周悦,吕晶晶,高正旭,等.2024. 2024年2月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探[J].暴雨灾害,43(4):458-468.
ZHOU Yue, LÜ Jingjing, GAO Zhengxu, et al. 2024. Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):458-468 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-131

2024年2月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探

周悦[1,2],吕晶晶[3],高正旭[4],周伶俐[1]

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室/中国气象局流域强降水重点开放实验室,武汉 430205;
2. 南京气象科技创新研究院 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041;3. 南京信息工程大学
气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044;4. 武汉区域气候中心,武汉 430074)

摘　要: 2024年2月长江中下游地区先后出现两次低温雨雪冰冻天气,其中第一次过程(2月1—6日)冻雨表现出量大、范围广、持续时间长、危害性强等特征。为此,基于湖北省80个国家气象站激光雨滴谱仪观测数据,结合气象要素观测资料,对此次冻雨过程进行定量判断,并对其宏微观特征进行定量分析,结果表明:(1) 此次过程冻雨区主要集中在江汉平原和武汉城市圈等地,表现为液态降水维持时间长。(2) 冻雨时数和冻雨量分布具有较好的一致性,其高值区均呈现西北-东南走向,冻雨时数一般在15 h以上,冻雨量超过24 mm;冻雨集中期在2月2—3日,此时段各区间其数浓度、液水含量、雨强和粒径站时数占比均显著高于该过程其他时段。(3) 各地区平均冻雨滴谱分布呈单峰型,其峰值数密度在200 $mm^{-3}\cdot mm^{-1}$左右。(4) 构建的Z-R关系不同于短历时、区域性冻雨过程,能较好地实现对此类冻雨定量估测降水 (Quantitative Precipitation Estimation QPE)的估算。整个过程中质量加权平均直径(D_m)和归一化截距参数($\log_{10}N_w$)的平均值分别为1.07 mm和3.03。(5) 在水汽凝华、丛集和凇附机制的共同影响下,致密霰粒和冰晶聚合物融化形成此次冻雨过程。

关键词: 冻雨;雨滴谱;时空分布;冻雨量;微物理特征
中图法分类号: P401　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-131

Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province

ZHOU Yue[1,2], Lü Jingjing[3], GAO Zhengxu[4], ZHOU Lingli[1]

(1. *China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205; 2. *Key Laboratory for Transportation Meteorology of China Meteorological Administration, Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences and Chinese Academy of Meteorological Sciences, Nanjing* 210044; 3. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044; 4. *Wuhan Regional Climate Center, Wuhan* 430074)

Abstract: In February 2024, two rounds of low temperature, rainfall/snowfall and freezing weather occurred in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The first round of the event from February 1 to 6. Showed characteristics such as a large amount of freezing rain, wide range, long duration, and severe hazard. Based on the observation data of laser raindrop spectrometers from 80 national meteorological stations in Hubei Province, and combined with meteorological element observation data, this study quantitatively identified frozen rain and analyzed its macro and micro characteristics. The results are as follows. (1) During this rainfall/snowfall and freezing weather process, frozen rain mainly occurred in areas such as the Jianghan Plain and the Wuhan urban area, characterized by long-term maintenance of liquid precipitation. (2) The distribution characteristics of freezing rain hours and freezing rain amounts were consistent, with high-value areas positioned along the

收稿日期: 2024-07-08;**定稿日期:** 2024-07-19
资助项目: 湖北省自然科学基金-气象创新发展联合基金项目(2023AFD096);南京气象科技创新研究院北极阁基金项目(BJG202304)
第一作者: 周悦,主要从事云雾降水宏微观特征和预报方法研究。E-mail: zhouyue8510@163.com
通信作者: 高正旭,主要从事电力气象灾害评估和预报研究。E-mail: gaozhengxu21@foxmail.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

northwest-southeast direction. The duration of freezing rain was generally longer than 15 hours, while the freezing rain amount exceeded 24 mm. The peak period for freezing rain appeared from February 2 to 3 in 2024, with the proportion of numerical concentration, liquid water content, rain intensity, and particle size station hours in each interval significantly higher than in other periods. (3) The average spectrum of frozen rain droplets in various regions showed an unimodal distribution, with the peak number density around 200 $mm^{-3}mm^{-1}$. (4) The constructed Z-R relationship was different from short-term, regional frozen rain processes. It could effectively estimate the quantitative precipitation estimation (Quantitative Precipitation Estimation, QPE) of such frozen rain. The average values of D_m and $\log_{10}N_w$ throughout the entire process were 1.07 mm and 3.03 mm, respectively. (5) This freezing rain process was mainly influenced by the combined effects of water vapor condensation, clustering, and glaze attachment mechanisms, and formed by the melting and formation of dense graupel particles and ice crystal polymers.

Key words: freezing rain; raindrop size distribution; spatiotemporal distribution; freezing rain amount; microphysical characteristics

引 言

冻雨天气是我国山区和平原地区冬季易发生的一种气象灾害，其对电力和交通等行业造成的次生灾害事故经常发生(胡毅，2005；李再华等，2008)。近年来，我国南方地区冻雨灾害受到多方重点关注，如2008年和2018年的大范围冰冻雨雪天气让人记忆犹新，2022年2月中下旬南方低温雨雪冰冻灾害又被应急管理部认定为2022年全国十大自然灾害之一(宗海锋等，2022)。此外，2024年2月在强暖湿气流和冷空气共同影响下，我国中东部地区发生了两次大范围雨雪冰冻天气，当时恰逢春节临近，给交通出行、农业生产和电力输送等造成了较大影响(张芳华等，2024)。

我国冻雨天气主要表现为倒“T”字型分布，南方主要分布在(105°—120°E，25°—30°N)范围内，其中贵州和湖南两省冻雨最为频发(王遵娅，2014；毛淑君和李栋梁，2015)。低温和降雨是导致冻雨发生的关键气象要素，而主导这两者的适宜大气环流形势则是基础(Yang et al.，2021)。然而，随着近年来灾害性天气极端性和局地性的显著增强，局地的边界层特征成为了判断冻雨是否出现的关键。通常认为冻雨天气的形成主要有两种机制：融化过程和过冷却暖雨过程，其分别表征了近地面存在暖层和无暖层存在时冻雨发生的两种层结特征(Zhou et al.，2016；Lu et al.，2022)。融化过程主导的冻雨主要发生在平原地区和低海拔地区，而过冷却暖雨过程主导的冻雨则集中在中高海拔山区，以冻雨最为集中的贵州省贵阳和威宁地区为例，有(无)暖层的冻雨过程占比分别为84.9%(15.1%)和18.8%(81.2%)，冻雨过程的主导物理机制差异显著(陆正奇，2022)。

冻雨的宏微观特征是冻雨天气影响地面环境的最重要物理要素，其中，冻雨的持续时间和雨强大小会直接反映其致灾强度，而冻雨的滴谱特征一方面和雨滴整个生命史的各个阶段密切相关(Rosenfeld and Ulbrich，2003)，其微物理参数的分布范围和相关特征可以间接反映雨滴在形成、生长、破碎和相变等过程中的主要物理机制(Bringi et al.，2009；江雨霏等，2023)，而另一方面冻雨滴的数浓度、粒径和液水含量则会直接主导雨滴碰冻到输电线路表面的数量，进而影响电线积冰的强度(Makkonen，2000)。尽管冻雨是冬季层状云降水过程中的一种，但是其微物理特征与典型层状云存在差别。Adhikari和Liu (2019)通过雷达观测分析了2014—2018年美国的冻雨过程，发现与一般降水相比，冻雨发生的云体更加浅薄(2～5 km)且具有更弱的雷达反射率，但与降雪过程相比则更深厚且强。Chen等(2011)研究了安徽潜山地区冻雨过程的宏微观特征，发现其雨滴谱拟合参数之间的相关特征不同于其他降水类型，且主要是由小冰晶融化导致，而不是大雪花融化形成。同时，Jia等(2019)通过对北方海陀山地区冬季降水的观测结果进行分析后指出，相比于Lognormal和Weibull分布，Gamma分布更适宜山区冬季混合相态滴谱的拟合。与平原地区的冻雨相比，山区冻雨具有更窄的滴谱、更短的持续时间以及更高的发生频率，且在降水过程的不同阶段之间存在显著的相态转化(Zhou et al.，2016)。

然而，上述的相关研究主要围绕单站或某地区冻雨过程展开研究，对于长时间、大范围冻雨过程的研究显著偏少，更缺乏在对冻雨进行定量识别基础上，围绕着冻雨量时空分布、微物理统计特征以及生消机制等关键致灾因子进行的分析。为此，本文围绕2024年2月1—6日影响湖北省大范围地区的一次典型冻雨天气过程，针对此次过程中冻雨宏微观特征方面的科学问题，利用湖北省80个国家气象站的激光雨滴谱仪观测数据，并结合L波段探空、地表温度和降水量等气象要素观测资料，对冻雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合和雪等五种不同类型的降水进行了定量判断，进一步分析了冻雨的时空分布和重要致灾因子(冻雨量)的演变特征，随后统计了冻雨微物理特征量的分布特征，并对湖北省不同地区冻雨的滴谱进行了对比分析，最后通过探究冻雨关键物理参量之

间的相关特征，给出了此次冻雨天气形成的主导物理机制。

1 资料与方法

1.1 资料说明

激光雨滴谱仪作为一种高精度、低成本的降水滴谱观测设备已在我国各级气象站广泛布设(Han et al.,2022)。本文利用的是2024年2月1—6日在湖北省80个国家气象站布设的由OTT Hydromet及华创公司生产的Parsivel型激光雨滴谱仪，该设备是以激光为测量基础的粒子测量传感器，能够测量32个直径通道和32个速度通道范围内的降水粒子个数，其中直径档的宽度范围为0～26 mm，而速度档的宽度范围为0～20 m·s^{-1}，数据时间分辨率为1 min。

由于激光雨滴谱仪信噪比的原因，前2个直径通道的观测数据直接剔除，同时在对雨滴谱资料进行处理之前，通过以下方法对数据进行质量控制：(1) 质量控制后的样本中，将分钟级的降雨强度小于0.1 mm·h^{-1}，或者降水粒数少于10个的样本视为噪声并剔除(Tokay et al.,2013)；(2) 利用有效观测面积替代物理观测面积重新对降水微物理参数进行反演，以降低边缘效应的影响(Jaffrain and Berne,2011)；(3) 固定降水密度采用Brandes等(2007)方法计算；(4) 参考Chen等(2017)的方法，剔除超过或低于经验下落末速度60%的降水粒子，以减少破碎粒子对观测结果的影响；(5) 由于存在部分高海拔的站点，所以需要用$(\rho_0/\rho)^{0.5}$对水成物粒子的下落末速度进行订正，其中ρ是实际空气密度，ρ_0是标准大气密度(Niu et al.,2010；Jia et al.,2019)。获得80个国家气象站雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合、雪共五种相态的雨滴谱仪观测数据，样本量依次为132 851、21 561、27 773、19 488、6 593 min。

同时，结合同时期所对应80个国家气象站的气温、降水和地表温度等相关资料，进一步对冻雨期间地面气象条件进行分析。

1.2 降水相态定量识别

冻雨本质是一种液态降水，但其一方面常与固态降水粒子混合出现，另一方面则碰撞在物体表面后会出现冻结的现象，所以要对其进行定量识别。降水类型的判断基于不同相态的降水粒子下落末速度与直径大小之间差异性的关系特征，其能够很好的适用于激光雨滴谱仪降水相态的识别与分类(Yuter et al.,2006；Tokay et al.,2014)。Lü等(2023)通过拟合观测降水粒子直径-下落速度关系式，并与不同降水相态的经验关系式进行弗雷歇距离δf (Fréchet distance) 的计算与判断，建立了降水相态匹配与识别的的客观方法。对于δf越接近0，则表明观测的降水粒子相态与理论曲线越接近。采用上述客观分类方法，本研究中的降水粒子相态分为雨、霰、雪花、雨霰混合及雪霰混合类型。对于已经识别为雨的降水，如果同时满足地面温度小于0 ℃则将其归类为冻雨(Chen et al., 2011；Garrett and Yuter, 2014；Jia et al.,2019)。

为了验证2月1—6日雨滴谱仪反演得到液态降水量(暖雨和冻雨)的可靠性，将其与雨量计观测得到的降水量进行对比分析，图1给出了湖北省80个国家站雨量计所测的日降水量和雨滴谱仪反演得到的日累积液态降水量之间相关关系的散点图，其中固态降水主导的降水日不考虑，共有414个站日的降水量观测资料。可以看到，两者呈较好的正相关关系，决定系数为0.77，且拟合线的斜率仅略大于1而截距为2.89，但存在拟合线上方散点的偏离程度明显大于下方的现象，这一方面表明了雨滴谱仪反演得到的降水量能很好地反映实际降水的大小(付志康等, 2022；Zhou et al.,2024)，而另一方面雨量计偏大的降水则与观测期间存在一定的霰和雪等固态降水有关，这与观测事实十分一致。

总之，雨滴谱仪反演得到的液态降水能够很好地应用在本文冻雨宏微观特征的分析中。

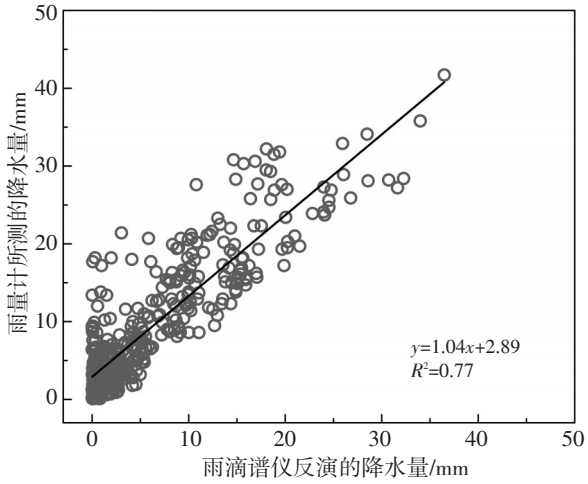


图1 2024年2月1—6日湖北省80个国家气象站雨量计所测和雨滴谱仪(液态降水)反演的日累积降水量散点图

Fig. 1 Scatter plots of daily accumulated precipitation observed from rain gauges and calculated from raindrop spectrometers (liquid precipitation) at 80 meteorological stations in Hubei Province from February 1 to 6, 2024

1.3 关键物理参量的计算

Gamma分布能够有效反映冻雨滴谱的分布特征，即

$$N(D)=N_0D^{\mu}\exp(-\Lambda D) \tag{1}$$

其中，N_0为浓度参数；μ为形状因子，当$\mu>0$时曲线向上弯曲，当$\mu<0$时曲线向下弯曲，当μ=0时，Gamma

分布转变为M-P分布；Λ为斜率参数。

本文分析用到的其他冻雨微物理参量包括雨滴总数浓度N_t (m^{-3})、液水含量L_{WC} ($g\cdot m^{-3}$)、雨强R ($mm\cdot h^{-1}$)、反射率因子Z ($mm^6\cdot mm^{-3}$)、质量加权平均直径D_m (mm)和归一化截距参数N_w ($mm^{-1}\ m^{-3}$)，其分别由以下各式计算得到(Chen et al.，2017；Lü et al.，2023)

$$N_t=\sum_{i=1}^{L}N(D_i)\Delta D_i \tag{2}$$

$$L_{WC}=\frac{\pi}{6000}\sum_{i=1}^{L}D_i^3N(D_i)\Delta D_i \tag{3}$$

$$R=\frac{6\pi}{10^4}\sum_{i=1}^{L}D_i^3V_iN(D_i)\Delta D_i \tag{4}$$

$$Z=\sum_{i=1}^{L}D_i^6N(D_i)\Delta D_i \tag{5}$$

$$D_m=\frac{M_4}{M_3} \tag{6}$$

$$N_W=\frac{4^4}{\pi\rho_w}\left(\frac{10^3LWC}{D_m^4}\right) \tag{7}$$

2 冻雨过程的宏观特征

2.1 降水过程概况

2024年2月1—6日的雨雪冰冻天气表现出致灾过程时间长，且多相态降水频繁出现的特征。因此，图2给出此次过程中的雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合和雪共五种降水相态的累积时间和占比特征，从中看到，此次降水过程表现为以雨为主，夹杂着霰、雪等固态降水粒子，此次降水过程主要集中在武汉城市圈，该地区的降水普遍接近或者超过3 000 min，其中武汉城市圈的鄂州、武汉和仙桃地区降水出现时间最长，均超过3 300 min。同时，雨作为此次降水过程的主导相态，武汉城市圈地区的占比基本超过60 %，而金沙、咸宁、黄石和鄂州等地区的占比则超过90 %。相比于液态降水而言，霰是主要出现的固态降水粒子，而雪花则很少出现。

不同于山区冬季降水过程中多相态频发的特征(Eidhammer et al.，2018；Gonzalez et al.，2021)，此次雨雪冰冻过程的相态分布极其有利于冻雨的出现和长时间维持，液态降水最为集中的江汉平原和武汉城市圈地区则具有容易冻雨致灾的降水条件。

进一步选取武汉、天门、宜昌和金沙4站分别代表武汉城市圈、江汉平原、鄂西南和鄂东南地区，分析2024年2月1—6日冻雨、雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合和雪六种相态降水逐小时占比及其冻雨量的演变特征(图3)，其中冻雨的判定标准见1.2。总体而言，降水相态表现为雨-冻雨-固态降水的转换特征，表现为典型平原地区冻雨过程相态转换的特征(Chen et al.，

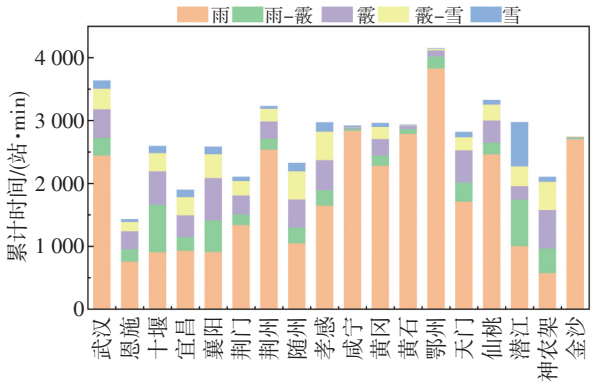


图2 2024年2月1—6日湖北省不同地区雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合和雪五种降水相态的累计时间和占比特征

Fig. 2 Distribution of cumulative time and proportions of five precipitation phases: rain, mixed rain-graupel, graupel, mixed graupel-snowflakes, and snowflakes from February 1 to 6, 2024

2011；Lü et al.，2023)，其中，雨主要集中在2月1日，冻雨主要集中在2月2—3日，之后则以固态降水为主，且江汉平原和武汉城市圈等冻雨主要集中发生区域2月2—3日基本没有固态降水出现，稳定持续的冻雨会导致电线积冰的爆发性增长(Jones and Eylander，2017)。而位于鄂西南宜昌地区的冻雨则表现出冻雨和固态降水相互夹杂的特征，反之位于鄂东南山区的金沙大气本底站(海拔751.6 m)则表现为冻雨长时间稳定维持，仅有少量的固态降水出现，而这一地区也出现了此次过程中湖北省最大的电线积冰厚度(平均冰厚超过40 mm)。

进一步分析武汉城市圈、江汉平原、鄂西南和鄂东南地区共4个地区小时降水量的分布特征，可知，冻雨量基本都小于4 $mm\cdot h^{-1}$，且大部分小时降水量在1 mm以下，此次冻雨为典型的层状云弱降水过程。

2.2 冻雨量时空分布特征

冻雨量的定量估算无论是在雨雪冰冻天气的预报预警服务中，还是灾后定量评估中均会起到无可替代的作用，目前气象业务、服务中冻雨量的大小主要依靠人工观测、称重式雨量计以及模式预估产品获取，其数值不仅不够准确、缺乏定量化的方法，而且物理意义不明确。本节主要利用雨滴谱仪判别得到的液态降水类型和降水量，结合地表温度，实现对冻雨量时空分布的定量估算。

图4给出2024年2月1—6日湖北省不同地区冻雨时数和冻雨量的时空分布特征。图4a显示，冻雨时数和冻雨量总体表现为一致性的分布特征，高值区呈现出西北—东南走向，从江汉平原南部的荆州地区延伸至武汉城市圈东北部的黄冈地区，冻雨时数一般在15 h以上，而冻雨量则超过24 mm。同时，值得注意的是，咸宁地区的崇阳和金沙表现出了此次冰冻雨雪过

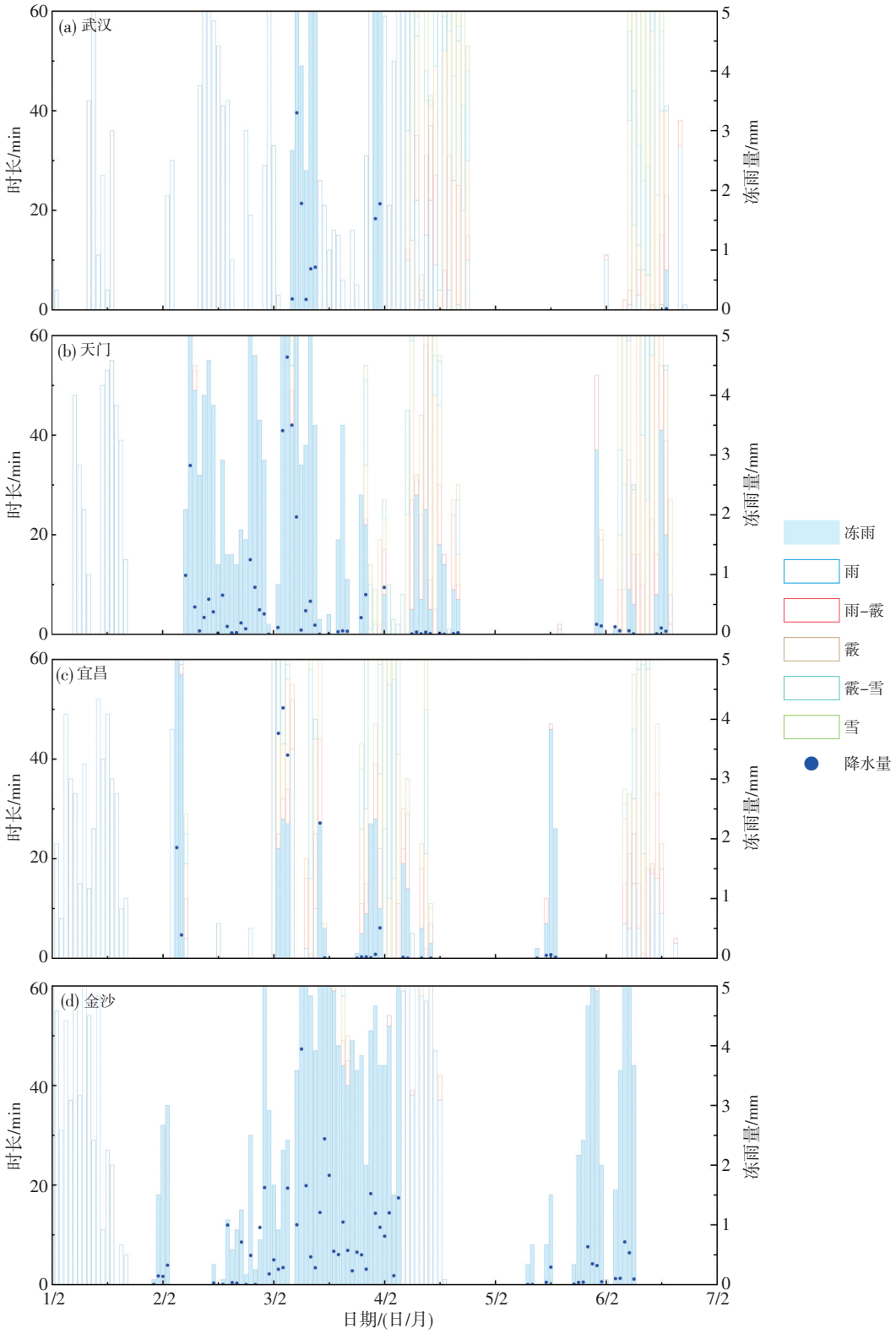


图3 2024年2月1—6日武汉(a)、天门(b)、宜昌(c)和金沙地区(d)冻雨、雨、雨-霰混合、霰、霰-雪混合和雪逐小时占比%及其冻雨量演变

Fig. 3 Temporal variation in the precipitation type and freezing rain amount at (a) Wuhan, (b) Tianmen, (c) Yichang, and (d) Jinsha from February 1 to 6, 2024
The rain (hollow blue bar), freezing rain (solid blue bar), mixed rain–graupel (hollow red bar), graupel (hollow apricot bar), mixed graupel–snowflakes (hollow cyan bar), and snowflakes (hollow green bar) from each station are shown. The blue solid dot represents the freezing rain amount

程中最大的冻雨时数和最强的冻雨量，分别为31 h和44 h，出现了45.6 mm和40.5 mm的冻雨量。不同于以往区域性冻雨短历时的特征(Lü et al.，2023)，长时间持续和高强度发生的冻雨天气通常表现出了极强的致

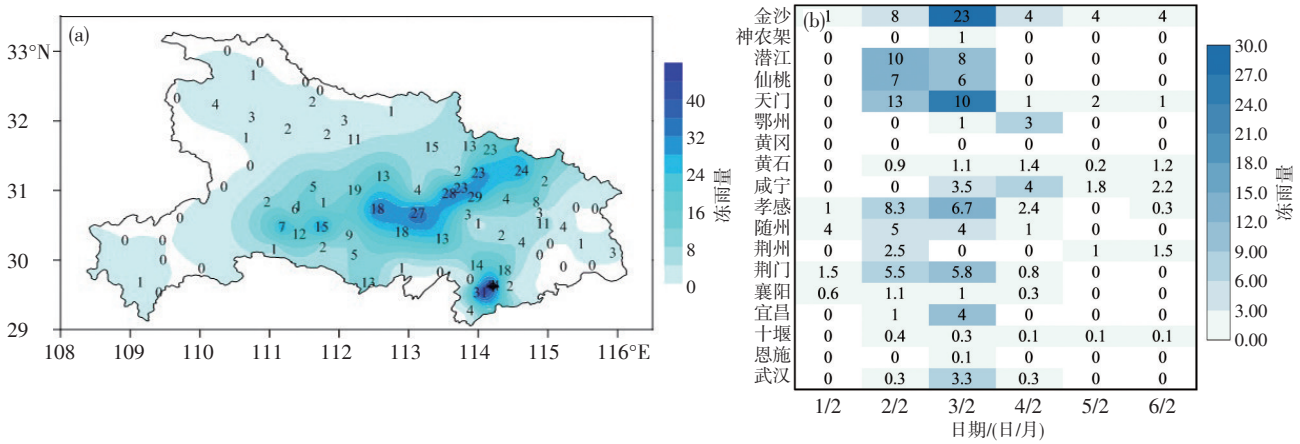


图4 2024年2月1—6日湖北省不同地区累计冻雨量(a，单位：mm)、逐日冻雨量(填色，单位：mm)和冻雨时数(数值，单位：h)(b)分布

Fig. 4 Spatial (a) and temporal (b) distributions of freezing rain amount (unit: mm) and freezing rain hours (unit: h) in different regions of Hubei Province from February 1 to 6, 2024

The freezing rain amount is displayed in different shades of color, while the freezing rain hours are represented by the numbers in the chart

灾性特征(Drage and Thiis，2012；宗海锋等，2022)。

另外，从其时间变化上看(图4b)，与前文分析一致，即冻雨时数和冻雨量均主要集中在2月2—3日，多个地区连续两天的冻雨量均在10 mm以上，其中2月3日最强，金沙和天门的日冻雨量均超过25 mm，且金沙几乎全天均被冻雨天气覆盖。尽管此次雨雪冰冻天气持续了近6 d，但仍然可以看到冻雨天气表现出一定的集中性特征，有针对性的进行防范和应对，能够有效减少冻雨天气的致灾影响。

3 冻雨过程的微物理特征

3.1 冻雨关键微物理参量的统计特征

上节分析了冻雨天气的宏观特征，为了完整刻画此次大范围冻雨天气，对冻雨的微物理特征进行了分析。图5给出2024年2月1—6日湖北省冻雨天气数浓度、液水含量、雨强和粒径的逐日分布规律，从中

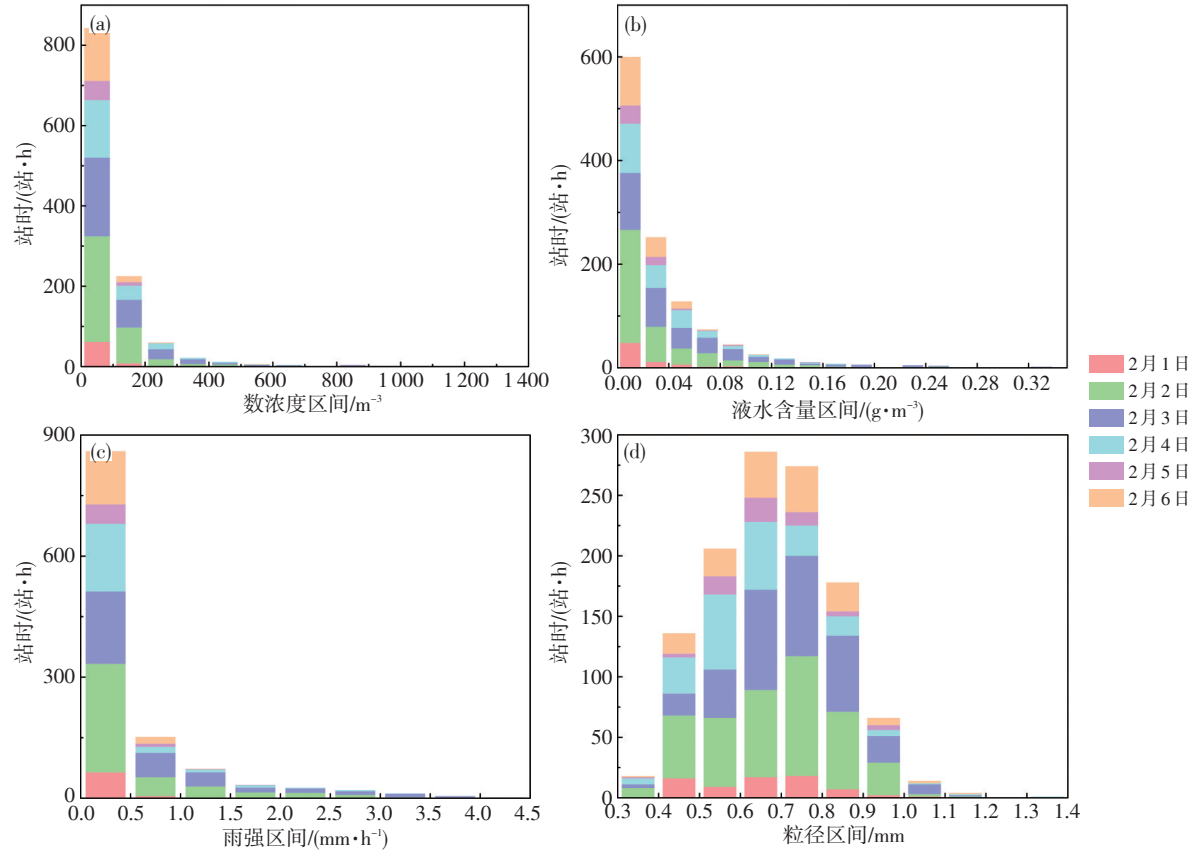


图5 2024年2月1—6日湖北省逐日冻雨天气数浓度(a)、液水含量(b)、雨强(c)和粒径(d)的分布

Fig. 5 The distributions of number concentration (a), liquid water content (b), rainfall intensity (c), and raindrop diameter (d) of freezing rain from February 1 to 6, 2024

看出，数浓度、液水含量和雨强均在最小的数值区间内表现得最为频发，分别为0~100 m^{-3}、0~0.02 $g·m^{-3}$和0~0.5 $mm·h^{-1}$，而粒径大小的频发区间主要集中在0.6~0.7 mm，4个物理量的峰值则分别为1 100 m^{-3}、0.33 $g·m^{-3}$、4.5 $mm·h^{-1}$和1.4 mm。并且随着区间数值的增大，2日和3日数浓度、液水含量和雨强站时数的占比明显增加，而粒径则在大于峰值区间之后才有这一特征出现。同时，2日和3日冻雨粒径在0.5~0.9 mm连续4个区域间范围的站时数均为50左右，明显大于其他时期，这表明较大的冻雨滴对这一时段较强的冻雨贡献明显。

3.2 冻雨的平均滴谱分布

此次过程中不同地区冻雨的平均谱见图6，从中看到，各地的平均雨滴谱均为单峰分布，小雨滴端曲线向下弯曲，峰值数密度主要位于0.44~0.69 mm，而最大粒径基本都小于5 mm，其中值得注意的是，冻雨较强的金沙、潜江、天门和仙桃等地区峰值数密度主要集中在0.56~0.69 mm，而冻雨偏弱的恩施、神农架、十堰和襄阳等地区峰值数密度则主要为0.44 mm，且即使是地理位置非常接近的潜江、天门和仙桃，冻雨的平均谱均存在较为明显的差异性特征(图6d)。进一步对比各个地区的冻雨峰值数密度，潜江地区峰值数密度最大，在0.56 mm处超过800 $mm^{-3}·mm^{-1}$，鄂州在同样粒径处的峰值数密度超过400 $mm^{-3}·mm^{-1}$，而其他地区的峰值数密度基本小于200 $mm^{-3}·mm^{-1}$，小于江汉平原和安徽潜山地区的区域性、短历时冻雨过程(Chen et al.，2011；Lü et al.，2023)，这种谱形的差异性和峰值数密度的低值特征与此次冻雨过程较长的持续时间密不可分。

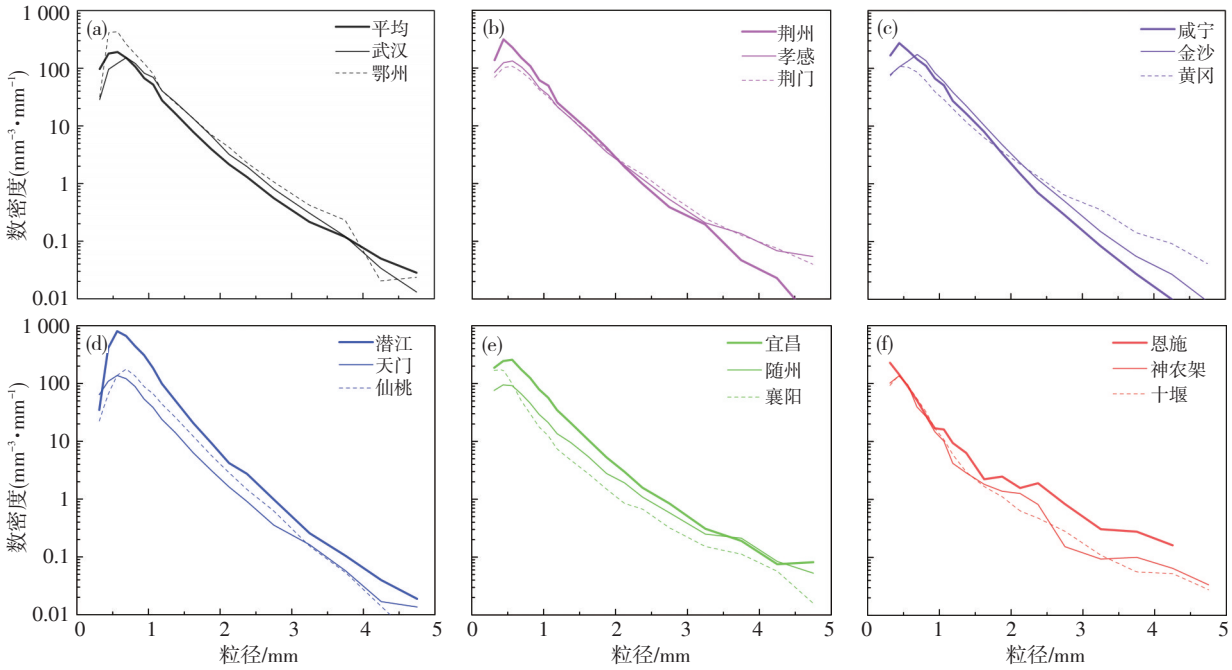


图6 2024年2月1—6日(a)湖北全省平均、武汉和鄂州，(b)荆州、孝感和荆门，(c)咸宁、金沙和黄冈，(d)潜江、天门和仙桃，(e)宜昌、随州和襄阳，(f)恩施、神农架和十堰冻雨的平均滴谱分布

Fig. 6 The average raindrop spectrum distributions of freezing rain in (a) all regions in Hubei Province, Wuhan, and Ezhou, (b) Jingzhou, Xiaogan, and Jingmen, (c) Xianning, Jinsha, and Huanggang, (d) Qianjiang, Tianmen, and Xiantao, (e) Yichang, Suizhou, and Xiangyang, (f) Enshi, Shennongjia, and Shiyan from February 1to 6, 2024

3.3 冻雨关键滴谱参量的相关关系

雨滴谱的观测结果常被用在QPE的估算中，其经验函数形式为Marshall and Palmer(1948)提出的$Z=AR^b$。该公式通过经验常数A和b描述了雨强R ($mm·h^{-1}$)和雷达反射率因子Z ($mm^6·m^{-3}$)之间的关系，这取决于降水类型、微物理性质、地理位置和气候区域。系数A与雨滴的大小有关，指数b代表降雨的微观物理特征，指数b=1则表示其为在稳定和平衡降雨，而b>1则表明降水滴谱受到到粒子大小以及混合过程的影响(Seela et al.，2017)。因此，在局地观测基础上选取合适的A和b，可以改善不同地区不同降雨事件类型的降水估算，而冻雨作为一种能够反应固态和液态之间转换的降水形式，对其Z-R关系的研究相对较少。图8给出R作为Z和(A，b)的函数的散点图，这些散点是由此次冻雨事件期间所有站点的观测值得出。

此次长时间、大范围冻雨过程的Z-R关系为$Z=216.95R^{1.79}$，相较于中纬度层云降水(Marshall and Palmer，1948)、安徽潜山冻雨(Chen et al.，2011)、江苏南京层云降水(Wen et al.，2019)、北京层云降水(Luo et al.，2021)

和江汉平原冻雨(Lü et al.，2023)的Z–R关系，虽然均为层状云降水过程，但A和b值在不同区域的分布存在显著差异。江苏南京层云降水A值最大，由于系数A与D_m成正比(Steiner et al.，2004)，丰富的水汽条件使得南京层状云的降水雨滴最大。安徽潜山冻雨的A值最小，b值次之，这可能与大量的小雨滴有关。最值得注意的是，(A, b)在该冻雨事件中的分布与中纬度层云降水和江汉平原冻雨非常接近，A值介于两者之间，而b值则甚至表现出比地理位置相近、但短历时且小范围的冻雨更大的数值(Lü et al.，2023)，更大于其他层状云降水的数值，这可能与冻雨不同于普通层状云降水的微物理机制有关(Pu et al.，2020)。

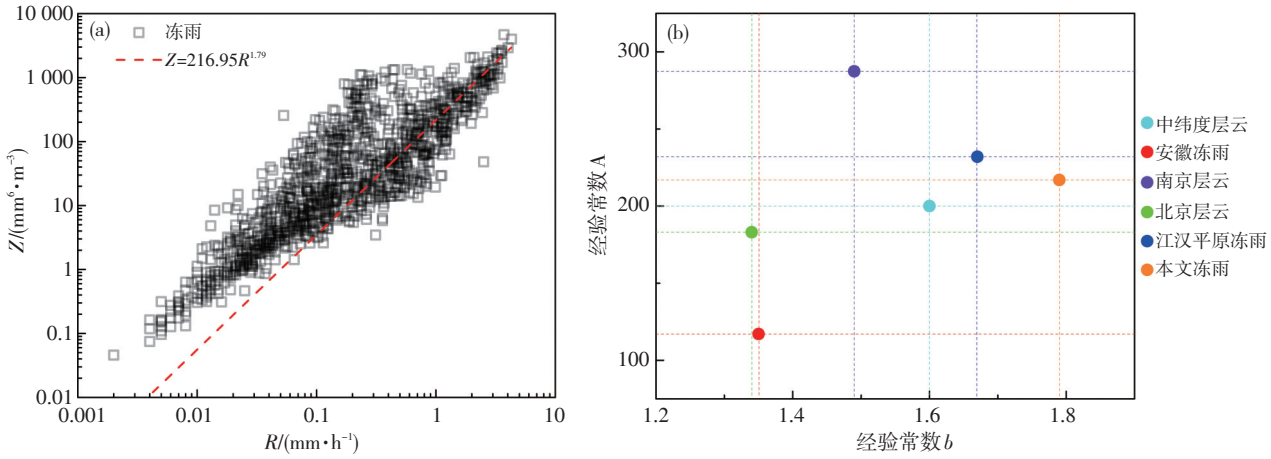


图7 2024年2月1—6日湖北地区冻雨过程中Z–R的散点图和相关关系(a)，以及经验常数A和b的分布(b，青色的实心圆和虚线代表的是中纬度层状云的Z–R关系，红色的实心圆和虚线代表的是中国中部潜山冻雨的Z–R关系，紫色的实心圆和虚线代表的是中国东部南京层状云的Z–R关系，绿色的实心圆和虚线代表的是中国北部北京层状云的Z–R关系，蓝色的实心圆和虚线代表的是中国中部江汉平原冻雨的Z–R关系)

Fig. 7 Scatterplots of the Z–R values and the fitted power-law relations from February 1 to 6, 2024 (a) and the corresponding parameters, A and b values (b) during the freezing rain event. In panel (b), the cyan solid circle and dashed line represent the commonly used Z–R model (Z=200$R^{1.60}$) for midlatitude stratiform precipitation, the red solid circle and dashed line represent the Z–R model (Z=117$R^{1.35}$) for freezing rain in Qianshan of Central China, the purple solid circle and dashed line represent the Z–R model (Z=287.42$R^{1.49}$) for stratiform precipitation in winter in Nanjing of East China, the green solid circle and dashed line represent the Z–R model (Z=183.07$R^{1.34}$) for stratiform precipitation in winter in Beijing of North China, and the blue solid circle and dashed line represent the Z–R model (Z=232.04$R^{1.67}$) for stratiform precipitation in Jianghan plain of Central China

D_m和N_w是降水过程中的两个关键微物理参量，两者的分布规律尽管存在着地区差异性特征，但是依然能够在一定程度上反映降水形成的物理机制。Dolan等(2018)对大量的雨滴谱数据集进行主成分分析(PCA)，进而给出了用于区分不同降水机制的D_0–$\log_{10}N_w$分布图。Gonzalez等(2021)则进一步将其应用在山区冬季降水过程的分析中。

为了更好地揭示此次冻雨形成的可能机制及其与类似降雨过程$\log_{10}N_w$和D_m的差异，将本次过程中获得的$\log_{10}N_w$–D_m关系与安徽潜山冻雨(Chen et al.，2011)、江汉平原冻雨 (Lv et al.，2023)以及湖北地区层云降水过程(Fu et al.，2020)中的关系进行比较 (图8)。安徽潜山地区冻雨的平均D_m值最小，但平均$\log_{10}N_w$值最大(分别为0.63 mm和4.25)，这表明此次冻雨过程主要是由微小的凇附雪粒融化形成，而雪花的融化往往会导致层状云降水表现为较大的D_m，和较小的$\log_{10}N_w$(Bringi et al.，2003)。江汉平原冻雨和湖北层云降水则表现出增大的D_m和减小的$\log_{10}N_w$，D_m为1.0 mm~1.25 mm，而$\log_{10}N_w$为3.75 ~3.9，表明存在干燥大雪花的融化，凝结–碰撞–聚结过程有利于大雨滴的形成(Martinez and Gori，1999)。

图8中几乎所有来自本次冻雨过程的$\log_{10}N_w$–D_m散点均位于Bringi 等(2003)提出的对流/层状分离线以下，它被广泛用于区分对流降水和层状降水。2月1—6日冻雨过程的$\log_{10}N_w$和D_m数值较为接近，其中3日和4日的D_m略大，接近1.12 mm，2日和5日的D_m略大，为0.95 mm左右，而$\log_{10}N_w$的数值均集中在3.0左右，显著小于其他短历时冻雨和本地区的层状云降水过程。整个过程中D_m和$\log_{10}N_w$的平均值分别为1.07 mm和3.03，概率密度呈现为单峰型分布，且均表现为分散型的分布特征，小雪粒的融化较少，更多的是致密霰粒和冰晶聚合物的融化(Zhang et al.，2019)。

进一步结合Dolan等(2018)给出的不同$\log_{10}N_w$和D_m相关关系下降水形成的主导物理机制，尝试定性揭示此次冻雨事件的物理机制。此次过程的$\log_{10}N_w$–D_m散点主要分布在D_m小于1 mm且$\log_{10}N_w$小于4的水汽凝华机制的区域，D_m大于1.1 mm且$\log_{10}N_w$小于3的丛

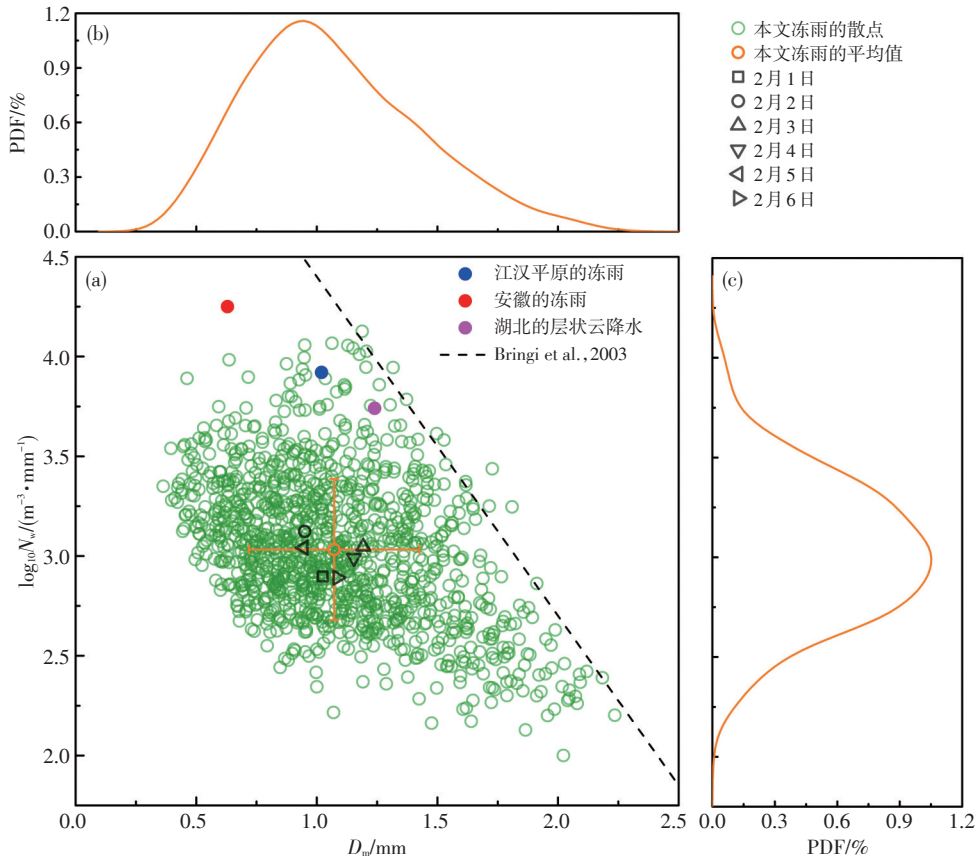


图8 2024年2月1—6日冻雨过程平均$\log_{10}N_w$–D_m散点图(a,蓝色实心点和红色实心点分别为江汉平原和安徽潜山的冻雨过程,玫红色实心点是湖北地区层状降水的研究结果),以及D_m(b)和$\log_{10}N_w$(c)频率分布图

Fig. 8 The (a) scatterplots of the mean values of $\log_{10}N_w$ and D_m for freezing rain (the blue solid circle represents the result of freezing rain in Jianghan plain, the red solid circle represents the result of freezing rain in Qianshan of Anhui Province, and the rose solid circle represents the result of stratiform precipitation in Hubei Province), and the (b, c) corresponding kernel density plots from February 1 to 6, 2024

集和淞附机制的区域,以及两者之间的空白区域。不同于短历时的平原冻雨过程(Chen et al.,2011;Lü et al.,2023)受到较明显弱对流的影响,此次冻雨过程主要受到水汽凝华、丛集和淞附机制的共同影响,导致D_m和$\log_{10}N_w$的平均值位于此两种机制之间的空白区域,进而形成大小适中的D_m和偏小的$\log_{10}N_w$。

4 结论与讨论

利用2024年2月1—6日湖北省80个国家气象站的激光雨滴谱仪观测数据,并结合地表温度、降水量等气象要素观测资料,对冻雨、雨–霰混合、霰、霰–雪混合和雪等五种不同类型的降水进行定量判断,揭示冻雨重要致灾因子(冻雨时数和冻雨量)的时空演变特征,统计分析冻雨微物理特征量的分布及其之间的相关特征,并给出此次冻雨天气形成的主导物理机制。主要结论如下:

(1) 此次雨雪冰冻天气过程中湖北各地降水时长普遍接近或者超过3 000 min,其中降水相态以液态降水为主,夹杂着霰、雪等固态降水粒子;冻雨时数和冻雨量总体表现为一致性的分布特征,高值区从江汉平原南部的荆州地区延伸至武汉城市圈东北部的黄冈地区,冻雨时数一般在15 h以上,而累计冻雨量则超过24 mm,其中咸宁地区的崇阳县冻雨强度最大,31 h冻雨过程中累计冻雨量为45.6 mm;2月2—3日是冻雨最为集中的时期,多个地区连续两天的冻雨量均在10 mm以上,其中2月3日金沙和天门的日冻雨量均超过25 mm,且金沙几乎全天被冻雨天气覆盖。

(2) 数浓度、液水含量和雨强均在最小的数值区间内站时数显著偏大,分别为0~100 m^{-3}、0~0.02 g·m^{-3}和0~0.5 mm·h^{-1},而粒径大小的频发区间主要集中在0.6~0.7 mm,且不同物理量各个区间范围内2月2—3日站时数的占比均为主导地位;不同冻雨的平均谱均为单峰型分布,峰值数密度主要位于0.44~0.69 mm,而最大粒径基本均小于5 mm,潜江和鄂州的峰值数密度较大,分别超过800 mm^{-3}·mm^{-1}和400 mm^{-3}·mm^{-1},其余地区基本小于200 mm^{-3}·mm^{-1}。

(3) 此次冻雨过程的Z–R关系为$Z=216.95R^{1.79}$,b值甚至大于地理位置相近层云降水或短历时且小范

围冻雨过程的数值，能够更好地应用于大范围、长持续冻雨过程的QPE推算中。

(4) 整个冻雨过程 D_m 和 $\log_{10}N_w$ 的平均值分别为1.07 mm和3.03，概率密度呈现为单峰型分布，且均表现为分散型的分布特征，小雪粒的融化较少，更多的是致密霰粒和冰晶聚合物的融化，过程主要受到水汽凝华、丛集和淞附机制的共同影响，进而形成大小适中的 D_m 和偏小的 $\log_{10}N_w$。

需要指出的是，尽管本文对此次大范围、长时间冻雨过程的宏微观特征进行了初步分析，其中仍有较多科学问题亟需深入探讨，如由于Parsivel型激光雨滴谱仪本身的局限性，如何利用二维视频雨滴谱仪的观测结果，对冻雨出现情景下激光雨滴谱仪的观测结果进行订正，冻雨量对不同地区电线积冰厚度和强度的定量影响，水成物宏微观特征的垂直分布对地面冻雨生消的作用是什么等，这些科学问题有待进一步研究。

参考文献(References)：

付志康，万蓉，肖艳姣，等. 2022.业务DSG5型降水现象仪与Parsivel降水滴谱仪测量参数对比分析[J].暴雨灾害,41(4):434–444. Fu Z K, Wan R, Xiao Y J, et al. 2022. Comparison of precipitation measurement by DSG5 and Parsivel present weather instrument [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):434–444 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.04.008

胡毅.2005.输电线路大范围冰害事故分析及对策[J].高压电技术,31(4):14–15. Hu Y. 2005. Analysis and countermeasures for large area accident cause by icing on transmission line [J]. High Voltage Engineering, 31(4):14–15 (in Chinese). doi:10.13336/j.1003–6520.hve.2005.04.006

江雨霏，杨莲梅，曾勇，等.2023.昭苏夏季层状云和对流云降水的雨滴谱特征[J].沙漠与绿洲气象,17(3): 8–16. Jiang Y F, Yang L M, Zeng Y, et al. 2023. Characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation in summer in Zhaosu [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):8–16 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2023.03.002

李再华，白晓民，周子冠，等.2008.电网覆冰防治方法和研究进展[J].电网技术,32(4):7–14. Li Z H, Bai X M, Zhou Z G, et al. 2008. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent sstudy [J]. Power System Technology,32(4):7–14 (in Chinese). doi:10.13335/j.1000–3673.pst.2008.04.009

陆正奇.2022.冬季降水相态的理论模型构建及地形的影响研究[D].南京：南京信息工程大学. Lu Z Q. 2022. Construction of a theoretical model of winter precipitation type and the influence of terrain on the distribution of precipitation types [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese). doi:10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000036

毛淑君，李栋梁. 2015.基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估[J].冰川冻土,37(1):14–26. Mao S J, Li D L. 2015. Comprehensive assessment of low temperature，snow and freezing weather in southern China based on meteorological elements [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,37(1):14–26 (in Chinese). doi:10.7522 /j.issn.1000–0240.2015.0002

王遵娅.2014.近 50 年中国大范围持续性冰冻天气过程的变化特征[J].高原气象,33(1):179–189. Wang Z Y. 2014. Change features of the extensive and persistent ice–freezing processes of China in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology,33(1):179–189 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00183

张芳华，许先煌，权婉晴，等. 2024. 2024 年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析[J].暴雨灾害. Zhang F H, Xu X H, Quan W Q, et al. 2024. Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–095

宗海锋，布和朝鲁，彭京备，等.2022.中国南方大范围持续性低温、雨雪和冰冻组合性灾害事件：客观识别方法及关键特征[J].大气科学,46(5):1055–1070. Zong H F, Bueh C L, Peng J B, et al. 2022. Combined disaster events of extensive and persistent low temperatures, rain/snow, and freezing in Southern China: Objective identification and key features [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(5):1055–1070 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2108.21052

Adhikari A, Liu C T. 2019. Remote sensing properties of freezing rain events from space [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(19):10385–10400. doi:10.1029/2019JD030788

Birk K, Lenning E, Donofrio K, et al. 2021. A revised Bourgouin precipitation–type algorithm [J]. Weather and Forecasting, 36(2):425–438. doi:10.1175/WAF–D–20–0118.1

Bourgouin P. 2000. A Method to Determine Precipitation Types [J]. Weather and Forecasting,15(5):583–592. doi:10.1175/1520–0434(2000)015<0583:AMTDPT>2.0.CO;2

Brandes E A, Ikeda K, Zhang G F, et al. 2007. A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46(5):634–650. doi:10.1175/JAM2489.1

Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual–polarized radar analysis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,60(2):354–365. doi:10.1175/1520–0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2

Bringi V N, Williams C R, Thurai M, et al. 2009. Using dual–polarized radar and dual–frequency profiler for DSD characterization: A case study from Darwin, Australia [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,26(10):2107–2122. doi:10.1175/2009JTECHA1258.1

Chen B, Hu Z, Liu L, et al. 2017. Raindrop size distribution measurements at 4,500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX–III [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,122(20):11092–11106. doi:10.1002/2017JD027233

Chen B J, Hu W, Pu J P. 2011. Characteristics of the raindrop size distribution for freezing precipitation observed in southern China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D6):D06201. doi:10.1029/2010JD015305

Dolan B, Fuchs B, Rutledge S A, et al. 2018. Primary modes of global drop size distributions [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,75(5):1453–1476. doi:10.1175/JAS–D–17–0242.1

Drage M A, Thiis T K. 2012. Large–scale measurements and numerical simulations of in–cloud icing around a mountain ridge [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,104–106:523–531. doi:

10.1016/j.jweia.2012.02.028

Eidhammer T, Grubišić V, Rasmussen R, et al. 2018. Winter precipitation efficiency of mountain ranges in the Colorado Rockies under climate change [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,123(5): 2573–2590. doi:10.1002/2017JD027995

Fu Z K, Dong X Q, Zhou L L, et al. 2020. Statistical characteristics of raindrop size distributions and parameters in central China during the Meiyu seasons [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125: e2019JD031954, doi:10.1029/2019JD03

Garrett T J, Yuter S E. 2014. Observed influence of riming, temperature, and turbulence on the fall speed of solid precipitation [J]. Geophysical Research Letters,41(18):6515–6522. doi:10.1002/2014GL061016

Gonzalez S, Bech J, Garcia–Benadi A, et al. 2021. Vertical structure and microphysical observations of winter precipitation in an inner valley during the Cerdanya–2017 field campaign [J]. Atmospheric Research, 264:105826. doi:10.1016/j.atmosres.2021.105826

Han Y, Guo J P, Li H J. et al. 2022. Investigation of raindrop size distribution and its potential influential factors during warm season over China [J]. Atmospheric Research,275:106248. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106248

Jaffrain J, Berne A. 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers [J]. Journal of Hydrometeorology,12(3):352–370. doi:10.1175/2010JHM1244.1

Jia X C, Liu Y G, Ding D P. 2019. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity [J]. Atmospheric Research,228:176–185. doi:10.1016/j.atmosres.2019.05.025

Jones K, Eylander J. 2017. Vertical variation of ice loads from freezing rain [J]. Cold Regions Science and Technology,143:126–136. doi:10.1016/j.coldregions.2017.07.008

Lu Z Q, Han Y X, Liu Y G. 2021. Occurrence of warm freezing rain: observation and modelling study [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,127(5):e2021JD036242. doi:10.1029/2021JD036242

Luo L, Guo J, Chen H N, et al. 2021. Microphysical characteristics of rainfall observed by a 2DVD disdrometer during different seasons in Beijing, China [J]. Remote Sensing,13(12):2303. doi:10.3390/rs13122303

Lv J, Zhou Y, Fu Z, et al. 2023. Variability of raindrop size distribution during a regional freezing rain event in the Jianghan Plain of Central China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,40(4):725–742. doi:10.1007/s00376–022–2131–1

Makkonen L. 2000. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,358(1776):2913–2939. doi:10.1098/rsta.2000.0690

Marshall J S, Palmer W M K. 1948. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,5(4):165–166. doi:10.1175/1520–0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2

Martinez D, Gori E G. 1999. Raindrop size distributions in convective clouds over Cuba [J]. Atmospheric Research,52(3):221–239. doi:10.1016/S0169–8095(99)00020–4

Niu S J, Jia X C, Sang J R. et al. 2010. Distributions of raindrop sizes and fall velocities in a semiarid plateau climate: Convective versus stratiform rains [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,49(4): 632–645. doi:10.1175/2009JAMC2208.1

Pu K, Liu X C, Wu Y, et al. 2020. A comparison study of raindrop size distribution among five sites at the urban scale during the East Asian rainy season [J]. Journal of Hydrology,590:125500. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125500

Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [J]. Meteorological Monographs, 30:237–237. doi:10.1175/0065–9401

Seela B K, Janapati J, Lin P L, et al. 2017. A comparison study of summer season raindrop size distribution between Palau and Taiwan, two islands in Western Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,122(21):11787–11805. doi:10.1002/2017JD026816

Steiner M, Smith J A, Uijlenhoet R. 2004. A microphysical interpretation of radar reflectivity–rain rate relationships [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,61(10):1114–1131. doi:10.1175/1520–0469(2004)061<1114:AMIORR>2.0.CO;2

Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al. 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,30(8):1672–1690. doi:10.1175/JTECH–D–12–00163.1

Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. 2014. Evaluation of the new version of the laser–optical disdrometer, OTT Parsivel2 [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,31(6):1276–1288. doi:10.1175/JTECH–D–13–00174.1

Wen L, Zhao K, Wang M Y, et al. 2019. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(4):346–362. doi:10.1007/s00376–018–8107–5

Yang L, Chen M X, Wang X L, et al. 2021. Classification of precipitation type in North China using model–based explicit fields of hydrometeors with modified thermodynamic conditions [J]. Weather and Forecasting, 36(1):91–107. doi:10.1175/WAF–D–20–0005.1

Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B. et al. 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,45(10):1450–1464. doi:10.1175/JAM2406.1

Zhang A S, Hu J J, Chen S, et al. 2019. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the monsoon season observed in Southern China [J]. Remote Sensing,11(4):432. doi:10.3390/rs11040432

Zhou L L, Zhou Y, Fu Z K, et al. 2024. Vertical structures and microphysical mechanisms of winter precipitation over the southwestern mountainous area of China [J]. Atmospheric Research,303:107346. doi:10.1016/j.atmosres.2024.107346

Zhou Y, Niu S J, Lv J J, et al. 2016. The effect of freezing drizzle, sleet and snow on microphysical characteristics of supercooled fog during the icing process in a mountainous area [J]. Atmosphere,7(11):143. doi:10.3390/atmos7110143

（责任编辑　何明琼）