

鲁南地区一次长生命史冻雨和冰粒过程特征分析

谢晓华^{1, 2} 赵海军^{1, 2} 刘新磊¹ 毛国荣¹ 赵雯¹

1 山东省临沂市气象局, 临沂 276000

2 山东省气象防灾减灾重点实验室, 济南 250031

摘要: 2024年2月20—21日鲁南发生了一次罕见的长生命史冻雨和冰粒转雪的天气过程, 利用常规观测资料、风廓线雷达资料、雨滴谱资料和ERA5再分析资料分析本次过程, 结果表明: (1) 本次过程为回流形势降水, 高空槽前西南暖湿气流沿着低层强冷空气造成明显降温的冷垫滑升, 中层暖湿气流与低层东北气流相互作用形成强烈逆温, “冷-暖-冷”的垂直温度结构得以长时间维持, 导致出现长达12 h的冻雨和冰粒天气。(2) 冻雨和冰粒均具有典型冰相融化特征。冻雨的地面气温更高, 暖层起始高度更低且暖层厚度和强度较大, 而冷层的厚度和强度较小。(3) 雨滴谱资料显示冻雨和冰粒粒子谱特征没有明显差异, 均具有粒子直径小、数浓度小、降水强度小和下落速度大的特征, 二者速度曲线均接近于降雨略有差异, 冻雨比冰粒的粒子略偏大、粒子数偏少; 降雪阶段, 谱宽展宽, 具有粒子直径大、数浓度大、降水强度大和下落速度小的特征。

关键词: 长生命史, 冻雨, 冰粒, 层结特征, 雨滴谱

中图分类号: P426

文献标志码:

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.080501

Analysis of Characteristics of a Long-Lived Freezing Rain and Ice

Pellet Event in Southern Shandong

XIE Xiaohua^{1,2} ZHAO Haijun^{1,2} LIU Xinlei¹ MAO Guorong¹ ZHAO Wen¹

1 Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276000

2 Shandong Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Jinan 250031

Abstract: A rare weather event featuring a long-lived period of freezing rain and ice pellets transitioning to snow occurred in the southern Shandong region from 20 to 21 February 2024. Using conventional observational data, wind-profiling radar data, raindrop spectrum data and ERA5 reanalysis data, this article analyzes this event. The results indicate that: (1) The event was characterized by return-flow precipitation. A southwest warm and humid airflow ahead of the upper-level trough slid upwards along a cold pad caused by a significant temperature drop due to the low-level strong cold air. The interaction between the mid-level warm and humid airflow and the low-level northeastern airflow formed a strong inversion temperature, and the "cold-warm-cold" vertical temperature structure was maintained for a long time, leading to a 12 h period of freezing rain and ice pellet weather. (2) Both freezing rain and ice pellets exhibited typical characteristics of ice-phase melting. The ground temperature during freezing rain was higher, the starting height of the warm layer was lower, and both the thickness and intensity of the warm layer were greater, while the thickness and intensity of the cold layer were smaller. (3)

*基金项目: 国家自然科学基金项目(42475007)、山东省自然科学基金项目(ZR2023MD125)、山东省气象局人工智能气象应用技术创新团队项目(SDCXTD2023-3)、山东省气象局创新团队专项(2024sdcxtd01)和山东省气象局引导类项目(2024SDYD35)共同资助

2024-10-09 2026-01-23

第一作者: 谢晓华, 主要从事天气预报和相关技术研究。E-mail: 827100588@qq.com

通讯作者: 赵海军, 主要从事灾害性天气研究工作。E-mail: weazhj@163.com

Raindrop spectrum data show that there was no significant difference in the particle size distribution characteristics between freezing rain and ice pellets. Both had features of small particle size, low number concentration, low precipitation intensity, and high falling velocity. Their velocity curves were similar to those of rainfall but had slight differences. Freezing rain had slightly larger particles and fewer particle numbers than ice pellets. During the snowfall phase, the spectrum was widened, characterized by large particle size, high number concentration, high precipitation intensity, and low falling velocity.

Key words: long-lived, freezing rain, ice pellet, stratification characteristics, raindrop spectrum

引言

冻雨和冰粒天气是冬季的主要灾害性天气之一。我国冻雨主要出现在贵州地区,在湖北、湖南、江西、安徽和辽东半岛也时有出现(曾明剑等, 2008), 冰粒天气发生次数较少, 且持续时间较短, 主要集中在中纬度的黄河下游和长江中下游地区(Gibson and Stewart, 2007; 李杰等, 2016)。

冻雨的产生分为两种机制: 一种为暖云机制, 一种为冰相机制(融化机制)(Ohtake, 1963; Huffman and Norman, 1988; 陶玥等, 2013)。暖云机制是指云滴通过碰并过程增长成雨滴, 雨滴下落到过冷层后, 成为过冷水滴, 落到地面冻结(Hanesiak and Stewart, 1995)。冰相机制是经典的“冰晶层-暖层-过冷却层”的模式, 指暖空气在向上爬升的过程中, 在逆温层顶形成大于 0℃的暖层, 高空的雪花在降落的过程当中进入暖层融化, 之后继续下降到低层冷层形成过冷水滴, 最终形成“冰包水”物质并在地面冻结(Okada, 1914; Szeto et al, 1999)。因此, 两种机制的主要区别在于中层是否存在大于 0℃的暖层, 暖层和冷层的强度不同, 会引发降水相态的转变, 可能伴随有雨、雪和冰粒的出现(杨成芳等, 2013)。冰粒的形成机制与冻雨类似, 也是分为两种机制: 一种是经典的融化机制(Hanesiak and Stewart, 1995), 多数情况下, 冰粒融化层较冻雨弱, 雪花未完全融化便进入过冷层; 也有少数情况, 中层融化层和低层冷层均较强, 雪花完全融化后又再次冻结为冰粒。另一种是暖雨直接冻结机制(漆梁波, 2012; Kajikawa and Heymsfield, 1989), 指高层没有雪花或冰晶, 由毛毛雨直接冻结为冰粒。

冻雨和冰粒天气的长时间维持, 会对农业、交通运输、电力、航空等造成严重不利影响(Bernstein, 2000; 刘朝茹等, 2015), 2008 年初, 我国南方受到冰冻雨雪天气的袭击, 给交通、电力、通讯和农业等方面造成了严重的损失(丁一汇等, 2008; 马宗晋, 2009; 江杨等, 2017)。针对其严重的灾害性, 不同降水相态的区分和预报显得更加重要, 许多学者做了相关的研究, 漆梁波(2012)对冬季我国不同区域(北方、江南、华南、西南)的冻雨和冰粒天气形成的物理过程进行对比分析研究, 总结出了甄别冻雨和冰粒天气的特征量。陈天锡等(1993)分析了冻雨发生的天气形势和温度的垂直分布特征, 陈双等(2019)对地面气温位于 0~2℃我国降雪的时空分布及其与降雨的垂直热力特征进行了研究, 引入了决策树判别方法对下雪和雨进行了判别分析。多源资料在降水相态的研究过程也当中发挥了重要作用, 多位学者利用自动气象站、双偏振雷达、毫米波云雷达、温度廓线仪和雨滴谱等分别对北京、山东和江苏的降雨、雨夹雪和雪等不同相态降水天气特征进行了分析研究(李峰和施红蓉, 2014; 孙莎莎等, 2023; 温静等, 2023)。

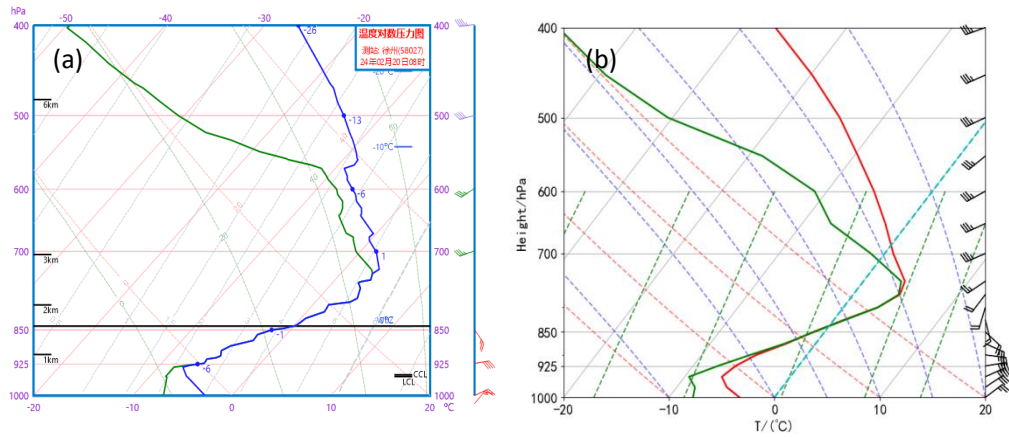
在鲁南地区, 冻雨冰粒天气通常作为一种雨转雪的中间相态, 冬季时有发生, 一般持续时间较短。2024 年 2 月 20—21 日发生了一次大范围的冻雨和冰粒转雪天气过程, 这是一次几十年一遇的过程, 我国出现了大范围强寒潮雨雪冰冻天气并伴随强对流发生(俞小鼎等,

81 2024)。在 20 日下午到夜间，山东大部地区出现冻雨和冰粒天气，其中鲁南地区多站持续
82 时间长达 12 h 以上，范围广、时间长，较为罕见。且由于当时气温较低，本次冻雨冰粒过
83 程形成明显道路结冰，对交通运输和设施农业带来较大危害。以往针对鲁南冻雨和冰粒的研
84 究较少，预报经验不足，缺乏可参考的具体预报指标。本文以临沂为代表，分析山东南部地
85 区长时间冻雨和冰粒转雪过程成因，结合风廓线雷达、雨滴谱等多源资料分析降水过程中相
86 态转换的时空分布特征，尝试凝练冻雨和冰粒的一些可参考指标，以提高预报员对冻雨和冰
87 粒天气过程认识，为今后北方地区此类天气预报提供参考。

89 1 资料来源及可用性

90 本文采用的实况资料为 2024 年 2 月 20 日 14 时至 21 日 20 时（北京时，下同）冻雨和
91 冰粒转雪的过程中，临沂国家级自动站观测的降水量、2 m 气温和 10 m 风等气象要素、风
92 廓线雷达、雨滴谱观测资料和徐州站探空资料，以及欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资
93 料（ $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ）。雨滴谱资料包括 32 个尺度通道（0.125~26 mm）和 32 个速度通道
94 （ $0.1 \sim 22.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

95 为了确定 ERA5 再分析资料在本次过程当中的可用性，利用 20 日 08 时（图 1）和 21 日
96 08 时（图略）徐州站实测探空数据与 ERA5 再分析资料绘制的临近格点（ 34.25° N 、 117.25°
97 E ）探空图进行对比分析，由于本次过程更关注融化层和冷层，二者均位于 700 hPa 以下，
98 为了更清晰地观察低层的层结特征，采用 Micaps 探空图（图 1a，倾斜方式显示）和利用 ERA5
99 再分析资料绘制的倾斜 40° 的探空图（图 1b，下文绘图方式同）。从图中可以看出，两者
100 整体形态接近，1000~700 hPa 基本一致，925~700 hPa 之间为逆温层结且呈现近饱和状态，
101 中层存在 0°C 以上的暖层；风场均表现为低层为东北风，850 hPa 以上风随高度顺转。温度
102 层结参数对比发现（表 1），再分析资料各特征高度值与实际探空观测基本一致，暖层和冷
103 层厚度与实况误差范围在 50~185 m 之间，最高温和最低温分别偏高 $0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 和 $0.8 \sim$
104 1.0°C 。综合来看，本次过程当中，再分析资料具有客观反映各高空气象要素的能力，且较
105 实际探空资料时间空间精度更高。



106 注：图 a 中蓝色实线为温度曲线，绿色实线为露点温度曲线；图 b 中红色实线为温度曲线，绿色实线为露点温度曲线，红色虚
107 线为干绝热线，绿色虚线为湿绝热线，蓝色虚线为等饱和比湿线，蓝绿色虚线为 0°C 等温线。
108

109 图 1 2024 年 2 月 20 日 08 时 (a) 徐州站实测 Micaps 探空图和 (b) 利用 ERA5 再分析资料绘制的临近格点
110 （ 34.25° N 、 117.25° E ）探空图

111 Fig 1 (a) Micaps sounding chart at Xuzhou Station and (b) sounding chart for a nearby grid point
112 based on ERA5 reanalysis data at 08:00 BT 20 February 2024

表 1 2024 年 2 月 20 日 08 时和 21 日 08 时徐州站探空与临近格点插值的 ERA5 再分析资料
温度层结参数对比
Table 1 Temperature stratification parameters between sounding at Xuzhou Station and the ERA5
reanalysis data with adjacent grid interpolation at 08:00 BT 20 and 08:00 BT 21 February 2024

时间 (BT) - 站点	>0℃ 起始 高度/hPa	>0℃厚度 /m	最暖层 /hPa	最高温 /℃	近 地 层 <0℃高度 /hPa	近 地 层 <0℃厚度 /m	近地层 最冷层 /hPa	近地层 最低温 /℃
2008-徐州站	840.3	1491	785.9	3.9	846.7	1512	931.9	-7.5
2008-ERA5	825.0	1307	775.0	4.3	850.0	1458	950.0	-6.5
2108-徐州站	761.0	689	747.5	2.1	766.4	2297	911.3	-9.6
2108-ERA5	750.0	547	750.0	2.3	750.0	2418	925.0	-8.8

2 天气实况

2024 年 2 月 20—21 日，临沂市出现了罕见的长生命史的冻雨、冰粒转雪的天气过程。20 日 14—16 时之间，临沂市自西南向东北陆续出现冻雨。17—20 时，北部县（区）为冰粒，中部县（区）冻雨逐渐转为冰粒，而南部县（区）仍为冻雨，21 日 00—02 时逐渐减弱结束。11 时，再次出现冰粒，伴随系统向北推进，温度下降，迅速转雪，过程持续至 21 日 20 时。根据降水时间和相态，本次过程主要分为两个阶段（图 2）：第一个阶段为 20 日下午到夜间，降水相态为冻雨和冰粒，持续时间长达 12 h，强度较小，小时降水量在 0~0.5 mm 之间，临沂站累计降水量为 1.7 mm；第二阶段为 21 日中午到傍晚，降水相态以雪为主，降雪强度达 $3.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，累计降水量为 7.7 mm。在 20—21 日降水过程当中，2 m 气温维持在 $-6\sim -2^{\circ}\text{C}$ 之间，同时偏北风持续较强，极大风力维持在 7 级左右，21 日午后降雪开始，阵风减弱到 5~6 级。整体来看，本次过程具有相态复杂、冻雨冰粒持续时间长、阶段性、风吹雪等特点，历史上较为少见。

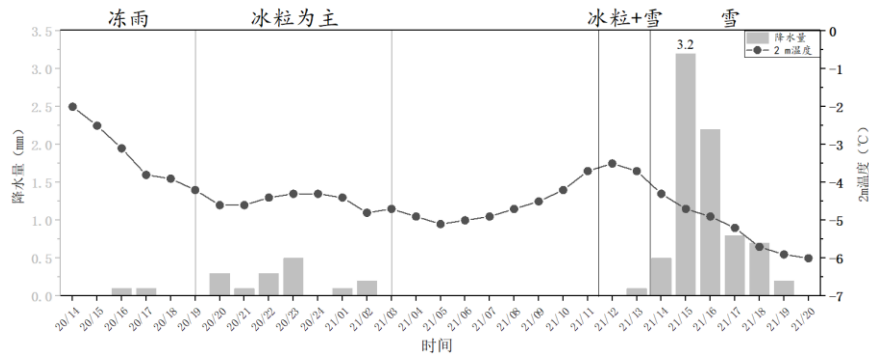


图 2 2024 年 2 月 20 日 14 时至 21 日 20 时临沂站降水量和 2 m 温度逐小时分布图
Fig 2 Hourly distribution of precipitation and 2 m temperature at Linyi Station from 14:00 BT 20
to 20:00 BT 21 February 2024

3 天气背景

3.1 环流形势

本次过程发生前, 2月18日(图略)亚洲中高纬地区受高空冷涡控制, 位于乌拉尔山和鄂霍次克海附近的高压脊有利于低涡维持和冷空气堆积, 500 hPa 和 850 hPa 相应的冷中心分别达 -48°C 和 -32°C 以下(许先煌等, 2024), 山东处于低涡底部偏西气流当中, 多短波槽活动; 西伯利亚地面冷高压中心强度达 1050 hPa 以上, 山东受冷高压前部东北气流影响, 48 h 降温达 10°C , 形成冷垫。

2月20日20时, 500 hPa (图 3a) 上西风槽东移发展, 受沿海高压脊阻挡, 槽前西南气流加强, 由 08 时的 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增强到 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 鲁南地区风速辐合明显。21 日凌晨开始风力逐渐减弱, 第一阶段冻雨冰粒逐渐结束。700 hPa (图 3b) 低槽经向度加大, 鲁南地区受槽前西南气流影响, 低空急流加强至 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 比湿达 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 鲁南地区处于西南急流轴左前方的辐合区, 21 日 08 时减弱至 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。850 hPa (图 3c) 鲁南地区受自西南地区伸向黄淮的切变线北侧与北方冷性反气旋前侧的东到东北气流影响之下。925 hPa (图 3d) 上持续受北方冷性反气旋前侧东北气流控制, 风力达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 有利于低层冷垫的长时间维持。同时地面冷高压位于贝加尔湖以南, 中心气压增强至 1062.5 hPa, 鲁南仍处于其前部的偏北气流当中(图略)。

从环流垂直配置来看, 20 日冻雨和冰粒过程发生的天气背景为典型回流形势, 500 hPa 和 700 hPa 长时间盛行西南暖湿气流, 低层至地面为东北气流, 造成近地层明显的降温, 高空槽前西南暖湿气流沿着低层冷垫滑升, 共同组成了“冷-暖-冷”的垂直温度结构, 从而形成冻雨和冰粒天气。同时, 20 日自西北地区发展的短波槽已东移至河套附近(图 3a), 携带新一股冷空气于 21 日下午影响鲁南地区, 中层暖层逐渐减弱, 第二阶段降水开始后快速转雪。

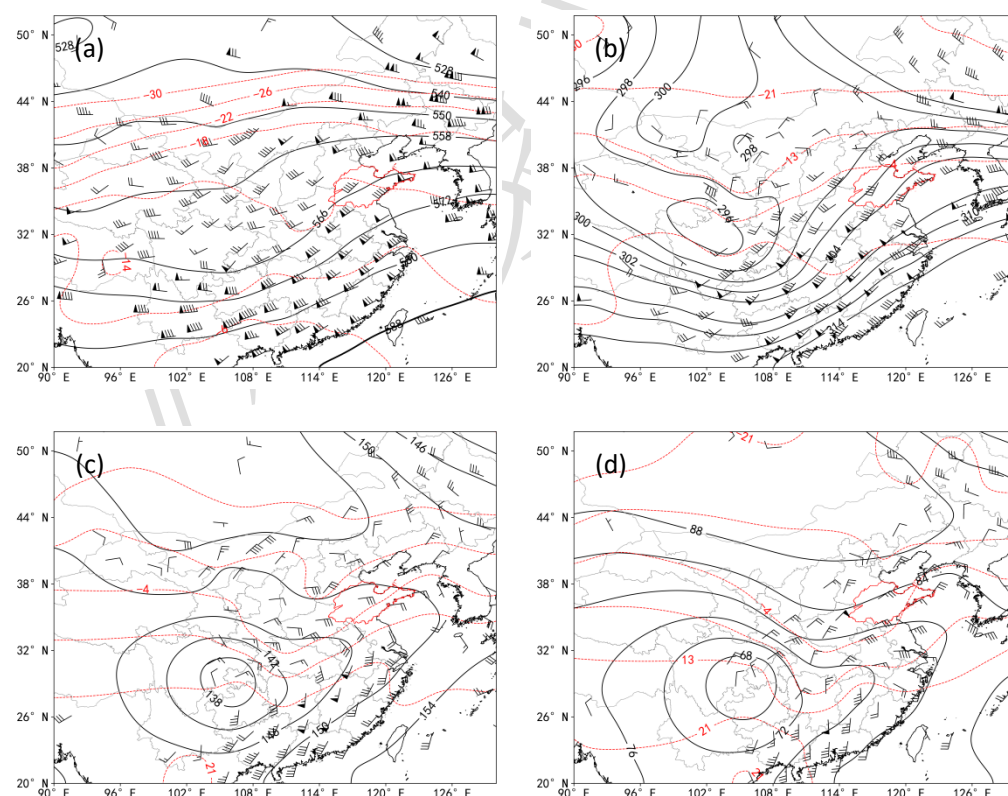


图 3 2024 年 2 月 20 日 20 时 (a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850hPa 和 (d) 925hPa 形势场

Fig 3 Synoptic charts at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa and (d) 925 hPa at 20:00 BT 20 February 2024

3.2 风场特征

从临沂站风廓线雷达风场资料（图 4）来看，2 月 18 日白天，从地面到高空为一致的西南气流，18 日夜间开始，低层 1 km 以下转为偏北风，风随高度逆转，形成冷平流结构，此时低层冷空气开始影响临沂，气温随之下降；19 日，冷空气持续向上扩展至 2 km 高度，之上仍以西南风为主。20 日 08 时近地层东北风逐渐增强，在 1 km 附近达到 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，1 km 以上风速开始减小，风随高度顺转，中层暖平流结构形成，到 2 km 基本转为西南风，风速较小，之后风速随高度迅速增大，到 3 km 左右达到急流强度。16 时，2 km 高度附近西南气流和 1 km 附近东北气流均达 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，冻雨逐渐开始；20 时，近地层东北气流再次加强，冷空气更加强盛，伴随低层气温进一步降低，冻雨转为冰粒。21 日 02 时之后，低层东北风和中高层西南风均明显减弱，第一阶段冻雨和冰粒结束，低层东北风开始向上扩展，21 日 04 时发展到 2 km 高度。21 日中午前后，受短波槽和低层补充南下的冷空气共同影响，槽前西南气流和低层东北气流再次加强，第二阶段降水开始并迅速转为纯雪。

综上，18 日夜间至 19 日，低层偏北风的出现和发展，为本次过程提供近地层冷垫；20 日中层暖湿层和低层冷层的增强共同造成冻雨和冰粒天气。中层西南急流和低层强东北气流的长时间维持，为本次过程提供充足的水汽、长时间的冷垫和冷垫之上的强烈逆温，使“冷-暖-冷”的垂直温度结构得以长时间维持，从而导致本次长达 12 h 冻雨和冰粒天气。

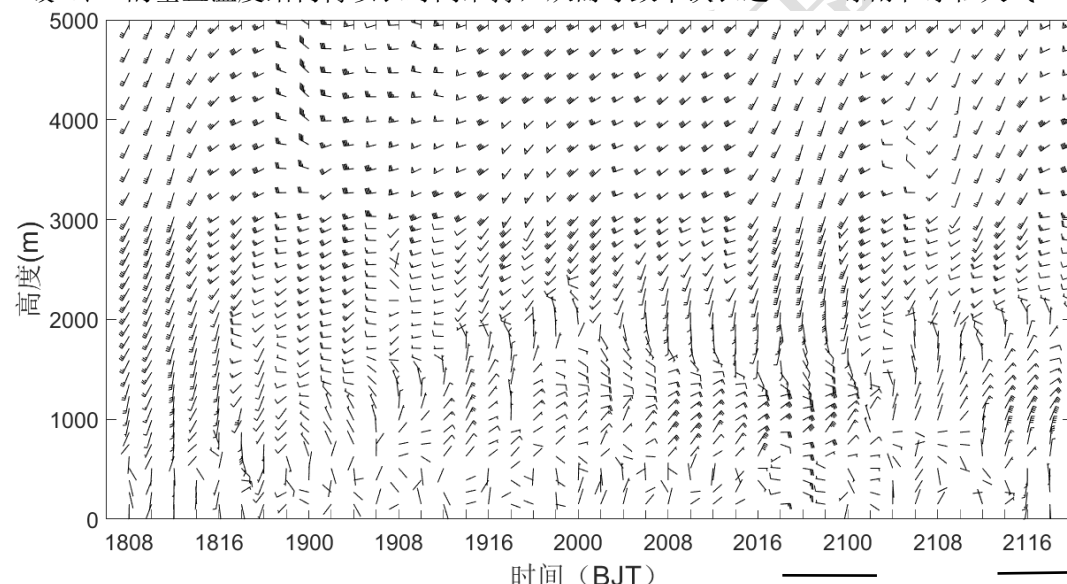


图 4 2024 年 2 月 18 日 08 时至 21 日 20 时临沂站风廓线雷达观测的风场图

Fig 4 Observed wind field by wind-profiling radar at Linyi Station from 08:00 BT 18 to 20:00 BT 21 February 2024

4 层结特征分析

4.1 冰相融化机制

本次降水过程中，从温度垂直分布（图 5a）来看，在 35°N 附近 700 hPa 以上温度均低于 0°C 且温度随高度降低，为冰晶层；融化层（暖层）位于 800~700 hPa，温度高于 0°C ，将下降粒子融化为液态水；800 hPa 至地面为冷层，其中 900 hPa 以下温度维持在 -5°C 左右，使液态水迅速冷却或冻结，到达地面形成冻雨或冰粒，自上而下构成“冰晶层-融化层-冷层”的垂直结构，属于典型的冰相融化机制（Ohtake, 1963; Huffman and Norman, 1988; 陶玥等, 2013）。

从风场和比湿场的垂直分布来看（图 5b）可以看出，20 日白天到夜间，700 hPa 附近持续受西南急流控制，比湿达 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，暖湿平流持续输送保证了融化层中源源不断的水汽和热量供应；900 hPa 以下受东北气流控制，低温低湿，为干冷层，使近地层低温出现并得以维持。21 日 08 时以后，虽然中层仍存在逆温，但是 0°C 以上的融化层逐渐消失，随着西南气流增强，再次出现降水并迅速转雪。

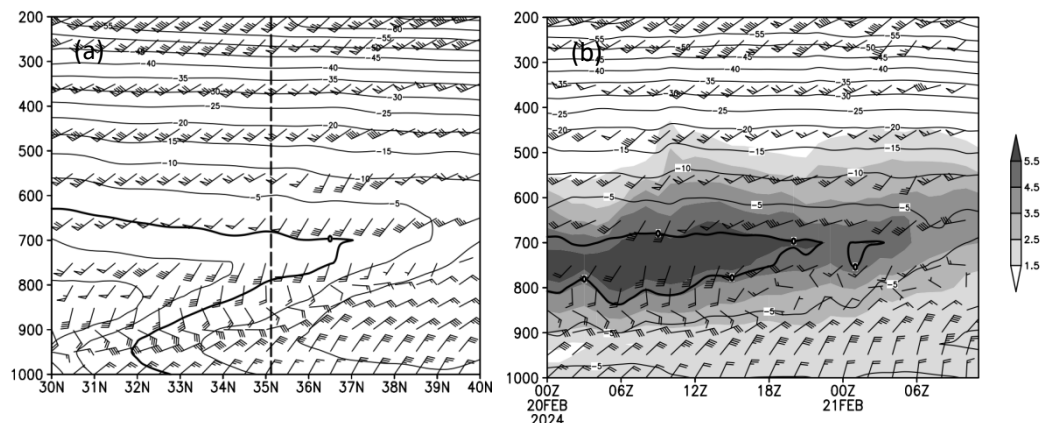
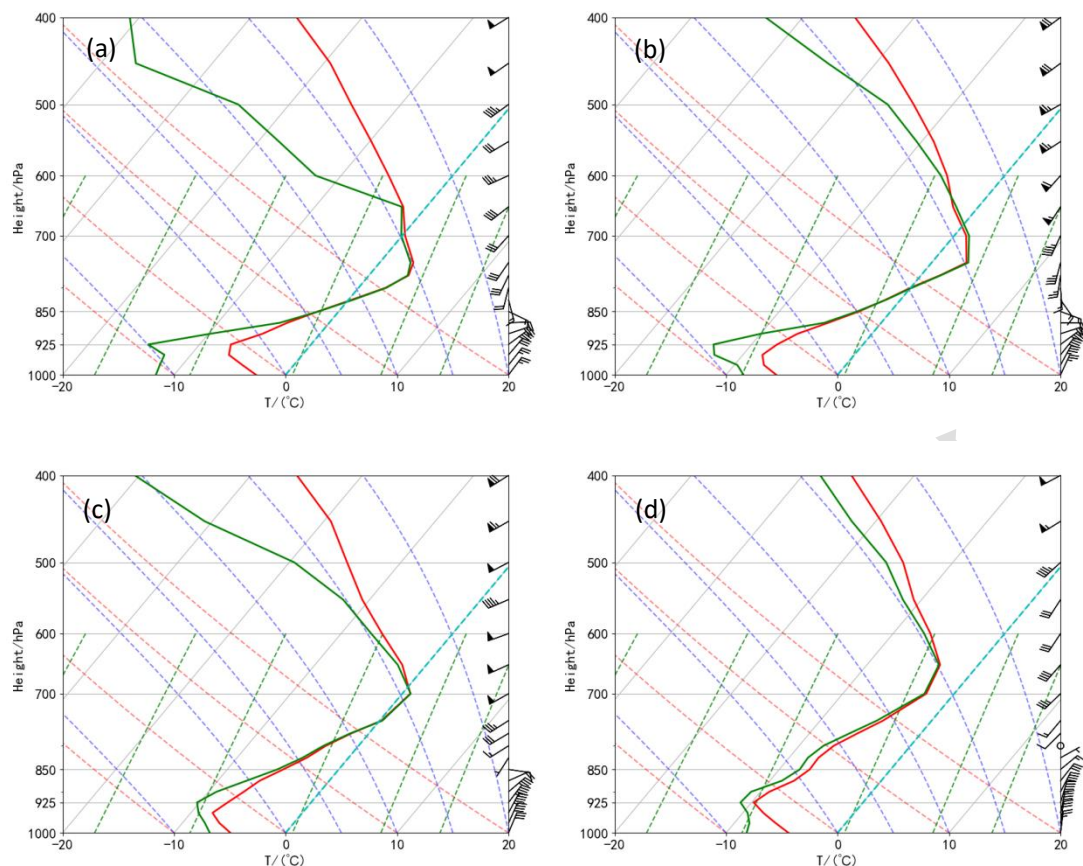


图 5 2024 年 2 月 20 日 20 时 (a) 118°E 温度和风场垂直剖面（单位： $^\circ\text{C}$ ）和 (b) 临沂站温度、比湿（单位： $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）和风场时间演变

Fig 5 (a) Vertical cross-section of temperature and wind field (unit: $^\circ\text{C}$) along 118°E and (b) temporal evolution of temperature, specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wind field at Linyi Station at 20:00 BT 20 February 2024

4.2 冻雨向冰粒演变的层结特征

为进一步研究不同相态降水过程中的层结特征，选取临沂站临近格点（ 35.25°N 、 118.5°E ）的 2 月 20 日 15 时（a）、20 时（b）、21 日 02 时（c）和 21 日 14 时（d）绘制的探空图（图 6）进行对比分析，分别对应冻雨、冰粒、冰粒即将结束和纯雪相态，从图中可以看出以下三点：第一，从温度曲线可以看出，低层和近地面气温较低，925~700 hPa 之间有明显逆温层。在 20 日 15 时和 20 时， 0°C 以上的融化层从 850 hPa 附近扩展至 700 hPa 或以上，结合表 2 可以看出，随着低层干冷空气入侵，临沂站冷层厚度由 1444 m 增加到 1920 m，最低气温由 -7.3°C 降至 -8.3°C ，暖层起始高度由 15 时 825 hPa 逐渐升高至 20 时 775 hPa，厚度由 1303 m 变薄至 808 m，暖层最高气温由 3.5°C 降至 3.1°C ，对应着冻雨逐渐转为冰粒的过程。21 日 02 时，暖层进一步增高变薄，最高温仅为 0.7°C ，仍旧维持冰粒状态，第一阶段降水基本结束。21 日 14 时，临沂站上空仍旧存在逆温，但是整层气温处于 0°C 以下，降水相态为纯雪。第二，结合露点曲线可以看出，低层和近地面存在温度露点差较大的干层，且随着过程推进，温度露点差逐渐减小；而中层温度露点差始终接近 0°C ，为近饱和层或饱和层。第三，本次过程当中，冻雨和冰粒的东北风发展高度均接近 850 hPa，区别体现在，20 时冰粒时期 925 hPa 以下的东北风更强，风速达到了 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表明此时近地层冷空气更加强盛。而在 21 日 14 时降雪时，东北风已经发展到 850 hPa 以上。



注：图中红色实线为温度曲线，绿色实线为露点温度曲线，红色虚线为干绝热线，绿色虚线为湿绝热线，蓝色虚线为等饱和比湿线，蓝绿色虚线为0℃等温线。

图 6 2024 年 2 月 20 日 20 日 (a) 15 时、(b) 20 时、(c) 21 日 02 时、(d) 14 时 (35.25° N、118.5° E) 的 $T_{\ln p}$ 图

Fig 6 T-lnp diagrams of the spot (35.25°N, 118.5°E) at (a) 15:00 and (b) 20:00 BT 20, and (c) 02:00 and (d) 14:00 BT 21 February 2024

4.3 冻雨和冰粒的层结对比

根据上文描述，冻雨和冰粒的过程当中均存在中层融化层，为更好地区分两种不同降水相态的温度层结特征，根据实际观测的冻雨和冰粒现象，选取 2 月 20 日 15 时和 20 时沂水、临沂和郯城站点的特征量（表 2）进行对比。其中沂水站位置接近鲁中，山区多且海拔较高，在本次降水开始后迅速转为冰粒，冰粒持续时间长达 11 h；临沂站位于鲁南的中间区域，有明显的冻雨转冰粒的相态转变过程；郯城站作为山东的最南端，在 20 日下午到夜间的降水过程当中为纯冻雨，因此选取以上三个站点进行冻雨和冰粒的对比研究。对比发现，冻雨的 2 m 气温为-4~-1℃，暖层起始高度低于 800 hPa，暖层厚度 1000~1300 m，最高气温 3~5℃，冷层厚度 1400~1500 m，最低气温-8~-6℃；而冰粒的 2 m 气温-6~-4℃，暖层起始高度位于 775 hPa 及以上，暖层厚度 800~1000 m，最高气温低于 3℃，冷层厚度 1600~2000 m，最低气温-10~-8℃。随着降水过程发展，地面湿度逐渐增大，2 m 露点温度差逐渐减小，但是在本次冻雨和冰粒的相态上未体现出明显指示意义。

综合以上分析，冻雨的地面气温明显高于冰粒，冻雨的暖层起始高度低并且暖层厚度和强度均大于冰粒，而冷层的厚度和强度均小于冰粒。

247
248
249

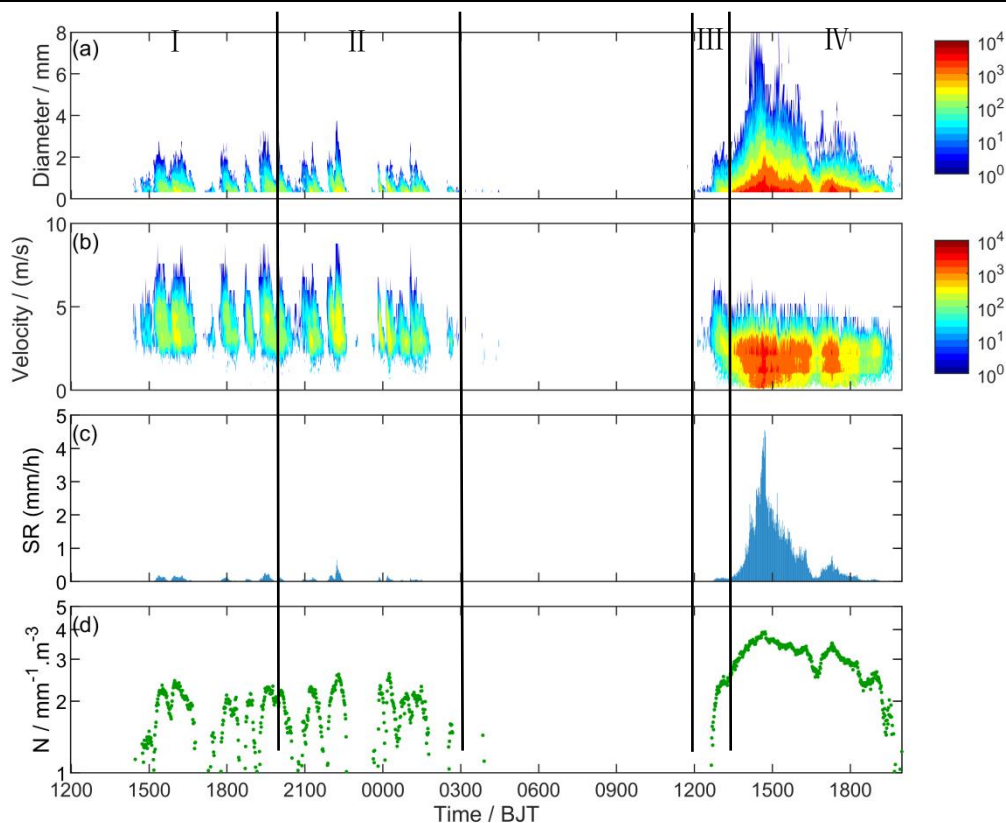
表 2 2024 年 2 月 20 日 15 时和 20 时各站点温湿度层结特征量对比
Table 2 Comparison of temperature and humidity stratification characteristics at each station at
15:00 and 20:00 BT 20 February 2024

站点	沂水 (35.75° N、118.75° E)		临沂 (35.25° N、118.5° E)		郯城 (34.5° N、118.25° E)	
	15 时	20 时	15 时	20 时	15 时	20 时
时间 (BT)						
暖层高度/hPa	800	775	825	775	825	825
暖层厚度/m	956	807	1303	808	1304	1303
暖层最高气温/℃	2.6	2.0	3.5	3.0	4.5	4.3
冷层厚度/m	1678	1919	1444	1920	1444	1446
冷层最低气温/℃	-8.6	-9.1	-7.3	-8.3	-6.7	-7.6
2m 温度露点差/℃	6.6	2.4	7.7	2.5	4.1	2.6
2m 气温/℃	-4	-5.5	-2.5	-4.6	-1.5	-2.8
降水相态	冻雨+ 冰粒	冰粒	冻雨	冰粒 为主	冻雨	冻雨

250

251 5 雨滴谱特征分析

252 从降水粒子谱图（图 7）可以看出，2 月 20 日的冻雨冰粒阶段与 21 日的降雪期间的降
253 水粒子谱图呈现明显区别。对比发现，20 日下午到夜间的冻雨（I）、冰粒（II）阶段，
254 具有粒子直径小，数浓度小，降水强度小，下落速度大的特征：粒子直径分布范围 0.1~2.0
255 mm，下落速度 3~8 m•s⁻¹，对应小于 1 mm•h⁻¹ 分钟降水率，粒子数浓度约在 1~3 mm⁻¹•m⁻³。
256 21 日白天的降水阶段，在降水初期（III，21 日 12—13 时），强度小，粒子直径和粒子数浓
257 度均较小，下落速度较大，与前一天的粒子谱接近，说明此时降水相态不是纯雪，仍伴有冰
258 粒或冻雨。14 时以后，粒子直径和数浓度明显增大，速度明显减小，粒子谱拓宽，为纯雪
259 阶段（IV）。对比冻雨和冰粒阶段，雪具有粒子直径大，数浓度大，降水强度大，速度小的
260 特征：粒子直径分布范围 0.1~8.0 mm，下落速度小于 5 m•s⁻¹，对应 1~4 mm•h⁻¹ 分钟降水
261 率，粒子数浓度约在 2~4 mm⁻¹•m⁻³。



注：I 阶段为冻雨，II 阶段为冰粒为主，III 阶段为冰粒混合雪，IV 阶段为纯雪。

图 7 2024 年 2 月 21 日 12 时至 21 日 20 时临沂站连续 3 h 的降水粒子 (a) 直径，(b) 下落速度，(c) 降水强度，(d) 粒子数密度

Fig 7 (a) Diameter, (b) falling velocity, (c) precipitation intensity and (d) particle number density of precipitation particles during the continuous 3 h precipitation process at Linyi Station from 12:00 to 20:00 BT 21 February 2024

据人工观测结果，20 日 15—19 时，临沂站以冻雨为主，20 时以后主要为冰粒，但从粒子谱图上，冻雨和冰粒特征没有明显区别。为进一步区分不同降水粒子，绘制粒子直径(D)和粒子数浓度(N)之间的关系图（图 8），可以看出，在冻雨和冰粒阶段粒子直径和数浓度均较小，冻雨（空心圆）的粒子直径平均值（ D_m ）为 0.89 mm，数浓度平均值（ N_m ）为 $1.75 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ，而冰粒（空心三角）阶段分别为 0.75 mm 和 $1.9 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ，表明冻雨比冰粒的粒子略偏大，但是粒子数偏少。在纯雪（实心圆）阶段（IV）对应的粒子直径和数浓度均明显增大，谱宽展宽，最大直径接近 6 mm，有大粒子（雪花）出现， D_m 为 1.65 mm， N_m 为 $3.02 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

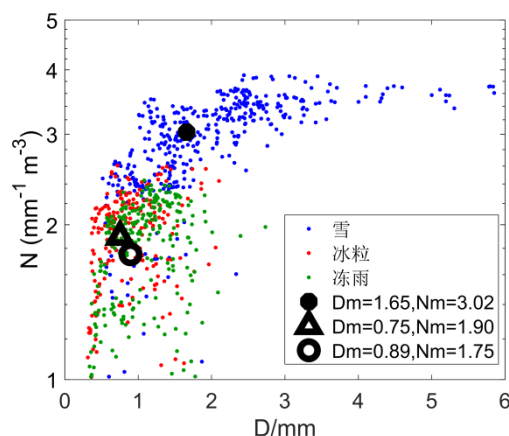


图 8 雪、冰粒和冻雨的粒子直径和粒子数浓度分布图

Fig 8 Distribution of particle number concentrations and diameters for snow, ice pellets and freezing rain

为更加细致地研究不同降水相态的下落速度，绘制了粒子下落速度-粒子直径关系谱图（图 9），可以看出，冻雨（图 9a，红色实线）和冰粒（图 9b，红色实线）接近 Brandes et al（2002）的降雨经验曲线（黑色实线），具有粒子直径小，下落末速度大的特征。对比冻雨、冰粒和雨三种相态拟合曲线的斜率发现，冻雨和冰粒的粒子直径普遍小于雨，且当粒子直径小于 1 mm 时，冻雨和冰粒的下落速度接近，均大于雨；当粒子直径超过 1 mm 时，冻雨下落速度明显减小，而冰粒持续接近降雨略偏大。纯雪阶段（图 9c），粒子直径分布较宽，2~4 mm 粒子明显增多，雪花下落速度较冻雨和冰粒明显下降，图中给出了 Jeong-Eun (2015) 的针状雪（蓝色实线）、Locatelli and Hobbs (1974) 的淞附聚（黑色实线）和未淞附聚并雪（黑色虚线），以及陶然亭 (2020) 给出的江苏省高速型降雪（平均降雪率 1.65 mm•h⁻¹，绿色实线）的经验关系，对比发现本次过程的速度曲线与淞附聚、未淞附聚并雪和高速型降雪基本平行，位于最上方。当粒径小于 3 mm 时，本次过程的速度最大，当粒径大于 3 mm 时，针状雪的下落速度明显增大，而本次降水粒子下落速度逐渐接近高速型降雪，初步判断与本次降雪雪强相对较大以及雪的形态有关，具体原因需进一步研究。

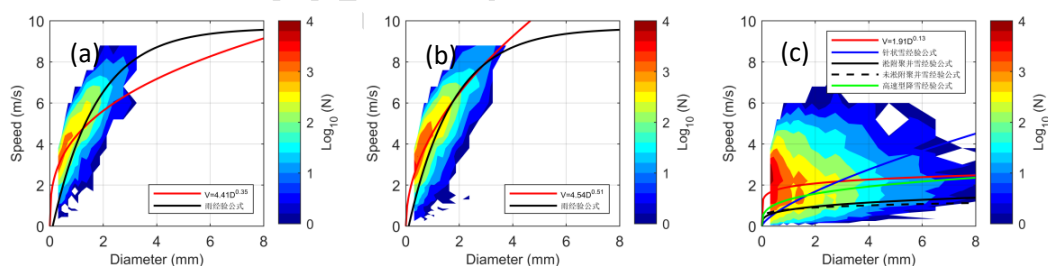


图 9 (a) 冻雨、(b) 冰粒和 (c) 雪的下落速度和粒子直径 (V-D) 关系

Fig 9 Relationship diagrams of falling velocity versus particle diameter (V-D) for (a) freezing rain, (b) ice pellets and (c) snow

综上，对比分析雨滴谱仪在本次过程中各阶段降水粒子的粒径尺度、数浓度和下落速度等方面特征可见，本次过程中冻雨和冰粒均具有粒径小、数浓度小、降水强度小和下落速度大的特征，冻雨比冰粒的粒子略偏大，粒子数偏少，冻雨和冰粒的速度曲线均接近于降雨。降雪相比于冻雨冰粒，具有粒径大、数浓度大、降水强度大和下落速度小 ($< 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的特征，但本次过程中雪的下落速度大于淞附聚并雪、未淞附聚并雪和高速型降雪的经验值，粒

径越大,越接近于高速型降雪。

6 结论与讨论

本文综合各种气象常规观测资料、风廓线雷达资料、雨滴谱资料以及 ERA5 再分析资料,对 2024 年 2 月 20—21 日鲁南一次长生命史冻雨冰粒转雪过程进行分析,得到以下结论:

1、此次冻雨和冰粒发生的天气背景为回流形势,具有降水相态复杂、冻雨冰粒持续时间长、阶段性、风吹雪等特点。500 hPa 和 700 hPa 盛行西南风急流,850 hPa 以下为东北气流。高空槽前西南暖湿气流沿着低层强冷空气造成明显降温的冷垫滑升,中层暖湿气流与低层东北气流相互作用形成强烈逆温,“冷-暖-冷”的垂直温度结构得以长时间维持,导致出现罕见的长生命史冻雨和冰粒天气。

2、冻雨和冰粒均具有典型冰相融化特征,差异主要体现在地面气温、暖层起始高度和厚度、冷层的高度和厚度。冻雨的地面气温明显较高,近地层的东北风较弱,冻雨的暖层起始高度低并且暖层厚度和强度均大于冰粒,冷层的厚度和强度均小于冰粒。冻雨的 2 m 气温 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$,暖层起始于 800 hPa 以下,厚度 1000~1300 m,最高气温 $3\sim5^{\circ}\text{C}$;冷层厚度 1400~1500 m,最低气温 $-8\sim-6^{\circ}\text{C}$ 。冰粒的 2 m 气温 $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$,暖层起始于 775 hPa 及以上,暖层厚度小于 1000 m,最高气温 $0\sim3^{\circ}\text{C}$;冷层厚度 1600~2000 m,最低气温 $-10\sim-8^{\circ}\text{C}$ 。

3、本次过程降水粒子的雨滴谱特征表现为:冻雨和冰粒的粒子谱特征没有明显区别,均具有粒径小、数浓度小、降水强度小和下落速度大的特征,粒子直径分布范围 0.1~2.0 mm,粒子数浓度约在 $1\sim3\text{ mm}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$,下落速度 $3\sim8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但冻雨比冰粒的粒子略偏大,粒子数偏少;二者的速度曲线均接近于降雨,仅当粒子直径超过 1 mm 时,冻雨下落速度低于冰粒;降雪阶段,粒子谱拓宽,具有粒径大、数浓度大、降水强度大和下落速度小的特征。

由于鲁南地区冻雨和冰粒天气过程较少,基于一次过程的多源资料特征分析结论对北方类似过程的层结分布状况和雨滴谱特征的适用性还需要进一步研究。

参考文献

- 陈双, 谌芸, 何立富, 等, 2019. 我国中东部平原地区临界气温条件下降水相态判别分析[J]. 气象, 45(8): 1037-1051. Chen S, Chen Y, He L F, et al, 2019. Discrimination analysis of snow and rain occurring under critical temperature conditions in central and Eastern China[J]. Meteor Mon, 45(8): 1037-1051 (in Chinese).
- 陈天锡, 陈贵发, 穆晓涛, 1993. 驻马店地区冻雨天气特征的分析 and 预报[J]. 气象, 19(2): 33-36, 40. Chen T X, Chen G F, Mu X T, 1993. Analysis and forecasting of freezing rain weather characteristics in Zhumadian area[J]. Meteor Mon, 19(2): 33-36, 40 (in Chinese).
- 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等, 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 66(5): 808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin, 66(5): 808-825 (in Chinese).
- 江杨, 叶金印, 何志新, 等, 2017. 2008 年初我国南方地区大范围冻雨过程的温度层结特征[J]. 暴雨灾害, 36(6): 566-572. Jiang Y, Ye J Y, He Z X, et al, 2017. Temperature stratification characteristics of a wide range freezing rain event occurred over southern China in early 2008[J]. Torr Rain Dis, 36(6): 566-572 (in Chinese).
- 李峰, 施红蓉, 2014. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析[J]. 气象, 40(8): 992-999. Li F, Shi H R, 2014. Study on wind profile radar observation features of a multi-phase weather process in Beijing[J]. Meteor Mon, 40(8): 992-999 (in Chinese).
- 李杰, 郭学良, 盛日峰, 等, 2016. 我国冰粒降水天气的观测特征统计分析[J]. 大气科学学报, 39(3): 349-360. Li J, Guo X L, Sheng R F, et al, 2016. Statistical analysis of observed properties of ice-pellet precipitation in China[J]. Trans Atmos Sci, 39(3): 349-360 (in Chinese).

刘朝茹, 韩永翔, 王瑾, 等, 2015. 我国冻雨统计及发生机制研究[J]. 灾害学, 30(3): 219-222, 234. Liu C R, Han Y X, Wang J, et al, 2015. Studies on statistics and formation mechanism of freezing rain[J]. J Catastrophol, 30(3): 219-222, 234 (in Chinese).
 马宗晋, 2009. 2008 年华南雪雨冰冻巨灾的反思[J]. 自然灾害学报, 18(2): 1-3. Ma Z J, 2009. A retrospective study of the 2008 huge disaster by low temperature, snow and ice in South China[J]. J Nat Dis, 18(2): 1-3 (in Chinese).
 漆梁波, 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J]. 气象, 38(7): 769-778. Qi L B, 2012. Formation mechanism and forecast on freezing rain and ice pellet in winter of China[J]. Meteor Mon, 38(7): 769-778 (in Chinese).
 孙莎莎, 孙艺, 徐婷婷, 等, 2023. 2021 年 11 月 7 日山东极端暴雪过程降水相态的多源观测特征分析[J]. 气象, 49(7): 830-842. Sun S S, Sun Y, Xu T T, et al, 2023. Multi-source observational characteristics of precipitation phase during extreme snowstorm in Shandong on 7 November 2021[J]. Meteor Mon, 49(7): 830-842 (in Chinese).
 陶然亭, 2020. 基于二维视频雨滴谱仪和双偏振雷达研究中国东部地区降雪微物理特征与降雪估计[D]. 南京: 南京大学. Tao R T, 2020. Snow microphysical characteristics and snowfall estimation in East China based on a 2D video disdrometer and dual polarization radar[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).
 陶玥, 李宏宇, 刘卫国, 2013. 南方不同类型冰冻天气的大气层结和云物理特征研究[J]. 高原气象, 32(2): 2501-2518. Tao Y, Li H Y, Liu W G, 2013. Characteristics of atmospheric stratification and cloud physics of different types of freezing rain over southern China[J]. Plateau Meteor, 32(2): 2501-2518 (in Chinese).
 温静, 雷正翠, 温龙, 等, 2023. 一次强寒潮过程的多相态降水分析[J]. 气象科技, 51(5): 704-714. Wen J, Lei Z C, Wen L, et al, 2023. Analysis of multiphase precipitation during a strong cold wave at end of March 2020[J]. Meteor Sci Technol, 51(5): 704-714 (in Chinese).
 许先煌, 张芳华, 2024. 2024 年 2 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 50(5): 642-648. Xu X H, Zhang F H, 2024. Analysis of the February 2024 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 50(5): 642-648 (in Chinese).
 杨成芳, 姜鹏, 张少林, 等, 2013. 山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J]. 气象, 39(3): 355-361. Yang C F, Jiang P, Zhang S L, et al, 2013. Analysis on temperature of precipitation types in cold seasons in Shandong[J]. Meteor Mon, 39(3): 355-361 (in Chinese).
 俞小鼎, 费海燕, 王秀明, 2024. 2024 年 2 月 17-23 日中国大范围强寒潮雨雪冰冻强对流过程涉及的若干问题[J]. 气象, 50(9): 1033-1042. Yu X D, Fei H Y, Wang X M, 2024. Some issues concerning the large area rainstorm, snowstorm, sleet, freezing rain and severe convection event over China from 17 to 23 February 2024[J]. Meteor Mon, 50(9): 1033-1042 (in Chinese).
 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等, 2008. 2008 年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害形成的温度场结构分析[J]. 气象学报, 66(6): 1043-1052. Zeng M J, Lu W S, Liang X Z, et al, 2008. Analysis of temperature structure for persistent disastrous freezing rain and snow over southern China in early 2008[J]. Acta Meteor Sin, 66(6): 1043-1052 (in Chinese).
 Bernstein B C, 2000. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events[J]. Wea Forecasting, 15(5): 485-508.
 Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2002. Experiments in rainfall estimation with a polarimetric radar in a subtropical environment[J]. J Appl Meteor, 41(6): 674-685.
 Gibson S R, Stewart R E, 2007. Observations of ice pellets during a winter storm[J]. Atmos Res, 85(1): 64-76.
 Hanesiak J M, Stewart R E, 1995. The mesoscale and microscale structure of a severe ice pellet storm[J]. Mon Wea Rev, 123(11): 3144-3162.
 Huffman G J, Norman Jr G A, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation[J]. Mon Wea Rev, 116(11): 2172-2182.
 Kajikawa M, Heymsfield A J, 1989. Aggregation of ice crystals in cirrus[J]. J Atmos Sci, 46(20): 3108-3121.
 Locatelli J D, Hobbs P V. 1974. Fall speeds and masses of solid precipitation particles[J]. J Geop Res, 79(15): 2185-2197.
 Ohtake T, 1963. Hemispheric investigation of warm rain by radiosonde data[J]. J Appl Meteor, 2(5): 594-607.
 Okada T, 1914. Notes on the formation of glazed frost[J]. Mon Wea Rev, 42(5): 284-286.

393 Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al, 1999. The mesoscale dynamics of freezing rain storms over eastern Canada[J].
394 J Atmos Sci, 56(10): 1261-1281.
395