

庐山两次冷雾过程宏微观物理特征

王天舒^{1,2} 牛生杰^{3,4} 王莹⁵ 赵俊杰^{6,7} 梁绵⁸ 王元⁹ 樊栋樞¹ 杨霏云¹
王涛¹⁰ 张鸿伟¹¹ 袁薇¹

- 1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081
- 2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210041
- 3 南京工业大学 安全科学与工程学院, 南京 211816
- 4 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044
- 5 天津市气象台, 天津 300074
- 6 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081
- 7 山西省气象灾害防御技术中心, 太原 030032
- 8 陕西省气象台, 西安 710014
- 9 兰州大学 西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000
- 10 中国环境科学研究院, 北京 100012
- 11 河南省气象探测数据中心, 郑州 450003

摘要 为研究冷雾演变机制和宏微观物理特征, 2016年1月和12月在江西省庐山气象局布设雾滴谱仪和自动气象站进行雾综合观测, 结合观测获取的资料和NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料, 分析了2016年1月16-17日(个例1)、2016年12月25-27日(个例2)两次冷雾的宏微观结构。结果表明, 两次冷雾的发展演变与冷锋的移动密切相关, 从形成阶段到发展阶段800 hPa以下由西南风转为偏北风, 冷锋前缘到达, 近地面气温骤降; 两次冷雾的成熟阶段近地面雨停且风力减弱, 个例2出现锋面逆温层; 两次冷雾的消散阶段900~500 hPa转为一致的偏北气流, 800 hPa以下风速增大。个例1和2的过程平均雾滴谱均呈双峰分布, 主峰均位于4.9 μm , 次峰分别位于8.9、11.0 μm 。个例1和2均出现了主峰位于10~14 μm 的瞬时雾滴谱, 出现频率分别为12.4%和46.3%。个例1和2中均有暖雾向冷雾的转换, 冷雾与暖雾相比各粒径段雾滴数密度均有所上升, 尤其是粒径14 μm 以下的雾滴数量增长较为明显。个例1全过程雾滴数浓度与平均直径的相关性较弱, 可能受雾滴碰并、雾滴竞争水汽等因素影响。个例2全过程雾滴数浓度、平均直径与含水量均为正相关关系, 说明

收稿日期 2023-05-04; 网络预出版日期 2023-00-00

作者简介 王天舒, 1992 年出生, 女, 博士, 高工, 主要从事云雾降水物理研究。E-mail: wangts9220@163.com

资助项目 中国气象局气象干部培训学院青年项目 2022CMATCQN04, 中国气象局气象干部培训学院重大项目 2023CMATCZDA02, 国家自然科学基金面上项目 42075063, 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室开放课题 2020Z00725, 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 2023YSKY-42, 国家自然科学基金青年科学基金项目 42205072, 陕西省自然科学基础研究计划项目 2022JQ-249

Funded by Project of China Meteorological Administration Training Center (Grant 2022CMATCQN04), Project of China Meteorological Administration Training Center (Grant 2023CMATCZDA02), National Natural Science Foundation of China (Grant 42075063), Open Project of China Meteorological Administration Cloud Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory (Grant 2020Z00725), the Fundamental Research Funds for the Central Public-interest Scientific Institution (Grant 2023YSKY-42), National Natural Science Foundation of China (Grant 42205072), Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (Grant 2022JQ-249)

31 此次雾过程以凝结核活化和凝结增长为主。个例2西南低空急流强劲、近地面降温明显、有逆温
 32 层存在，雾滴谱较宽，雾滴谱10到14 μm 粒径之间峰值更为突出，雾滴数浓度、平均直径、含水
 33 量皆大于个例1。

34
 35 **关键词** 冷雾；庐山；锋面逆温；尺度谱分布

寒
科

风
涉

大
科

稿
刊

收稿日期 2023-05-04；网络预出版日期 2023-06-00

作者简介 王天舒，1992 年出生，女，博士，高工，主要从事云雾降水物理研究。E-mail:
 wangts9220@163.com

资助项目 中国气象局气象干部培训学院青年项目 2022CMATCQN04，中国气象局气象干部培训学院重大项目 2023CMATCZDA02，国家自然科学基金面上项目 42075063，中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室开放课题 2020Z00725，中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 2023YSKY-42，国家自然科学基金青年科学基金项目 42205072，陕西省自然科学基础研究计划项目 2022JQ-249

Funded by Project of China Meteorological Administration Training Center (Grant 2022CMATCQN04), Project of China Meteorological Administration Training Center (Grant 2023CMATCZDA02), National Natural Science Foundation of China (Grant 42075063), Open Project of China Meteorological Administration Cloud Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory (Grant 2020Z00725), the Fundamental Research Funds for the Central Public-interest Scientific Institution (Grant 2023YSKY-42), National Natural Science Foundation of China (Grant 42205072), Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (Grant 2022JQ-249)

36

37 **Macroscopic and microscopic physical characteristics of two 38 supercooled fog processes in Lushan Mountain**

39 WANG Tianshu^{1,2}, NIU Shengjie^{3,4}, WANG Ying⁵, ZHAO Junjie^{6,7}, LIANG Mian⁸, WANG

40 Yuan⁹, FAN Dongliang¹, YANG Feiyun¹, WANG Tao¹⁰, ZHANG Hongwei¹¹, YUAN Wei¹

41 1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

42 2 Key Laboratory of Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing
43 210041

44 3 College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816

45 4 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing
46 University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

47 5 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

48 6 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, CMA Weather
49 Modification Center (WMC), Beijing 100081

50 7 Shanxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Taiyuan 030032

51 8 Meteorological Observatory of Shaanxi Province, Xi'an 710014

52 9 Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou
53 730000

54 10 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

55 11 Henan Meteorological Observation and Data Center, Zhengzhou 450003

56

57 **Abstract:** Comprehensive fog observation campaigns at Lushan Meteorological Bureau of Jiangxi
58 Province were conducted with a fog drop spectrometer and an automatic weather station in January
59 and December of 2016, respectively. This study investigated the physical characteristics (macro and
60 micro) of supercooled fog and elucidated its evolution mechanism. Combining observational data
61 with NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, the macro and micro physical characteristics of two supercooled
62 fogs cases (case 1 on January 16-17, 2016, while case 2 on December 25-27, 2016) were analyzed.
63 Our results revealed that the evolutions of the two supercooled fogs were strongly correlated with
64 the movement of cold front. From the formation stages to the development stages, the dominated
65 wind direction below 800 hPa changed from southwest to northerly, the front edge of the cold front
66 arrived at the study area, and the temperature near the surface decreased sharply in both cases. At
67 the mature stages of the two supercooled fogs, the rain stopped at the near-surface and the wind
68 force weakened, meanwhile, the front inversion layer appeared in case 2. During the dissipation
69 stages, the wind direction in 900-500 hPa changed into north in both cases and the wind speed below
70 800 hPa increased obviously. For micro characteristics, the average droplet spectra exhibited
71 bimodal distributions in both cases, with the main peaks at 4.9 μm . However, the secondary peaks
72 were at 8.9 and 11.0 μm in case 1 and case 2, respectively. Both cases presented instantaneous
73 droplet spectra with the main peaks between 10 to 14 μm , and the frequency were 12.4% and 46.3%
74 in case 1 and case 2, respectively. Both cases had a transition from warm fog to supercooled fog.

75 Compared with the warm fog, the number density of supercooled fog droplets in each size increased,
 76 especially for droplets with particle size below 14 μm . The correlation between fog droplet number
 77 concentration and average diameter in the whole process of case 1 was weak, which may be affected
 78 by factors such as fog droplet collision-coalescence and droplet competition for water vapor. Case
 79 2 showed positively correlation among the fog droplet number concentration, average diameter and
 80 water content in the whole process, which indicated that the fog process was dominated by
 81 condensation nuclei activation and condensation growth. The strong low-level jet in southwest, the
 82 obviously decreased temperature in near-surface, and the inversion layer were all found in case 2,
 83 resulting in the wider droplet spectrum, the more prominent peak between 10 and 14 μm particle
 84 sizes in droplet spectrum, moreover, higher values of number concentration, average diameter, and
 85 water content comparing with case 1.

86
 87 **Key words:** supercooled fog; Lushan Mountain; frontal inversion; scale spectrum distribution
 88
 89

90 冷雾为温度低于0℃的雾，其具有危害性，对生产生活造成不利的影响。冷雾会降低大气能
 91 见度，还能够导致公共设施（如电线、道路等）表面产生积冰，影响其正常使用，严重时造成汽
 92 车追尾、海上轮渡停航甚至相撞、电线舞动或断裂等现象（Gultepe et al., 2014; 李杰等, 2015）。

93 目前国外已经有了一些关于冷雾过程中宏观物理特征的报道。冷雾过程中的宏观物理特
 94 征包括冷雾的时空分布、冷雾发生时的气象条件和地形因素等。针对冷雾的时空分布特征，
 95 Bezrukova et al. (2006) 给出了1981-1990前苏联版图冷雾出现频率的空间分布；Leung et al. (2020)
 96 指出加拿大哈得逊湾区域近60年来冷雾呈现减少趋势。冷雾气象要素的变化同样受到学者的关
 97 注。Didenko et al. (1994)研究了水-气温差、水表扰动对北极地区蒸汽雾形成和发展的影响。Gultepe
 98 et al. (2016)对在瓦扎茨山脉观测到的冷雾进行了总结，指出其形成发展与逆温层的存在密切相关。
 99 Christopher et al. (2019)分析了格陵兰峰顶研究站2012至2014年冷雾滴谱及气象要素资料，冷雾期
 100 间平均云辐射强迫为26 W m^{-2} 。冷雾易出现于气温低、水汽充足的中高海拔山区，地形特征影响
 101 着冷雾的生消机制。若处于迎风坡，则上坡风快速增加过饱和度，促进云凝结核活化，提高了山
 102 顶雾的数浓度和含水量（Lohmann et al., 2016; Song et al., 2019; Ohashi and Suido, 2021）。若处于
 103 地形背风坡，则下沉运动使得近地层气温升高，形成的逆温层有利于近地层水汽聚积，对雾有明
 104 显的增幅作用（Prtenjak et al., 2018; Cuxart et al., 2021）。冷雾滴尺度谱分布的观测和模拟能够
 105 阐明其微观物理特征。Schmitt et al. (2013)对污染条件下冷雾的微物理特征进行了分析，采用
 106 gamma分布拟合了雾滴尺度分布，形状参数的取值在-0.5到-1.0之间。Zíková et al. (2020)、Wagh
 107 et al. (2021) 研究了冷雾中气溶胶粒子的尺度分布、成核温度和活化比例等。Girard and Blanchet
 108 (2001)、Girard et al. (2005)采用气候模式模拟了冷雾相态、雾滴粒径、雾滴浓度等，模拟结果与
 109 观测较为一致。Sokolov and Virk (2019)用实验室模拟研究了冷雾滴谱变化对雾滴冲击物体的速
 110 度、最大冲击角度等参数的影响。

111 国内对冷雾个例的研究还较少，已有的冷雾研究主要在贵州和湖北积冰区等地。罗宁等(2008)

利用贵州积冰区云滴谱及常规气象资料研究了积冰期间冷雾微物理特征，发现大滴是积冰增长的重要因素。贾然等（2010）、Zhou et al. (2013)用湖北恩施雷达站测得的雾滴谱、雨滴谱资料研究了冻毛毛雨对冷雾的影响。Niu et al. (2012)研究了恩施雷达站的冷雾积冰过程，指出雾含水量较高时对应冰厚增长速度较大，二者能够取得0.62的相关系数。冷雾宏微观物理参数的研究，对于浓雾低能见度天气（Niu et al., 2010; 张璐等, 2019; 张浩等, 2021）、电线积冰（Ducloux and Nygaard, 2018; Makkonen et al., 2018; He et al., 2019）和道路积冰（Toms et al., 2017）灾害的预报至关重要，因此还需要加强对我国不同地区冷雾的观测和研究，为我国浓雾和冰冻灾害预报提供支撑。

针对冷雾宏微观物理特征探索的迫切性，2016年1月和12月，研究团队在庐山开展雾观测试验，从中选取了两次典型冷雾个例。根据观测获取的雾滴谱及气象要素等资料，结合NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 逐6小时再分析资料，分析冷雾个例生消的宏微观物理过程，揭示冷雾的宏微观特征观测事实，推动冷雾微物理参数化的建立，以期提高冷雾和积冰灾害的预报。

1 观测地点和仪器

观测地点位于江西省庐山气象局（ 115.98°E , 29.58°N , 海拔1164.5 m）（图1）。庐山坐落于鄱阳湖（中国最大的淡水湖）与长江之间，水汽资源丰富，冬季冷空气活跃时常会形成云雾、冻雨和雪等天气。庐山气象局位于庐山牯岭正街气象局山的山巅，高山观测由于海拔高度的优势可以实现对自然云雾的直接观测（郭丽君等, 2019）。观测所用仪器见表1。雾滴谱仪在雾出现时打开，其他仪器均为连续监测。冰冻天气中持续关注雾滴谱及旋桨风速计的工作状态，对其进行及时除冰。从2016年1月和12月的观测中选取了1月16-17日（个例1）、12月25-27日（个例2）两次典型冷雾过程进行分析。个例1和2均有气温略低于 0°C 的时段，过程最低气温分别为-0.5和-2.4 $^{\circ}\text{C}$ ，因此判断两次雾为冷雾。个例1和2中庐山气象局观测站均记录了雾凇、雨凇现象，佐证了两次过程中有过冷却液态雾滴组成的冷雾出现。



图1 观测点位置

Fig.1 Location of the observation site.

137

138 表 1 观测所用仪器
139 Table 1 List of instruments used.

仪器	型号	监测内容	监测范围和分辨率	精度
雾滴谱仪	FM-100	雾滴谱	2-50 μm , 1 s	
热盘降水传感器	TPS-3100	降水量	0-50 mm h^{-1} , 1 min	$\pm 0.5 \text{ mm h}^{-1}$
天气现象与能见度 仪	OWI-430	能见度、天气现象	0.001-10 km, 1 min	5 km 以下 10%, 5 到 10 km 15%
温度湿度计	HMP155	温度、湿度	1 min	温度 1 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 10%
旋桨风速计	05103	风速、风向	1 min	$\pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$, $\pm 3^{\circ}$
长短波辐射计	CNR2	长短波辐射	1 min	<10%

140 雾滴谱仪分为20档，测量粒径范围为0~50 μm 。由于第一档(0~2 μm)的测量结果易受到间
 141 隙气溶胶(未活化颗粒)的影响，所以在资料分析时去除了该档(李子华等，2011)。由雾滴谱
 142 仪测得的每档雾滴数计算得到雾滴总数浓度 N (cm^{-3})、雾滴算术平均直径 D (μm)、雾含水量 LWC
 143 (g m^{-3})、雾滴峰值直径 D_P (μm)、雾滴直径的离散度 C_d 和自动转化阈值函数 T ，计算方法同Niu et al.
 144 (2010):

$$N = \int n(r) dr \quad (1)$$

145 r (μm)为每档雾滴谱的几何平均半径， n ($\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$)为每档雾滴数密度。

$$D = \frac{2}{N} \int rn(r) dr \quad (2)$$

$$LWC = 1 \times 10^{-6} \times \rho_0 \times \int \frac{4\pi}{3} r^3 n(r) dr \quad (3)$$

146 $\rho_0 = 1.0 \text{ g cm}^{-3}$ 为水密度。

$$\left. \frac{dn(D_{fo})}{dD_{fo}} \right|_{D_{fo}=D_P} = 0 \quad (4)$$

147 D_{fo} (μm)为雾滴直径。

$$C_d = \sqrt{\frac{\int (D_{fo} - D)^2 n(D_{fo}) dD_{fo}}{ND^2}} \quad (5)$$

$$T = \left[\frac{\int_{r_c}^{\infty} r^6 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^6 n(r) dr} \right] \left[\frac{\int_{r_c}^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr} \right] \quad (6)$$

148 r_c (μm)为自动转化临界半径，由下式计算：

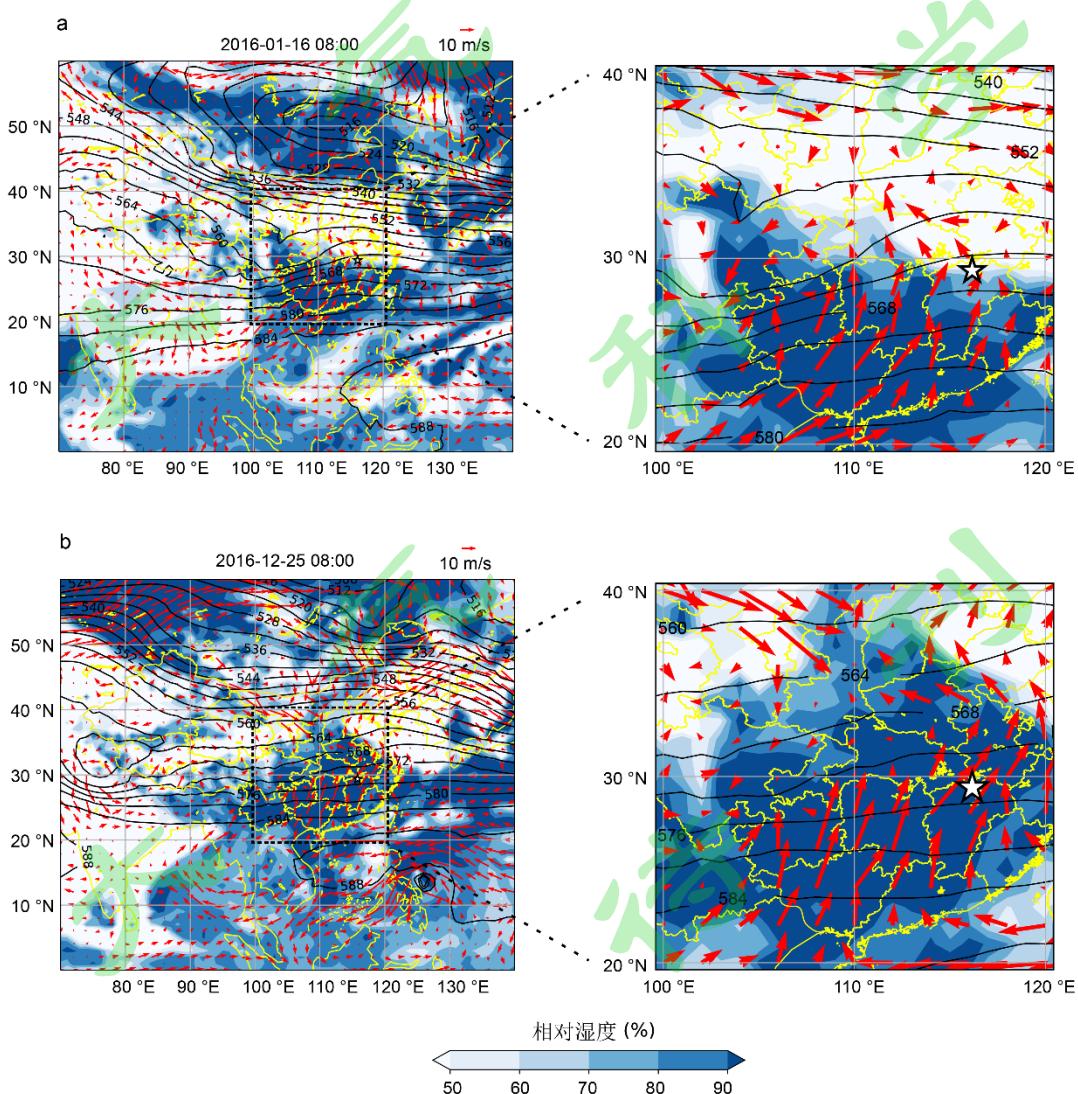
$$r_c \approx 4.09 \times 10^{-4} \beta_{con}^{1/6} \frac{N^{1/6}}{LWC^{1/3}} \quad (7)$$

149 β_{con} ($1.15 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$)为经验系数。

150 2 天气形势和地形作用

由NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 逐6小时格点资料得到两次雾期间的500 hPa位势高度、850 hPa水平风速风向、850 hPa相对湿度（图2）。个例1 2016年1月15至16日，乌拉尔山以北地区有高压脊发展并逐渐形成阻塞高压，高压前部的东北风分量促使低涡后部横槽在贝加尔湖一带不断发展，冷气流在横槽内逐渐积聚。16至17日横槽不断旋转南下转竖，冷空气以扩散形式不断深入我国内陆。与此同时，位于印缅地区的南支槽呈发展趋势，南支槽不断加深，槽前的暖湿空气和南下的冷空气在我国中低纬度一带相遇，形成云系，庐山观测点出现雾和降雨天气。个例2 2016年12月25至27日乌拉尔山以东到贝加尔湖地区不断有小高压脊东移；南支槽明显加强，振幅加大，槽前的西南气流使得水汽源源不断向我国中东部地区输送，庐山观测点出现雾和降雨天气。与个例1相比，个例2西南低空急流强劲且维持时间长（24小时），再加上庐山刚好位于急流出口，因此个例2庐山观测点的水汽输送更强。

冷雾的发生与天气系统相联系，也与当地的地形特征关系密切。庐山地处江西省北部，对气流起到了阻挡和抬升的作用。锋面来临之前南支槽前潮湿的西南气流在前进途中遇到山体抬升冷却凝结形成雾，而后南下的冷空气与西南气流在我国中低纬度一带相遇形成的冷锋过境，云系接地形成雾。庐山海拔较高气温低，随着雾过程的发气温下降到 0°C 以下，因而形成冷雾。



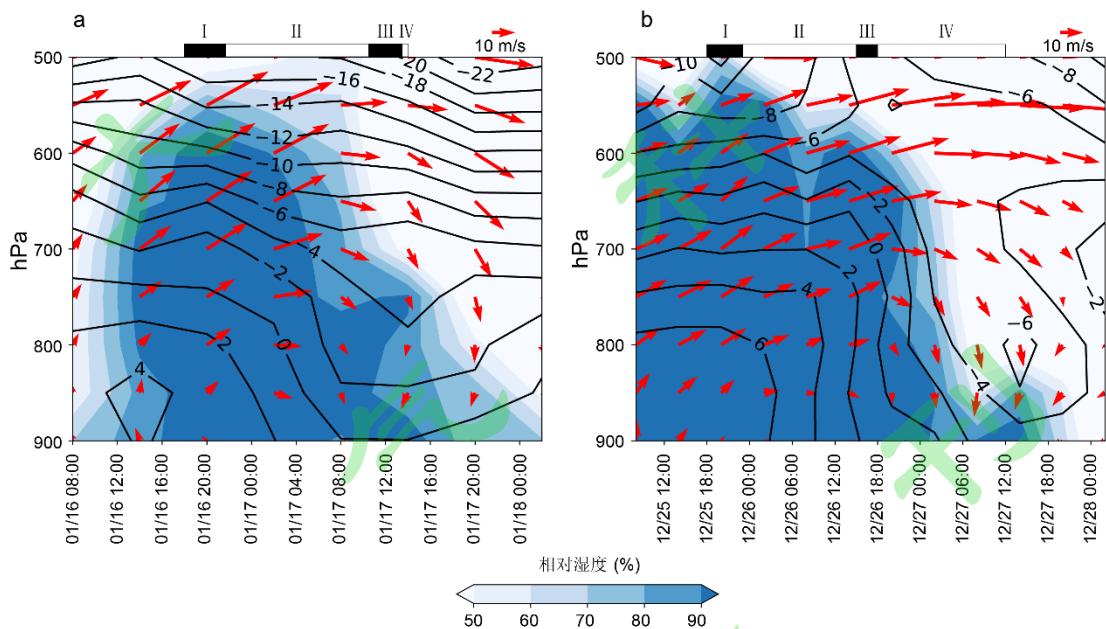
165
166

167 图2 (a) 个例1和 (b) 个例2 典型时次500 hPa位势高度 (黑线)、850 hPa水平风速风向 (红箭
168 头)、850 hPa相对湿度 (色标) 的分布; 五角星为观测点的位置
169 Fig.2 Geopotential height at 500 hPa (black lines), horizontal wind speed and direction (red arrows) at
170 850 hPa, relative humidity (color scale) at 850 hPa at typical times in (a) case 1 and (b) case 2;
171 the five-pointed stars are the location of the observation site.

172 3 气象要素特征

173 图3为由NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 逐6小时格点资料得到的两次雾过程中观测点上空的气温、水平风速风
174 向和相对湿度的时间变化, 图4为两次雾的地面气象要素时间序列。根据能见度 (图4) 和雾含水
175 量 (4.2节) 的变化特征将两次雾分为形成阶段 (I)、发展阶段 (II)、成熟阶段 (III) 和消散
176 阶段 (IV)。表2给出了两次雾逐阶段的气象要素平均值。

177 由温度和风速风向的垂直分布 (图3) 可见, 从两次雾发生前到雾的形成阶段900至500 hPa
178 基本受西南水平气流控制, 充分回暖增湿 (田梦等, 2020; 杨军等, 2021)。暖湿气流沿锋面和
179 山体抬升, 膨胀冷却达到饱和形成云, 云体在山区接地形成雾。随后从形成阶段到发展阶段,
180 800 hPa以上仍保持西南气流, 800 hPa以下由西南风转为偏北风, 冷锋前缘到达, 云系接地。
181 偏北风冷空气的入侵促进了近地面降温, 到了成熟阶段, 个例2 26日16时前后850至750 hPa出现了锋面
182 逆温层。两次雾的消散阶段, 900~500 hPa转为一致的偏北气流, 且800 hPa以下风速增大, 干冷
183 气流使整层湿度减弱。



184
185 图3 (a) 个例1和 (b) 个例2气温 (黑线)、水平风速风向 (红箭头) 和相对湿度 (色标) 的高
186 度-时间剖面图; I、II、III和IV分别为雾的形成阶段、发展阶段、成熟阶段和消散阶段
187 Fig.3 Height-time profiles of air temperature (black lines), horizontal wind speed and direction (red
188 arrows) and relative humidity (color scale) in (a) case 1 and (b) case 2; I, II, III and IV are the
189 formation stage, development stage, mature stage and dissipation stage of fog cases, respectively.

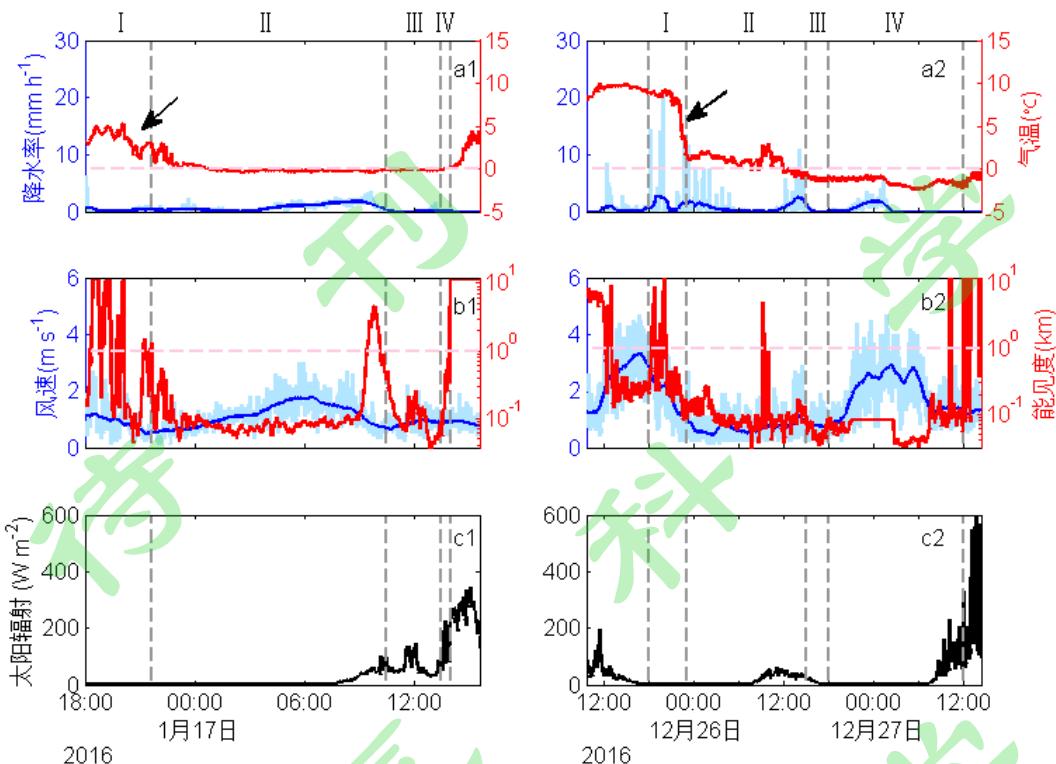


图4 个例1（左栏）和个例2（右栏）的（a1、a2）降水率（蓝）、气温（红）、（b1、b2）风速（蓝）、能见度（红）、（c1、c2）太阳辐射时间演变；I、II、III和IV分别为雾的形成阶段、发展阶段、成熟阶段和消散阶段

Fig.4 Temporal variations of (a1, a2) precipitation rate (blue), air temperature (red), (b1, b2) wind speed (blue), visibility (red), (c1, c2) solar radiation of case 1 (left column) and case 2 (right column); I, II, III and IV are the formation stage, development stage, mature stage and dissipation stage of fog cases, respectively.

从地面气象要素（图4、表2）来看，个例1（图4 a1、b1、c1）雾形成阶段，气温逐渐降低，风速维持 2 m s^{-1} 以下。能见度在0.1至10 km之间波动较大，至阶段末稳定在1 km以下，雾逐渐形成。发展阶段气温进一步下降，17日00:49降至 0°C 以下，之后稳定在略低于 0°C 左右。与上阶段相比，平均风速略有上升，雨强增大。在成熟阶段到来前17日09:27至10:07能见度曾短时突破1 km，可能为活动云系、云团、云块之间的缝隙（吴兑等，2007），推测成熟阶段可能有新云团平流到观测点。成熟阶段，气温稳定在略低于 0°C 左右，风速和降水均减弱，17日12:52能见度降至过程最低值0.037 km，雾进一步发展增强。消散阶段能见度逐步回升到1 km以上。个例2（图4 a2、b2、c2）雾形成阶段，25日20:11至23:00，气温由 9.1°C 降至 1.5°C ，风速由 2.2 m s^{-1} 下降至 1.5 m s^{-1} ，降水持续。25日20:11后能见度维持在1 km以下，雾逐步形成。发展阶段降水维持，气温26日11:51跌破 0°C ，与上阶段相比风力减弱。成熟阶段，26日15:34雨停，至阶段末无降水发生，风速维持在 2 m s^{-1} 以下，气温维持在 0°C 以下，能见度维持在0.1 km以下。消散阶段，风速与上阶段相比增大，促进了雾滴的蒸发和湍流输送，雾体逐渐消散，能见度逐步回升到1 km以上。

212 表 2 两次雾各阶段的气象要素均值

213 Table 2 The average meteorological elements in each stage of the two fog cases.

个例 年月 日	阶段	气温	风速	降水量	能见度
		(°C)	(m s ⁻¹)	(mm h ⁻¹)	(km)
个例 1 2016 年 1 月	I 16 日 18:00-21:40	3.5	0.9	0.3	2.6
	II 16 日 21:40-17 日 10:30	0.0	1.1	0.7	0.2
	III 17 日 10:30-13:30	-0.1	0.9	0.1	0.1
	IV 17 日 13:30-14:00	0.0	0.9	0.0	0.7
全过程		0.6	1.0	0.5	0.7
个例 2 2016 年 12 月	I 25 日 18:00-23:00	7.7	1.8	1.3	1.0
	II 25 日 23:00-26 日 15:00	0.9	0.7	0.7	0.1
	III 26 日 15:00-18:00	-1.1	0.7	0.1	0.1
	IV 26 日 18:00-27 日 12:00	-1.5	1.9	0.4	0.1
全过程		0.5	1.4	0.6	0.2

214

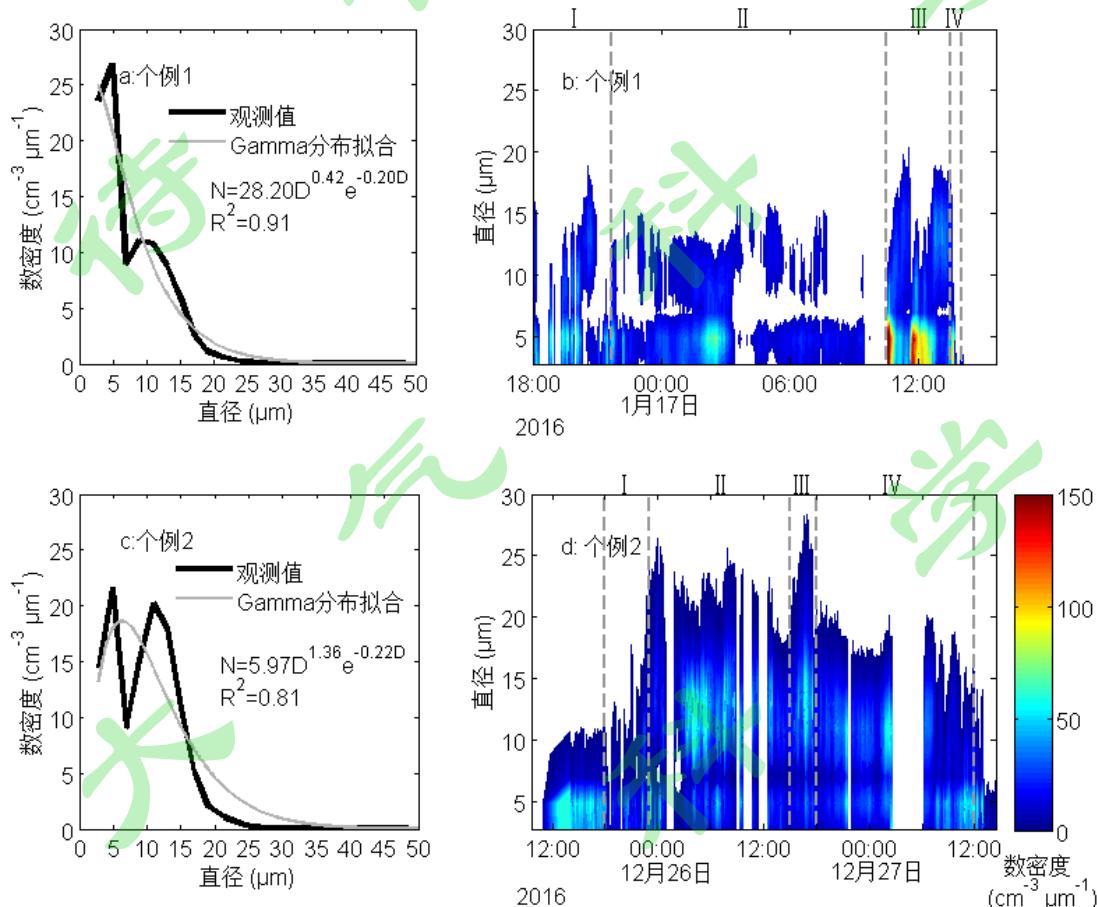
215 两次雾的层结及近地面气象要素演变在各阶段均具有明显的相似性。从形成阶段到发展阶段800 hPa以下由西南风转为偏北风，冷锋前缘到达，受弱冷平流影响两次雾近地面均出现了气
 216 温骤降（图4a1、a2箭头）。个例1 16日20:04至21:00，气温由5.2°C降至1.1°C，降温率为4.4 °C h⁻¹。
 217 个例2 25日22:00至23:00，气温由7.3°C降至1.5°C，降温率为5.8 °C h⁻¹。骤降温使得环境过饱和度增大，促进了雾滴的活化和凝结增长，雾逐渐形成和发展。两次雾的成熟阶段，地面气象要素的共同特点是雨停和风力减弱。雨停后雾体不再受到雨滴的下沉拖曳和碰并影响，潮湿的地面上水分蒸发，增加了近地层空气中的水汽含量（李子华等，2011；黄治勇，2012），同时蒸发也引起了空气温度略有下降（濮梅娟等，2013），使雾中过饱和度加大，雾强度增强。弱风力的稳定环境利于雾的维持（陆春松等，2011）。消散阶段两次雾900~500 hPa转为一致的偏北气流，且
 218 800 hPa以下风速增大，近地面太阳辐射增强，雾逐渐消散。但是，两次雾的层结特征也有一些差
 219 异。个例2在形成阶段近地面降温更为强烈，成熟阶段出现了锋面逆温层。冷空气影响期间锋面
 220 逆温是温度场垂直结构的重要特征（邓雪娇等，2007），它的出现有利于近地层雾加强。个例1
 221 在雾的形成阶段近地面降温不及个例2强烈，在个例1中未出现明显的逆温层。

228 4 雾微物理特征

229 4.1 雾滴谱

230 个例1和2的过程平均雾滴谱均呈双峰分布，主峰均位于4.9 μm，次峰分别位于8.9、11.0 μm
 231 （图5a、c）。采用Gamma分布分别对个例1和2的过程平均雾滴谱进行了拟合，拟合优度分别为
 232 0.91和0.81。从瞬时雾滴谱的演变来看（图5b、d），个例1和2均出现了主峰位于10~14 μm的瞬时
 233 雾滴谱，出现频率分别为12.4%和46.3%。城市雾例如南京雾（Niu et al., 2010）、济南雾（王庆
 234 等，2021）等的滴谱随粒径的变化大致呈单调递减，主峰位于2至6 μm。而庐山雾与城市雾相比
 235 10~14 μm之间的峰值较为突出。城市雾滴谱峰值位于小粒径一端说明雾滴群凝结增长的同时伴

236 随大量新滴活化 (Lu et al., 2020; Wang et al., 2023), 可能由气溶胶浓度较高或水汽不十分充足
 237 导致。山地由于地形抬升等作用, 湿度条件较好, 并且气溶胶浓度较低, 对水汽的“争食”比城市
 238 雾弱, 对单个粒子的增长而言水汽较足; 在水汽较足的条件下, 由于雾滴的凝结增长速度与其粒
 239 径成反比, 小雾滴比粒径较大的雾滴增长得快(Chen et al., 2016; Yang et al., 2018; 王元等, 2021),
 240 因此粒径10到14 μm 的雾滴增多。

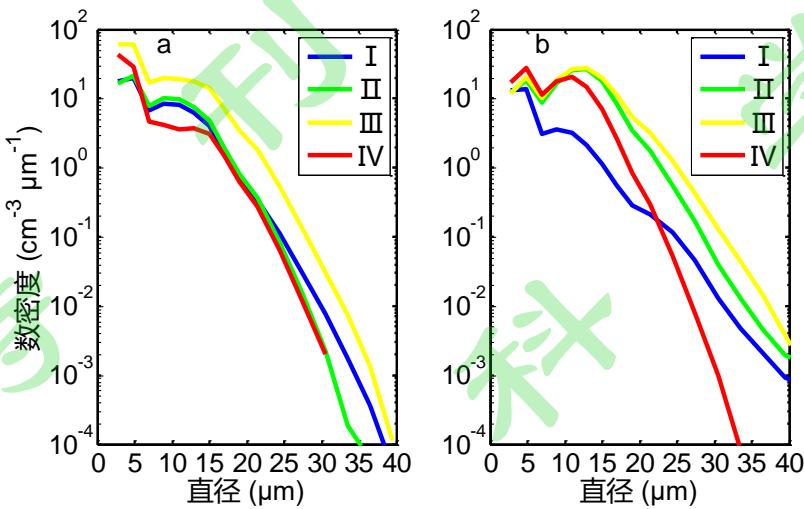


241
 242 图5 (a) 个例1平均雾滴谱的Gamma分布拟合; (b) 个例 1 的雾滴谱随时间变化; (c) 个例 2
 243 平均雾滴谱的K-M分布拟合; (d) 个例 2 的雾滴谱随时间变化; I、II、III和IV分别为雾
 244 的形成阶段、发展阶段、成熟阶段和消散阶段

245 Fig.5 (a) Fitting of Gamma distribution of average spectrum of case 1; (b) temporal variation of fog
 246 droplet spectra of case 1; (c) fitting of K-M distribution of average spectrum of case 2; (d)
 247 temporal variation of fog droplet spectra of case 2; I, II, III and IV are the formation stage,
 248 development stage, mature stage and dissipation stage of fog cases, respectively.

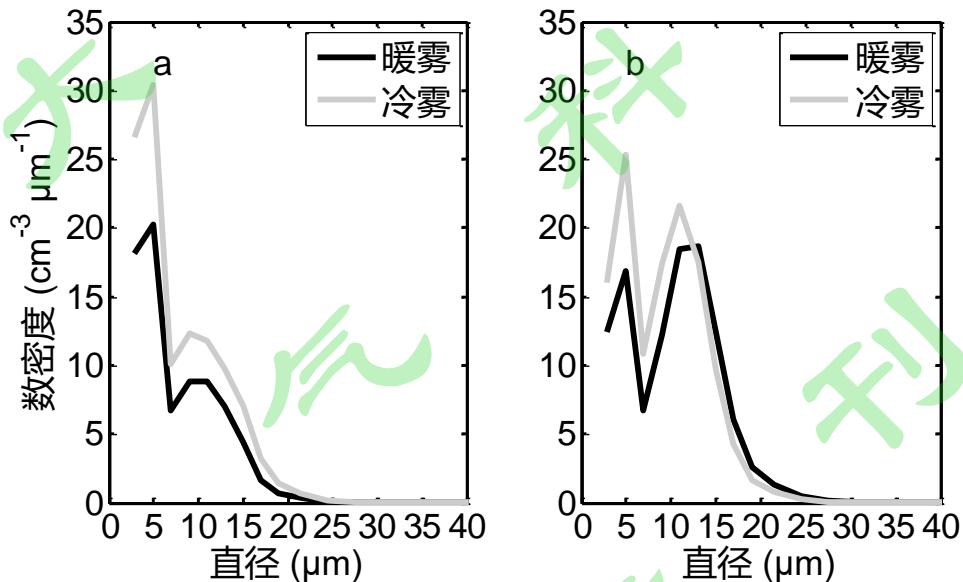
249 图6为两次雾各阶段的平均雾滴谱。个例1和2在形成阶段为暖雾。形成阶段后期, 两次雾受
 250 偏北风弱冷平流影响近地面均出现了气温骤降 (图4a1、a2箭头), 降温促使过饱和度显著增大,
 251 促进了凝结核的活化以及雾滴的凝结增长。个例2在形成阶段后期降温更剧烈, 从形成阶段到发
 252 展阶段雾滴谱的变化比个例1更为明显, 其雾滴谱拓宽, 10到14 μm 粒径之间峰值变得比个例1明
 253 显突出。两次雾的发展阶段中后期气温下降到0 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 自此暖雾转为冷雾。到了成熟阶段, 气

254 温进一步下降,近地面雨停和风力减弱,逆温层出现,有利于水汽和雾滴积累(崔雅琴等,2019),
 255 各档雾滴数密度上升,雾滴谱拓宽。两次雾的消散阶段仍为冷雾,各粒径段雾滴数密度均减少,
 256 雾滴谱收窄。



257
 258 图6 两次雾各阶段平均雾滴谱: (a) 个例1, (b) 个例2; I、II、III和IV分别为雾的形成阶段、
 259 发展阶段、成熟阶段和消散阶段

260 Fig.6 Fog droplet average spectrum of each stage in the two fog cases: (a) case 1 and (b) case 2; I,
 261 II, III and IV are the formation stage, development stage, mature stage and dissipation stage of fog
 262 cases, respectively.



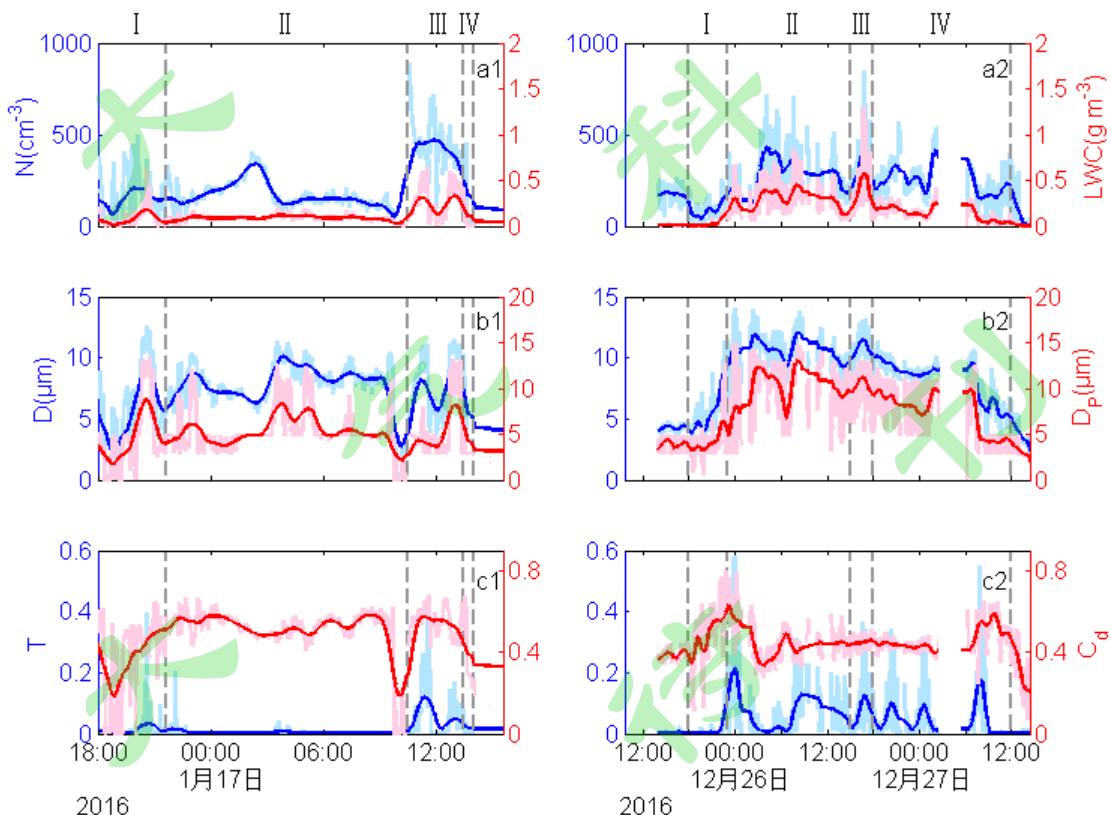
263
 264 图7 (a) 个例1和(b) 个例2中的冷雾和暖雾滴谱
 265 Fig.7 Cold and warm fog droplet spectra in (a) case 1 and (b) case 2.

266
 267 个例1 2016年1月17日00:49气温降至0 °C以下,个例2 2016年12月26日11:51气温跌破0 °C,
 268 图7中暖雾、冷雾滴谱分别为气温跌破0 °C之前和之后的平均雾滴谱。总体来说,个例1和2中,
 269 冷雾与暖雾相比各粒径段雾滴数密度均有所上升,尤其是粒径14 μm以下的雾滴数量增长较为明

270 显。相较暖雾，冷雾的 $2\sim4\mu\text{m}$ 档雾滴数量增加，说明有许多凝结核活化成为新的小雾滴，在冷雾
 271 的情况下气温较低，环境过饱和度增大，有助于达到更多液滴的临界过饱和度，凝结核活化率增
 272 加。相较暖雾，冷雾的 $4\sim14\mu\text{m}$ 雾滴数量增加，说明凝结增长较活跃，一方面是由于气温较低导
 273 致液滴平衡水汽压下降，液滴平衡水汽压与环境水汽压的差值增大，另一方面气温较低有利于凝
 274 结潜热的扩散。冷雾与暖雾相比在 $14\mu\text{m}$ 以上雾滴数量增加不明显，推测原因可能是冷雾中近地
 275 面温度低，湍流运动相对暖雾弱，雾滴间的湍流碰并过程相对较弱。

276 4.2 基本微物理参数

277 从两次雾个例微物理参数 N 、 LWC 、 D 、 D_p 、 T 和 C_d 的时间演变（图8）来看，雾微物理参数
 278 波动较大。山地雾中微物理参数的起伏变化是由于活化、凝结、碰并和沉降等过程的交叉作用，
 279 亦是源于雾体在前进过程中受山体抬升不断爬坡和翻越山坡（吴兑等，2007）。表3为两次雾各
 280 阶段的微物理参数。个例1和2微物理参数的变化规律相似，发展阶段 N 、 D 、 LWC 和 D_p 均高于形
 281 成阶段，成熟阶段 N 、 D 、 LWC 和 D_p 均为各阶段最大，消散阶段与成熟阶段相比， N 、 D 、 LWC 和
 282 D_p 均明显下降。将两次庐山雾的微物理参数与其他地区的雾进行对比。一般来说城市雾的 N 较高，
 283 如2009年天津雾 N 为 563 cm^{-3} （Shen et al., 2018），2017年南京雾 N 为 567 cm^{-3} （王元等，2019）；
 284 海雾 N 较低，如2011年湛江东海岛的海雾 N 为 248 cm^{-3} （吕晶晶等，2014），2007年茂名海雾 N 为
 285 57 cm^{-3} （黄辉军等，2009）；山地雾 N 一般介于城市雾和海雾之间，如2001年南岭大瑶山雾 N 为
 286 202 cm^{-3} （吴兑等，2007），本文报道的两次庐山雾 N 与2001年南岭大瑶山雾接近。



287
 288 图8 个例1（左栏）和个例2（右栏）的（a1, a2）雾滴总数浓度 N （蓝）、雾含水量 LWC （红）、

289 (b1, b2) 雾滴平均直径 D （蓝）、雾滴峰值直径 D_p （红）、(c1, c2) 自动转化阈值函数 T
 290 （蓝）和离散度 C_d （红）时间演变；I、II、III和IV分别为雾的形成阶段、发展阶段、成熟
 291 阶段和消散阶段

292 Fig.8 Temporal variations of (a1, a2) fog droplet total number concentration N (blue), fog liquid water
 293 content LWC (red), (b1, b2) average fog droplet diameter D (blue), fog droplet peak diameter D_p
 294 (red), (c1, c2) auto-conversion threshold function T (blue) and dispersion C_d (red) of case 1 (left
 295 column) and case 2 (right column) ; I, II, III and IV are the formation stage, development stage,
 296 mature stage and dissipation stage of fog cases, respectively.

297

298 表3 两次雾各阶段微物理参数均值

299 Table 3 The average microphysical parameters in each stage of the two fog cases.

个例	阶段	$N(\text{cm}^{-3})$	$D(\mu\text{m})$	$LWC(\text{g m}^{-3})$	$D_p(\mu\text{m})$	C_d
个例 1 2016 年 1 月	I 16 日 18:00-21:40	147.6	5.4	0.073	4.4	0.37
	II 16 日 21:40-17 日 10:30	162.4	7.7	0.086	5.2	0.51
	III 17 日 10:30-13:30	446.6	7.8	0.257	5.5	0.55
	IV 17 日 13:30-14:00	186.6	4.4	0.052	3.0	0.45
	全过程	202.5	7.2	0.108	5.0	0.49
个例 2 2016 年 12 月	I 25 日 18:00-23:00	83.4	5.6	0.033	4.2	0.48
	II 25 日 23:00-26 日 15:00	281.8	10.6	0.291	10.0	0.44
	III 26 日 15:00-18:00	318.8	10.8	0.390	10.3	0.45
	IV 26 日 18:00-27 日 12:00	239.4	8.0	0.133	7.2	0.46
	全过程	237.4	8.8	0.195	8.0	0.46

300

301 通过研究雾中不同阶段微物理量间的相关性，可以反推其占主导的微物理过程 (Lu et al.,
 302 2013)。图9为两次雾过程 N 、 D 和 LWC 的相关性。个例1全过程 N 与 D 的相关性较弱，个例2全过程
 303 N 与 D 成正相关，相关系数为0.55。两次雾全过程的 N 与 LWC 、 D 与 LWC 均为正相关关系。经典
 304 云物理理论认为，云滴的增长过程包括云凝结核活化，云滴凝结增长及之后可能发生的碰并过程
 305 (杨军等, 2011)。当雾微物理过程以小粒子活化和雾滴凝结增长为主时， N 、 D 和 LWC 同时增
 306 大 (Niu et al., 2010; Zhou et al., 2013)。若有碰并收集效应发生，则液滴之间会碰并结合，造成
 307 N 下降而 D 增大。可见个例1中雾滴碰并、雾滴竞争水汽等因素干扰了 N 与 D 的正相关关系，个例2
 308 以凝结核活化和凝结增长为主。下面详细分析两次雾各阶段微物理参量的相关性及成因。

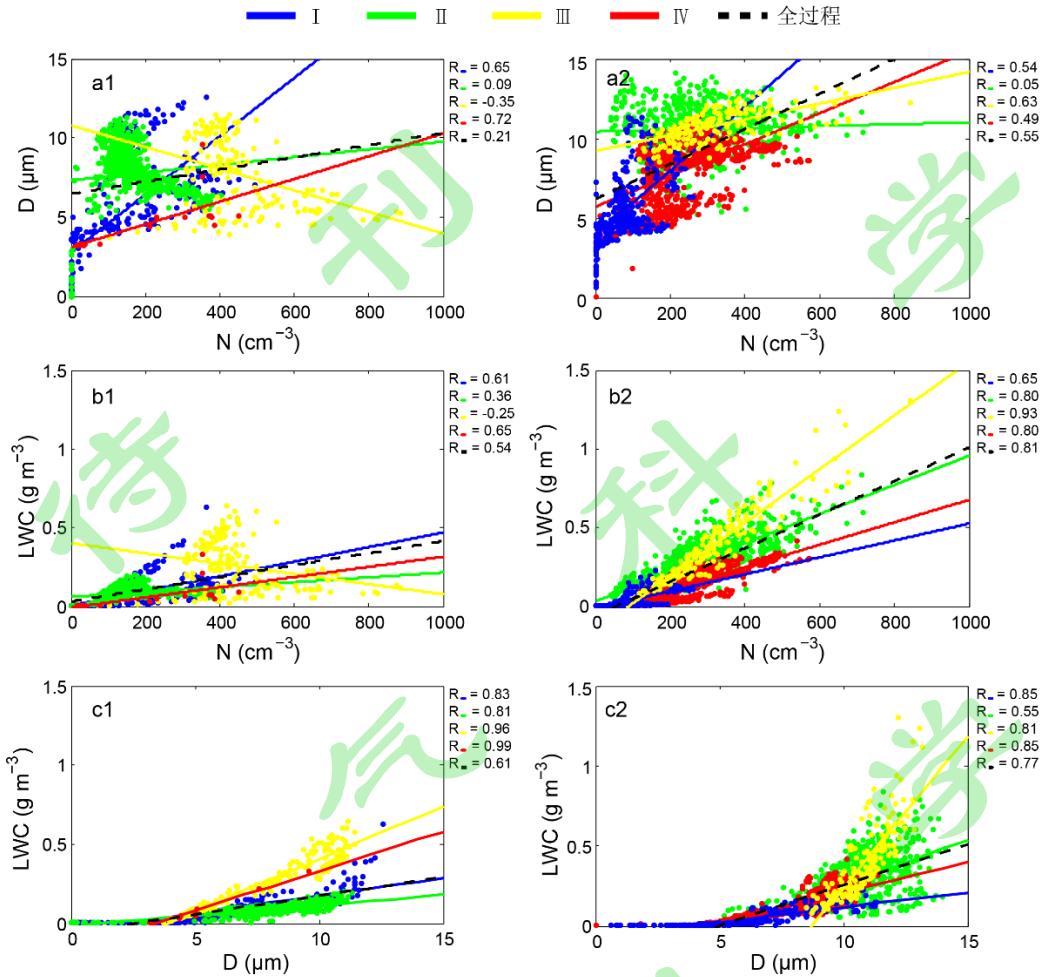


图9 个例1（左栏）和个例2（右栏）中（a1、a2）雾滴数浓度 N 和平均直径 D ，（b1、b2）数浓度 N 和含水量 LWC ，以及（c1、c2）平均直径 D 和含水量 LWC 的相关性；I、II、III和IV分别为雾的形成阶段、发展阶段、成熟阶段和消散阶段

Fig.9 The correlations between (a1, a2) fog droplet total number concentration N and average diameter D , (b1, b2) total number concentration N and liquid water content LWC , and (c1, c2) average diameter D and liquid water content LWC ; I, II, III and IV are the formation stage, development stage, mature stage and dissipation stage, respectively.

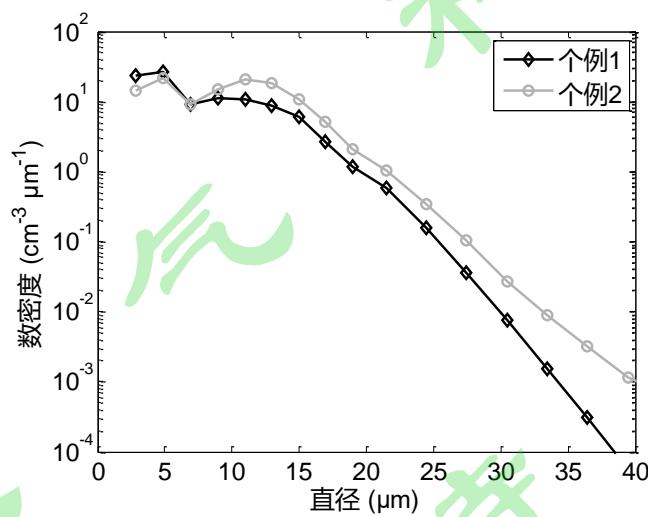
个例1形成阶段 N 、 D 和 LWC 三个微物理参数之间的相关性较好，均呈现正相关。发展阶段 N 、 D 的相关性较差。从图8可见发展阶段 LWC 较为平稳，基本维持在0.09 g m $^{-3}$ 左右，16日22:00至17日02:30 N 明显增长，但 D 却有所下降。这说明有新凝结核活化，小雾滴数量增多，但限于水汽条件小雾滴不能充分长大，造成 D 下降。17日02:30至03:30 N 减少，而 D 有所上升，可能有蒸凝效应发生。因为大滴的平衡过饱和度小于小滴，当环境过饱和度较低时，环境过饱和度能够超过大滴的平衡过饱和度，而小于小滴的平衡过饱和度，所以大滴增长而小滴蒸发（Yang et al., 2018）。成熟阶段 N 、 D 的相关系数为-0.35， N 与 LWC 的相关系数为-0.25， D 与 LWC 的相关系数为0.96。说明随着 LWC 、 D 的增长， N 有所下降。成熟阶段中粒径5 μm以下的小雾滴和粒径15 μm以上的大雾

326 滴均明显增多，雾滴谱拓宽（图6），阶段平均离散度 C_d 0.55为各阶段中最高（表3）， T 显著增
327 大，17日11:37 T 达到过程最高值0.44（图8），这些迹象表明碰并过程可能较显著，造成了 N 与 D 、
328 LWC 的负相关关系。消散阶段样本点较少， N 、 D 和 LWC 三个微物理参数之间成正相关关系。

329 个例2的四个阶段 N 、 D 和 LWC 三个微物理参数之间基本为正相关，只有发展阶段中 N 和 D 的
330 相关性较差。可能的原因是发展阶段中雾开始发展加强的时候大量小粒子活化成为小雾滴，但受
331 到水汽条件的限制，雾滴对水汽存在一定的“争食”，雾滴群的平均尺度没有随之增大。如26日
332 02:00至04:00， N 明显增大，但 D 却有所下降（图8）。

333 4.3 两次雾微物理特征的比较

334 个例1和2的微物理特征主要有三点差异。一是个例2雾滴谱的10到14 μm 粒径之间峰值更为
335 突出，雾滴谱较宽（图10）；二是个例2过程平均 N 237.4 cm^{-3} 、 D 8.8 μm 、 D_p 8.0 μm 、 LWC
336 0.195 g m^{-3} 皆大于个例1（表3）；三是由微物理量间的相关性分析推测，个例1中雾滴碰并、雾
337 滴竞争水汽等因素影响了微物理量间的正相关性，个例2微物理量间基本为正相关关系，以凝结
338 核活化和凝结增长为主（4.2节）。从两次雾的宏观特征推测微物理过程差异的原因。与个例1
339 相比，个例2在雾发生前西南低空急流强劲（2节），输送了大量的水汽；个例2在雾形成阶段近
340 地面降温更为强烈，成熟阶段出现了锋面逆温层（3节），水汽易达到饱和并且得以在近地层累
341 积，使得雾滴凝结增长所需的水汽稳定维持。所以个例2在微物理特征上表现为雾滴谱显著凝结
342 拓宽，在10到14 μm 粒径段出现数密度的峰值， N 、 D 、 D_p 和 LWC 等微物理参量显著增大，微
343 物理过程以凝结核活化和凝结增长为主。



344
345 图10 两次雾的平均滴谱

346 Fig.10 Average spectra of the two fog cases.

347 5 结论

348 利用2016年1月和12月在江西省庐山气象局观测到的雾滴谱及气象要素资料，结合NCEP

349 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料，分析了2016年1月16-17日、2016年12月25-27日两次冷雾的宏微观结构及演变
350 特征，得到以下结论：

351 1) 两次冷雾的起因是南支槽前潮湿的西南气流在前进途中遇到山体抬升形成雾，南下的冷
352 空气与西南气流在我国中低纬度一带相遇，冷锋过境云系接地形成雾。与个例1相比，个例2西南
353 低空急流强劲且维持时间长（24小时），再加上庐山刚好位于急流出口，因此个例2庐山观测点
354 的水汽输送更强。

355 2) 两次冷雾的层结及近地面气象要素演变在各阶段均具有明显的相似性。从形成阶段到发
356 展阶段800 hPa以下由西南风转为偏北风，冷锋前缘到达，近地面气温骤降；成熟阶段近地面雨
357 停且风力减弱；消散阶段900~500 hPa转为一致的偏北气流，且800 hPa以下风速增大，近地面太
358 阳辐射增强。但是，两次冷雾的层结特征也有一些差异。个例2在形成阶段近地面降温更为强烈，
359 成熟阶段出现了锋面逆温层。个例1在雾的形成阶段近地面降温不及个例2强烈，在个例1中未出
360 现明显的逆温层。

361 3) 个例1和2的过程平均雾滴谱均呈双峰分布，主峰均位于4.9 μm ，次峰分别位于8.9、11.0
362 μm 。个例1和2均出现了主峰位于10~14 μm 的瞬时雾滴谱，出现频率分别为12.4%和46.3%。个例
363 1和2中均有暖雾向冷雾的转换，冷雾与暖雾相比各粒径段雾滴数密度均有所上升，尤其是粒径14
364 μm 以下的雾滴数量增长较为明显。个例1全过程N与D的相关性较弱，可能受雾滴碰并、雾滴竞争
365 水汽等因素影响。个例2全过程N、D与LWC均为正相关关系，说明此次雾过程以凝结核活化和凝
366 结增长为主。个例2西南低空急流强劲、近地面降温明显、有逆温层存在，雾滴谱较宽，10到14
367 μm 粒径之间峰值更为突出，过程平均N、D和LWC皆大于个例1。

368 本文主要分析了观测资料，详细探究了庐山冷雾滴谱演变特征。今后也会结合数值模拟继续
369 开展雾的机理研究，本文给出的雾滴谱Gamma分布拟合、雾滴数浓度、平均直径等参数可为建立
370 雾的微物理参数化方案提供依据。

371

372

373 参考文献

374

375

Bezrukova N A, Jeck R K, Khalili M F, et al. 2006. Some statistics of freezing precipitation and rime for the territory
376 of the former USSR from ground-based weather observations[J]. Atmospheric Research, 82: 203-221.

377

Chen J, Liu Y, Zhang M, et al. 2016. New understanding and quantification of the regime dependence of aerosol-
378 cloud interaction for studying aerosol indirect effects[J]. Geophysical Research Letters, 43(4): 1780-1787.

379

Christopher J C, David C N, Max B, et al. 2019. Supercooled liquid fogs over the central Greenland Ice Sheet[J].
Atmospheric Chemistry and Physics, 19(11): 7467-7485.

380

崔雅琴,张佃国,王洪,等.2019.2015年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析[J].大气科学,43(4):705-
381 718. Cui Yaqin, Zhang Dianguo, Wang Hong, et al. 2019. Preliminary analysis of atmospheric physical
382 quantity characteristics during haze weather in Jinan area in 2015[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,
383 43(4): 705-718.

384

Cuxart J, Prtenjak M T, Matjacic B. 2021. Pannonian basin nocturnal boundary layer and fog formation: role of
385 topography[J]. Atmosphere, 12(6):712.

386

Didenko N K, Ivanov Y N, Puzov Y A, et al. 1994. Experimental modelling of the arctic steam fogs[J]. Atmospheric
387 Research, 32: 195-201.

388

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.
389 Deng Xuejiao, Wu Dui, Tang Haohua, et al. 2007. Analyses on boundary layer structure of a frontal heavy
390 fog process in Nanling Mountain Area[J]. Plateau Meteorology, 26(4): 881-889.

391

Ducloux H, Nygaard B E K. 2018. Ice loads on overhead lines due to freezing radiation fog events in plains[J]. Cold
392 Regions Science and Technology, 153: 120-129.

393

Girard E, Blanchet J P. 2001. Simulation of Arctic diamond dust, ice fog, and thin stratus using an explicit aerosol-
394 cloud-radiation model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 59(10):1199-1221.

395

Girard E, Blanchet J P, Dubois Y. 2005. Effects of arctic sulphuric acid aerosols on wintertime low-level atmospheric

396

- 397 ice crystals, humidity and temperature at Alert, Nunavut[J]. Atmospheric Research, 73:131-148.
 398 Gultepe I, Kuhn T, Pavolos M, et al. 2014. Ice fog in arctic during FRAM—ice fog project: aviation and nowcasting
 399 applications[J]. American Meteorological Society, 95: 211-226.
 400 Gultepe I, Fernando, Js H, Pardyjak E R, et al. 2016. An overview of the MATERHORN fog project: observations
 401 and predictability[J]. Pure and Applied Geophysics, 173, 2983-3010.
 402 郭丽君,郭学良,楼小凤,等.2019.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[J].气象学
 403 报,77(5):923-937. Guo Lijun, Guo Xueliang, Lou Xiaofeng, et al. 2019. An observational study of diurnal
 404 and seasonal variations, and macroscopic and microphysical properties of clouds and precipitation over Mount
 405 Lu, Jiangxi, China. Acta Meteorologica Sinica, 77(5): 923-937.
 406 黄辉军,黄健,刘春霞,等.2009.茂名地区海雾的微物理结构特征[J].海洋学报,31:17-23. Huang Huijun, Huang
 407 Jian, Liu Chunxia, et al. 2009. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming area[J]. Acta
 408 Oceanologica Sinica, 31: 17-23.
 409 黄治勇,牛奔,杨军,等.2012.湖北西南山地一次辐射雾和雨雾气象要素特征的对比分析[J].气候与环境研究,
 410 17(5):532-540. Huang Zhiyong, Niu Ben, Yang Jun, et al. 2012. Analysis of characteristics of
 411 meteorological elements of radiation fog and rain fog in southwestern Hubei[J]. Climatic and Environmental
 412 Research, 17(5): 532-540.
 413 He Q, Zhang J, Deng M, et al. 2019. Rime icing on bundled conductors[J]. Cold Regions Science and Technology,
 414 158: 230-236.
 415 贾然,牛生杰,李蕊.2010.鄂西电线积冰微物理观测研究[J].气象科学,30(4):481-486. Jia Ran, Niu Shengjie, Li
 416 Rui. 2010. Observational study on microphysical characteristics of wire icing in west Hubei[J]. Scientia
 417 Meteorologica Sinica, 30(4): 481-486.
 418 罗宁,文继芬,赵彩,等.2008.导线积冰的云雾特征观测研究[J].应用气象学报,19(1):91-95. Luo Ning, Wen Jifen,
 419 Zhao Cai, et al. 2008. Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas[J]. Journal of
 420 Applied Meteorological Science, 19(1): 91-95.
 421 陆春松,牛生杰,岳平,等.南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J].大气科学学报, 2011, 34(1):58-65. Lu
 422 Chunsong, Niu Shengjie, Yue Ping, et al. Observational research on boundary layer structure during high
 423 incidence period of winter fog in Nanjing[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(1): 58-65.
 424 李子华,刘端阳,杨军.2011.辐射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 Zihua,
 425 Liu Duanyang, Yang Jun. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog
 426 droplet spectrum broadening[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 35(1): 41-54.
 427 Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical
 428 processes in warm fogs. Acta Meteorol Sin, 27, 832-848.
 429 吕晶晶,牛生杰,张羽,等.2014.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
 430 报,72(2):350-365. Lv Jingjing, Niu Shengjie, Zhang Yu, et al. 2014. Evolution characteristics of the macro-
 431 /micro- structure and the boundary layer during a spring heavy sea fog episode in Donghai Island in
 432 Zhanjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica,72(2): 350-365.
 433 李杰,郭学良,周晓宁,等.2015.2011~2013 年中国冻雨,冻毛毛雨和冻雾的特征分析[J].大气科学,39(5):1038-
 434 1048. Li Jie, Guo Xueliang, Zhou Xiaoning, et al. 2015. Characteristics of freezing rain, freezing drizzle,
 435 and freezing fog in China from 2011 to 2013[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 39(5): 1038-1048.
 436 Lohmann U, Henneberger J, Henneberg O, et al. 2016. Persistence of orographic mixed-phase clouds[J]. Geophysical
 437 Research Letters, 10: 512-519.
 438 Lu C S, Liu Y G, Yum S S, et al. 2020. Reconciling contrasting relationships between relative dispersion and volume-
 439 mean radius of cloud droplet size distributions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(9),
 440 e2019JD031868.
 441 Leung A, Gough W A, Butler K A. 2020. Changes in fog, ice fog, and low visibility in the Hudson Bay Region:
 442 Impacts on aviation[J]. Atmosphere, 11, 186.
 443 Makkonen L, Zhang J, Karlsson T, et al. 2018. Modelling the growth of large rime ice accretions[J]. Cold Regions
 444 Science and Technology, 151: 133-137.
 445 Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. 2010. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet
 446 spectrometer: a case study[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27(6): 1259-1275.
 447 Niu S J, Zhou Y, Jia R, et al. 2012. Preliminary study of the microphysics of ice accretion on wires: oservations and
 448 simulations[J]. Science China Earth Science, 55(3): 428-437.
 449 Ohashi Y, Suido M. 2021. Numerical simulations of upslope fog observed at Beppu Bay in Oita Prefecture, Japan[J].
 450 Meteorlogical Applications, 28(3).
 451 潘梅娟,尚倩,李子华,等.2013.一次浓雾宏微观结构特征及快速消散的原因分析[J].高原气象,32(3):770-777.
 452 Pu Meijuan, Shang Qian, Li Zihua, et al. 2013. Analyses on macro- and micro-structure characteristics of a
 453 dense fog and its rapid dissipation causes[J]. Plateau Meteorology, 32(3): 770-777.
 454 Prtenjak M T, Klaic M, Jericevic A, et al. 2018. The interaction of the downslope winds and fog formation over the
 455 Zagreb area[J]. Atmospheric Research, 214: 213-227.
 456 Schmitt G, Steufer M, Heymsfield J, et al. 2013. The microphysical properties of ice fog measured in urban
 457 environments of Interior Alaska[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(11):136-147.
 458 Shen C, Zhao C, Ma N, et al. 2018. A novel method to estimate supersaturation ratio in the environmental activation
 459 process using aerosol and droplet measurement data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123:
 460 10606-10619.
 461 Song J A, Yum S S, Gultepe I, et al. 2019. Development of a new visibility parameterization based on the
 462 measurement of fog microphysics at a mountain site in Korea[J]. Atmospheric Research, 229: 115-126.
 463 Sokolov P, Virk M S. 2019. Droplet distribution spectrum effects on dry ice growth on cylinders[J]. Cold Regions
 464 Science and Technology, 160: 80-88.

- 465 Toms B A, Basara Jeffrey B, Hong Y. 2017. Usage of existing meteorological data networks for parameterized road
 466 ice formation modeling[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56: 1959-1976.
- 467 田梦,吴彬贵,黄鹤,等.2020.环渤海近海岸雾产生的天气条件及边界层特征分析[J].气候与环境研究,25(2): 199-
 468 210. Tian Meng, Wu Bingui, Huang He, et al. 2020. The synoptic condition and boundary layer characteristics
 469 of coastal fog around the Bohai Sea[J]. Climatic and Environmental Research, 25 (2): 199–210.
- 470 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-
 471 415. Wu Dui, Deng Xuejiao, Mao Jietai, et al. 2007. A study on macro and micro structures of heavy fog
 472 and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain[J]. Acta Meteorologica Sinica,65(3):406-415.
- 473 王元,牛生杰,吕晶晶,等.2019.南京冬季一次强浓雾及超细粒子累积过程分析[J].中国环境科学,39:459-468.
 474 Wang Yuan, Niu Shengjie, Lv Jingjing, et al. 2019. Analysis of a cumulative event of nano-scale aerosols and
 475 a strong fog during winter in Nanjing[J]. China Environmental Science, 39: 459-468.
- 476 王元,牛生杰,陆春松,等.2021.西双版纳热带雨林地区冬季辐射雾理化特征的观测研究.中国科学:地球科学,
 477 51(12):2098-2111. Wang Y, Niu S J, Lu C S, et al. 2021. Observational study of the physical and chemical
 478 characteristics of the winter radiation fog in the tropical rainforest in Xishuangbanna, China[J]. Science China
 479 Earth Sciences, 64(11): 1982–1995.
- 480 王庆,樊明月,李季,等.2021.济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响[J].大气科学,45(2):333-354. Wang
 481 Qing, Fan Mingyue, Li Ji, et al. 2021. The microphysical characteristics of winter fog in Jinan and its effect
 482 on visibility[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(2): 333-354.
- 483 Wagh S, Singh P, Ghude S D, et al. 2021. Study of ice nucleating particles in fog-haze weather at New Delhi, India:
 484 A case of polluted environment[J]. Atmospheric Research, 259:105693.
- 485 Wang Y, Lu C, Niu S, et al. 2023. Diverse dispersion effects and parameterization of relative dispersion in urban fog
 486 in eastern China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2022JD037514.
- 487 杨军,陈宝君,银燕,等.2011.云降水物理学[M].北京:气象出版社,119-185. Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan, et al.
 488 2011. Physics of Clouds and Precipitation[M]. Beijing: Meteorological Press, 119-185.
- 489 Yang F, Kollias P, Shaw R A, et al. 2018. Cloud droplet size distribution broadening during diffusional growth:
 490 ripening amplified by deactivation and reactivation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18: 7313-7328.
- 491 杨军,高雅,吴彬贵,等.2021.天津平流雾过程及其空中微物理特征个例研究[J].大气科学学报,44(6):945-953.
 492 Yang Jun, Gao Ya, Wu Binggui, et al. 2021. Advection fog process and its microphysical properties: a case
 493 study in Tianjin[J]. Trans Atmos Sci, 44(6): 945-953.
- 494 Zhou Y, Niu S J, Lv J J. 2013. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fog events[J]. Advances
 495 in Atmospheric Sciences, 30(4): 1053-1069.
- 496 张璐,刘鹏,张文君,等.2019.中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析[J].气候与环境研究,24(5):
 497 585-596. Zhang Lu, Liu Peng, Zhang Wenjun, et al. 2019. Analysis of variations of winter fog days formation
 498 across different regional climatic conditions in China[J]. Climatic and Environmental Research, 24(5): 585-
 499 596.
- 500 Zíková N, Pokorná P, Makes O, et al. 2020. Activation of atmospheric aerosols in fog and low clouds[J]. Atmospheric
 501 Environment, 230, 117490.
- 502 张浩,石春娥,杨军,等.2021.寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系[J].大气科学, 45(6): 1217-1231.
 503 Zhang Hao, Shi Chun' e, Yang Jun, et al. 2021. Microphysical characteristics of fog with different intensities
 504 and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(6):
 505 1217-1231.