陈璇,钟敏,陈赛男,等.2024. 2024年2月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析[J].暴雨灾害,43(6):668-679. CHEN Xuan, ZHONG Min, CHEN Sainan, et al. 2024. Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):668-679 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-094

2024年2月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析

陈璇,钟敏,陈赛男,罗昱,熊思章,鲁易,刘瑞雪
(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘　要:2024年2月初湖北省遭受了一次极端冰冻天气过程,期间经历了冻雨、冰粒和雪等多种降水相态变化,其中冻雨强度为当地1981年以来最强。为给复杂冰冻天气过程的准确预报及精细化预警服务提供参考依据,利用常规气象观测、双偏振雷达和再分析资料,对湖北此次极端冰冻过程的基本观测特征及成因进行分析。结果表明:(1) 此次过程的环流形势表现为,南支槽和副热带高压共同影响,西南气流与偏东路冷空气长时间交汇,西南暖湿气流叠置在低层冷空气之上,垂直方向上存在有利于冻雨发生的“冷-暖-冷”温度夹心层结。700 hPa水汽通量异常偏强、700—800 hPa温度异常偏高和925 hPa温度异常偏低是此次冻雨强度具有极端性的主要原因。(2) 降水相态与垂直温湿层结的关系分析表明,云顶伸展高度、融化层和低层冷垫的厚度及强度是决定降水相态的关键因子,湖北省此次过程冻雨和冰粒均为融化机制降水,冰粒比冻雨云顶高度更高、融化层厚度和强度更弱、低层冷垫厚度和强度更强。(3) 此次极端冻雨的双偏振雷达特征表现为强回波主要集中在融化层2~3 km高度附近,有明显的0 ℃层亮带特征,回波强度为30~45 dBz,最强可达50 dBz;在融化层及以下,相关系数维持在0.7~0.95,存在明显的梯度大值区;差分反射率为正值,强度在1~3 dB,最大达4 dB,与降雨没有明显差异,但与纯雪为负值差异较大。

关键词:极端冻雨;冰粒;温湿层结;双偏振雷达特征
中图法分类号: P458　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-094

Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024

CHEN Xuan, ZHONG Min, CHEN Sainan, LUO Yu, XIONG Sizhang, LU Yi, LIU Ruixue

(*Wuhan Central meteorological Observatory, Wuhan* 430074)

Abstract: An extreme freezing weather occurred in Hubei during the early of February in 2024, which accompanying freezing rain, ice pellets, and snow occurred and the intensity of freezing rain ranks first since 1981. Based on conventional meteorological observations, dual-polarization radar, and reanalysis data, the characteristics of observation and the cause of extreme freezing rain process are analyzed to provide reference for accurate forecasting and refined warning services of complex freezing weather processes. The results are as follow. (1) This process occurred under the combined influence of the subtropical trough and the subtropical high, with the long-term convergence of the cold air from the east route, forming a typical circulation pattern where the southwest warm and moist air flows are superimposed on the low-level cold air, and a "cold-warm-cold" temperature sandwich structure conducive to the occurrence of freezing rain is formed in the vertical direction. The abnormally strong water vapor flux at 700 hPa, the abnormally high temperature at 700-800 hPa, and the abnormally low temperature at 925 hPa are the main reasons for the extreme intensity of the freezing rain. (2) The analysis of the relationship between precipitation phase and vertical temperature and humidity layer structure indicates that the cloud top height, the melting layer, and the thickness and strength of the low-level cold pad are the key factors determining the precipitation phase. In this process in Hubei Province, both freezing rain and ice pellets are melting mechanism precipitation, with ice pellets having a higher cloud top height, weaker melting layer thickness and strength, and stronger low-level cold pad thickness and strength than freezing rain. (3) The dual-polarization radar characteristics of this extreme freezing rain are manifested as strong echoes mainly concentrated near the 2~3 km height of the melting layer, with a clear 0 ℃ layer

收稿日期: 2024-05-16;**定稿日期:**2024-07-20
资助项目: 湖北省自然科学基金项目(2023AFD096)
第一作者: 陈璇,主要从事天气预报及极端天气预报技术研究。E-mail:xuanch2002@163.com
通信作者: 钟敏,主要从事天气预报及灾害性天气预报技术研究。E-mail:zhongmin296@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

bright band feature, and echo intensity of 30~45 dBZ, the strongest reaching 50 dBZ, in and below the melting layer, the correlation coefficient remains at 0.7~0.95, with a clear gradient high value area, the differential reflectivity is positive, with a strength of 1~3 dB, up to 4 dB at most, which is not significantly different from rainfall, but differs significantly from the negative value of pure snow.

Key words: extreme freezing rain; ice pellet; temperature-humidity stratification; dual-polarization radar characteristics

引 言

湖北省地处中纬度地区的南北过渡带，冬季常常位于雨雪分界线上，降水相态复杂。2024年2月1—6日，湖北省经历了一次极端冰冻天气过程，与2008年不同的是，2008年雨雪冰冻在湖北以雪为主，而此次过程经历了冻雨、冰粒转暴雪，局部大暴雪，尤其是冻雨强度评估为1981年以来最强(史瑞琴等，2024)，具有极端性，对交通安全、电力传输、农业生产等造成了较大影响。

国外针对冻雨的研究较为系统，在20世纪初期就开展了冻雨的研究。国内学者在20世纪80年代开始关注冰冻灾害(Ohtake，1963)，2008年初我国南方出现低温冻雨灾害后，对这方面的研究逐渐增多(陶玥等，2012)。针对冻雨的研究主要集中在三个方面。一是研究冻雨形成的物理机制。冻雨的云物理形成机制有两种：融化机制和过冷暖雨机制(Bocchieri,1980；Huffman and Norman,1988)。融化过程多出现在暖锋面一侧(Huffman and Norman，1988)，过冷暖雨过程直径大于40 μm云滴的形成是关键，这样大小的云滴形成后才能启动碰并过程形成大的雨滴。欧建军等(2011)统计我国冻雨形成机制发现，我国北方(30°N以北的地区)发生冻雨的机制比较单一，主要是融化机制，南方(30°N以南的地区)冻雨两种机制都存在，其中高海拔地区以暖雨机制为主。漆梁波(2012)指出北方区域的融化类冻雨比例也仅为39%，但纬度越高，融化类冻雨比例增高。刘朝茹等(2015)发现冻雨发生机制与海拔高度有关，高海拔地区易发生过冷暖雨机制冻雨，低海拔地区易发生融化机制冻雨。2008年我国南方的冻雨过程中，湖南冻雨为融化机制，而贵州冻雨为过冷暖雨机制(陶玥等，2012)，两种机制下产生的冻雨过程主要受温度层结的影响，同时也受湿度、风速等气象要素的作用(Theriault et al.，2014；Chen et al.，2014)。二是从气候学、天气学的角度研究冻雨天气，针对大量冻雨个例进行天气分析，研究冻雨形成的环境条件、冻雨的气候态分布。La Nina事件引起的欧亚地区持续大气环流异常是导致我国大范围持续低温雨雪冰冻灾害的重要原因，同时也是造成冷空气不断侵袭南方的直接原因，孟加拉湾和南海地区暖湿气流的北上是大范围冻雨和降雪形成的必要条件(丁一汇等，2008；高辉等，2008；王东海等，2008)。赵思雄和孙建华(2008)提出了一个多尺度系统持续性的雨雪、冰冻天气物理模型。宗志平和马杰(2011)研究指出逆温层强度与冻雨强度变化之间存在明显联系。大量学者从天气学成因角度分析了冻雨发生的环流特征和温度层结特征(甘文强等，2018；刘红武等，2020；孟雪峰等，2022；张桂莲等，2023；王宁等，2023)。周悦等(2016)统计了湖北冻雨过程的环流背景主要有乌山阻高型和贝湖阻高型，2月为冻雨多发月份。三是利用数值模式研究冻雨天气，研究冻雨的预报方法以提高冻雨短期预报的准确率(Tremblay and Glazer，2000；Rasmussen，2002；董全等，2020；王珊珊等，2022)。

冻雨作为一种降水相态，在观测方面，双偏振雷达较单极化雷达在对降水粒子相态识别上优势明显。近年来，国内学者主要在雪、雨夹雪或雨转雪等冬季降水相态观测方面开展了个例研究(唐明晖等，2023；李萌萌等，2023)，指出相关系数(CC)、差分反射率(Z_{dr})对降雪过程中雨、雨夹雪和雪的判定有一定的指示作用。孙莎莎等(2023)指出CC对雨转雪的指示意义要好于Z_{dr}。管理等(2021)、王浩宇等(2023)分别利用准垂直廓线(QVP)方法和模糊逻辑相态识别算法开展了双偏振雷达冬季相态识别的研究。针对冻雨的双偏振雷达观测特征研究较少，已有研究中主要为小量级的冻雨云雷达观测特征(Kyoko et al. 2009；雷之雨等，2018)，因此需要更为深入的研究。

本文利用常规气象观测、双偏振雷达和再分析等资料，对2024年2月初湖北极端冰冻过程，从实况特点、环流背景及冻雨异常成因、冻雨的垂直温湿层结及双偏振雷达观测特征等方面进行分析，期望为今后此类极端冰冻天气过程的准确预报及精细化预警服务提供参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文分析使用了常规、非常规观测及再分析资料，其中常规观测资料包括湖北省83个国家级气象站逐小时观测数据(包括降水、2 m气温、电线积冰直径、地面温度)及08时(北京时，以下同)和20时高空观测数据。非常规观测资料为武汉八分山S波段双偏振雷达资料。再分析资料为欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料(空间分辨率0.25°×0.25°，时间分辨率为1 h，要素包括位势高度、风、气温、比湿、相对湿度、垂直速度、云冰、云水)。

1.2 研究方法

本文研究中涉及到降水相态实况确定、冻雨量统

计、冻雨和冰粒的垂直要素分析以及气象因子异常分析，以下为具体方法简介。

对降水相态实况的识别和统计结合了2 m气温、人工加密观测、新闻报道和灾情实况。对冻雨量的统计，是根据上述方法确定的冻雨发生时间及对应的降水量进行累加，在实况中如有冻雨和冰粒混合，按照相应小时降水量的70%计为冻雨量。

在冻雨和冰粒的垂直要素分析中，云顶高度的确定方法采用Poore等(1995)和漆梁波(2012)提出的温度露点差判断方法。具体如下：当温度≥0 ℃且温度露点差≤ 2 ℃时，认为是云内；当温度＜0 ℃且≥−20 ℃时，温度露点差≤4 ℃认为是云内；当温度＜−20 ℃时，温度露点差≤6 ℃ 认为是云内。融化层高度为探空观测中温度＞0 ℃的层结所在高度，融化层厚度为温度＞0 ℃的层结厚度，融化层强度为温度＞0 ℃的层结中最高温度。冷垫高度、厚度和强度的统计方法同融化层，但为温度＜0 ℃的层结和最低温度。

在分析本次极端冰冻过程的异常气象因子时，采用Grumm和Hart (2001)提出的标准化距平法，利用1980—2024年ERA5再分析资料对位势高度、水汽通量和温度等物理量进行异常度分析。异常度绝对值越大，表明要素偏离历史同期平均值越高。

2 冰冻天气实况

湖北省此次冰冻天气过程影响范围广、极端性强、降水相态复杂，其间经历了雨、雨夹雪、冻雨、小冰雹、冰粒、霰、纯雪等多种相态的反复，但以冻雨、冰粒和雪为主，尤其是冻雨。1—6日中东部地区47站出现冻雨，荆州、天门、潜江、仙桃、孝感、武汉、咸宁、鄂州、黄冈西北部累积冻雨量达10~39 mm (图1a)，最大电线

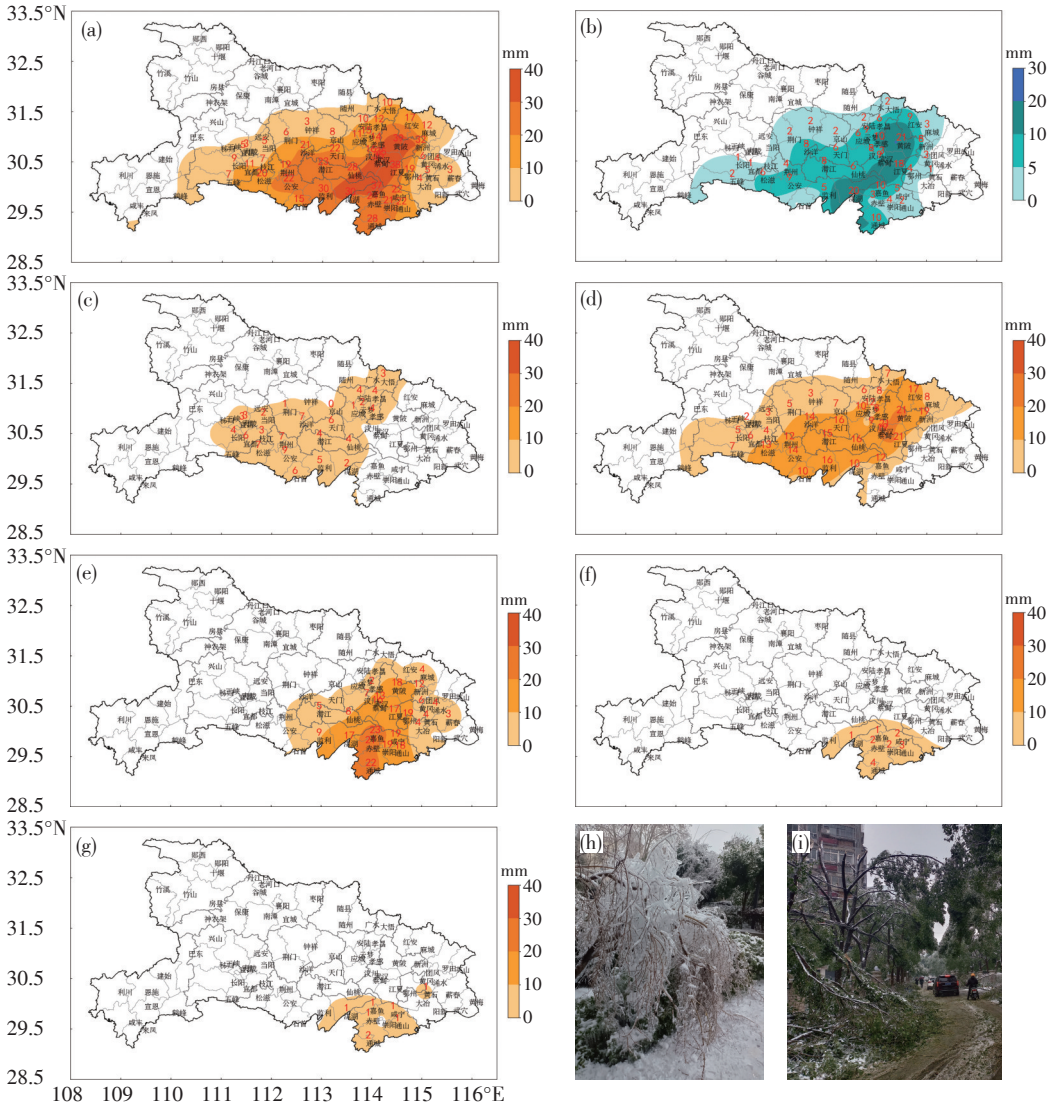


图1 湖北省2024年2月1—6日累积冻雨量(a)、最大电线积冰直径(b)、逐日冻雨量(c:1日, d:2日, e:3日, f:5日, g:6日)及武汉冰冻灾害实况(h:树枝覆冰, i:树木折断)

Fig.1 (a) Cumulative freezing rain, (b) maximum diameter of ice accretion on power lines, (c–g) daily freezing rain(c:1st, d:2nd, e:3rd, f:5th, g:6th) in Hubei Province from February 1–6, 2024 and (h, i) current situation of the ice disaster in Wuhan (h:branches covered with ice, i:trees broken)

积冰直径5~21 mm (图1b)，江汉平原及鄂东地区连续出现2~5 d冻雨(图1c—g)，冻雨强度评估为1981年以来最强，具有极端性(史瑞琴等，2024)。冻雨最强时段发生在2—3日，2日主要在鄂西南东部、江汉平原至鄂东北(图1d)，3日东移至江汉平原东部、鄂东北及鄂东南(图1e)，武汉连续两日为冻雨中心，累积冻雨量达32~39 mm，冻雨强度大、持续时间长，致灾性强(图1h—i)，且恰逢春运高峰期，防御难度大。

为进一步分析本次过程中降水相态实况演变，选取有探空观测的武汉和宜昌两个代表站进行分析，从逐小时降水相态时间演变图(图2)可见，此次冰冻过程主要经历了三个时段：第一时段(2日凌晨至上午)武汉为冻雨，宜昌为冻雨伴冰粒；第二时段(2日夜间至3日上午)武汉主要为冻雨，期间3日04—08时混合有冰粒，宜昌为冰粒转雪；第三时段(3日夜间至4日凌晨)武汉为冻雨伴冰粒，宜昌则为纯雪。结合2 m气温和地面温度观测可以看出，当2 m气温和地面温度均降至0 ℃以下时，两站开始出现冻雨，2 m气温降至−2~−1 ℃时，冻雨中开始混杂冰粒。从降水量可以看出，后两个时段明显强于第一时段，武汉近10 h出现2~3 mm·h^{-1}的冻雨，多个时段混合有冰粒(图2a)，宜昌出现7.7 mm·h^{-1}的冰粒混雪(图2b)，冻雨和冰粒强度大、持续时间长，是致灾主要原因。

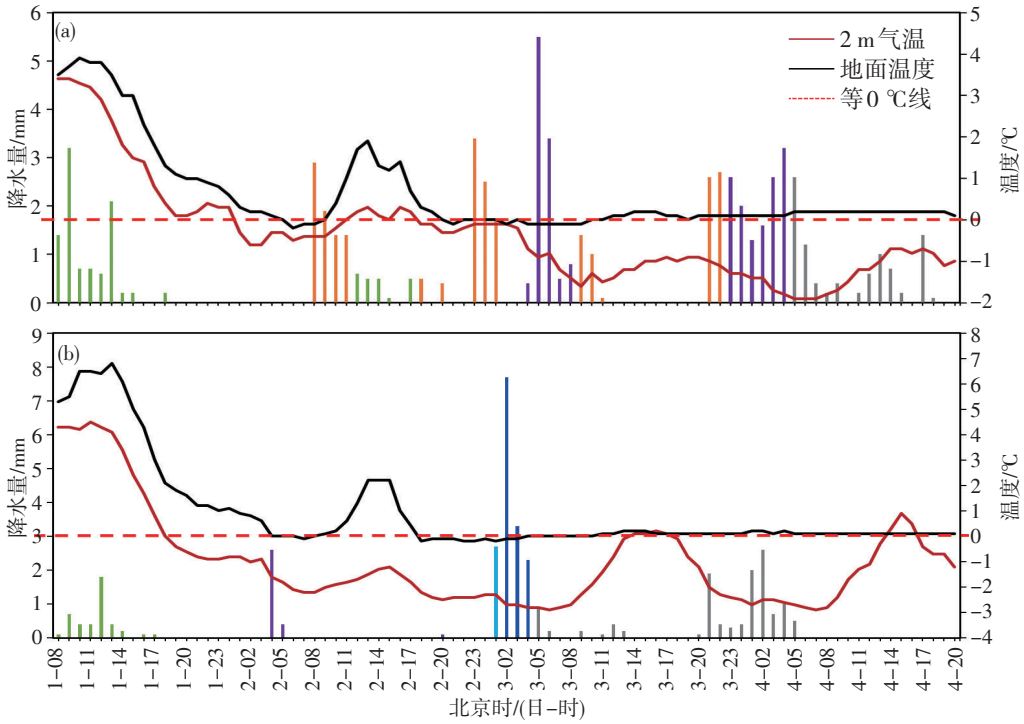


图2 2024年2月1—4日武汉(a)和宜昌(b)国家站逐小时降水量(柱状)及降水相态(绿色:降雨;橙色:冻雨;紫色:冻雨和冰粒混合相态;蓝色:冰粒和雪混合相态;浅蓝色:冰粒;灰色:纯雪)、地面温度时序图

Fig.2 Hourly precipitation (bar shape, unit: mm) and precipitation phase (green: rain; orange: freezing rain; purple: mixed phase of freezing rain and ice pellets; blue: mixed phase of ice pellets and snow; light blue: ice pellets; gray: snow), along with ground temperature (unit: °C) in (a) Wuhan and (b) Yichang from February 1–4, 2024

3 环流形势

针对此次过程冻雨的主要发生时段(2日08时—4日08时)，重点分析影响冻雨的关键系统发展演变特征。

从2—3日500 hPa形势场(图3a)可见，低纬度南支槽活跃，东移过程中受副热带高压阻挡，南支槽前不断有短波槽生成，东移影响湖北。700 hPa (图3b)自贵州–湖南–安徽存在宽广的西南急流带，日变化特征明显，2日夜间和3日夜间加强北推，风速超过27 m·s^{-1}，湖北位于急流出口区，这也是2日夜间—3日降水明显加强的重要原因，同时西南急流的加强北抬也有利于中层暖层的发展(图3f)。850 hPa (图3c)主要受华北高压底后部持续的东北气流回流影响，与西南暖湿气流交汇，在湖南北部至湖北东部一带形成稳定少动的暖式切变线，为湖北东部和南部的降水提供动力抬升条件。

进一步分析在上述环流形势下温度的发展演变特征，2日08时500 hPa欧亚高纬呈两槽一脊型，巴湖附近为−40 ℃的冷低压中心，有强冷空气堆积，在贝湖西侧高压脊的引导下，强冷空气向我国输送，同时在中纬度甘肃东部及湖北西南部短波槽的配合下，进一步引导冷空气向低纬度输送(图3a)。此时，地面冷锋已南压至华南，可见，冻雨开始前地面冷空气已先南下降温，为冻雨的发生提供冷垫(图3d)。700 hPa (图

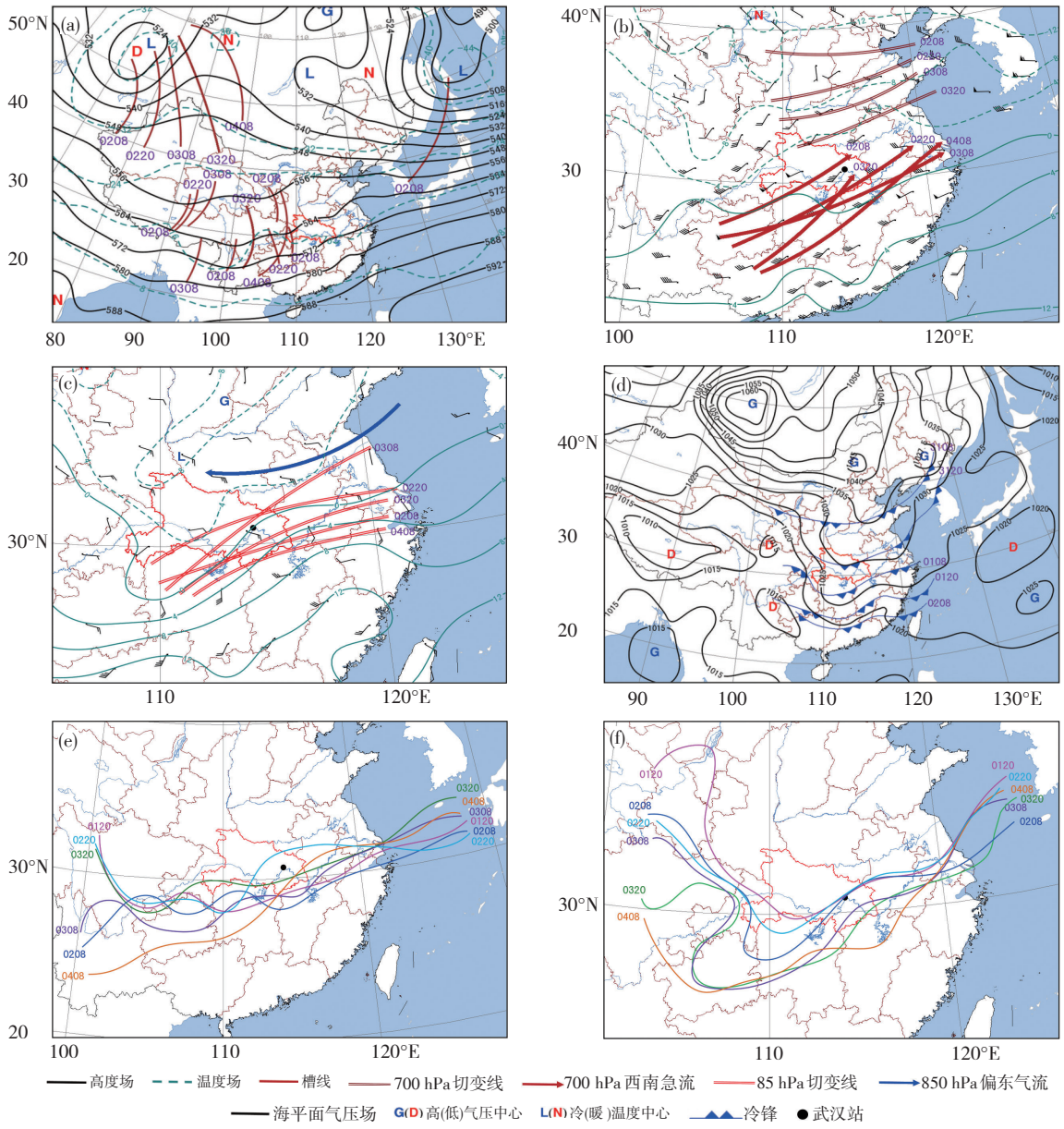


图3 2024年2月2日08时500 hPa高度场(单位:dagpm)和温度场(单位:℃) (a)、700 hPa (b)和850 hPa (c)风场和温度场(单位:℃)、海平面气压场(单位:hPa) (d)、700 hPa (e)和850 hPa (f) 0 ℃等温线演变(a—d中紫色数字为日期,如0208代表2日08时,e和f中彩色实线为不同时刻0 ℃线位置)

Fig. 3 The (a) 500 hPa height and temperature fields, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa wind and temperature fields, (d) sea level pressure field, and the evolution of the 0 °C isotherm at (e) 700 hPa and (f) 850 hPa at 08:00 BT on February 2 2024 (Purple numbers in Fig. a–d represent date, e.g., 0208 represents 08:00 BT on the 2nd, and colored solid lines in Fig. e and Fig. f represent positions of the 0 ℃ line at different times)

3e) 0 ℃等温线2日08时位于湖南北部至江西北部,2日20时随着西南急流加强,0 ℃等温线迅速北抬至湖北中北部,并在湖北东部小幅摆动,至4日08时后才明显南压。850 hPa (图3f) 0 ℃等温线2日20时前始终位于湖北东部沿长江一线,2日20时—4日08时明显南压,同时湖北一直位于地面(图3d)冷锋后部。湖北中东部中层回暖,地面至低层变冷,在垂直方向上形成了有利于冻雨发生的“冷-暖-冷”温度夹心层结。实况也表明,在2日夜间到4日凌晨,湖北中东部出现了持续性冻雨。

4 成因分析

4.1 极端冻雨强度的成因

针对此次过程冻雨强度具有极端性的特点,用标准化距平方法分析其异常特征,结果表明,此次过程在水汽和温度两类因子上异常度明显。

图4a为冻雨最强时次(2月4日02时)700 hPa水汽通量标准化距平,分析可知,湖北大部地区700 hPa水汽通量较气候态异常偏强,尤其江汉平原南部至鄂东地区水汽通量超过4 σ (图4a),可见3日夜间至4日凌

晨西南急流加强(图3b)，急流轴东移北推，造成了该时段鄂东地区的异常强降水。同样2日夜间鄂西南的水汽通量高出气候态3 σ以上(图略)，与同时段宜昌、荆门、荆州西部的强降水相对应。从温度标准化距平来看，冻雨最明显时段2—4日凌晨湖北上空700—800 hPa温度一直维持较气候平均态偏高状态(图略)，特别是4日凌晨700 hPa温度在鄂东偏高1~2 σ(图4b)，925 hPa温度则偏低1~2 σ(图4c)。700—800 hPa温度持续异常偏高、925 hPa温度偏低，是此次冻雨强度具有极端性的主要原因。

4.2 冻雨的温湿垂直分布特征及成因

降水相态主要受大气垂直温湿层结分布影响。实况探空资料在垂直层结上有较高的空间分辨率，但时间分辨率低，ERA5再分析资料有较高的时间分辨率，但在垂直层结上分辨率不及探空。由于此次过程以冻雨为主，同时伴有冰粒，因此，本文利用两种资料分析武汉站和宜昌站冻雨的温湿层结特征以及与冰粒的异同。

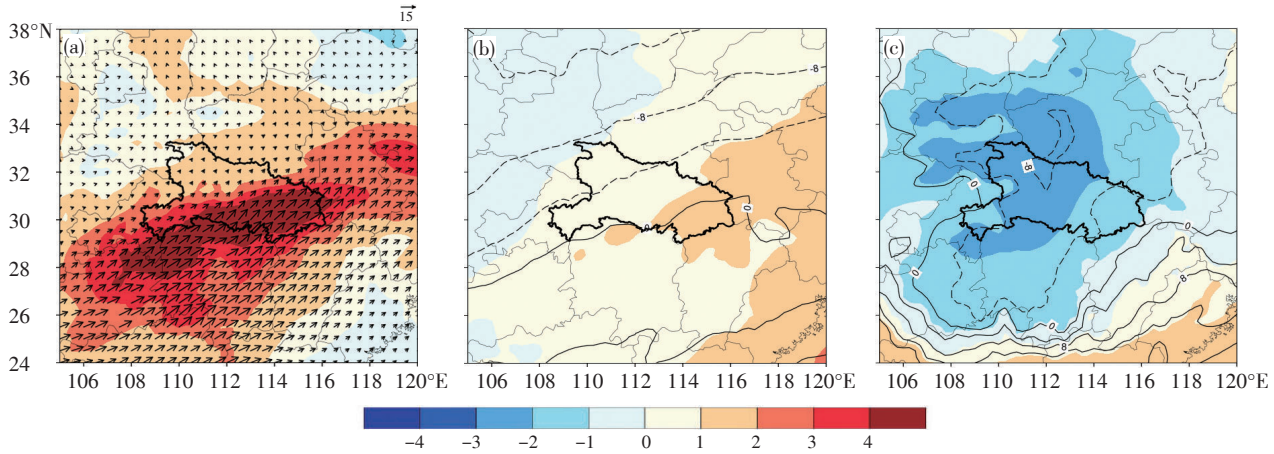


图4 2024年2月4日02时700 hPa水汽通量场(a，单位kg·m^{-2}·s^{-1})和温度场(b，等值线，单位℃) 925 hPa温度场(c，等值线，单位℃)及标准化距平(阴影)

Fig. 4 (a) 700 hPa water vapor flux (unit: kg·m^{-2}·s^{-1}) and (b) temperature (contour line, unit: °C), (c) 925 hPa temperature (contour line, unit: °C) and normalized anomaly (shaded) at 02:00 BT on February 4, 2024

以−10 ℃作为区分云中是否有冰晶的关键阈值(Huffman and Norman，1988)。从表1和图5可以看到，此过程冻雨和冰粒发生时段，高层到低层有明显的“冰晶层−融化层−冻结层”，融化层中西南暖湿气流发展旺盛，最高温度为2.5~6.5 ℃，位于800 hPa附近，冻结层受明显的东北风影响，最低温度为−7.5~−4 ℃，位于950~850 hPa之间。

具体来看两站在不同时段的降水相态与垂直温湿层结演变。武汉第一时段(2日凌晨至上午)冻雨发生时间短，2日08时前后云顶短暂伸展到304.6 hPa(−41.9 ℃)高度(图5a，6a)，600—400 hPa出现少量短时云冰(图7a)，但在850—700 hPa高度上出现了高于0 ℃

表1 2024年2月2—4日武汉、2—3日宜昌探空大气层结参数

Table1 The sounding atmospheric stratification parameters of Wuhan 2–4 and Yichang 2–3 February 2024

探空站	时间	降水相态	云顶		融化层厚度/m	融化层高度/m	融化层		冷垫厚度/m	低层冷垫		2 m气温/℃
			高度/hPa	温度/℃			强度/℃	高度/hPa		强度/℃	高度/hPa	
武汉	2日08时	冻雨	304.6	−41.9	1 340	1 611~2 951	4.6	810	1 532	−5	954.8	−0.4
	2日20时	冻雨	539.5	−13	1 619	1 469~3 088	6.5	796	1 414	−4	930.5	−0.3
	3日08时	冻雨伴冰粒	332.4	−38.2	1 015	1 717~2 732	2.5	795.3	1 625	−6.3	933.6	−1.4
	3日20时	无降水	273.2	−48.4	857	1 944~2 801	2.6	775.5	1 915	−6.1	940.9	−0.9
	4日08时	雪	339	−36.1	–	2 611	0.2	740.6	2 449	−6	845.9	−1.8
宜昌	2日08时	无降水	481.4	−20.5	767	1 890~2 657	1.6	779.2	1 858	−7	877.7	−2.2
	2日20时	冻雨伴冰粒	597.6	−10.4	621	1 983~2 604	3.5	783.5	1 972	−7.5	866.1	−2.5
	3日08时	雪	391.8	−31.5	–	–	–	–	整层	−8.3	813.4	−2.7

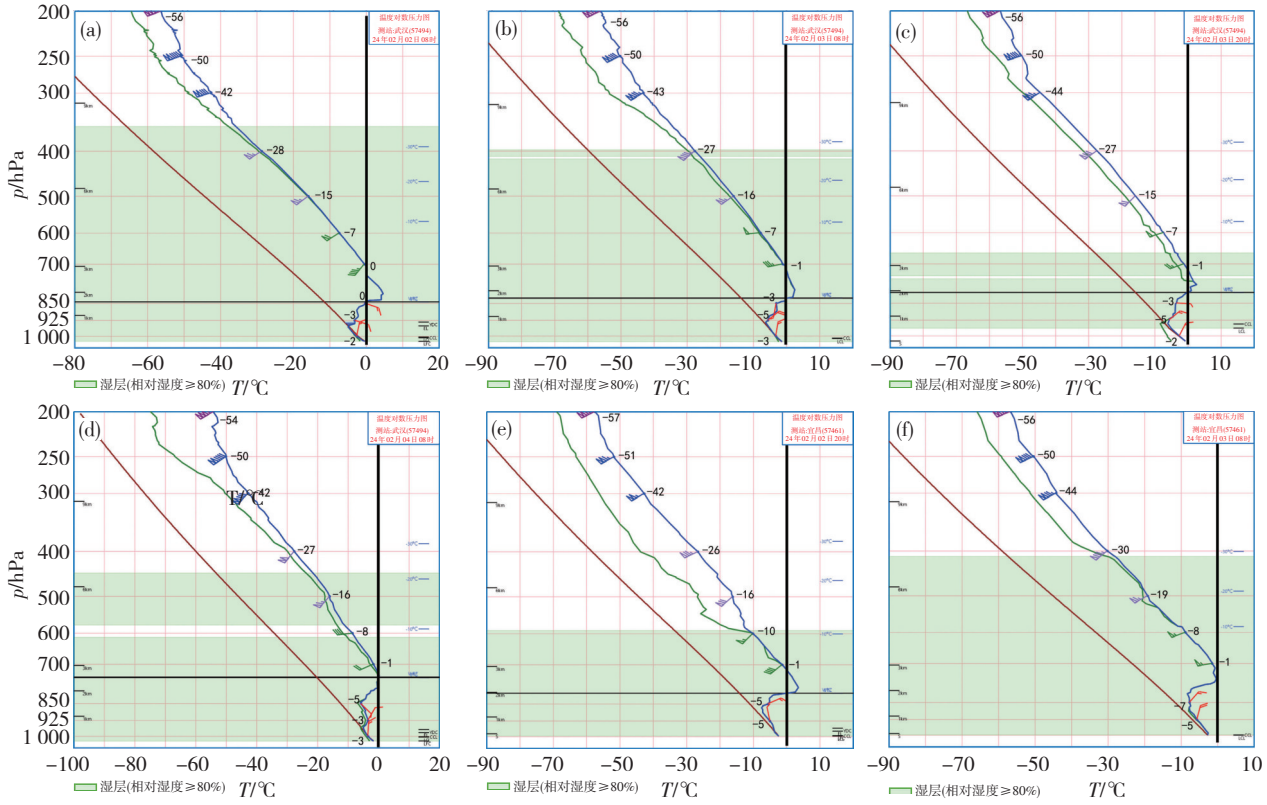


图5 武汉站2日08时(a)、3日08时(b)、3日20时(c)、4日08时(d)及宜昌站2日20时(e)、3日08时(f)探空曲线

Fig. 5 Sounding profiles at (a) 08:00 BT on February 2, (b) 08:00 BT on February 3, (c) 20:00 BT on February 3, and (d) 08:00 BT on February 4 in Wuhan station, and at (e) 20:00 BT on February 2, (f) 08:00 BT on February 3 in Yichang station

的融化层,厚度达1 340 m,最暖处位于810 hPa,温度为4.6 ℃,同时850 hPa以下冷垫厚度达1 532 m,低层冷垫强度达-5 ℃,2 m气温下降至-0.4 ℃(表1),高层的冰晶在下落到融化层时融化,在到达地面的过程中遇到深厚的冷垫,冷却为过冷水,落地时出现了冻雨,为融化机制的冻雨。第二时段(2日夜间至3日上午),随着上升运动的增强,云顶高度由539.5 hPa(-13 ℃)伸展至332.4 hPa(-38.2 ℃)(表1),中高层云冰含量明显比第一时段增多且高度增高(图7a)。2日20时—3日01时前后,温度层结与第一时段相似,但融化层厚度更厚、强度更强,虽然云冰含量也有所增多(图6a),但降水相态仍为冻雨。3日04—08时,融化层厚度和强度减弱至1 015 m和2.5 ℃,冷垫厚度和强度增强到1 625 m和-6.3 ℃,降水相态中出现冰粒(图5b、表1)。可见,云顶高度增高、云冰含量增多,融化层厚度减弱、冷垫增强有利于降水中的冰粒成分的增加,这与漆梁波(2012)的研究结论一致。第三时段(3日夜间至4日凌晨),持续较强的上升运动,导致云顶伸展高度更高(273.2 hPa),且维持12 h以上,云中云冰厚度和含量也明显强于前两个时段。此时段,融化层厚度和强度继续减弱,冷垫强度维持在-6 ℃左右,但厚度增强,融化层的减弱及冷垫的增强有利于冰粒含量增多(图5c、d)。出现冰粒时,2 m气温比单冻雨时会有明显的下降(图2a),也表明低层冷垫更冷。

宜昌三个时段云顶伸展高度均较高,达450 hPa以上,对应在600—300 hPa云冰含量也高,可见三个时段也都有冰晶的参与,但第二和第三时段出现冰粒和雪时,云顶高度更高、云冰含量更多(图6b,7b)。不同的是,第一时段和第二时段前期在800—700 hPa间有融化层存在,厚度621~767 m、强度达到1.6~3.5 ℃,低层冷垫厚度1 900 m左右、强度-7.5~-7 ℃,2 m气温低于-2 ℃,融化层浅薄且强度弱、冷垫厚且强度强,导致降水相态为冻雨和冰粒混合状态(表2)。第二时段后期和第三时段,随着融化层的消失,大气整层温度低于0 ℃,冰晶下落无融化,降水相态逐渐由冰粒转为纯雪(图5e、f,表2)。根据实况观测,宜昌第二时段的冰粒比武汉第三时段冰粒直径更大,此阶段宜昌融化层厚度和强度均比武汉小,冷垫厚度和强度比武汉大,可能是由于弱暖层只是部分融化冰晶,在更冷的冷垫中更易完全冻结,并以固态落到地面。

综上所述,武汉和宜昌地区高空均有冰晶和融化层的存在,为融化机制的冻雨、冰粒。冰粒比冻雨云顶高度更高、融化层厚度和强度更弱、低层冷垫厚度

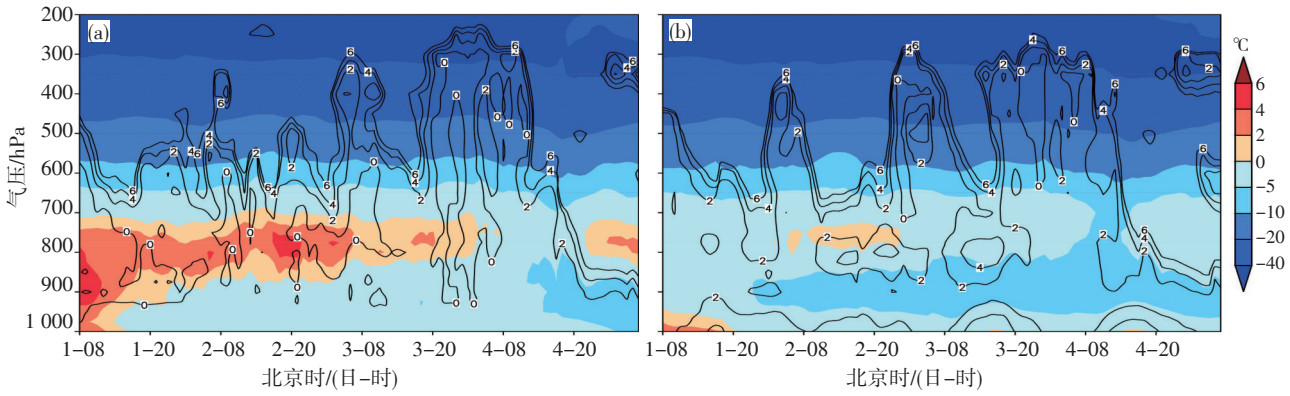


图6 2024年2月1—4日武汉(a)和宜昌(b)温度(阴影)和露点温度(黑线)层结时序图

Fig. 6 Time series of temperature (shaded area: temperature) and dew point temperature (black line) for (a)Wuhan and (b)Yichang from 1–4 February 2024

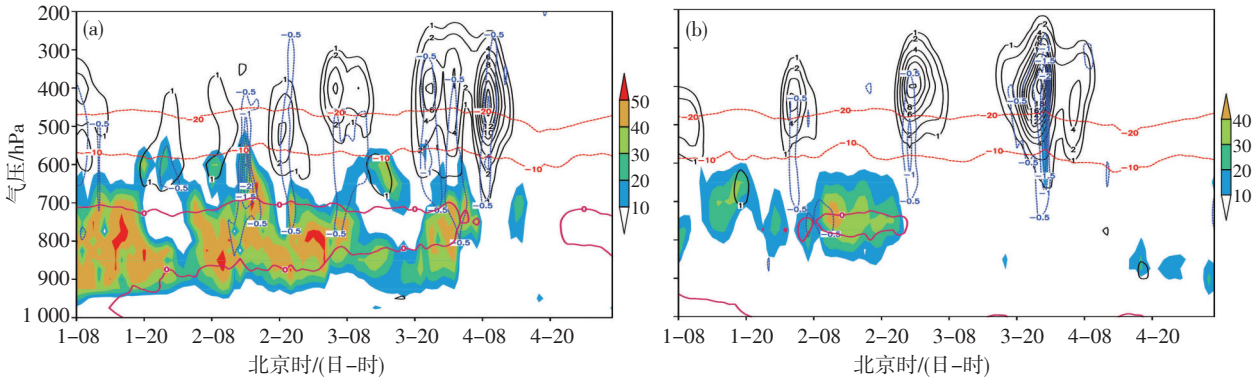


图7 2024年2月1—4日武汉(a)和宜昌站(b)云冰(黑线，单位:10^{-4} kg·kg^{-1})和云水(阴影，单位:10^{-4} kg·kg^{-1})时序图(红色线：温度，单位：℃；蓝色线:垂直速度，单位:Pa·s^{-1})

Fig. 7 Time series of cloud ice (black line, unit: 10^{-4} kg·kg^{-1}) and cloud water (shaded area, unit: 10^{-4} kg·kg^{-1}) for (a) Wuhan and (b) Yichang station from February 1–4, 2024 (red line: temperature, unit: °C; blue line: vertical velocity, unit: Pa·s^{-1})

和强度更强。云顶伸展高度、融化层和冷垫的厚度及强度对降水相态的影响均很重要，温湿层结的复杂配置，直接导致了降水相态的复杂性。

5 冻雨的双偏振雷达观测特征

由于此次过程中冻雨为主要灾害且强度具有极端性，武汉为冻雨中心，下面重点对武汉冻雨的雷达观测特征做详细分析。

从武汉降水实况演变(图2a)可知，冻雨主要发生2日08—11时、3日00—10时及3日20时—4日04时。图8a—c分别为武汉八分山双偏振雷达三个时段典型时次(2日08时、3日05时、3日20时)的组合反射率因子(CR)图，可以看到在三个时段中，武汉区域的反射率因子强度在30~45 dBz，最强达到50 dBz。为了从垂直方向上分析冻雨变化特征，分别沿第一时段(图8a)和第二时段(图8b)的AB、CD、EF做垂直剖面图(图9a—c)。可以看到在第一个时段图9a中40~45 dBz反射率因子位于2~3 km高度附近，图9b中40~45 dBz反射率因子位于3 km以下，接近地面。第二个时段图9c可以看到反射率因子强度在2~3 km附近和第一时段相比明显增强，最强达50 dBz，且强回波的厚度也明显增大，表明降水强度增强，这与观测到的降水强度变化一致。

相关系数(CC)大小能反映云中水凝物粒子的均匀程度，通常CC为1则表明粒子相态均一。对应同时次的相关系数(图8d—f)可以看到，武汉区域范围CC的值多在0.7~0.95之间，存在明显的梯度，且第二和第三个降水时段CC大梯度区域明显大于第一个降水时段。图9d—f分别为与图9a—c对应的CC垂直剖面。从第一时段图9d可以看到，在融化层高度附近及以下对应的CC值梯度较大，与实况监测到武汉冻雨最早开始时间约在2日08时左右较为一致。图9e可以看到3 km高度附近也存在CC大梯度区，但与图9d不同的是，3 km以下反射率因子大值区对应的CC值一致为1，表明在雷达站南侧3 km以下降水粒子相态趋于一致，实况观测为雨。从第二时段图9f可以看到，整个垂直方向上CC值均小于1，为0.7~0.95，表明降水相态具有不均匀性，为液态和固态粒子共存。以上观测

结果表明在第一个时段，武汉市西北部开始出现冻雨，但南部还为雨，但在第二和第三时段，均观测到较多混合相态粒子，且范围明显增大，与地面实况观测到的天气现象为冻雨为主，伴有冰粒较为一致。

差分反射率(Z_{dr})反映了水平极化反射率与垂直极化反射率的对数比率，其值为正且越大时，代表粒子越大且越扁平。从图8g—i可以看到，与反射率因子30~45 dBz相对应的差分反射率强度在1~3 dB，表明降水粒子形状扁平，以雨滴为主。图9g—i分别为与图9a—c对应的差分反射率垂直剖面，第一时段差分反射率在1~3 dB，表明云中有不同降水相态的粒子下落至地面且以扁平的降水粒子为主(图9g)。差分反射率从3 km至地面有增强趋势，近地面达3 dB(图9h)，与反射率因子垂直特征一致。第二时段差分反射率的垂直剖面出现了与第一阶段不同的特征，表现为3 km以上低于0 dB，在3 km以下依然为正值，在1~4 dB (图9i)，这表明在该时次，融化层以上冰晶含量逐渐增多，但经过融化层下落至地面的过程中，降水粒子还是以雨滴为主，且强度强于第一时段，这与3.3节中指出的第二时段冻雨为融化机制的分析结果一致。第三个时段的垂直剖面特征与第二时段类似(图略)。

综上，此次极端冻雨的双偏振雷达特征表现为强回波主要集中在融化层2~3 km高度附近，有明显的0 ℃层亮带特征，回波强度为30~45 dBz，最强可达50 dBz，与一般降雨回波垂直分布特征有明显不同；在融化层及以下，相关系数维持在0.7~0.95，存在明显的梯度大值区，与降雨回波CC为1不同；差分反射率为正值与降

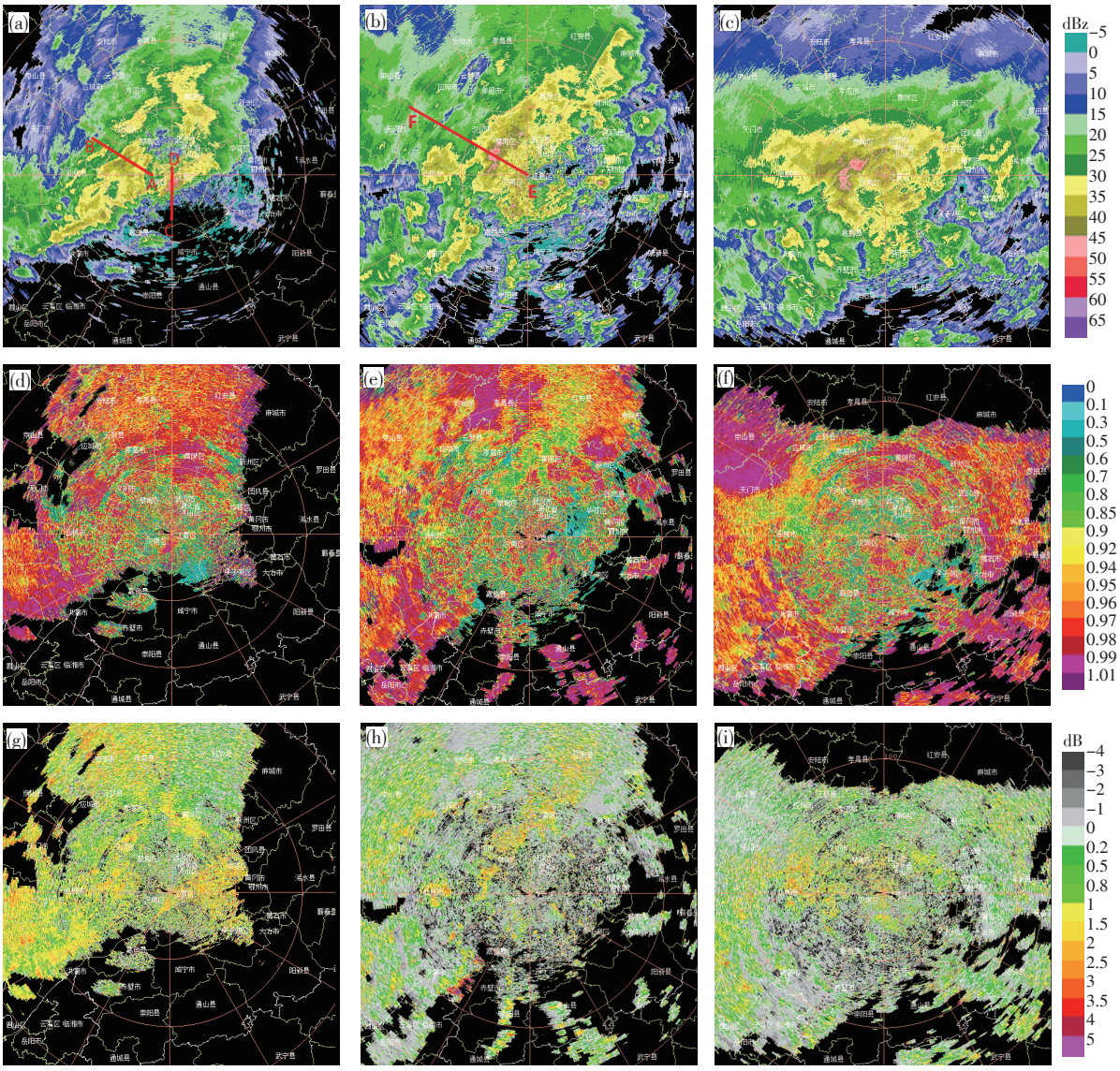


图8 2月2日08:03 (a, d, g)、3日05:01 (b, e, h)和3日20:40 (c, f, i)武汉雷达回波组合反射率(a—c)、相关系数(d—f)和差分反射率(g—i)

Fig. 8 The (a–c) composite reflectivity, (d–f) correlation coefficient and (g–i) differential reflectivity at (a, d, g) 08:03 BT on 2, (b, e, h) 05:01 BT on 3 and (c, f, i) 20:40 BT on 3 February in Wuhan station

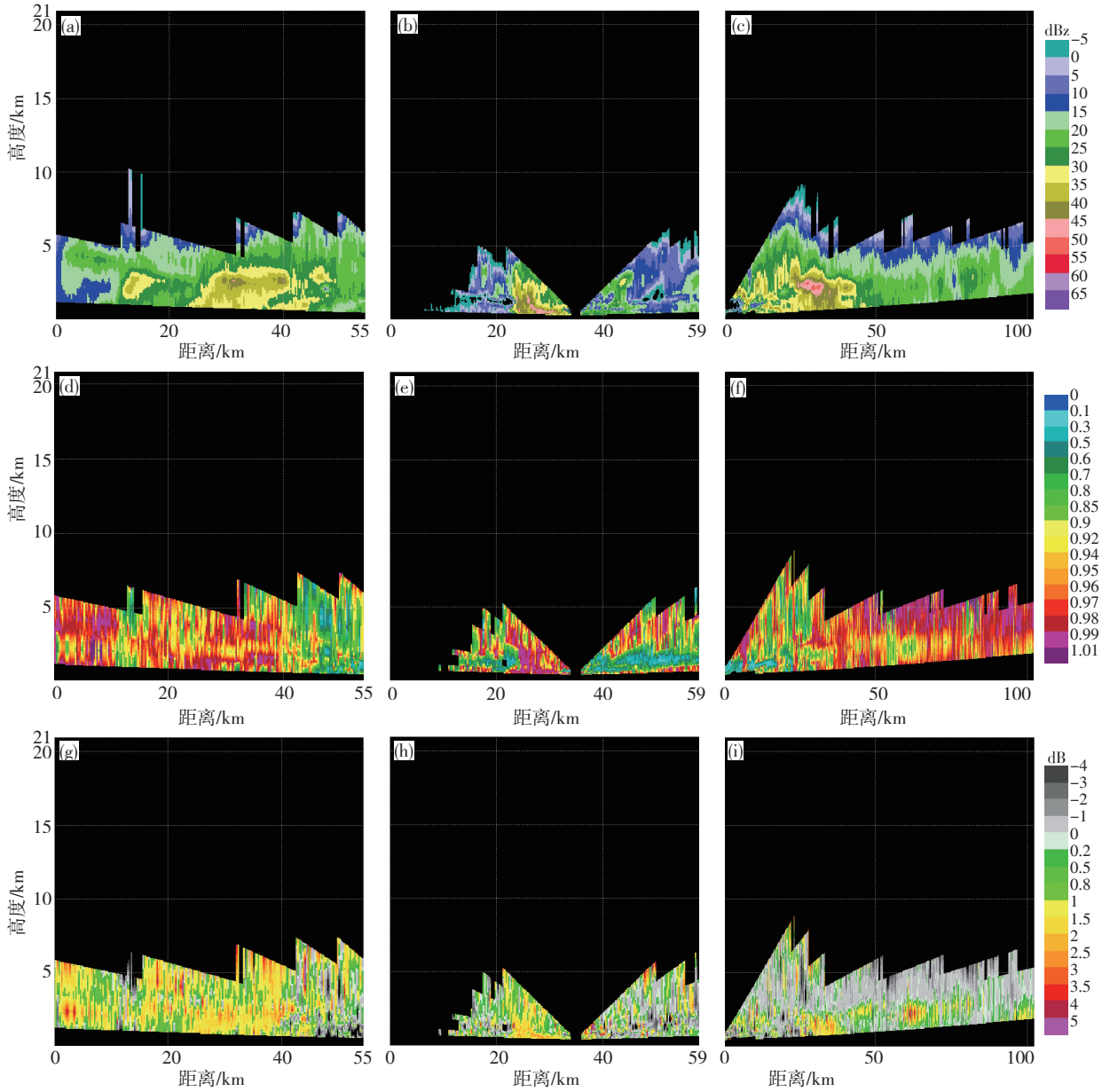


图9 2月2日08:03 (a, d, g)、3日05:01 (b, e, h)和3日20:40 (c, f, i)武汉雷达回波组合反射率(a—c)、相关系数(d—f)和差分反射率(g—i)分别沿图8中AB、CD、EF方向剖面

Fig. 9 The (a–c) composite reflectivity, (d–f) correlation coefficient and (g–i) differential reflectivity at (a, d, g) 08:03 BT on 2, (b, e, h) 05:01 BT on 3 and (c, f, i) 20:40 BT on 3 February in Wuhan station were measured along the AB, CD and EF directions in Fig. 8

雨没有明显差异，但与纯雪为负值差异较大。以上特点在预报中可作为冻雨双偏振雷达判别依据。

6 结论与讨论

2024年2月初湖北省经历了一次极端冰冻天气过程。利用常规气象观测、地面自动站、双偏振雷达和再分析资料，对此次过程的冻雨观测特征和成因进行了初步分析，得出以下主要结论：

(1) 此次过程中，地面冷空气先南下形成冷垫，随后南支槽东移，配合副高阻挡，冷暖气流叠加，在垂直方向上形成明显的冷–暖–冷温度夹心层结，导致冻雨的发生。700 hPa水汽通量异常偏强、700—800 hPa温度异常偏高和925 hPa温度异常偏低是此次冻雨强度具有极端性的主要原因。

(2) 云顶伸展高度、融化层和低层冷垫的厚度及强度对降水相态影响至关重要，温湿层结的复杂配置，直接导致了降水相态的复杂性。湖北省此次过程冻雨和冰粒均为融化机制降水，冰粒比冻雨云顶高度更高、融化层厚度和强度更弱、低层冷垫厚度和强度更强。当中层暖层消失，大气整层温度低于0 ℃，冰晶下落无融化，即由冻雨、冰粒转纯雪。

(3) 双偏振雷达观测表明，此次极端冻雨的双偏振雷达特征表现为强回波主要集中在融化层3 km高度附近，有明显的0 ℃层亮带特征，回波强度为30~45 dBz，

最强可达50 dBz;在融化层以下,相关系数维持在0.7~0.9,存在明显的梯度大值区;差分反射率为正值,强度在1~3 dB,最大达4 dB,与降雨没有明显差异,但与纯雪为负值差异较大。

本文主要围绕此次极端冰冻过程的天气学成因和双偏振雷达观测特征两方面做了分析研究,得到了一些对冻雨预报有参考意义的结论。但由于雨雪相态与气象要素垂直分布关系密切,而现有的新型垂直观测设备布设密度不够,给此次极端冰冻过程的实况观测和预报带来很大难度,此外,对于冻雨造成的电线积冰厚度也缺乏深入研究。今后需加强双偏振雷达、微波辐射计、云雷达等新型观测资料应用研究,揭示冻雨和冰粒等降水相态的微物理机制,改进降水相态客观识别算法,深入低温雨雪冰冻灾害影响研究。

参考文献:

丁一汇,王遵娅,宋亚芳.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 Meteorologica Sinica,66(5):808-825 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014

董全,张峰,宗志平.2020.基于ECMWF集合预报产品的降水相态客观预报方法[J].应用气象学报,31(5):527-542. Dong Q, Zhang F, Zong Z P. 2020. Objective precipitation type forecast based on ECMWF ensemble product [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(5):527-542 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20200502

甘文强,蓝伟,杜小玲,等.2018.2018年1月底至2月初贵州低温雨雪天气成因初探[J].暴雨灾害,37(5):410-420. Gan W Q, Lan W, Du X L, et al. 2018. Tentative analysis on the cause of a low-temperature, freezing rain and snow event in Guizhou between the end of January and the beginning of February in 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,37(5):410-420 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.003

高辉,陈丽娟,贾小龙,等.2008. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析[J].气象,34(4):101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice snow and frozen disasters in South China during January 2008 [J]. Meteorological Monthly,34(4):101-106 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.013

管理,戴建华,陶岚,等.2021.QVP方法在双偏振雷达冬季降水观测中的应用[J].应用气象学报,32(1):91-101. Guan L, Dai J H, Tao L, et al. 2021. Application of QVP method to winter precipitation observation based on polarimetric radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science,32(1):91-101 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20210108

雷之雨,郑佳锋,朱克云,等.2018.一次冻雨天气的云雷达回波特征分析[J].气象科技,46(6):1232-1239. Lei Z Y, Zheng J F, Zhu K Y, et al. 2018. Characteristics of cloud radar echoes during a freezing rain [J]. Meteorological Science and Technology,46(6):1232-1239 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20170583

李萌萌,王云,朱冰,等.2023.一次江淮地区突发降雪的多源观测特征及其成因分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):7-15. Li M M, Wang Y, Zhu B, et al. 2023. Multi-source observation characteristics and causes of an abrupt snowfall in Jianghuai region [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):7-15 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.002

刘红武,李振,陈龙,等.2020.湖南一次罕见低温雨雪冰冻天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,14(2):18-26. Liu H W, Li Z, Chen L, et al. 2020. Analysis of a rare consecutive cryogenic freezing rain in Hunan province [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(2):18-26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn. 1002-0799.2020.02.003

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. Liu C R, Han Y X, Wang J, et al. 2015. Studies on statistics and formation mechanism of freezing rain [J]. Journal of Catastrophology,30(3):219-222 (in Chinese). doi:10.3969 /j.issn.1000-811X.2015.03.040

孟雪峰,孙永刚,霍志丽,等.2022.内蒙古一次极端暴雪事件中冻雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,16(4):22-30. Meng X F, Sun Y G, Huo Z L, et al. 2022. Cause analysis of freezing rain in an extreme snowstorm in Inner Mongolia [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(4):22-30 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.004

欧建军,周毓荃,杨棋,等. 2011.我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J].高原气象,30(3):692-699. OU J J, Zhou Y Q, Yang Q, et al. 2011. Analyses on spatial-temoral distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China [J]. Plateau Meteorology,30(3):692-699 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:GYQX. 0.2011-03-017

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]. Meteorological Monthly,38(7):769-778 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.07.001

史瑞琴,夏智宏,秦鹏程,等.2024.基于低温-雨雪-冻雨综合强度指数的湖北冰冻事件评估[J].暴雨灾害,43(4):448-457. Shi R Q, Xia Z H, Qin P C, et al. 2024. Evaluation of freezing events based on the comprehensive intensity index of low temperature,-rain snow-freezing in Hubei [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):448-457 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-078

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]. Meteorological Monthly,49(7):830-842 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.030302

唐明晖,俞小鼎,王青霞,等.2023.湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析[J].暴雨灾害,42(3):293-302. Tang M H, Yu X D, Wang Q X, et al. 2023. Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):293-302 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2022-065

陶玥,史月琴,刘卫国.2012. 2008年1月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征[J].大气科学,36(3):507-522. Tao Y, Shi Y Q, Liu W G. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over Southern China in January 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,36(3):507-522 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11082

王东海,柳崇健,刘英,等.2008. 2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气

特征及其天气动力学成因的初步分析[J].气象学报,66(3):405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(3):405-422 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.038

王浩宇,吴翀,刘黎平,等.2023.基于东北偏振雷达冬季相态识别的研究[J].成都信息工程大学学报,38(1):13-22.Wang H Y, Wu C, Liu L P, et al. 2023. Reasearch on winter phase identification based on Northeast polarized radar [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,38(1):13-22 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.01.003

王宁,云天,布和朝鲁,等.2023.中国东北地区两场罕见冻雨过程的对比分析[J].大气科学,47(4): 1267-1282.Wang N, Yun T, Bueh C, et al. 2023. Comparative analysis of the two unusual freezing rain events in Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,47(4): 1267-1282 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22068

王珊珊,雷彦森,方鸿斌,等.2022.基于CatBoost算法的长江中游冬季降水相态预报方法研究[J].气象,48(9):1153-1161.Wang S S, Lei Y S, Fang H B, et al. 2022. Method of winter precipitation type prediction in the middle reaches of the Yangtze River based on CatBoost algorithm [J]. Meteorological Monthly,48(9):1153-1161 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041301

赵思雄,孙建华.2008. 2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J].气候与环境研究,13(4):351-367. Zhan S X, Sun J H. 2008. Multi scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over Southern China during January-February 2008 [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):351-367 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.02

张桂莲,霍志丽,王学强.2023.冷垫背景下冻雨和极端大暴雪成因机制分析[J].高原气象,42(3):725-733. Zhang G L, Huo Z L, Wang X Q. 2023. Analysis on the genesis mechanism of freezing rain and extreme heavy snowstorm under the background of cold cushion [J]. Plateau Meteorology,42(3):725-733 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00 048

周悦,许冠宇,高正旭,等.2016.湖北省冻雨天气特征及其判定方法研究[J].气象科技,44(6):949-955. Zhou Y, Xu G Y, Gao Z X, et al. 2016. Characteristics and discrimination method of freezing rain weather in Hubei province [J]. Meteorological Science and Technology,44(6): 949-955 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.2016.06.015

宗志平,马杰.2011. 2008年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J].气象,37(2):156-160. Zong Z P, Ma J. 2011. The relationship between the strength variability of freezing rain and the character of inversion in the beginning of 2008 [J]. Meteorological Monthly,37(2): 156-160 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.2.004

Bocchieri J R. 1980. The objective use of upper air soundings to specify precipitation type [J]. Monthly Weather Review,108(5):596-603. doi:10.1175/1520-0493(1980)1082.0.CO;2

Chen R S, Liu J F, Song Y X. 2014. Precipitation type estimation and validation in China [J]. Journal of Mountain Science,11(4):917-925. doi:10.1007/s11629-012-2625-x

Grumm R H, Hart R. 2001. Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: preliminary findings [J]. Weather and Forecasting,16(6):736-754. doi:10.1175/1520-0434(2001)0162.0.CO;2

Huffman G J, Norman G A. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. Monthly Weather Review, 116(11):2172-2182. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWR-PA>2.0.CO;2

Ikeda K, Rasmussen M, Brandes E, et al. 2009. Freezing drizzle detection with WSR-88D radars [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,48:41-59. doi:10.1175/2008JAMC1939.1

Ohtake T. 1963. Hemispheric investigation of warm rain by radiosonde data [J]. Journal of Applied Meteorology,2(5):594-607. doi:10.1175/1520-0450(1963)002<0594:HIOWRB>2.0.CO;2

Poore K D, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. Journal of Climate,8(3):550-568. doi:10.1175/1520-0442(1995)0082.0.CO;2

Theriault J M, Rasmussen K L, Fisico T, et al. 2014. Weather observations on whistler mountain during live storms [J]. Pure and Applied Geophysics,171(1/2):129-155. doi:10.1007/s00024-012-0590-5

Rasmussen R M. 2002. Freezing drizzle formation in stably stratified layer-clouds: The role of radiative cooling of cloud droplets, cloudcondensation nuclei, and ice initiation [J]. Journal of the Atmospheric Science,59: 837-860. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0837:FDFISS>2.0.CO;2

Tremblay A, Glazer A. 2000. An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts [J]. Monthly Weather Review,128:1289-1308. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<1289:AIMSFF>2.0.CO;2

（责任编辑　杨　浩）