谷秀杰,郭紫薇,杨慧,等.2024. 2024年2月初河南一次罕见雨雪冰冻过程诊断分析[J].暴雨灾害,43(4):469-478. GU Xiujie, GUO Ziwei, YANG Hui, et al. 2024. Diagnostic analysis of a rare rainfall/snowfall and freezing process in Henan in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):469-478 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-058

2024年2月初河南一次罕见雨雪冰冻过程诊断分析

谷秀杰[1,2],郭紫薇[1,2],杨慧[1,2],武文博[1,2],郝晓珍[1,2],康智国[1,2]
(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003;2. 河南省气象台,郑州 450003)

摘　要:2024年1月31日—2月5日河南出现了一次罕见的雨雪冰冻天气,表现为持续时间长、累积雨雪量大、积雪深、温度低、降水相态复杂等特点。利用国家气象站和双偏振雷达观测数据以及ERA5再分析资料,对本次过程的极端性及降水相态演变、雨雪冰冻成因进行了诊断分析,结果表明:(1) 过程期间有5个国家气象站最大积雪深度达到或突破2月历史同期极值,多站最高气温达到或刷新2月上旬历史同期最小值;单日至少有68.3%的国家气象站出现降水,单站最长连续降水近29 h。(2) 大尺度环流系统稳定维持是本次过程发生发展的重要原因之一;对流层低层强冷空气持续入侵不仅起到动力抬升作用,也为雨雪冰冻天气提供了持续降温条件;异常强盛的偏南气流为本次过程提供了充足的水汽和动量,同时也增强了不稳定层结。(3) 使用单一特性层温度来判识降水相态依据不足,应根据整层大气层结温度来预判可能出现的降水相态,当整层大气温度均低于0 ℃时降水相态为纯雪,若存在温度高于0 ℃的融化层或云体由过冷却水滴组成时,将出现混合型降水相态。(4) 双偏振雷达的相关系数和差分反射率产品对区分雨夹雪和纯雪有较好的指示意义,当相关系数接近1、差分反射率为-1~0 dB时,为纯雪;当相关系数小于1、差分反射率大于1 dB时,为雨夹雪。

关键词:雨雪冰冻;大尺度环流;诊断分析;河南
中图法分类号: P458　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-058

Diagnostic analysis of a rare rainfall/snowfall and freezing process in Henan in early February 2024

GU Xiujie[1,2], GUO Ziwei[1,2], YANG Hui[1,2], WU Wenbo[1,2], HAO Xiaozhen[1,2], KANG Zhiguo[1,2]

(1. *CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou* 450003;
2. *Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou* 450003)

Abstract: From 31 January to 5 February, 2024, Henan Province experienced a rare freezing rain and snow process characterized by a long duration, substantial cumulative precipitation, significant snow depth, low temperatures, and complex precipitation phases. Based on the national meteorological observation data, dual-polarization radar data, and hourly reanalysis data of ERA5, a diagnostic analysis of the event's extremity, phase evolution, and causes of the freezing rain and snow was conducted. The results are as follows. During the process, 5 national meteorological stations reached or exceeded the maximum snow depth of the historical records in February. At many stations, the minimum temperature has reached or set a new historical record in early February. Precipitation was observed from at least 68.3% of national meteorological observation stations in a single day, with the longest continuous precipitation at a single station being nearly 29 hours. The stable maintenance of a large-scale circulation system was one of the main reasons for this process. The persistent intrusion of the strong cold air in the lower troposphere provided both dynamic uplift and sustained cooling conditions for the freezing rain and snow process. Exceptionally strong southerly airflow provided ample moisture and momentum, enhancing unstable stratification. For precipitation phase identification, relying solely on a single-layer temperature is insufficient. Instead, the entire atmospheric layer temperature should be considered to predict possible precipitation phases. When the entire atmospheric layer temperature is below 0 °C, precipitation is pure snow. If there is a melting layer or the cloud consists of supercooled water droplets, mixed precipitation will occur. Dual-polarization radar's correlation coefficient and differential reflectivity products are useful for distinguishing between sleet and pure snow. A correlation coefficient close to 1 and differential

收稿日期: 2024-04-02;**定稿日期:**2024-06-18
资助项目: 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-077);河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目(KM202302);河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金项目(KL202404)

第一作者: 谷秀杰,主要从事短期天气预报工作。E-mail: gxjwang@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

reflectivity between −1 and 0 dB indicates pure snow, while a correlation coefficient less than 1 and differential reflectivity greater than 1 dB indicate sleet.

Key words: rainfall/snowfall and freezing; large-scale circulation; diagnostic analysis; Henan Province

引 言

2024年1月31日至2月5日，河南出现了一次罕见的雨雪冰冻过程，本次过程具有持续时间长、累积雨雪量大、积雪深、温度低、降水相态复杂等特点。最大积雪深度和最高气温最低值均具有极端性，过程期间有5个国家气象站最大积雪深度达到或突破2月历史极值或历史极值，12个国家气象站日最高气温达到或刷新2月上旬历史同期最小值。过程持续期间恰逢春节前出行高峰，河南又是内陆交通运输的重要枢纽，雨雪冰冻天气与春运叠加，给交通运输、保通保畅、电力输送等带来很大挑战。雨雪冰冻天气往往包含十分复杂的雨、雪、冻雨、冰粒等不同相态之间相互转换机制，或以不同组合形式一起发生，此类天气常常会给交通、通信、电力、农业生态等带来重大影响和损失，甚至还会出现严重的冰冻和雪灾(张俊兰等，2018；宗海锋等，2022)。此类天气的预警预报一直是气象工作的重点和难点，因此对其开展成因分析与可预报性研究具有重要意义(张韧等，2012；江漫等，2014；Qian et al., 2023)。

全球气候虽呈现变暖的趋势，但极端冷事件也时有发生。有研究指出，21世纪以来偏寒冷事件有所增多和增强(黄小燕等，2016；Chen et al., 2021；Fu et al., 2023；He et al., 2023)，2008、2011和2016年冬季我国南方均发生了较严重的雨雪冰冻天气，尤其是2008年南方持续雨雪冰冻天气发生后，此类灾害性天气更引起了越来越多专家的关注，并涌现出大量的研究成果(杜小玲等，2014；毛宇清等，2022；唐明晖等，2023)。丁一汇等(2008)指出，2008年南方雨雪冰冻灾害形成的原因是多种因素在同一时段同一地区相互配合和迭加的结果；从致灾机理看，此次灾害性天气与东亚季风异常有关，欧亚大陆异常的大气环流是导致2008年持续雨雪冰冻灾害的重要原因(高辉等，2008；顾雷等，2008；陶诗言和卫捷，2008；Yang et al., 2020；Han et al., 2023)，而与此同时来自极地的冷气团与来自孟加拉湾和南海地区热带洋面的暖气团长时间交汇于长江中下游地区，在持续低温的作用下发生雨雪冰冻，引发了大范围雨雪冰冻灾害(杨贵名，2008)。吴古会等(2012)对2011年冬季贵州雨雪冰冻天气成因的研究表明，东亚地区500 hPa高度距平场“北高南低”分布及中高纬阻塞高压的稳定维持，有利于引导冷空气频繁南下影响贵州，此为持续低温的主要原因，中高纬度环流与2008年有一定相似性，但由于西太平洋副热带高压较弱，中亚地区低值系统不活跃，过程表现出间歇性，受灾程度远不如2008年。刘红武等(2020)对湖南一次雨雪冰冻天气过程分析表明，500 hPa横槽转竖的过程中不断引导冷空气南下，是产生雨雪冰冻的大尺度环流背景，地面强大的冷高压及大的温度梯度是造成低温的主要原因。

上述结论对开展雨雪冰冻天气机理研究和预报预警具有重大意义，但由于不同区域所处的气候带及地形地貌不同，其雨雪冰冻天气成因也存在明显差异。河南地处暖温带和亚热带过渡区，地势为西高东低，由平原、盆地、山地、丘陵和水面构成，地形地貌较为复杂，近年来河南雨雪冰冻事件明显增多且持续时间长，但目前对河南雨雪冰冻成因及降水相态诊断分析较少，而降水相态预报准确与否直接影响着雨雪冰冻强度及落区。因此，本文以河南省2024年1月31日—2月5日的雨雪冰冻过程为例，利用国家气象站资料、双偏振雷达资料和ERA5再分析资料，通过数理统计和天气学分析方法，对本次过程极端性特征及相态演变、雨雪冰冻成因进行了诊断分析，以期为提高河南冬季雨雪冰冻的精细化预报水平和服务能力提供参考依据。

1 资料与天气实况

1.1 资料来源

本文所用资料的时间段均为2024年1月31日—2月5日，其主要包括：(1) “气象大数据云平台·天擎”系统提供的河南省120个国家气象观测站逐时降水量、积雪深度、气温、天气现象等观测数据；(2) 河南省气候中心提供的最大积雪深度和日最高气温最小值极值记录；(3) 信阳双偏振天气雷达和郑州、南阳、阜阳站探空资料；(4) 欧洲中期天气预报中心提供的第五代大气再分析(ERA5)数据，水平分辨率为0.25°×0.25°，时间分辨率为1 h，垂直方向共10层(1 000—300 hPa)，包括位势高度场、温度场、经向风场、纬向风场等，用于诊断分析大尺度环流、水汽输送、温度层结及距平等；其中以1991—2020年的要素平均值作为各场的气候平均态。

1.2 雨雪实况

2024年1月31日08:00—2月5日08:00 (北京时，下同)，受西南暖湿气流和冷空气共同影响，我国中东部大部出现持续雨雪冰冻天气。河南雨雪过程从1月31日下午开始，自南向北逐渐发展到全省，至2月5日逐渐结束，持续5 d之久。根据影响系统的演变及雨雪集中时段，可将本次雨雪冰冻过程分为三个主要

阶段：第一阶段为2024年1月31日14：00—2月1日20：00，河南北部、中西部以降雪为主，南部以降雨为主，其他地区为雨夹雪转纯雪，过程期间全省大部伴有10~13 ℃的降温及6级以上阵风，局地9~11级；第二阶段为2月2日08：00—3日08：00，河南东南部出现复杂相态转换，由雨、雨夹雪、冻雨、冰粒等转为纯雪，其他地区为纯雪；第三阶段为3日20：00—4日20：00，此阶段降雪量最大，东部、东南部10~20 mm，局部20~29.9 mm。

本次过程全省范围均有雨雪发生，累积降水量东南部30~50 mm，西部、北部分别为4~10 mm，其他县市10~25 mm；积雪深度多站达到或突破历史同期极值，最大积雪深度为10~20 cm。过程期间不断有冷空气扩散南下，受冷空气和降水共同影响，气温明显偏低，全省大部日最高气温持续低于0 ℃。由于降水持续时间长，气温多波动且处在相态转换的临界值附近，因此河南东部和南部出现多种相态反复转换或交织出现的情况。此外，本次过程次生及衍生的气象灾害较多，主要有暴雪和低温造成的道路结冰、冻雨导致的电线覆冰等，给交通运输、电力输送和能源保供造成较大影响。综上，本次雨雪冰冻过程具有持续时间长、累积雨雪量大、积雪深、温度低、降水相态复杂等特点。

2 极端性分析

2.1 积雪深度与气温

从2024年1月31日08：00—2月5日08：00河南累积降雪量空间分布图(图1a)可见，黄河以南大部累积降雪量均在10 mm以上，大于20 mm有29站，其中大于30 mm有4站，分别为罗山39 mm、新蔡31.4 mm、商城31.1 mm、新县站30.8 mm，均位于河南东南部的驻马店和信阳地区。截止2月5日08：00由最大积雪深度(图1b)可见，黄河以南大部5 cm以上，其中洛阳南部、郑州南部、开封东部、商丘、许昌、漯河、平顶山南部、周口、驻马店、信阳为12~20 cm，鄢陵和新县最大积雪深度均为20 cm，其中鄢陵突破历史极值，临颍19 cm、睢县17 cm突破2月历史同期极值，许昌18 cm、杞县15 cm达到2月历史同期极值(表1)。本次过程除了雨雪量大、积雪深外，过程期间整体气温较低，国家站中日最低气温最低值出现在叶县站(−14.7℃)，尤其日最高气温明显偏低，郑州、开封等12个国家气象站日最高气温达到或刷新2月上旬历史同期最小值(图略)。

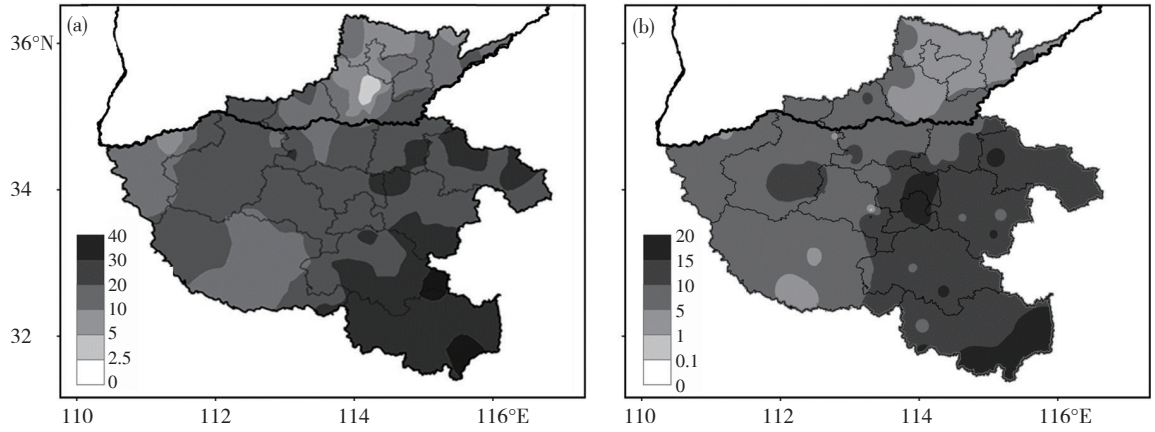


图1 2024年1月31日08：00—2月5日08：00河南累积降雪量(a, 单位: mm)和最大积雪深度(b, 单位: cm)空间分布(黑色粗实线为黄河)

Fig. 1 The spatial distribution of (a) cumulative snowfall (unit: mm) and (b) maximum snow depth (unit: cm) in Henan Province from 08：00 BT on January 31 to 08：00 BT on February 5, 2024 (The thick black solid line represents the Yellow River)

表1 2024年1月31日08：00—2月5日08：00河南最大积雪深度达到(突破)2月历史极值或历史极值站点统计

Table 1 Site statistics table of the maximum snow depth reached (broke through) the historical extreme value or the historical extreme value in February in Henan Province from 08：00 BT on January 31 to 08：00 BT on February 5 in 2024

站名	最大积雪深度/cm		
	本次过程	历史极值	2月历史极值
鄢陵	20	17	15
临颍	19	23	18
睢县	17	20	15
许昌	18	38	18
杞县	15	21	15

2.2 降水范围与持续时间

对过程期间全省120个国家气象观测站逐日降水量进行分级统计，由表2可见，2月1日出现降水量(R)≥0.1 mm的站点数最少(82站)，占比68.3%；其他4 d均多于100站，其中1月31日和2月2日最多，均为118站，占比98.3%。出现R≤5 mm降水站点数2月3日最多(86站)，其次是2月4日(79站)；出现5 mm<R≤10 mm的降水站点数2月2日最多(52站)，其次是1月31日(50站)；出现R>10 mm降水站点数量2月2日最多(10站)，其次是2月1日(4站)。

从过程累积降水量及逐日降水量演变(图略)可

表2 2024年1月31日08:00—2月5日08:00河南不同等级降水量(R)站点逐日统计

Table 2 Daily statistical of different levels of precipitation (R) in Henan Province from 08:00 BT on January 31 to 08:00 BT on February 5, 2024

时间/(年-月-日)	降水站点数			
	$R\geqslant$0.1 mm	0.1 < $R\leqslant$5 mm	5 mm<$R\leqslant$10 mm	R>10 mm
2024-01-31	118	67	50	1
2024-02-01	82	67	11	4
2024-02-02	118	56	52	10
2024-02-03	101	86	12	3
2024-02-04	116	79	36	1

知,河南东南部累积雨雪量大、持续时间长。图2为位于东南部的新县站1月31日15:00—2月1日21:00逐小时降水演变,可见新县站降水几乎持续了29 h,期间仅有2月1日05:00—06:00未观测到降水,此外在2月1日09:00—19:00降水明显增强,其他时段小时降水量为1 mm或以下。并且该站降水在1日夜间出现短暂间歇后,于2日08:00再次出现持续雨雪天气。综上,本次雨雪过程持续时间长达5 d,期间单日至少有68.3%的国家气象站出现降水,尤其河南东南部连续出现降水时间近29 h。

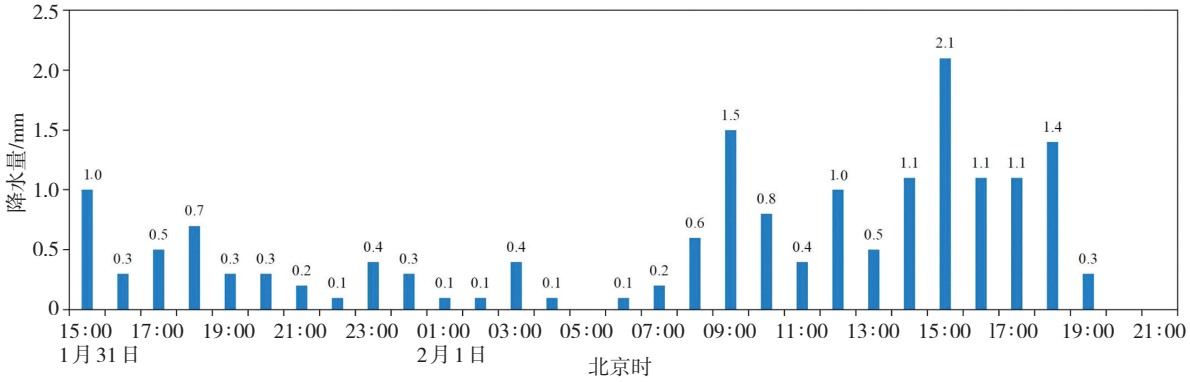


图2 2024年1月31日15:00—2月1日22:00新县站逐小时降水量变化

Fig. 2 Hourly precipitation of Xin County from 15:00 BT on January 31 to 22:00 BT on February 1, 2024

3 环流形势分析

3.1 大尺度环流及距平

图3a给出2024年1月31日08:00—2月5日08:00亚欧上空500 hPa平均高度场及其距平场。由高度场可见,亚欧上空为“两槽一脊”的形势,中国大陆上空气流较平直,多短波东移不断影响黄淮到长江流域,588 dagpm线西伸点位于(120°E, 15°N)附近;距平场显示,东海经华北到贝加尔湖北部为大范围中心强度达15 dagpm以上的正距平区,新疆、青海到西藏为3~7 dagpm负距平区,中国大陆处在东高西低稳定的大尺度环流中,为雨雪天气的持续提供了有利的背景场。图3b为过程期间平均海平面气压场及其距平场,可见在贝加尔湖东南部到东北地区西部有1 037.5 hPa高压中心,冷中心附近及其东侧正距平达10~15 hPa,冷空气由东北经华北、黄淮南下到长江流域,锋区位于河套到长江流域,强盛而持久的冷空气不仅起到动力抬升作用,也为雨雪冰冻天气提供了持续降温条件。高空及地面大尺度环流系统的稳定维持是本次过程发生发展的主要原因之一。

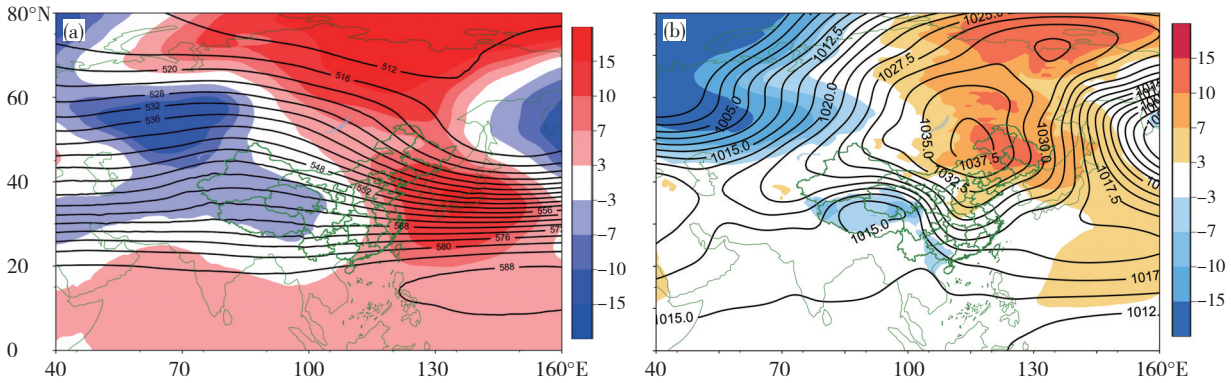


图3 2024年1月31日08:00—2月5日08:00 500 hPa平均高度场(等值线, 单位: dagpm)及距平场(填色, 单位: dagpm)(a)、平均海平面气压场(等值线,单位: hPa)及距平场(填色, 单位: hPa) (b)

Fig. 3 The distribution of (a) average altitude field (contour line, unit: dagpm) and anomaly field (color-filled, unit: dagpm), (b) mean sea level pressure field (contour line, unit: hPa) and anomaly field (color-filled, unit: hPa) from 08:00 BT on January 31 to 08:00 BT on February 5, 2024

3.2 700 hPa平均经向风及距平

图4a给出了2024年1月31日08∶00—2月5日08∶00 700 hPa平均经向(v)风及距平场，可见平均v风大值中心位于贵州到湖南一带，中心值为8~10 m·s^{-1}，河南中南部为2~6 m·s^{-1}；由距平场可见，中国中东部为大范围5~7 m·s^{-1}正距平区，局地超7 m·s^{-1}，河南大部为3~5 m·s^{-1}正距平区，东南部达5~7 m·s^{-1}。低空异常强盛的偏南气流长久维持，且沿着近地层东北风急流缓慢爬升不断向北发展，形成了河南冬季降水的典型高低空配置“天南地北”型。为进一步揭示偏南风在本次雨雪冰冻过程中的作用，选取降水最强时刻2月2日14∶00 700 hPa v风及距平(图4b)，可见12 m·s^{-1}的v风大值中心位于湖南西部，河南大部4~10 m·s^{-1}；7 m·s^{-1}以上的正距平区覆盖我国中东部和南部大部区域，中心强度超10 m·s^{-1}。

异常强盛的低空偏南气流输送水汽的同时也增强了不稳定层结。图4c给出过程期间平均水汽通量及水汽通量散度，可见水汽由孟加拉湾向东北方向输送到河南南部，黄河以南有明显水汽辐合，强中心位于湖北东部到河南东南部。强的水汽辐合和质量辐合为本次雨雪天气提供了充足的水汽和动量条件。图4d为过程期间湿位涡的水平分量，即湿斜压项(MPV2)，当大气存在条件对称不稳定时MPV2<0，且绝对值越大说明风的垂直切变和大气斜压性越强(马梁臣等，2023)，可见过程期间河南始终处于MPV2<0的区域内，且西部、北部最低值达到−0.8~−0.6 PVU，表明700 hPa存在条件对称不稳定及较强大气斜压性，可产生倾斜对流，为雨雪天气发生发展提供了有利的动力条件。

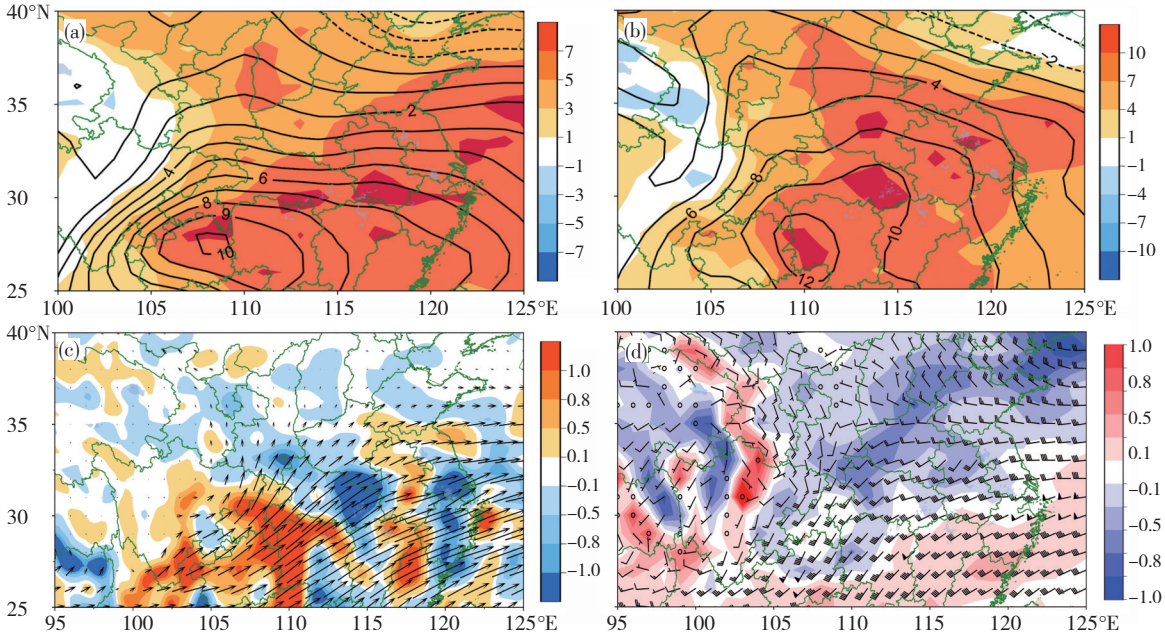


图4 2024年1月31日08∶00—2月5日08∶00 (a，c，d)和2月2日14∶00 (b) 700 hPa平均经向(v)风(等值线，单位：m·s^{-1})及距平场(填色，单位：m·s^{-1}) (a)、平均水汽通量(风矢)和水汽通量散度(填色，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) (c)、湿斜压项(MPV2)(填色，单位：PVU)及水平风(风羽) (d)

Fig. 4 The distribution of (a) 700 hPa average meridional wind (v) (contour line, unit: m·s^{-1}) and anomaly field (color-filled, unit: m·s^{-1}), (c) water vapor flux (wind vector) and water vapor flux divergence (color-filled, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), (d) MPV2 (color-filled, unit: PVU) and horizontal wind (barb) from 08∶00 BT on January 31 to 08∶00 BT on February 5, 2024, and (b) 700 hPa average V wind (contour line, unit: m·s^{-1}) and anomaly field (color-filled, unit: m·s^{-1}) on 14∶00 BT on February 2, 2024

3.3 代表站及850 hPa温度演变

上述分析可知，本次过程还伴随着强烈的降温，尤其最高气温全省大部连续4 d维持在0 °C以下，多站最高气温达到或刷新2月上旬历史同期最小值。图5a为1月29日—2月7日焦作、郑州、三门峡、南阳、商丘和信阳这六个代表站日最高气温和郑州、南阳两个探空站逐日08∶00 850 hPa温度演变，过程前河南日最高气温为8~13.8 °C；31日过程开始后日最高气温快速下降；2月1日大部站点日最高气温接近或低于0 °C；2日降至最低点，大部站点日最高气温为−3~−4.6 °C，降幅达12.6~16.9 °C；3—4日日最高气温略有回升，但依然低于0 °C；5日降水结束后，大部站点日最高气温回升至0 °C以上。此外，由郑州和南阳两站探空可知，29日08∶00起850 hPa温度逐渐下降，31日白天开始快速下降，至3日08∶00两站均降至最低点，两站分别由1月29日08∶00的0.2 °C和1 °C降至3日08∶00的−10 °C和−11 °C，降幅达10~12 °C。持续低温及雨雪天气造成了严重的冰冻灾害。

由图5b可知，过程期间850 hPa平均温度0 ℃线南压至贵州北部、湖南北部到安徽中部一线，河南处在−8~−2 ℃；距平场显示，华南到东部沿海为正距平，华北南部经河南到西北地区东部为负距平区，河南大部处在−5~−3 ℃。由此可见，本次过程高空温度非常低，明显低于多年平均值。

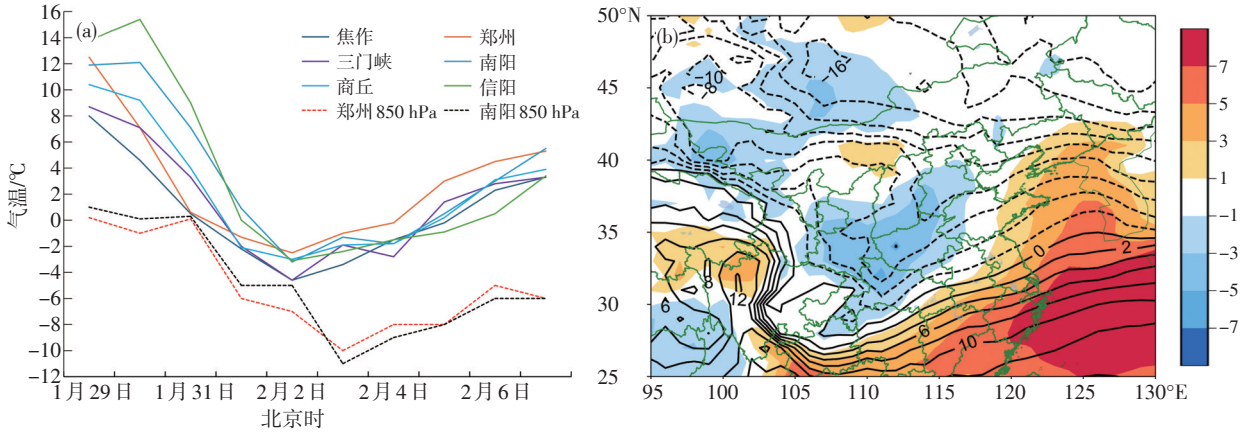


图5 2024年1月29日—2月7日河南6个代表站日最高气温和郑州、南阳两探空站逐日08:00 850 hPa温度演变(a)、2024年1月31日08:00—2月5日08:00 850 hPa平均温度(等值线，单位：℃)及距平场(填色，单位：℃)(b)

Fig. 5 (a) The evolution of the daily maximum temperature of the six representative stations and the daily temperature at 850 hPa in Zhengzhou and Nanyang sounding stations at 08:00 BT from January 29 to February 7, 2024, and (b) the distribution of average temperature (contour line, unit: ℃) and anomaly field (color-filled, unit: ℃) at 850 hPa from January 31 to February 5, 2024

4 降水相态诊断分析

4.1 中低层温度特征

本次雨雪冰冻过程还伴有复杂的降水相态演变，1月31日白天，河南中北部出现了雨、雨夹雪、冰粒或纯雪等多种降水相态，入夜后随着温度下降，中北部逐渐转为纯雪，但东南部直到2月2日夜间依然存在不同降水相态的反复转换。降水相态的演变与中低层大气温度关系密切(董伟，2019)，因此对中低层大气温度与降水相态进行对比分析，可获得不同层结温度与相态演变的关联性。图6为1月31日08:00—2月1日20:00 700 hPa、850 hPa和925 hPa 0 ℃等温线演变，可见1月31日08:00，700 hPa 0 ℃等温线已南压到长江流域，850 hPa和925 hPa 0 ℃等温线位于沿黄河一带；至31日20:00，700 hPa 0 ℃等温线稳定维持在长江流域；随着冷空气南下，850 hPa和925 hPa 0 ℃等温线南压到淮河一带。综上，31日白天850 hPa及以下大气温度处于由高于0 ℃向低于0 ℃转换的过渡期，既由融化层向冻结层转换，因此31日白天黄淮之间出现了多种相态交织的情况；入夜以后，850 hPa和925 hPa 0 ℃等温线继续南压，至2月1日20:00，850 hPa 0 ℃等温线位于江淮一带，925 hPa 0 ℃等温线位于长江以南地区，此时河南上空特性层的温度均低于0 ℃，且维持到降水结束

4.2 单站要素与降水相态

由上述分析可知，2月1日夜间以后特性层温度均

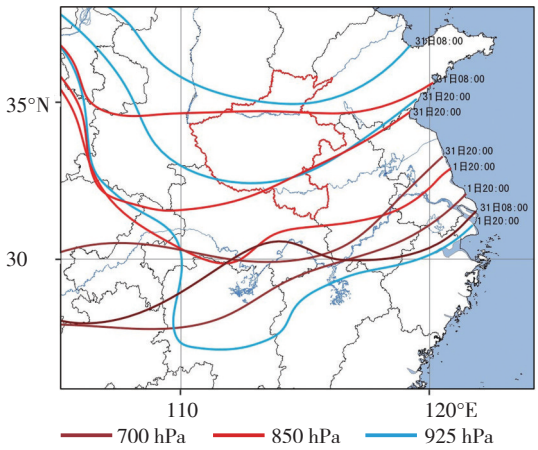


图6 2024年1月31日08:00—2月1日20:00 700 hPa、850 hPa和925 hPa各层0 ℃等温线(红色折线闭合区为河南省)

Fig. 6 The 0 ℃ isotherm at 700 hPa, 850 hPa, and 925 hPa from (a) 08:00 BT on January 31 to 20:00 BT on February 1, and (b) 08:00 BT to 20:00 BT on February 2, 2024 (The red box represents Henan Province)

低于0 ℃，据以往的气象预报经验考虑降水相态应为纯雪，然而2日白天到夜里，位于河南东南部的信阳站依然出现了多种降水相态的反复转换。为研究降水相态转换与层结温度的关系，利用ERA5再分析资料，给出了信阳站逐小时降水量、降水相态与中低层大气温度时序图(图7)，可见2日08:00—14:00，775 hPa接近0 ℃，750 hPa略低于0 ℃，此阶段信阳降水相态为雪。2日15:00—3日05:00，775 hPa和750 hPa高于或接近0 ℃，该阶段信阳站出现了雨、雨夹雪和雪的降水相态相互转换。3日06:00以后整层温度均低于0 ℃，相态转为纯雪并一直维持到降水结束。上述诊断分

析表明，由于大气是一个连续介质，使用单一特性层温度来判识降水相态依据不足，当整层大气温度均低于0 ℃时降水相态为纯雪，若中间存在温度高于0 ℃的融化层时，将出现混合型降水相态。

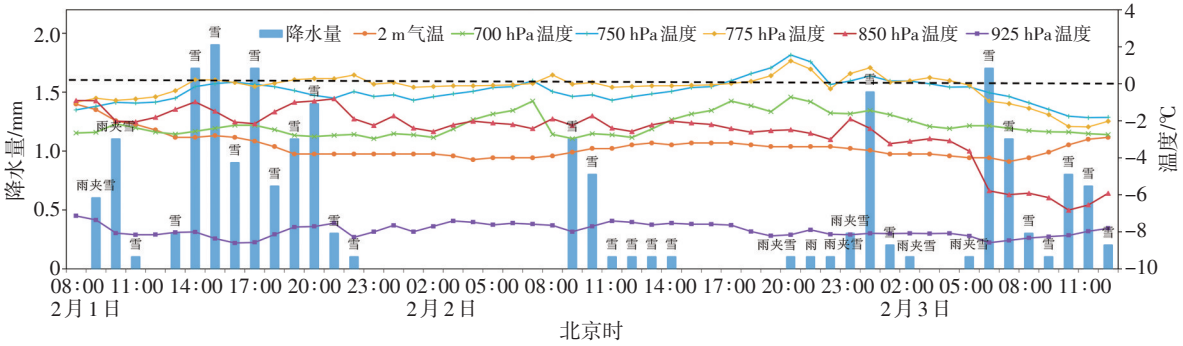


图7 2024年2月1日08:00—2月3日12:00信阳站逐时降水量、降水相态与中低层大气温度时序图

Fig. 7 Time series diagram of hourly precipitation, precipitation phase, and temperature of the mid-low atmosphere from 08:00 BT February 1 to 12:00 BT February 3, 2024 at Xinyang Station

为进一步验证不同降水相态与层结温度的关系，选取距河南东南部较近、同样降水相态复杂且有探空数据的阜阳站为研究对象，由2日20:00阜阳站探空(图8)可见，850—700 hPa之间存在较弱的融化层，此时阜阳站为雨夹雪。为更深入了解逆温层具体高度及厚度，表3为2日20:00阜阳站各层的探空数据，可见805—728.1 hPa为温度高于0 ℃的融化层，其厚度为815 m，其他层次为低于0 ℃的冻结层。一般以温度露点差小于2 ℃作为云顶高度(荆浩，2022)，由表3可见，温度露点差2.1 ℃对应温度-11.3 ℃，说明云顶温度略低于-10 ℃，大部分云体处于-10~0 ℃，由过冷却水滴组成，不利纯雪的出现；只有当云体温度处在-20~-10 ℃才有利冰晶的增长(朱乾根等，2007)，与此时雨夹雪的降水相态相符合。综上，阜阳站在780 hPa附近存在高于0 ℃的融化层且云体由过冷却水滴组成，不利于纯雪的出现，因此降水相态为雨夹雪。

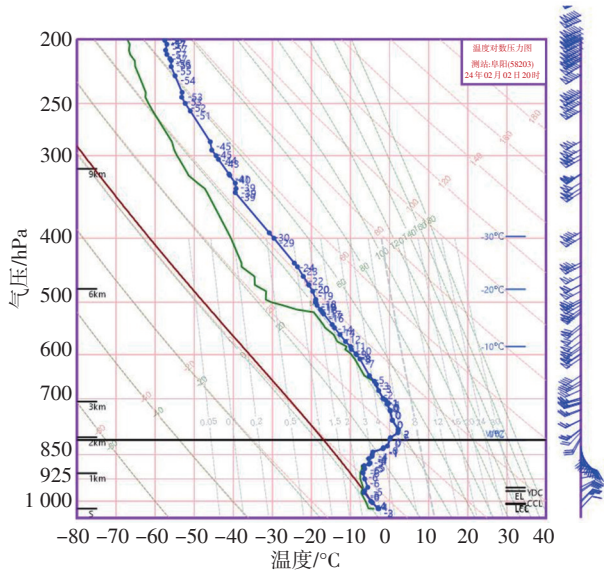


图8 2024年2月2日20:00阜阳站探空图

Fig. 8 The atmospheric sounding over Fuyang station at 20:00 BT on February 2, 2024

表3 2024年2月2日20:00阜阳站探空各等压面对应的气象要素

Table 3 Meteorological elements of various levels of the atmospheric sounding over Fuyang station at 20:00 BT on February 2, 2024

等压面/hPa	高度/m	温度/℃	温度露点差/℃	相对湿度/%
1 000	240	-4.8	1.4	89
925	851	-6.4	1.1	91
850	1 513	-4.5	0.2	98
805	1 953	0.1	0	100
780	2 211	2.2	0	100
728.1	2 768	-0.1	1	99
712.5	2 935	-0.7	0	100
700	3 070	-1.6	0	100
583.3	4 515	-10	1.0	91
573.2	4 656	-11.3	2.1	83
500	5 669	-18.9	1.3	32
400	7 301	-29.6	11	30

4.3 雷达监测特征

由2月1日09:00信阳双偏振雷达相关系数产品(图9a)可见，在距离信阳25 km内、0.9—2.8 km高度处，相关系数在0.89~0.94，同时差分反射率大于1 dB(图9b)，说明此处为融化层，降水粒子形状不规则为冰水混合物，与此时信阳雨夹雪对应较好(图7)，回波强度为30~40 dBz (图9c)。至13:42信阳转为纯雪，其相关系数接近1 (图9d)，同时差分反射率处在-1~0 dB(图9e)，表明此时降水粒子较均一，符合纯雪特征，信阳附近及其东北部50 km内带状回波强度达35~45 dBz(图9f)，此时信阳降雪增强(图7)。选取位于信阳东东北方向、距离信阳约50~65 km的罗山和息县2个观测站不同降水相态时雷达产品进行对比分析，由2日22:30

相关系数(图9g)及差分反射率(图9h)产品可见,距信阳45~65 km、3 km以下相关系数小于0.98、差分反射率大于1 dB,同样说明降水粒子不规则,回波强度较弱只有20 dBz左右(图9i)。至23∶18罗山、息县均转为纯雪,雷达相关系数(图9j)和差分反射率(图9k)与信阳站转为纯雪时有相似的特征,即相关系数接近1、差分反射率处于-1~0 dB,此时回波强度增加到35~45 dBz(图9l),罗山2日23∶00—3日00∶00 1 h降雪达3 mm。由此可见,双偏振雷达的相关系数和差分反射率产品对于区分雨夹雪和纯雪有较好的指示意义。

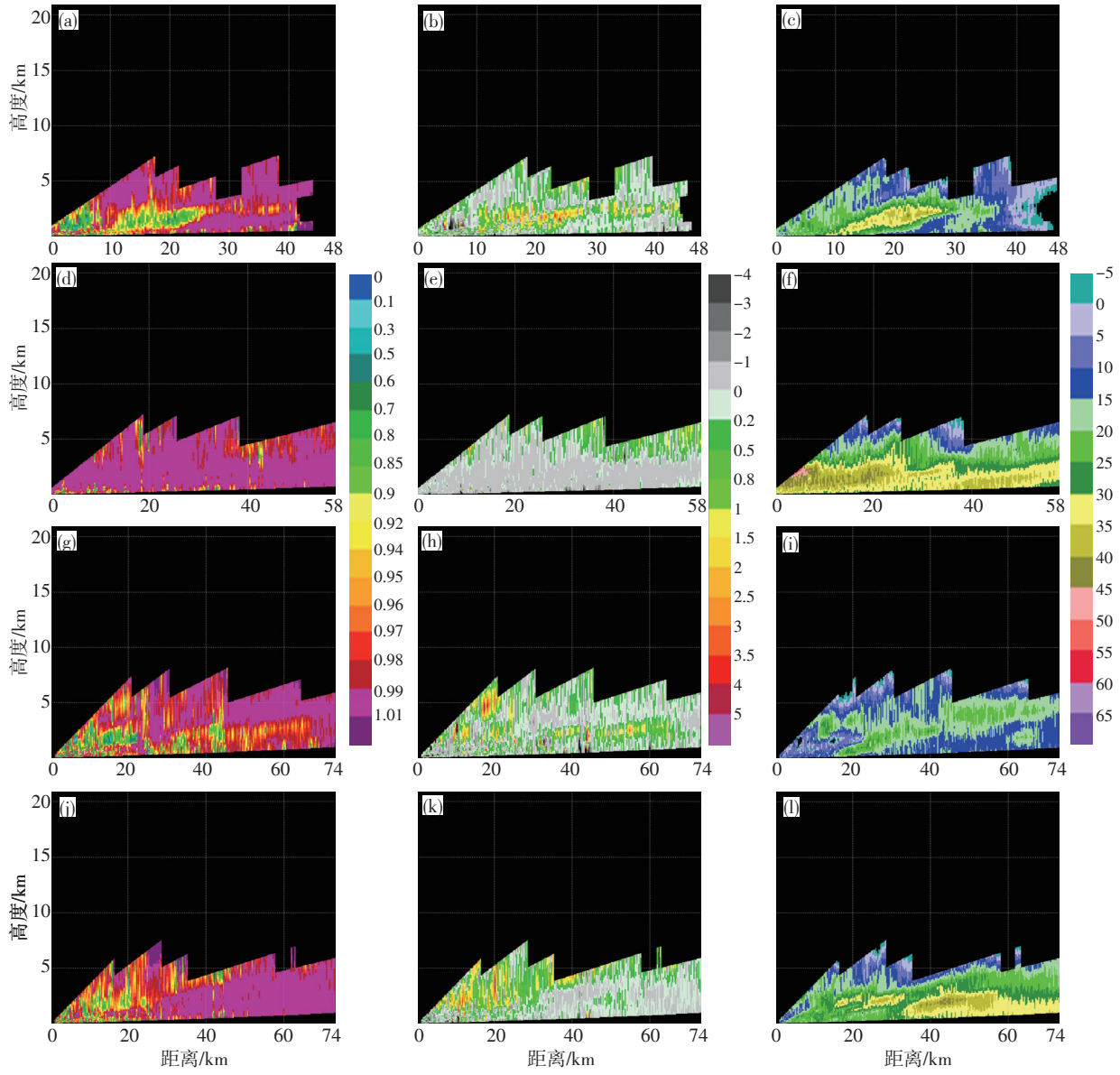


图9 2024年2月1日09∶00 (a—c)、13∶42 (d—f)、2日22∶30 (g—i)、23∶18 (j—l)信阳双偏振雷达相关系数(a,d,g,j)、差分反射率(单位∶dB)(b,e,h,k)、反射率因子(单位∶dBz)(c,f,i,l)剖面

Fig. 9 The profiles of (a, d, g, j) correlation coefficient, (b, e, h, k) differential reflectivity (unit: dB), and (c, f, i, l) reflectivity factor (unit: dBz) from Xinyang dual-polarization radar at (a–c) 9∶00 BT (d–f) 13∶42 BT on February 1, (g–i) 22∶30 BT, (j–l) 23∶18 BT on February 2, 2024

5 结论与讨论

本文利用国家气象站观测资料、双偏振雷达资料和ERA5再分析资料,对2024年2月初发生在河南的雨雪冰冻过程的极端性特征及相态演变、雨雪冰冻成因进行了诊断分析,得到主要结论如下∶

(1) 本次雨雪冰冻过程持续时间长、累积雨雪量大、积雪深、温度低、降水相态复杂。雨雪过程自1月31日08∶00开始,至2月5日08∶00结束,持续长达5 d,且单日至少有68.3%的国家气象观测站出现降水,新县站雨雪持续时长近29 h;国家气象站中,有1站最大积雪深度突破历史极值、4站达到或突破2月历史同期极值;12站最高气温达到或刷新2月上旬历史同期最小值。

(2) 高空及地面大尺度环流系统的稳定维持是产

生本次雨雪冰冻天气的主要原因之一，强盛而持久的冷空气不仅起到动力抬升作用，也为雨雪冰冻天气提供了持续降温条件。异常强盛的低空偏南气流长久维持，提供了充足的水汽及不稳定条件，且沿着近地层东北风急流缓慢爬升不断向北发展，形成了河南冬季降水的典型高低空配置“天南地北”型。

(3) 过程期间850 hPa平均温度距平场显示，河南处在-5~-3 ℃负距平区，明显低于多年平均值。当云顶温度略低于-10 ℃，大部分云体处于-10~0 ℃，由过冷却水滴组成，不利纯雪的出现；当整层大气温度均低于0 ℃时降水相态为纯雪。由于大气是一个连续介质，使用单一特性层温度来判识降水相态依据不足，应根据整层大气层结温度来预判可能出现的降水相态。

(4) 双偏振雷达的相关系数和差分反射率产品对于区分雨夹雪和纯雪有较好的指示意义，当相关系数接近1、差分反射率介于-1~0 dB时，表明此时降水粒子较均一，对应纯雪天气；当相关系数小于1、差分反射率大于1 dB时，对应雨夹雪特征。

本文从大尺度环流及距平场、层结温度及双偏振雷达特征等方面，研究了河南省本次雨雪冰冻成因，统计了中低层温度与不同降水相态的对应关系，分析了不同降水相态的雷达双偏振特征，对区分纯雪和雨夹雪具有重要意义。需要指出的是，本文仅统计了单站温度层结及特性层温度演变与不同降水相态的对应关系，对降水相态与云顶温度、0 ℃层高度、逆温层强度及厚度等气象要素的统计关系还有待深入探究。

参考文献(References)：

丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等.2008.中国南方2008年1月罕见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

董伟,杨光武,马梁臣,等.2019.长春市冬季降水相态的温度判据研究[J].干旱气象,37(3):363-369. Dong W, Yang G W, Ma L C, et al. 2019. Discrimination of winter precipitation types based on temperature in Changchun city [J]. Journal of Arid Meteorology,37(3):363-369 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-03-0363

杜小玲,高守亭,彭芳.2014. 2011年初贵州持续雨雪冰冻天气成因研究[J].大气科学,38(1):61-72. Du X L, Gao S T, Peng F, et al. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(1):61-72 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12119

高辉,陈丽娟,贾小龙,等.2008. 2008年1月我国大范围雨雪冰冻灾害分析Ⅱ成因分析[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: Ⅱ. Possible climatic causes [J]. Meteorological Monthly,34(4):101-106 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.013

顾雷,魏科,黄荣辉.2008. 2008年1月我国严重雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系[J].气候与环境研究,13(4):405-418. Gu L, Wei K, Huang R H. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of east Asian monsoon system [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):405-418 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.06

黄小燕,王小平,王劲松,等.2016. 1960—2013年中国沿海极端气温事件变化特征[J].地理科学,36(4):612-620. Huang X Y, Wang X P, Wang J S, et al. 2016. Variation of extreme temperature events in coastal region of China in 1960—2013 [J]. Scientia Geographica Sinica,36(4):612-620 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs.2016.04.016

江漫,于甜甜,钱维宏.2014.我国南方冬季雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析[J].大气科学,38(4):813-824. Jiang M, Yu T T, Qian W H. 2014. Analysis on atmospheric anomalous signals of winter low temperature and snow-ice storms in southern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4):813-824 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13217

荆浩,于波,张琳娜,等.2022.北京及周边地区冬季降水相态的判别指标研究[J].气象,48(6):746-759. Jing H, Yu B, Zhang L N, et al. 2022. Discrimination criteria of winter precipitation types in and around Beijing [J]. Meteorological Monthly,48(6):746-759 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122401

刘红武,李振,陈龙,等.2020.湖南一次罕见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 Provinc [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(2):18-26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.02.003

马梁臣,霍也,王宁,等.2023.两次北上相似路径台风导致的暴雨湿位涡诊断分析[J].气象与环境学报,39(3):1-9. Ma L C, Huo Y, Wang N, et al. 2023. Diagnostic analyses of heavy rainfalls caused by two similar northward- moving typhoons using moist potential vorticity [J]. Journal of Meteorology and Environment, 39(3):1-9 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2023.03.001

毛宇清,李力,姜有山,等.2022.一次春季雨雪天气的降水相态演变特征分析[J].暴雨灾害,41(3):290-297. Mao Y Q, Li L, Jiang Y S, et al. 2022. Analysis on the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in spring [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):290-297 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.005

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

陶诗言,卫捷.2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J].气候与环境研究,13(4):337-349. Tao S Y, Wei J. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):337-349 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01

吴古会,彭芳,崔庭,等.2012. 2011年冬季贵州雨雪冰冻天气的成因分

析[J].气象,38(3):291–299. Wu G H, Peng F, Cui T, et al. 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011 [J]. Meteorological Monthly,38(3):291–299 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.03.005

杨贵名,孔期,毛冬艳,等.2008. 2008年初"雨雪冰冻"灾害天气的持续性原因分析[J].气象学报,66(5):836–849. Yang G M, Kong Q, Mao D Y, et al. 2008. Analysis of the long lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 66(5):836–849 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.076

张俊兰,杨霞,李建刚,等.2018. 2015年12月新疆极端暴雪天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,12(5):1–9. Zhang J L, Yang X, Li J G, et al. 2018. The analysis to the process of extreme blizzard weather in December of 2015 [J]. Desert and Oasis Meteorology,12(5):1–9 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2018.05.001

张韧,洪梅,刘科峰,等.2012. 2007/2008年冬季雨雪冰冻灾害的副热带高压环流背景与变异特征[J].大气科学学报,35(1):1–9. Zhang R, Hong M, Liu K F, et al. 2012. Subtropical high circulation background and its variation characters in a serious cold rain–snow frost disaster in winter of 2007/2008 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,35(1): 1–9 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–7097.2012.01.001

朱乾根,林锦瑞,寿绍文等.2007.天气学原理和方法(第四版) [M].北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. Synoptic principles and methods (The fourth edition) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

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

Chen G X, Wang W C, Cheng C T, et al. 2021. Extreme snow events along the coast of the Northeast United States: potential changes due to global warming [J]. Journal of Climate,34(6):2337–2353. doi:10.1175/JCLI–D–20–0197.1

Fu D X, Ding Y H. 2023. Changes in atmospheric circulation during the winter regional extreme cold events over China since 1960 [J]. Journal of Meteorological Research,37(5):589–603. doi:10.1007/S13351–023–3016–7

Han S Z. 2023. Linkage of the preceding winter mid–latitude Eurasian atmospheric circulation with the spring northern East Asian snow cover [J]. Atmospheric Research,293:106926. doi:10.1016/J.ATMOSRES.2023.106926

He Y L, Wang X X, Zhang B Y, et al. 2023. Contrast responses of strong and weak winter extreme cold events in the Northern Hemisphere to global warming [J]. Climate Dynamics,61(9–10):4533–4550. doi:10.1007/S00382–023–06822–7

Qian Z L, Ma J H, Yin Z C. 2023. Impacts of the SSTs over equatorial central–eastern Pacific and southeastern Indian Ocean on the cold and rainy/snowy/icy weather in Southern China [J]. Journal of Meteorological Research,37(2):248–261. doi:10.1007/S13351–023–2128–4

Yang Y, Gao M, Xie N, et al. 2020. Relating anomalous large–scale atmospheric circulation patterns to temperature and precipitation anomalies in the East Asian monsoon region [J]. Atmospheric Research,232: 104679–104679. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104679

(责任编辑 唐国瑛)