无降水,且雾维持比较稳定的过程进行分析。2021 年 4 月 18 日 00:00-10:00 维持时长10 h,且无降水的一次雾过程符合上述条件,将其作为个例分析的对象。

3.1 天气过程分析

六盘山气象站大气压基本在 720 hPa 左右,利用

ERA5 再分析资料分析六盘山站800 hPa以上高度的温度和相对湿度的垂直结构,结果如图 1 所示。4 月 18 日 00:00 低层相对湿度已达到 95%,且在 775 hPa 附近出现逆温层,考虑凌晨大地辐射降温,使山地地面温度下降,这为雾天气提供相对稳定的环境条件。775 hPa 附近的逆温层在之后稳定维持至 03:00,此时相对湿度为 88%。03:00 后层结开始逐渐不稳定,于 08:00 逆温层完全消失,此时相对湿度为 73%,雾已开始逐渐消散,于 10:00 雾过程结束。

由图 2 可知雾过程中的水汽条件由来自南风补给,至 03:00,风速开始逐渐减弱,水汽补充减少。至 11:30 六盘山站点风速降至近  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,雾过程趋近结束。

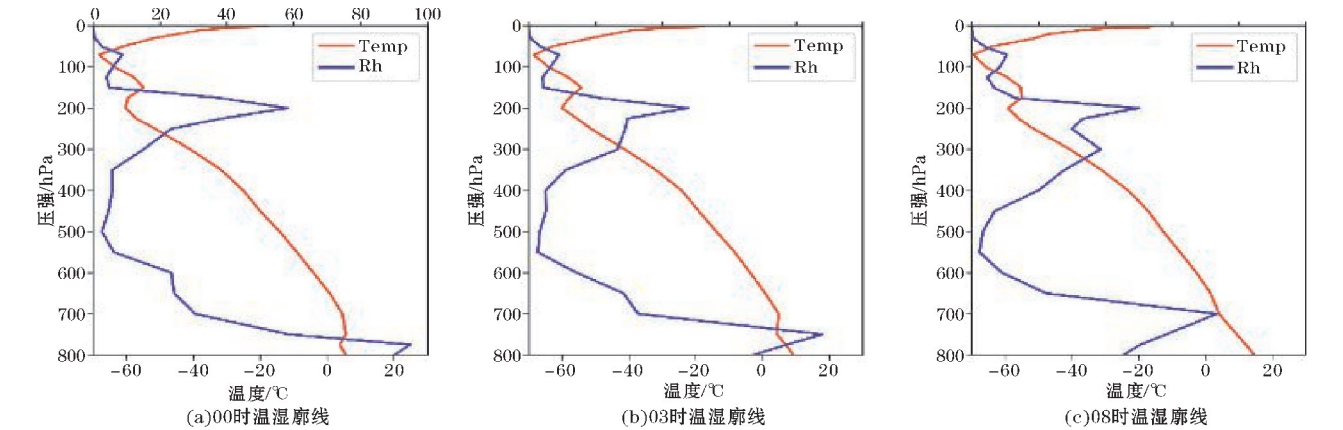
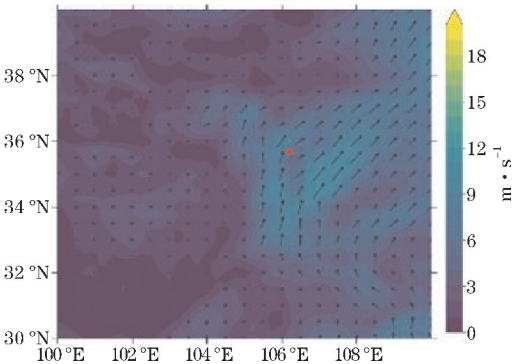
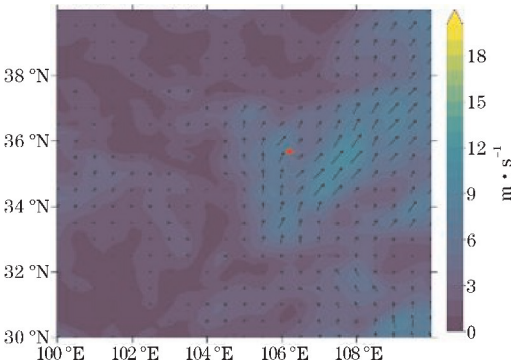


图 1 2021 年 4 月 18 日六盘山站温度和相对湿度的垂直分布





(a) 00 时 775 hPa 风场



(b) 03 时 775 hPa 风场

图2 2021年4月18日六盘山站775 hPa风场(\*号代表站点位置)

3.2 气象要素特征分析

从能见度分析可得(图3),17日20:00–18日00:39属于雾过程的发生发展阶段,能见度从5000 m以上迅速下降至200 m以下,4月18日00:40–09:36为雾的维持阶段,能见度始终维持在110 m左右,4月18日09:37–12:00为雾的消散阶段,能见度迅速升高到2000 m以上。

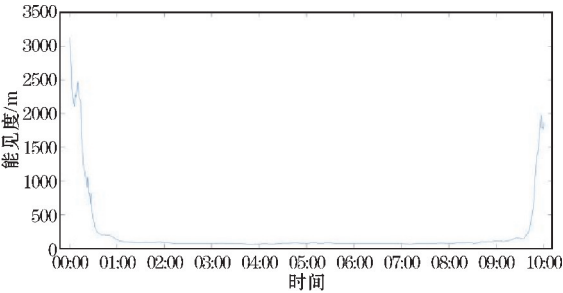


图3 4月17–18日浓雾过程能见度变化时序图

如图4所示,4月17日20:00–23:00,雾发生的初期阶段,温度基本保持在1.9℃左右,20:42和21:24两个时刻出现了两次低值,分别为0.4℃和1.1℃;湿度整体呈快速上升趋势,从20:00的55%到23:00升到90%以上,在温度出现低值的20:42和21:24两个时次,湿度也相应地出现两次低值,分别为55%、

65%;风速在20:00–21:00基本保持 $6.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,21:00–22:30下降至 $5.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,22:30–23:00快速升高到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。气温在20:00–23:00没有下降,说明有空中暖平流带来的外部热量补充,同时雾发生期间,平均风速基本保持 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,由此判断此次雾为平流辐射雾。

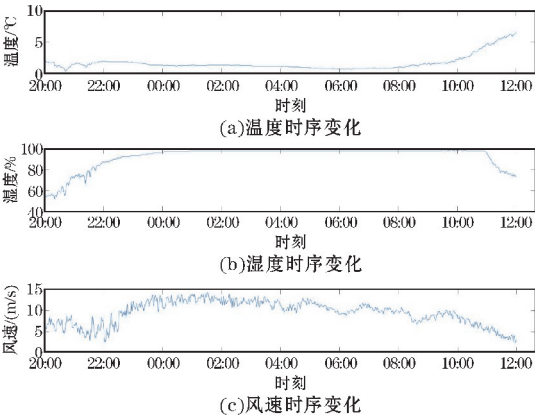


图4 气象要素变化曲线

在4月18日00:40–09:36雾的维持阶段,温度先降后升,但变化幅度很小,在1.0℃以内;相对湿度基本保持在98%左右;风速基本维持在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,风速在18日04:40之前维持在 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,之后呈下降趋势,但整体维持在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。4月18日09:37–12:00,温度快速升高,湿度显著下降,风速稳定减缓,平流雾产生条件无法继续维持,导致雾逐渐消散;具体上温度于18日06:27开始增温,到12:00温度增加了5.9℃;相对湿度于10:55开始快速下降,于12:00降至74%;风速于09:52起保持下降,最后至12:00降至 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.3 微物理特征分析

图5为经滑动平均后雾滴粒子数浓度、液态水含量以及有效粒子直径时序变化图。在整个过程中,雾滴的粒子浓度从00:33开始剧增,01:06达到最高值 $451\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,印证了雾发生前期往往具有爆发性的特征<sup>[21]</sup>,同时液态水含量开始增加至 $0.039\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,且液态水含量与粒子浓度呈现良好的线性相关。粒子有效直径达到 $5.73\text{ }\mu\text{m}$ 。此阶段为核化和凝结增长起主要作用,之后粒子浓度开始缓慢下降,02:30–08:32处于稳定状态,浓度稳定在 $200\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右,液态水含量变化不大,均值为 $0.035\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,该阶段雾逐渐演变为成熟阶段,有效粒子直径在此期间达到最大值 $9.35\text{ }\mu\text{m}$ ;08:32粒子浓度和液态水含量同时下降,雾开始消散,1 h后粒子浓度低于 $5\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,液态水含量

接近 $0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,有效粒子直径  $10:00$  低于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。整个雾过程的粒子平均浓度为 $196\text{ N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均液态水含量为 $0.028\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均粒子有效直径为 $8.9\text{ }\mu\text{m}$ 。由于雾的粒子浓度不高,液态水含量不高,大滴粒子稀少,不利于向强浓雾发展。

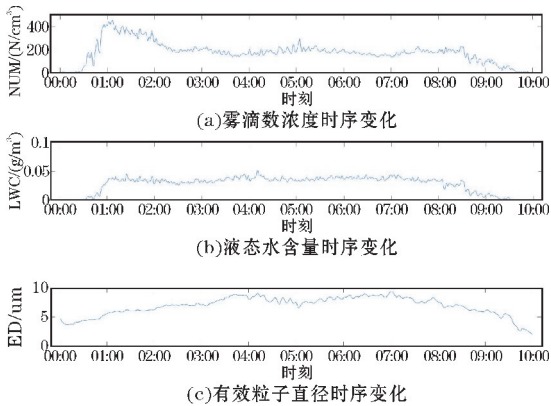


图 5 雾过程微物理参量时间演变图

此次雾过程中,雾滴谱的粒子分布发生一些改变。如图 6 所示,纵坐标为将  $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  分成的 30 通道,其中  $2\sim 14\text{ }\mu\text{m}$  每  $1\text{ }\mu\text{m}$  分为一个通道,其他的粒径每  $2\text{ }\mu\text{m}$  分为一个通道。雾滴谱时序变化图显示,00:25 之前雾滴谱段短且仅在  $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$  分布。00:30 雾滴谱开始拓展,且粒子浓度开始迅速增加,01:06 达到粒子浓度最大值,且粒径集中在  $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 。随着时间推移,雾滴谱的宽度仍在拓展,最大宽度拓展到  $14\text{ }\mu\text{m}$  的宽度,同时  $3\sim 6\text{ }\mu\text{m}$  粒子浓度也随时间推进逐渐降低,这是由于雾发展后期主要是以碰并、凝结过程为主,小液滴凝结增长形成了大液滴<sup>[22]</sup>。08:00 雾滴谱宽度开始持续变窄,期间直径  $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$  的粒子浓度有暂时性的提高后又逐渐消散,是由于大液滴蒸发,缩小为小液滴。最终雾滴谱演变结果回到 00:01 的状态。

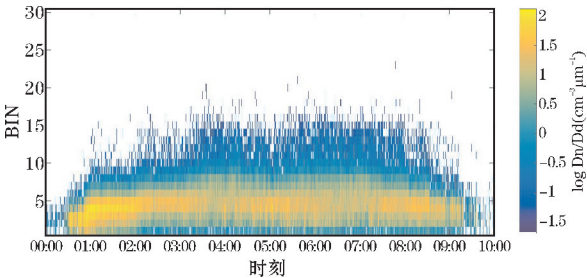


图 6 雾滴谱时序变化图

3.4 雾滴谱分布的拟合曲线

图 7 为全过程平均雾滴谱分布曲线,可以看出该曲线符合 Deirmendjian 分布:

$$n(D)=aD^{\alpha}\exp(-bD^{\beta})$$
式中: $D$  为平均粒子直径, $n(D)$  为粒子数密度, $a,b,\alpha,\beta$  均为参数,拟合值  $a=1314202.0908$ , $b=15.9063$ , $\alpha=14.6972$ , $\beta=0.4566$ 。实测值(实线)与拟合值(虚线)曲线比较接近,拟合优度  $R^2$  达到 0.7,表明该雾滴直径分布函数能很好反映出此次雾过程平均微物理结构特征。从图 7 可看出,在雾滴直径为  $5\text{ }\mu\text{m}$  时,其值达到峰值,其后随着雾滴直径增大,谱线呈指数形式下降,谱分布趋向于粒子直径小的一端,其粒径小于  $5\text{ }\mu\text{m}$  的占 45%,小于  $7\text{ }\mu\text{m}$  的占 87%。

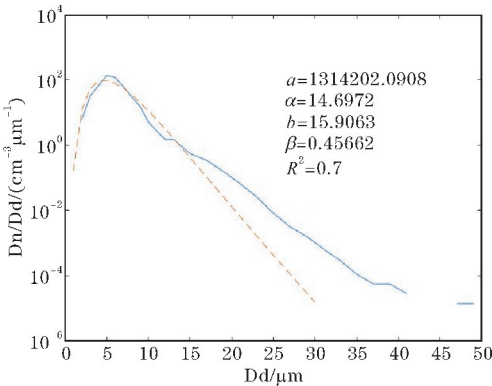


图 7 平均雾滴谱图以及对应的拟合曲线

图 8 为此次雾过程在发生发展、维持和消散 3 个阶段的雾滴谱特征,从图可见 3 个阶段的滴谱曲线都满足 Deirmendjian 分布,呈现单峰性。第 1 阶段(发生发展阶段)的雾滴谱曲线十分集中,主要处于  $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ ;到第 2 阶段(维持阶段),雾滴谱曲线向右拓展宽度,向上抬升高度,谱峰顶向右上偏移,峰顶高度处于  $6\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ ;到第 3 阶段(消散阶段),雾滴谱曲线向左收缩,降低高度,谱峰顶向左下偏移,峰顶位于  $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 。在第 2 阶段和第 3 阶段同时出现了间断大滴谱,考虑是由于在第 2 阶段,雾滴产生一定的碰并增长,使雾滴出现不连续的增长;在第 3 阶段,雾开始消退,大液滴蒸发缩小,出现滴谱的断带。

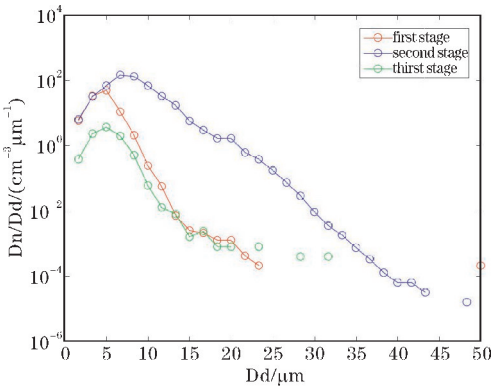


图 8 不同阶段的雾滴谱

## 4 结论

(1)六盘山春季雾过程,多数是受暖湿气流导致的暖平流辐射混合雾,雾过程中伴随着风的运动,风速最大可达 $12.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,持续的风为维持雾过程带来充足的水汽,六盘山顶创造了低温条件,造成雾的发生。

(2)与其他山区相比,六盘山雾滴平均粒子数浓度偏低,与南岭山地相近,其平均粒子直径与庐山、衡山接近;六盘山雾平均液态含水量相较于其他山区整体偏低。沿海地区海雾的粒子数浓度较山地雾微物理参数整体偏低。

(3)六盘山春季雾粒子浓度最大值为 $430 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,平均值为 $264 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最小值为 $108 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;平均直径最大值为 $11.99 \mu\text{m}$ ,平均值为 $8 \mu\text{m}$ ,最小值为 $4.26 \mu\text{m}$ ;液态水含量最大值为 $0.137 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,平均值为 $0.059 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最小值为 $0.011 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。有雨雾过程的微物理结构参数均大于无雨雾过程,其中平均液态水含量的差异最大,相对变化量达到126%。

(4)在2021年4月18日的个例中,推断出该雾的性质为暖平流辐射雾,平均粒子浓度为 $196 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,粒子平均直径为 $8.9 \mu\text{m}$ ,平均液态含水量为 $0.028 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,且雾滴谱的结构呈现 Deirmendjian 分布,谱线呈指数下降,雾滴普遍集中在小滴段。

## 参考文献:

- [1] 张璐瑶. 城市雾、高山雾与海雾微物理特征及能见度参数化方案对比研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2020.
- [2] Taylor G I. The formation of fog and mist[J]. Quart J Roy Met Soc,1917,43:241-268.
- [3] 冯蕾,田华. 国内外雾预报技术研究进展[J]. 南京信息工程大学学报,2014,6(1):74-81.
- [4] 张舒婷,牛生杰,赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析[J]. 大气科学,2013,37(3):552-562.
- [5] 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[J]. 气象,2019,45(9):1299-1309.
- [6] 张悦,樊曙先,张舒婷,等. 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,2015,31(3):385-394.
- [7] 刘端阳. 南京冬季雾宏微观物理结构的观测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
- [8] 李子华,吴君. 重庆市区冬季雾滴谱特征[J]. 南京气象学院学报,1995(1):46-51.
- [9] 尹志聪,王会军,郭文利. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征[J]. 中国科学:地球科学,2015,45(5):649-655.
- [10] 甄晓菊,吴国明,杨晓亮. 一次浓雾过程的观测分析[J]. 黑龙江气象,2019,36(2):6-8.
- [11] 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[J]. 气象,2021,47(2):157-169.
- [12] 刘端阳,濮梅娟,杨军,等. 2006年12月南京连续4天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报,2009,67(1):147-157.
- [13] 崔驰潇,包云轩,袁成松,等. 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,2018,42(6):1344-1362.
- [14] 杨中秋,许绍祖,耿骝. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构[J]. 海洋学报,1989(4):431-438.
- [15] 芮雪,陆春松,朱磊,等. 2022. 云微物理过程对黄山云滴谱离散度的影响[J]. 大气科学学报,45(4):630-640.
- [16] 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[J]. 气象学报,2007(3):406-415.
- [17] 王羽飞,齐彦斌,李倩,等. 一次长白山夏季雾的宏微观特征. 应气象学报,2022,33(4):442-453.
- [18] 唐浩华,范绍佳,吴兑,等. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. 中山大学学报,2002(4):92-96.
- [19] 张曦,牛生杰,魏锦成,等. 厦门春季海雾天气分类及典型个例宏微观结构分析[J]. 气象科学,2016,36(1):121-127.
- [20] 黄辉军,黄健,刘春霞,等. 茂名地区海雾的微物理结构特征[J]. 海洋学报,2009,31(2):17-23.
- [21] 濮梅娟,严文莲,商兆堂,等. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象,2008(5):1111-1118.
- [22] 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.

## Observation and Analysis of Spring Fog Process in Liupan Mountain

YU Jie<sup>1,2</sup>, SHU Zhiliang<sup>1,3,4</sup>, LIN Tong<sup>3,4</sup>, YANG Ling<sup>1,2</sup>, GUO Zaihua<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, China; 3. Ningxia Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Yinchuan 750002, China; 4. Key Laboratory of Meteorological Disaster Monitoring, Warning and Risk Management in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** To explore the main types, causes and microphysical structure characteristics of spring fog in Liupan Mountain, this paper analyzes the weather background, fog types and microphysical structure characteristics of spring fog in Liupan Mountain by using fog drop spectrum data, automatic meteorological observation station data and ERA5 reanalysis data of 12 fog cases from March to May 2021, combined with the methods of correlation analysis and linear regression, and compared with the microphysical characteristics of fog in other regions. The results show that the spring fog in Liupan Mountain is mainly the radiation advection mixed fog caused by the influence of warm moisture flow. The average particle concentration of 12 fog cases is  $264 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ , the minimum is  $108 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$ , and the average diameter is  $8 \mu\text{m}$ . The average liquid water content is  $0.059 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . From the case on April 18, it is found that the droplet spectrum is Deirmendjian distribution, and the drop size of droplets is concentrated in about  $6 \mu\text{m}$ . Compared with other mountains, the average particle number concentration of fog droplets in Liupan Mountain is lower, similar to that in Nanling Mountain, and the average particle diameter is similar to that in Lushan Mountain and Hengshan Mountain; the average liquid water content of fog in Liupan Mountain is lower than that in other mountain areas. Under different geographical conditions, it is found that the microphysical parameters of sea fog in coastal areas are lower than those of mountain fog.

**Keywords:** fog drop spectrum; Liupan Mountain; spring mist; microphysical characteristics