杜小玲,蓝伟,何东坡,等.2024. 2024年2月初贵州东部及长江中下游低温雨雪冰冻天气基本特征及成因[J].暴雨灾害,43(4):395-406.
DU Xiaoling, LAN Wei, HE Dongpo, et al. 2024. Characteristics and causes of low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in eastern Guizhou and the middle and low reaches of the Yangtze River in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4): 395-406 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-100

2024年2月初贵州东部及长江中下游低温雨雪冰冻天气的基本特征及成因

杜小玲[1],蓝伟[2],何东坡[1],陈波[3],卢璐[1]
(1. 贵州省气象台 贵阳 550002;2. 贵州省气象数据中心 贵阳 550002;
3. 贵州省黔西南州气象局 兴义 562499)

摘　要:2024年2月初贵州东部及长江中下游出现低温雨雪冰冻天气,恰逢春运高峰,给春运、能源保供及人民生活造成严重影响。为揭示此次低温雨雪冰冻天气的异常特征,利用国家气象信息中心实况观测资料、美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料以及怀化双偏振雷达资料对此次天气的基本特征和成因进行了分析。结果表明:(1) 2024年春节前贵州东部、湖南中北部、湖北东部南部及安徽西部北部出现4~6 d严重冰冻灾害,冰冻灾害主要由两轮低温雨雪天气造成,首轮低温雨雪出现在2月1—4日,降水相态具有多样性,尤其是3日雨雪最为明显,以强降雪及强冻雨为主,导致积雪和积冰快速增长。第二轮低温雨雪出现在5—6日,贵州东部、湖南中北部以冻雨为主,湖北等长江沿线以雨夹雪和降雪为主,积冰得以维持或继续增长。(2) 亚洲中高纬度位势高度距平呈西低东高分布,且南支槽活跃,为低温雨雪冰冻天气提供了重要天气背景。南支槽前强盛的西南急流沿锋面爬升形成倾斜上升气流,增强了锋后的降水强度,造成第一轮强低温雨雪天气;而后南支槽减弱,但南支锋区仍维持,中低层急流和地面静止锋均维持,造成了第二轮持续低温雨雪天气。(3) 受华南静止锋和云贵静止锋形成及维持的影响,锋后逆温范围宽广,且长江以南地区暖层显著,造成长江南北不同相态的降水。同时长江南北的温湿场在垂直方向上有较大差异,长江以北地区以强降雪为主时,温湿场上表现为深厚的冷湿特征,具有典型的冰相结构;长江以南地区以强冻雨为主时,温湿场上具有"强暖湿-冷湿"特征。(4) 2月3—4日长江南北地区均出现快速跃增的雨水、冰水和雪的混合比,形成了强湿雪和强冻雨;长江以南地区低层过冷水3日夜间以小雨滴和大雨滴方式共存、5日夜间则是由小雨滴构成。

关键词:低温雨雪;冰冻灾害;温湿特征;双偏振雷达;贵州;长江中下游
中图法分类号: P426.6　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-100

Characteristics and causes of low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in eastern Guizhou and the middle and low reaches of the Yangtze River in early February 2024

DU Xiaoling[1], LAN Wei[2], He Dongpo[1], CHEN Bo[3], LU Lu[1]

(1. *Guizhou Provincial Meteorological Observatory, Guiyang* 550002; 2. *Guizhou Meteorological Data Center, Guiyang* 550002;
3. *Meteorological Bureau of Qian Xinan of Guizhou Provincial, Xingyi* 562400)

Abstract: In early February 2024, severe low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather events occurred in the eastern parts of Guizhou and the middle and lower reaches of the Yangtze River. Coinciding with the travel period of the Spring Festival, the event caused serious impacts on travel, energy supply guarantees, and people's daily lives. To reveal the exceptional characteristics of the weather event, observation data from the National Meteorological Information Center, NCEP/NCAR reanalysis data, and Huaihua dual-polarization radar data were used to analyze the characteristics and causes of rainfall/snowfall and freezing weather events. The results are as follows: (1) Severe freezing disasters lasting 4-6 days occurred in eastern Guizhou, northern and central parts of Hunan, eastern and southern parts of Hubei, and northern and western parts of Anhui. These disasters were primarily caused by two rounds of low-temperature rain and snow weather.

收稿日期: 2024-05-22;**定稿日期:**2024-07-16
资助项目: 贵州省气象局创新团队(黔气科合TD[2024] 01号)
第一作者: 杜小玲,主要从事短期天气预报及暴雨、冻雨天气机理研究。E-mail: dxl_jingjing@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

The first round occurred around February 1 to 4, with the most severe period appearing on the 3rd. It was characterized by heavy snowfall and freezing rain, leading to rapid accumulation of snow and ice. The second round occurred from February 5 to 6, with freezing rain predominating in eastern Guizhou and northern and central parts of Hunan, and sleet predominating along the Yangtze River in Hubei and other areas, which sustained or further increased the ice accumulation. (2) The geopotential height anomaly of the mid to high latitudes in Asia showed a distribution of low in the west and high in the east, and the southern trough was active. Both provided important weather conditions for the low-temperature rain and snow weather. The strong southwest jet stream climbs along the front to form a tilted upward airflow, enhancing the precipitation intensity behind the front, and leading to the first round of the weather event. The weakening of the southern trough and the maintenance of the southern front area, the mid-to-low low-level jet, and the surface stationary front resulted in the second round of the weather event. (3) Affected by the formation and maintenance of the South China stationary front and the Yunnan-Guizhou stationary front, the range of inversion was wide, with a significant warm layer in the southern region of the Yangtze River, resulting in different phases of precipitation on the south and north sides of the Yangtze River. Meanwhile, there were significant differences in the vertical direction of the temperature and humidity fields on the north and south sides of the Yangtze River. When heavy snowfall dominated north of the Yangtze River, the temperature and humidity fields exhibited deep cold-wet characteristics, with a typical ice-phrase structure. However, when heavy freezing rain dominated south of the Yangtze River, the temperature and humidity fields exhibited a "strong warm-wet and cold-wet" feature. (4) The rapidly increasing amount of rainwater, ice, and snow formed strong wet snow and severe freezing rain on February 3-4. The low-level supercooled water of both light and heavy rain droplets coexisted in the southern region of the Yangtze River on the night of the 3rd day, while it was dominated by light rain on the night of the 5th day.

Keywords: low-temperature rainfall/snowfall; freezing disaster; temperature and humidity characteristics; dual-polarization radar; Guizhou; the middle and lower reaches of the Yangtze River

引 言

低温雨雪冰冻是我国南方地区冬季重要的灾害性天气，当这类天气持续时间长、影响范围广时，往往会对交通、电力、林业、农业等行业造成严重影响。根据1951—2020年我国南方地区低温雨雪冰冻危险评估(李倩，2023)，贵州省冰冻危险性高于南方各省，其发生频次较多、持续较长，而湖南省呈低频长时特征，湖北、江苏及安徽等省呈高频短时特征。2008年初我国南方地区遭遇大范围强低温雨雪冰冻天气，此后这类天气受到更多关注和研究。研究显示2008年初大气环流异常尤其是中高纬度阻塞环流形势对低温雨雪冰冻天气的维持十分有利(陶诗言等，2008；赵思雄和孙建华，2008)，低温-雨雪-冰冻期间大型斜脊更偏东，位于贝加尔湖附近(宗海锋等，2022)。异常的大气环流还能诱发低层静止锋锋生(陶诗言和卫捷，2008)，华南准静止锋和云贵准静止锋是2008年初造成低温雨雪冰冻天气的重要影响系统，2008年初华南准静止锋的坡度很小，仅为1/500，其结构具有东亚冬季气候锋的基本特征(陶祖钰等，2008)。2008年初江南持续低温雨雪冰冻天气是准静止锋活跃的结果，用相当位温梯度表示的湿大气锋生可有效描述准静止锋的活动及其与降水的关系(钱维宏和付娇兰，2008)。锋面的强逆温层和强暖层有利于冻雨的形成和维持，逆温层是南方大范围冻雨形成和长时间维持的一个必要条件(丁一汇等，2008；杜小玲等，2010，2012)。

近60 a来我国南方地区冰冻日数呈减少趋势，这种趋势与气温升高密切相关(王遵娅，2011)。尽管如此，南方地区仍出现了持续性强低温雨雪冰冻天气(孙晓娟等，2022)。如2011年1月贵州再次遭受长达32 d的低温雨雪冰冻天气，受灾程度仅次于2008年初(杜小玲等，2014)；2018年1月底至2月初贵州出现11 d的低温雨雪冰冻天气(甘文强等，2018)；2018年末和2021年末南方地区出现两次典型的低温雨雪冰冻天气(吕春艳等，2024)。2024年2月1—7日贵州东部及长江中下游地区出现持续低温雨雪冰冻天气，根据国家防灾减灾救灾委员会办公室发布的消息，2月上旬低温雨雪冰冻天气造成湖北、湖南、安徽、贵州等10省(区、市) 402.7万人不同程度受灾、7人死亡，房屋损坏1万间，农作物受灾面积4.234×10^5 hm^2，直接经济损失126.1亿元；同时与春运叠加，对公路高铁保畅、电力保供、群众出行和生产生活带来严重影响，是2009年以来春运期间发生的最严重低温雨雪冰冻天气(张芳华等，2024)。据武汉区域气候中心重大天气气候事件监测报告显示，湖北省有23站电线积冰最大直径突破1981年以来的历史极值。此次低温雨雪冰冻天气造成了严重灾害，且在强冷空气影响下，一些地区出现了强降雪，另一些地区则出现了强冻雨，造成这种差异的原因值得探讨。为此，本文利用国家气象信息中心的降雪、降水及电线积冰等观测资料对此次低温雨雪冰冻天气的实况特征进行统计分析，并应用美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR)再分析资料以及怀化双偏振雷达资料对其环流背景、影响系统以及温度场、湿度场、相关要素开展诊断分析，以期

揭示此次低温雨雪冰冻天气的基本特征及初步原因，为提升此类灾害性天气的预报能力提供参考。

1 资料与方法

使用的资料包括：(1) 2024年2月1—7日(1日指1日08时—2日08时，1—7日指1日08时—8日08时，北京时，下同)国家站(含基准站、基本站和一般站，固定观测时间为08时、14时、20时、02时，加密观测时为3 h一次)降雪量、最大积雪深度、不同相态降水量、电线积冰直径(已减去电线直径)以及国家站和区域站累计降水量等数据。其中降雪量指雨雪期间采用称重式雨量计得到的降水量，是雨、雨夹雪、冰粒、雪等混合性降水的降水量。以上数据及相关统计图表均来源于国家气象信息中心天擎系统，统计时界均为08—08时，用于开展降雪、降水及积冰等实况特征分析；(2) NCEP/NCAR全球逐日再分析资料，包括位势高度场、风场、温度场、海平面气压场等，时间分辨率1 d，空间分辨率2.5°×2.5°，用于分析500 hPa平均位势高度及距平、平均海平面气压场及距平、2 m气温及距平；(3) NCEP FNL格点再分析资料，时间分辨率6 h，空间分辨率1°×1°，用于分析高空和地面的风场、温度场、位势高度、水汽、温度、湿度以及云中雨水、冰水和雪的混合比；(4) 中国气象局气象信息综合处理系统(MICAPS)的高空和地面观测资料，用于分析中尺度环境场和地面锋面动态特征；(5) 怀化市气象局提供的怀化双偏振雷达资料，包括融化层和粒子相态分类产品(HCL)，用于分析融化层高度和粒子相态。

降雪量等级参考国标(GB/T 21984–2017) 24 h降雨量来划分，即：微量降雪/零星小雪(<0.1 mm)、小雪(0.1~2.4 mm)、中雪(2.5~4.9 mm)、大雪(5.0~9.9 mm)、暴雪(10.0~19.9 mm)、大暴雪(20.0~29.9 mm)及特大暴雪(≥30.0 mm)。

2 天气过程概况

2.1 降雪和积雪特征

2024年2月1—7日湖北、安徽、江苏、贵州东部、湖南大部、江西北部及浙江北部出现降雪，湖北孝感、荆州、武汉等地累计降雪量达到50 mm以上，最大累计降雪量出现在湖北孝感汉川(66.1 mm) (图1a)，同期积雪最深的地方集中在湖北潜江–安徽亳州–六安–蚌埠–淮南–湖南常德等地，积雪深度达20 cm以上，最大积雪深度出现在湖北潜江(29 cm，2月6日17时) (图1b)。24 h降雪和积雪深度(图略)显示，降雪于1月31日从苏皖北部开始，2月1—2日在苏皖鄂发展，1日最大降雪量为15 mm (安徽滁州)，2日湖北出现大暴雪，最大降雪量出现在湖北荆州 (26.2 mm)，积雪最深的出现在安徽北部，亳州–淮南–阜阳–滁州–蚌埠等地积雪深度达10~18 cm。3日降雪区域向西向南推进至贵州东部、湖南中北部及江西北部，降雪中心出现在张家界–孝感–荆州–咸宁–仙桃–武汉–九江等地，最大降雪量为34.1 mm (湖南张家界)，积雪最深处与大暴雪区域基本重叠，最大积雪深度为19 cm (安徽亳州蒙城)。4日降雪中心移至苏皖中北部，最大降雪量为15.6 mm (江苏连云港西连岛)，湖北中东部及苏皖中北部均有新增积雪，主要积雪在安徽北部及湖北中部，最大积雪深度为24 cm (安徽亳州蒙城)。5—6日降雪仍在长江中下游沿江一线维持，但强度明显减弱，5日最大降雪量为7.7 mm (江西九江)，最大积雪深度为26 cm (湖北潜江)；6日最大降雪量为9 mm (湖南衡阳南岳)，最大积雪深度为29 cm (湖北潜江)。7日湖南中部和贵州东部仍有少量雨雪，最大降雪量为3.8 mm (湖南邵阳新

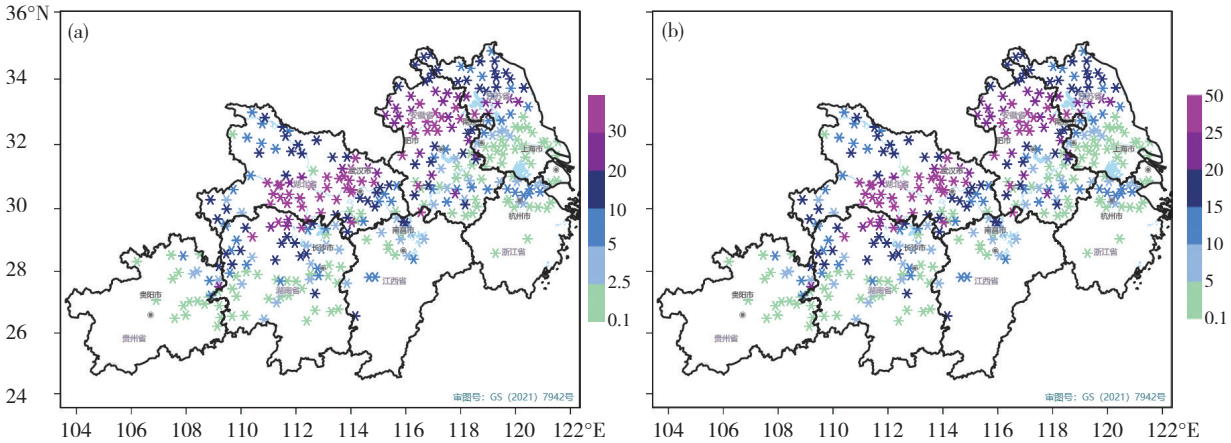


图1 2024年2月1—7日贵州、湖南、湖北、安徽、江苏、江西、浙江及上海七省一市累计降雪量(a,单位: mm)和累计最大积雪深度(b,单位: cm)空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of accumulated (a) snowfall (unit: mm) and (b) snow depth (unit: cm) in Guizhou, Hunan, Hubei, Anhui, Jiangsu, Jiangxi, Zhejiang, and Shanghai provinces and cities during February 1–7, 2024

宁),最大积雪仍在湖北潜江,但积雪深度减弱为23 cm。8日贵州及长江中下游各省降雪停止,而湖南北部、湖北中部和安徽北部的积雪直到10日后才结束。

综上,强降雪集中在湖南北部–湖北大部–安徽西部北部及江苏北部,其中2月1日、4日出现暴雪,2日出现大暴雪,3日出现特大暴雪,是降雪最强阶段。5—7日降雪强度明显减弱,但湖北等地积雪深度有新的增长,8日降雪过程结束。

2.2 降水相态及电线积冰特征

图2a给出2月1—7日不同降水相态累计降水量空间分布,同期贵州东部–湖南大部–湖北东部–安徽西部北部出现大范围冻雨,并观测到电线积冰(图2b)。积冰重灾区集中在湖南中北部和湖北东部,除了湖南湘西花垣站和衡阳南岳站分别观测到243 mm和139 mm积冰直径外,湖南中北部和湖北东部积冰直径达10~44 mm,安庆–长沙–池州九华山–衡阳衡山–武汉–荆州及岳阳洞庭湖等地积冰直径均在20 mm以上。从雨凇累计时长(图略)来看,贵州东部–湖南中北部–湖北东部和安徽沿江一带累计出现雨凇达72 h以上。

从每日不同相态降水和电线积冰(图略)分析可知,2月1日湖南北部–湖北中部–安徽北部出现雨夹雪和冻雨,并观测到积冰;2日湖南中北部–湖北中东部–安徽西部北部出现5~10 mm冻雨,并产生5~16 mm积冰,最大积冰直径为23 mm (安徽安庆天柱山);3日贵州东部–湖南中北部–湖北东部出现25~50 mm冻雨和雨夹雪,积冰加重,除湖南花垣记录到243 mm积冰外,南岳观测到44 mm积冰,武汉–荆州–岳阳–益阳–安庆–贵州万山积冰增至10~37 mm;4日湖南南岳积冰增至56 mm,咸宁和安庆积冰为36~39 mm;5—6日贵州东部–湖南中北部及湖北东南部再度出现2~20 mm冻雨和雨夹雪,局部超过20 mm,安庆和咸宁积冰增至40~43 mm,而长沙至武汉一带积冰增至15~30 mm;7日雨雪强度减弱、范围减少,湖北积冰减弱;8日积冰范围已经明显缩小,9—10日除南岳山仍有积冰外,其他地区积冰消失。

综上,2月1—2日冻雨增强,积冰增加;3日贵州东部–湖南中北部–湖北中东部–安徽西部北部出现大范围强冻雨,积冰范围和强度快速增加;5—6日受冻雨和雨夹雪影响,贵州东部–湖南中北部及湖北东南部积冰加重,积冰重灾区集中在湖南中北部–湖北东南部。

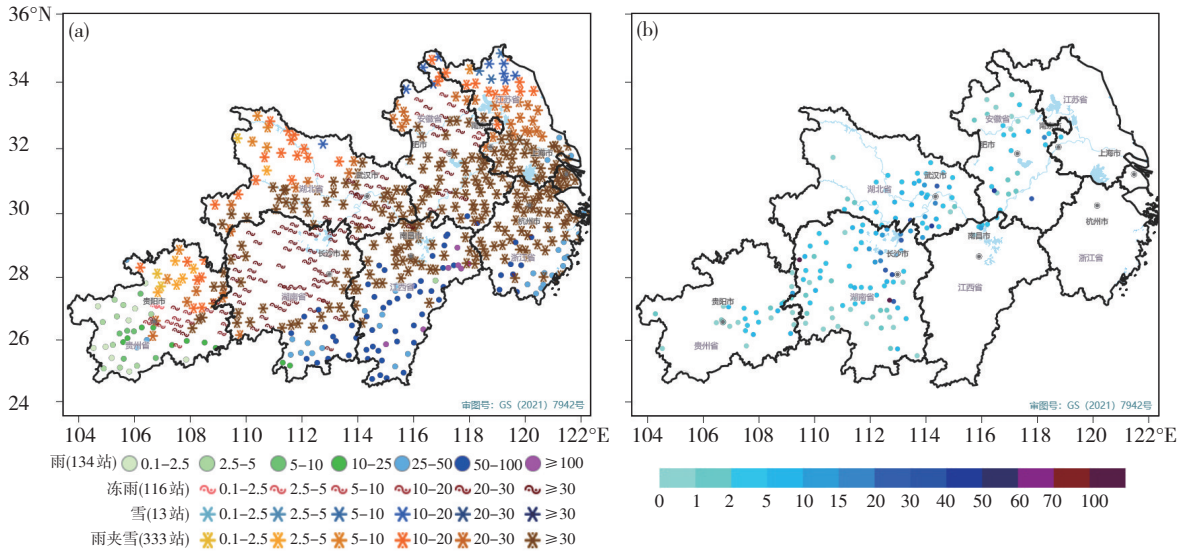


图2 2024年2月1—7日贵州、湖南、湖北、安徽、江苏、江西、浙江及上海七省一市不同降水相态累计降水量(a,单位: mm)和累计电线积冰直径(b,单位: cm)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of accumulated (a) precipitation (unit: mm) of different precipitation phases and (b) wire icing diameter (unit: cm) in Guizhou, Hunan, Hubei, Anhui, Jiangsu, Jiangxi, Zhejiang, and Shanghai provinces and cities during February 1–7, 2024

2.3 降水和气温特征

2月1—7日贵州东部及长江中下游降水呈南多北少的分布特征,长江以南地区累计降水普遍在25 mm以上,江西、浙江、湖南东南部、湖北东南部、安徽南部和江苏南部达50 mm以上,在浙皖赣三省之间最大累计降水超过150 mm (图3a)。分析逐日降水(图略)可知,1—7日贵州及长中下游地区降水频繁,其中1—2日贵州东部及长江中下游地区出现降水,长江中下游出现中到大雨;3日雨带向西向南推进,七省一市均出现降水,贵州东南部、湘中、鄂东、皖南、赣北等地出现大雨,局部暴雨;4日雨带东南移,中雨以上降水移至江南南部;5—6日阴雨天气维持,中雨以上降水出现在长江以南地区;7日降水减弱,多地降水仅为微量或小雨量级;8日降水停止,雨雪天气结束。

2月1—7日上述大部地区平均气温处于–2~4 ℃之间,0 ℃等温线位于贵州东北部–湖南中北部–湖北

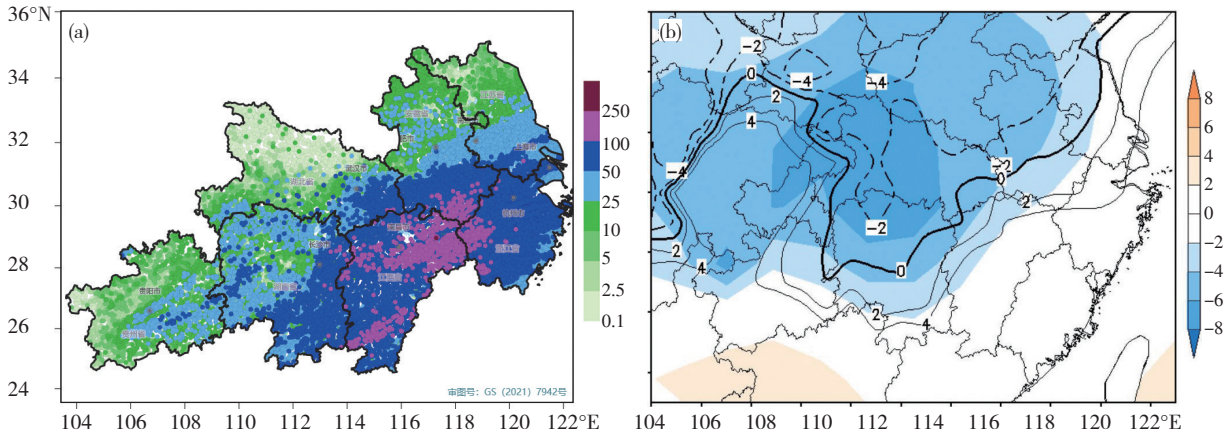


图3 2024年2月1—7日贵州、湖南、湖北、安徽、江苏、江西、浙江及上海七省一市累计降水量(a,单位: mm)以及平均气温(等值线)和距平(阴影) (b,单位: ℃)空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of (a) accumulated precipitation (unit: mm), (b) average temperature (contour) and anomaly (shaded) (unit: ℃) in Guizhou, Hunan, Hubei, Anhui, Jiangsu, Jiangxi, Zhejiang, and Shanghai provinces and cities during February 1–7, 2024

东南部–安徽南部–江苏中部一带。和同期相比，气温偏低2~6 ℃，尤其是湖北中西部–湖南北部偏低6 ℃左右(图3b)。

上述分析表明，2024年2月1—7日贵州东部及长江中下游地区出现了持续低温雨雪冰冻天气。冰冻灾害主要由两轮低温雨雪天气造成，首轮低温雨雪出现在2月1—4日，尤其是3日降水强度最大，雨雪尤为明显，贵州东部、湖南西北部、湖北东部南部、安徽、江苏北部及江西北部普降大雪，局部大暴雪至特大暴雪；贵州东部、湖南中北部、湖北东部南部及安徽西部北部出现强冻雨，使积雪和积冰迅速增加。第二轮低温雨雪出现在5—6日，贵州东部、湖南中北部以冻雨为主，湖北等长江沿线以雨夹雪和降雪为主。两次恶劣天气叠加，导致贵州东部、湖南中北部、湖北东部南部及安徽西部北部出现4~6 d严重的冰冻灾害。

3 环流背景及影响系统

3.1 环流特征

图4a给出2月1—7日平均的500 hPa位势高度场和距平场，分析可知，亚洲中高纬度地区呈两槽一脊型，乌拉尔山附近低槽深厚，且位势高度异常偏低。在中低纬度地区100°E附近南支槽活跃，贵州及长江中下游地区处于南支槽前西南气流影响中。我国的位势高度距平呈西低东高的分布特征，除贵州处于弱的负距平外，长江中下游各省均处于正距平中。新疆至青藏高原为明显的负距平，表明这期间高原槽异常活跃。分析逐日高空形势(图略)发现，2月1—2日乌拉尔山附近极涡异常强大，其南侧分裂的低槽从80°E进入青藏高原后与南支槽结合发展，在高原地区(80°—100°E)活动。3日低槽在越过青藏高原进入

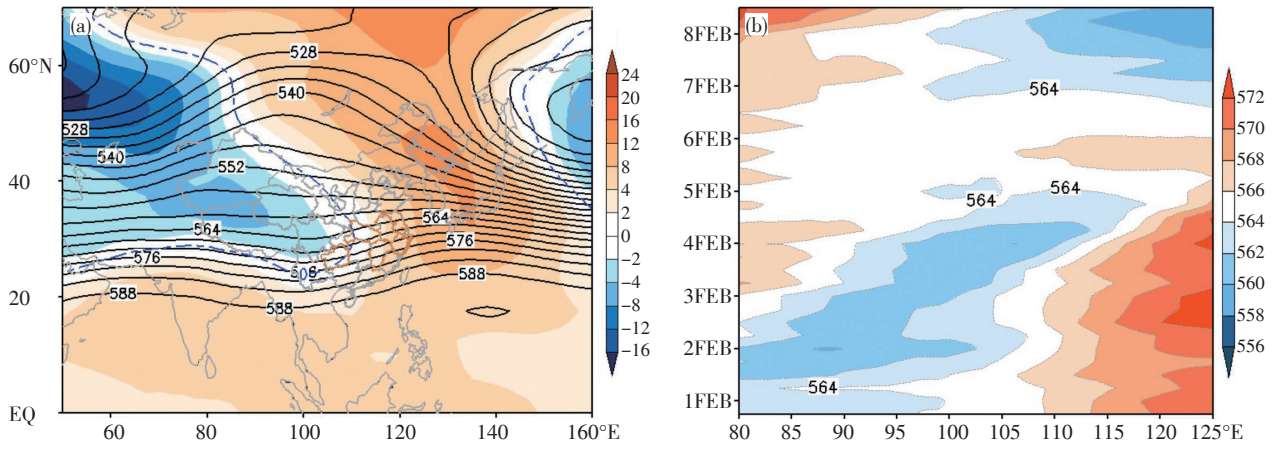


图4 2024年2月1—7日平均的500 hPa位势高度场(等值线)及距平场(阴影) (a)、20°—40°N之间平均的500 hPa位势高度经度–时间剖面(b) (单位: dagpm)

Fig. 4 The (a) average geopotential height (contour) and anomaly (shaded), and (b) longitude–time cross–section of the average geopotential height along 20°–40°N during February 1–7, 2024 (unit: dagpm)

100°E后进一步发展加深，3—4日夜间低槽从100°E移至110°E，自西向东影响贵州及长江中下游各省市(图4b)，造成大范围雨雪天气。5—7日乌拉尔山附近极涡减弱北缩，但其前期分裂进入我国的低槽在影响华北地区的过程中引导冷空气持续南下，与南支暖湿气流在长江中下游交汇造成持续的阴雨天气。

3.2 地面冷空气特征

2024年2月1—7日地面冷空气活动频繁，冷空气主体偏东(图5a)。冷高压中心在蒙古国维持，中心平均强度超过1 040 hPa，我国中东部地区受冷气团控制。从华北至华中地区等压线呈南北向，表明冷空气南下的势力强劲；等压线在华南和西南东部形成密集区，表明冷空气在这些地区堆积，进而形成锋区。和同期相比，海平面气压场上形成了北正南负的分布特征。贵州东北部及长江中下游地区处于0~2 hPa的正距平中，表明上述地区冷空气较同期偏强。进一步分析锋面动态(图5b)可知，2月1日冷空气南下越过长江以南，到达贵州中部至江南南部；2日冷锋进入华南北部，3—4日冷锋在华南北部至贵州西南部稳定少动形成静止锋；5日受南下冷空气补充影响，锋面移至华南南部；6—7日冷空气在华南入海后，锋面西段在贵州西部和云南东部维持静止锋。综上，1—7日贵州东部及长江中下游地区处于锋后强冷空气控制下，低温雨雪冰冻天气与华南静止锋和云贵静止锋的建立及维持密切相关。

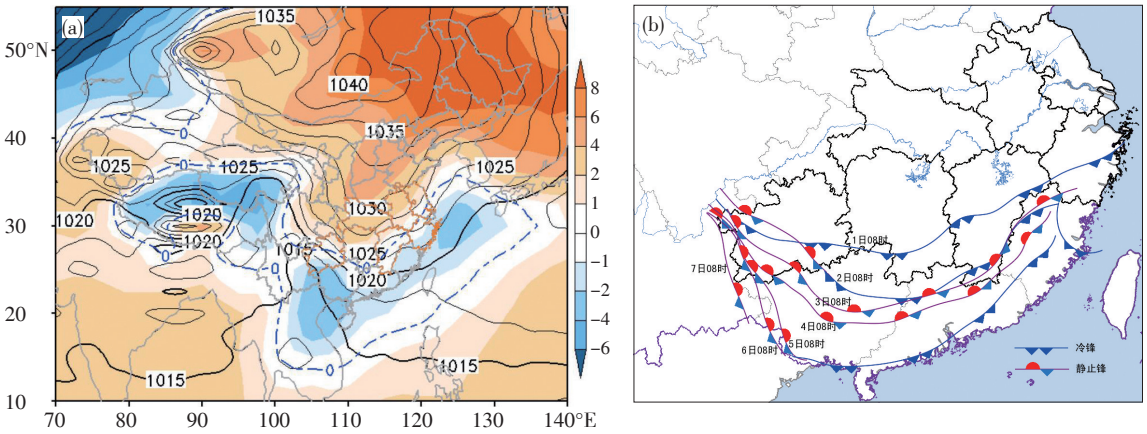


图5 2024年2月1—7日平均的海平面气压场(等值线)和距平场(填色) (a,单位: hPa)以及锋面动态(b)

Fig. 5 The (a) average sea level pressure field (contour) and anomaly field (shaded) (unit: hPa) and (b) frontal dynamics during February 1–7, 2024

3.3 风场、温度场及环境场特征

为了解2月1—7日高空和地面的风场、温度场特征，将各层的风场和温度场进行平均处理，得到各层的平均风场和温度场。分析可知，500 hPa中低纬度南支锋区显著，在20°—30°N之间存在一支平均风速为20 m·s^{-1}以上的西南风急流，最大风速达36 m·s^{-1}以上，贵州及长江中下游地区处于急流轴的左侧(图6a)；700 hPa上我国南方地区存在宽广的12 m·s^{-1}以上的西南风急流，贵州和湖南上空有20 m·s^{-1}以上的风速中心，同时温度场0 ℃等温线位于贵州北部–湖南北部–江西北部–浙江北部一线(图6b)；850 hPa上华南至江南南部为偏南气流，切变线位于长江下游–湖南中部–贵州西部南部一线，同时0 ℃等温线到达贵州东北部–湖南北部，西南地区东部至江南南部一带有温度密集带(图6c)；地面上我国中东部地区均为偏北风，地面0 ℃等温线到达湖南北部，且西南地区东部至江南南部、华南北部存在等温线密集带(图6d)。进一步分析3日20时的环境场(图6e)可知，高空槽和南支槽到达100°E附近，贵州及长江中下游省市处于槽前强盛的中低空(500 hPa和700 hPa)西南风急流区，急流沿着锋面爬升，与850 hPa切变线在贵州东南部至长江中下游一线交汇产生强降水。5日20时低槽减弱(图6f)，中低空急流偏西风显著，急流沿锋面斜升，形成稳定的静止锋降水。

综上，亚洲中高纬度位势高度距平呈西低东高分布，这使得北支低槽活跃且深厚，引导强冷空气在我国东部地区积聚且加强；南支槽活跃，槽前强盛的西南急流向长江中下游地区输送异常充沛的水汽。地面强冷空气和中低层强盛的西南急流为低温雨雪冰冻天气提供了重要天气背景。冷空气势力强大，在华南和贵州地区堆积，形成华南静止锋和云贵静止锋，受南支槽东移影响，槽前强盛的西南急流沿锋面爬升形成倾斜上升气流，增强了锋后的降水强度，由此造成第一轮强低温雨雪天气。而后南支槽减弱，但南支锋区仍维持，中低层急流和地面静止锋均维持，造成了第二轮持续低温雨雪天气。

4 温湿特征

4.1 长江南北温湿场特征

此次低温雨雪冰冻天气降水相态具有多样性，长

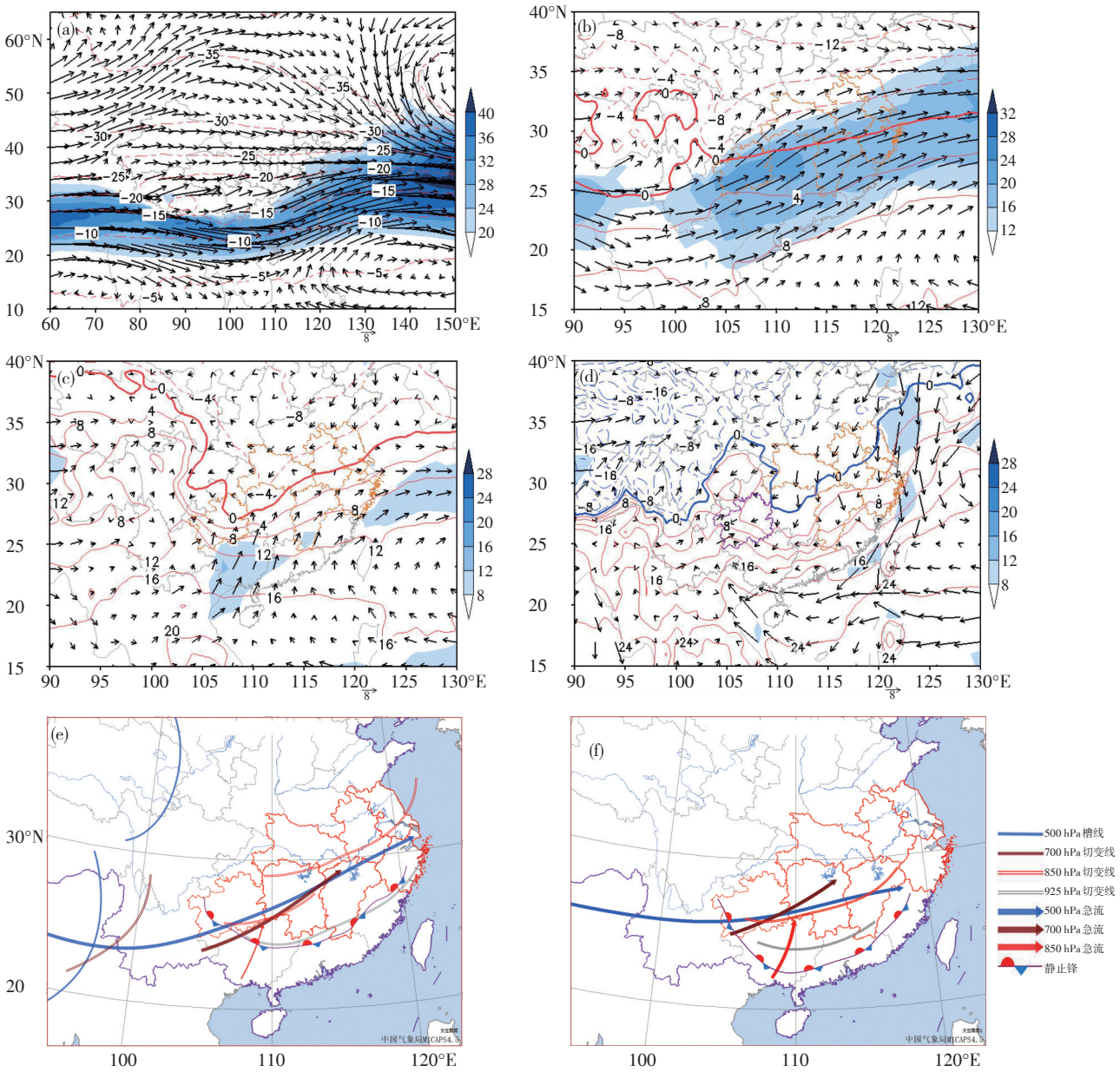


图6 2024年2月1—7日平均的500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c)及地面(d)风场(箭矢,阴影表示风速,单位: m·s^{-1})和温度场(等值线,单位: ℃), 2月3日20时(e)与5日20时(f)高空和地面主要系统

Fig. 6 The average wind fields (vector, shadows represent wind speed, unit: m·s^{-1}) and temperature field (contour, unit: ℃) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, and (d) ground during February 1–7, and the main high-altitude and ground systems at (e) 20:00 BT on February 3 and (f) 20:00 BT on February 5, 2024

江以北降雪偏多，长江以南冻雨偏多。为了解此次过程长江南北降水相态差异的原因，分别选取(112°—118°E，30°—33°N)、(107°—114°E，26°—30°N)范围作为长江以北地区(包括湖北中东部及安徽大部)、长江以南地区(包括贵州东部及湖南大部)。通过分析这两个地区的温度场和湿度场特征，来揭示此次低温雨雪冰冻天气长江南北降水相态差异的原因。

长江以北地区温度和湿度的高度-时间剖面(图7a)显示，1—2日温度场在800 hPa附近存在弱暖层，同时高湿区位于500 hPa以下，温度场和湿度场由上而下形成了“冷湿-弱暖湿-冷湿”的夹心结构，此时是雨转冻雨和雨夹雪阶段。3—4日暖层消失，高湿区向上伸展到300 hPa以上，形成深厚的湿柱，湿柱上端处于利于冰晶形成的冷湿环境，且整层温度均处于0 ℃以下，此时是强降雪阶段。在短暂间歇后，6—7日该区域中层再次出现冷湿结构，但近地面湿度减弱，表明此时降雪天气偏弱。

长江以南地区温度和湿度变化(图7b)显示，暖层是长江以南地区最大的特点，2月1—6日，700—850 hPa之间存在长时间的深厚暖层。结合湿度场可知，2—3

日白天温度场和湿度场由上而下形成了“强暖湿–冷湿”特征，暖层平均温度达4 ℃以上，有利于冻雨的形成；3日夜间—4日上午，暖层温度有所减弱，厚度略有下降，湿层增厚，上下冷湿区扩大，自上而下形成“冷湿–暖湿–冷湿”的夹心结构。由于湿层伸展高度到600 hPa以上，顶部温度降至–10 ℃以下，此阶段出现了降雪和雨夹雪伴冻雨的混合型降水。在短暂间歇后，5—6日夜间再次形成了“冷湿–暖湿–冷湿”的夹心结构，造成长江以南又一轮冻雨和雨夹雪混合型天气。

综上，长江以北出现冻雨和雨夹雪时，温湿场在垂直方向上具有“冷湿–弱暖湿–冷湿”的结构；转为强降雪时，温湿场表现为深厚的冷湿层，具有典型的冰相结构。长江以南地区以强冻雨为主时，温湿场上具有“强暖湿–冷湿”特征，云顶低于600 hPa，逆温强，融化层厚度可达100~150 dagpm；转为降雪和雨夹雪时，温湿场转为“冷湿–暖湿–冷湿”特征。

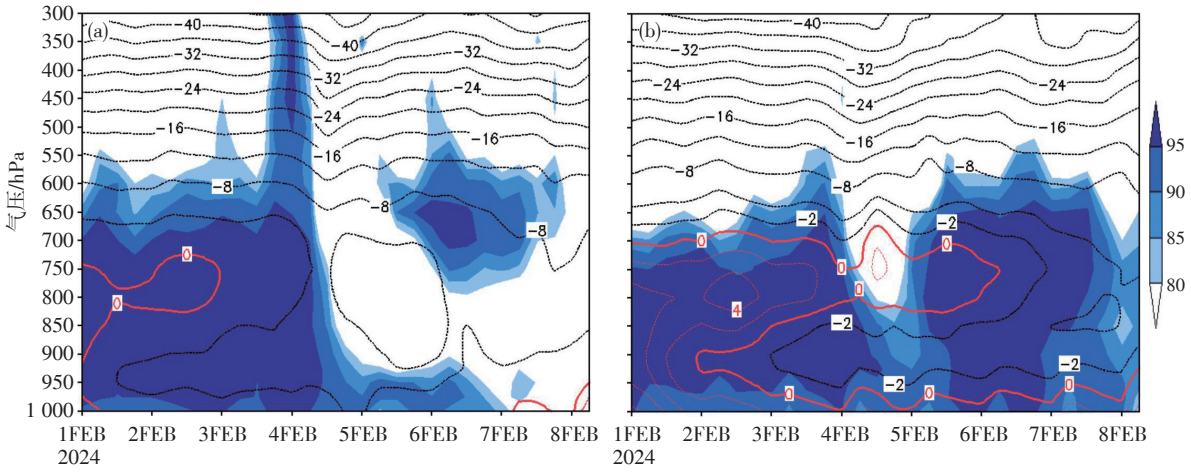


图7 2024年2月1—7日长江以北(a)和长江以南(b)地区温度(等值线,单位: ℃)和湿度(阴影,单位: %)高度–时间剖面

Fig. 7 Height–time cross section of temperature (contour, unit: ℃) and humidity (shaded, unit: %) for (a) north of the Yangtze River and (b) south of the Yangtze River during February 1–7, 2024

4.2 逆温特征

2月1—7日强冷空气南下，在华南和贵州地区堆积形成华南静止锋和云贵静止锋。为了解锋后冷空气和逆温的强弱及影响范围，以每日08时地面0 ℃等温线变化来分析冷空气强弱，以锋后逆温区来考虑锋面影响范围。与常规选取700 hPa与850 hPa的温差作为逆温不同，根据图7分析，逆温顶位于800 hPa上下，逆温底位于925 hPa附近，因而选取800 hPa与925 hPa之间温度差≥ 0 ℃作为低层逆温。温度场选取500 hPa的–10 ℃等温线以及800 hPa、925 hPa和地面0 ℃等温线作为特征线，800 hPa和925 hPa的0 ℃等温线包围的区域就是低层的暖层(也称融化层)。

图8a显示，地面上7月1日0 ℃等温线位于长江以北，2日0 ℃等温线南下进入湖南中部，3日0 ℃等温线继续向西进入贵州东部，向南到达湖南南部和江西西北部–江苏中部一线，4—7日0 ℃等温线在上述地区维持，表明贵州东部及长江中下游地区长时间处于0 ℃以下的低温区。温度特征线与逆温的平均场

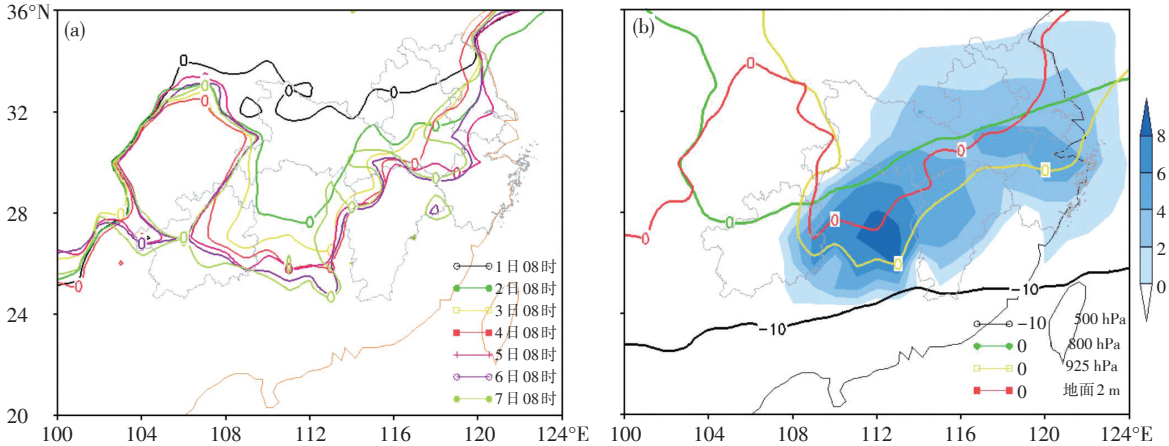


图8 2024年2月1—7日地面2 m 0 ℃等温线逐日变化(a)及2月1—7日平均的500 hPa、800 hPa、925 hPa、地面2 m特征线(等值线)和逆温场(阴影) (b,单位: ℃)

Fig. 8 The (a) daily variation of the 2 m 0 ℃ line on the ground, (b) 500 hPa, 800 hPa, 925 hPa, ground 2 m average temperature characteristic line (contour) and average inversion zone (shaded) during February 1–7, 2024 (unit: ℃)

(图8b)显示，受冷空气持续影响，贵州东部及长江中下游地区还存在大范围逆温区，逆温中心在湖南。同时，在逆温区的中部还存在大范围暖层，在暖层与地面0 ℃等温线所包围的范围自上而下具有“冷–暖–冷”的温度特点，是冻雨最易形成的区域，正好包含贵州东部、湖南中北部、湖北东部及安徽沿江地区；而在暖层北侧的区域自上而下具有冷性的特点，即整层均在0 ℃以下，该区域则是降雪最易发生的地区，正好包含湖南北部、湖北中东部、安徽大部及江苏西部北部；在暖层的南侧，则是易产生降水的地区。

上述分析表明，2—7日受强冷空气堆积影响，贵州东部及长江中下游地区处于锋后0 ℃以下的低温区；锋后逆温范围宽广，暖层位于逆温区的中部地带，总体位于长江以南地区，造成了长江南北不同相态的降水。

4.3 水汽特征

2月1—7日长江中下游累计降水量大，长江以南地区累计降水量大多超过50 mm，江西北部、安徽南部及浙江西部累计降水量达100 mm以上。针对降水偏多的特点，对同期高空的水汽输送及距平(图9)进行分析。500 hPa (图9a)和700 hPa (图9b)水汽输送主要来源于孟加拉湾，和历史同期相比，500 hPa水汽通量略偏多，700 hPa偏多2~4 kg·m^{-1}·s^{-1}。850 hPa (图9c)上水汽主要来源于两个方向，一是从孟加拉湾经中南半岛北上到达长江中下游，二是来源于南海，两支水汽在南方地区汇合，和同期相比，长江以南地区水汽明显偏多6~8 kg·m^{-1}·s^{-1}。选取锋后(110°—120°E, 25°—35°N)区域分析空中水汽通量散度发现，1—7日存在两段深厚的水汽辐合柱(图9d)，其中2月1—4日出现持续辐合区，且辐合强度逐日增强，并在4日凌晨达到最大水汽辐合中心，在5日短暂辐散后，6日前后再次出现水汽辐合。这两段深厚的水汽辐合柱在冬季是少见的，表明槽前强烈的水汽输送和锋后深厚的水汽辐合，造成了持续偏多的降水。

5 微物理特征

考虑到长江南北降水相态的复杂性和多样性，

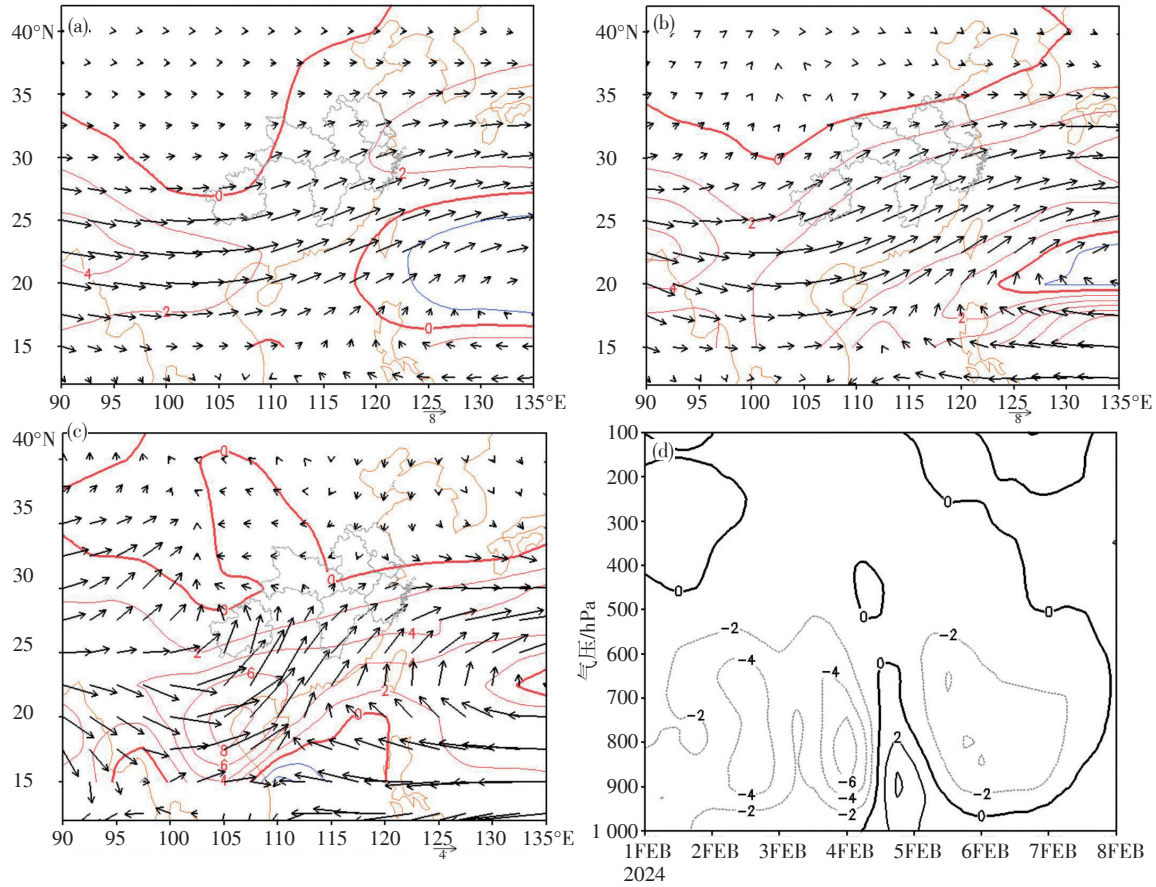


图9 2024年2月1—7日平均的500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c)水汽通量(箭矢)及距平(等值线，红色粗线、红色细线、蓝色细线分别表示距平0线、正距平、负距平) (单位：kg·m^{-1}·s^{-1})，以及(110°—120°E, 25°—35°N)水汽通量散度(单位：10^{-8} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})的高度–时间剖面(d)

Fig. 9 The average water vapor flux (vector) and anomaly (contour, red thick line, red thin line, and blue thin line represent the 0 line, positive anomaly, and negative anomaly, respectively) (unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, and (c) 850 hPa, and (d) height–time cross–section of water vapor flux divergence (unit: 10^{-8} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) for (110°—120°E, 25°—35°N) during February 1–7, 2024

进一步分析云中雨水、冰水和雪的混合比及粒子相态特征。

5.1 雨水、冰水和雪的混合比特征

图10a、b为长江以北地区雨水和冰水以及雪的混合比。图中显示，2月1日夜间至2日，雨水混合比明显大于冰水和雪的混合比，结合温湿场结构分析可知，这期间长江以北地区存在过冷水和冰雪，导致了冻雨和雨夹雪。3—4日，雨水、冰水和雪的混合比明显增加增厚，中心值均达1g·kg^{-1}以上，高度伸展至300 hPa附近，且雪的混合比最大，使得这个阶段强湿雪成为主要天气，此时在地面0 ℃以下低温的配合下，造成地面大范围结冰。5—6日空中又出现雨水、冰水和雪的混合比，但强度均减弱，到达地面时有少许冰水和雪的混合比，表明此时长江以北有减弱的降雪或雨夹雪。

图10c、d为长江以南地区雨水和冰水以及雪的混合，可见2月1—2日这三者的混合比均明显偏弱，直到2月3日夜间至4日早晨，雨水、冰水和雪的混合比迅速增大，且雪的混合比远大于雨水和冰水的混合比，并表现出深厚的特点，这反映出该时段以强降雪为主的天气。同时由于混合了雨水和冰水，这个阶段同样表现出强湿雪的特点。5日夜间至6日再度出现雨水、冰水和雪的混合比，但中心值明显低于3—4日，反映出这个阶段长江以南地区仍有冻雨和雨夹雪天气。

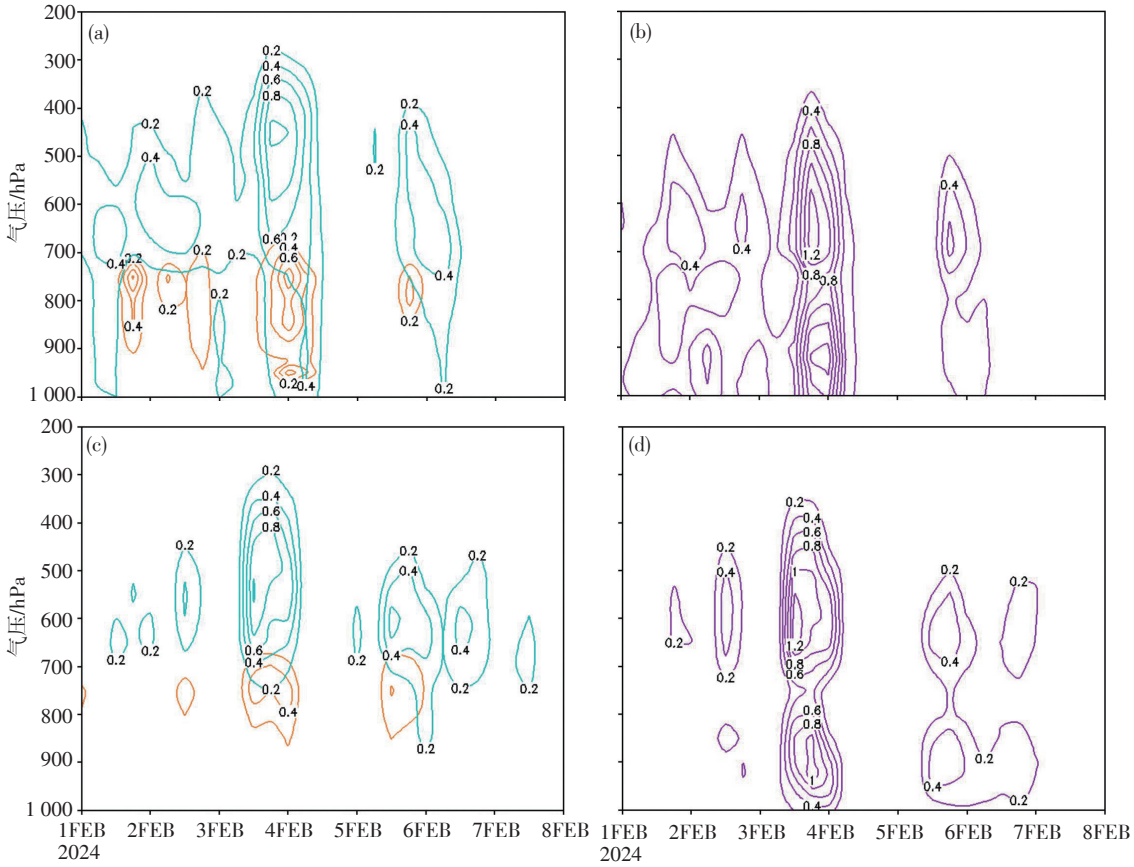


图10 2024年2月1—7日长江以北(a, b)、长江以南(c, d)地区雨水(黄色实线)和冰水(蓝色实线) (a, c)，以及雪(b, d)混合比(单位: g·kg^{-1})的逐日变化

Fig. 10 Daily variation of the mixing ratios (unit: g·kg^{-1}) of (a, c) rainwater (yellow solid line), ice water (blue solid line), and (b, d) snow in (a, b) north of the Yangtze River and (c, d) south of the Yangtze River during February 1–7, 2024

5.2 粒子相态特征

为进一步了解3日夜间和5日夜间粒子相态的分布特点，在雷达资料有限的情况下，使用怀化双偏振雷达资料来分析长江以南地区空中降水粒子相态特征。图11为2月3日20时和5日23时0.5°、1.5°、2.4°仰角融化层高度和粒子相态分类产品(HCL)叠加图，可见3日夜间三个仰角均出现融化层，其中1.5°仰角融化层高度和HCL最为清晰(图11a、b、c)。该仰角上融化层高度为1.8—3 km，融化层中温度高于0 ℃，粒子相态表现为大雨滴和湿雪，融化层以下温度低于0 ℃，粒子相态为小雨滴和大雨滴及部分湿雪，而在融化层以上则存在大量的干雪、冰晶及部分湿雪(图11b)。3日夜间高空存在干雪、冰晶和湿雪，在下降至融化层后融化为湿雪和大雨滴，再继续降至融化层下，转为小雨滴和大雨滴及部分湿雪。5日夜间同样出现融化层，由于0.5°和2.4°仰角融化层的外圈出现不规整线

条(图11d、f)，故以1.5°仰角(图11e)来分析。该仰角融化层的高度位于1—1.5 km，融化层以上粒子相态为干雪及部分冰晶，融化层中有部分干雪、湿雪和大雨滴，融化层以下为部分小雨滴(图11e)。可见，3日夜间和5日夜间，融化层下方均出现小雨滴或大雨滴。融化层以下又处于0 ℃以下低温的环境中，表明这些小雨滴和大雨滴共同构成了过冷水。3日夜间过冷水以小雨滴及大雨滴的方式共存，5日夜间过冷水以小雨滴的形式出现。过冷水中是否存在大雨滴则反映出降水强弱的差异，表明3日夜间大雨滴产生了强冻雨。

综上，长江以北地区2月1—2日过冷水和冰雪形成了冻雨和雨夹雪，3—4日深厚且增强的冰雪雨造成了强降雪和强冻雨，5—6日弱冰雪产生降雪和雨夹雪。长江以南地区2月3—4日快速跃增的雪冰混合比和低层充沛的过冷水产生了强降雪和强冻雨，而低层过冷水是由小雨滴和大雨滴组成，5日夜间至6日弱的过冷水和冰雪形式了冻雨和雨夹雪，而低层过冷水则是以小雨滴的方式出现。

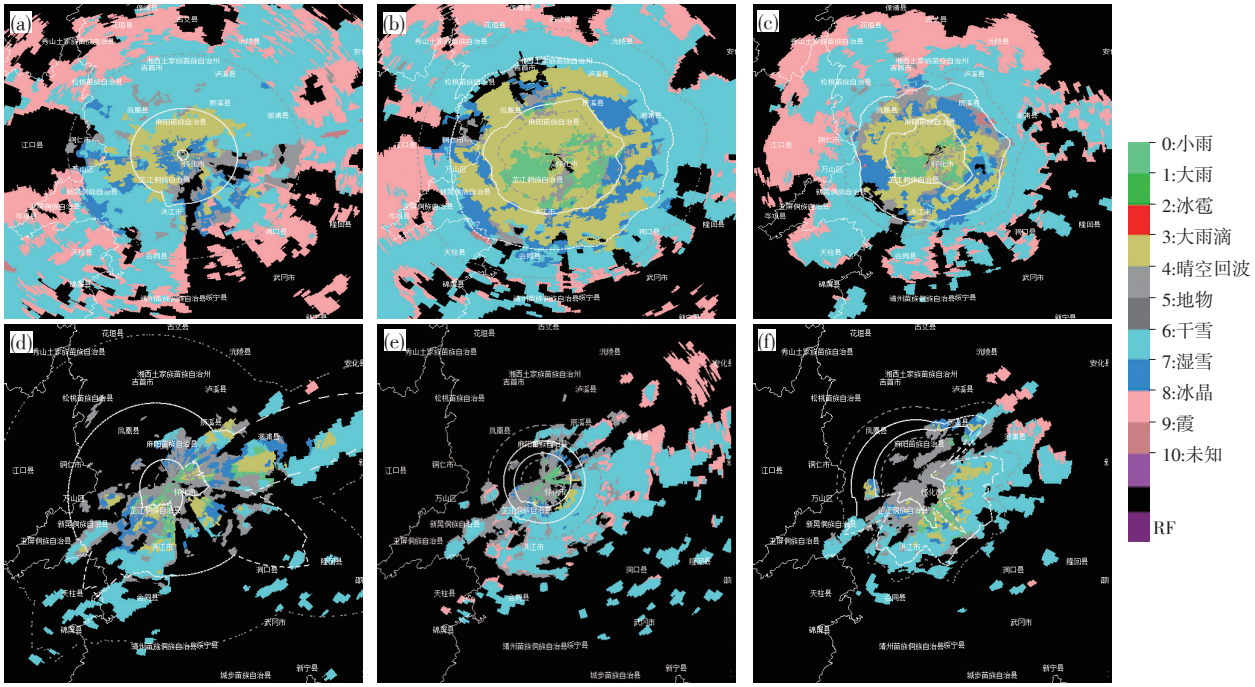


图11 2024年2月3日20时(a, b, c)和5日23时(d, e, f) 0.5° (a, d)、1.5° (b, e)、2.4° (c, f)仰角融化层高度(坐标极点周围两圈近似圆圈的白线，外圈为融化层顶，内圈为融化层底，单位: km)和粒子相态分类产品(HCL) (阴影)叠加图

Fig. 11 Overlay diagram of melting layer height (Two white circular lines around the coordinate poles, with the outer circle representing the top of the melting layer and the inner circle representing the bottom of the melting layer, unit: km) and classification of hydrometeors (HCL) (shaded) at (a, c) 0.5°, (b, e) 1.5° and (c, f) 2.4° on (a, b, c) February 3 and (d, e, f) February 5, 2024

6 结论与讨论

利用国家气象信息中心实况观测资料和美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料以及湖南怀化双偏振雷达资料，对2024年2月初贵州东部及长江中下游地区的低温雨雪冰冻天气的基本特征和成因进行了分析，得出以下主要结论：

(1) 2024年春节前贵州东部及长江中下游地区出现持续低温雨雪冰冻天气，冰冻灾害主要由两轮低温雨雪天气造成。首轮低温雨雪出现在2月1—4日，3日雨雪最强，以强降雪及强冻雨为主，导致积雪和积冰快速增长；第二轮低温雨雪出现在2月5—6日，贵州东部、湖南中北部以冻雨为主，湖北等长江沿线以雨夹雪为主；两轮低温雨雪天气叠加，造成贵州东部、湖南中北部、湖北东部南部4~6 d严重的冰冻灾害。

(2) 亚洲中高纬度位势高度距平呈西低东高分布，且南支槽活跃，为低温雨雪冰冻天气提供了重要天气背景。冷空气强盛，在华南和贵州地区堆积，形成华南静止锋和云贵静止锋。南支槽前强盛的西南急流沿锋面爬升形成倾斜上升气流，增强了锋后的降水强度，造成第一轮强低温雨雪天气；而后南支槽减弱，但南支锋区仍维持，中低层急流和地面静止锋均维持，造成了第二轮持续低温雨雪冰冻天气。

(3) 受华南静止锋和云贵静止锋形成和维持的影响，锋后逆温宽广，长江以南地区温度场上暖层特征显著，造成长江南北不同的降水相态。长江以北为强降雪时，温湿场表现为深厚的冷湿特征，具有典型的冰相结构；长江以南地区产生强冻雨时，温湿场具有

“强暖湿-冷湿”特征，逆温强。

(4) 2月3—4日长江南北地区均出现快速跃增的雨水、冰水和雪混合比，形成强湿雪和强冻雨；长江以南地区低层过冷水在3日夜间由小雨滴和大雨滴共存，2月5日夜间则是由小雨滴组成。

本文从预报员的视角，对产生低温雨雪冰冻天气的环流背景、冷空气活动以及高空、地面、风场、温度场进行了分析，并重点从温湿场、逆温及水汽异常三个方面分析了长江南北降水相态差异以及降水偏多的原因。但对冰冻灾害的极端性和降水相态的复杂性还缺乏深入细致的分析，有待进一步研究。

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 theun-precedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(5):808-825 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.074

杜小玲,高守亭,彭芳.2014. 2011年初贵州持续低温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. 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

杜小玲,高守亭,许可,等.2012.中高纬阻塞环流背景下贵州强冻雨特征及概念模型研究[J].暴雨灾害,31(1):15-22. Du X L, Gao S, Xu K, et al. 2012. Study on the synoptic features of strong freezing rain with blocking pattern in Guizhou and conceptual model [J]. Torrential Rain and Disasters,31(1):15-22 (in Chinese). doi:1004-9045(2012)01-0015-08

杜小玲,蓝伟.2010.两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析[J]高原气象,29(5):1183-1195. Du X L, Lan W. Comparative analysis of the structure of two quasi stationary front zones in Yunnan Guizhou region [J]. Plateau meteorology,29(5):1183-1195 (in Chinese). doi:1000-0534(2010)05-1183-13

GB/T 21984-2017 短期天气预报[S].北京:中国标准出版社. (GB/T 21984-2017) Short-range weather forecast [S]. Beijing:China Standards Publishing House

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

李倩,闫正,许映军.2023. 1951—2020年中国南方地区低温雨雪冰冻危险性评估[J].地理科学,43(1):163-172. Li Q, Yan Z T, Xu Y J. 2023. Assessment of low temperature, rain/snow and freezing events of the southern China from 1951 to 2020 [J]. Scientia Geographica Sinica,43(1):163-172 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs. 2023.01.017

吕春艳,李旭,陈军,等.2024.我国南方两次低温雨雪天气成因对比分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):96-104. Lv C Y, Li X, Chen J, et al. 2024. Comparison of causes of two low temperature rain and snow weathers in Southern China [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):96-104 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.01.012

钱维宏,付娇兰.2009. 2008年初江南冻雨过程的湿大气锋生[J].中国科学D辑:地球科学,29(6):787-798. Qian W H, Fu J L. 2009. Frontal genesis of moisyure atmosphere guring the early 2008 persisent freezing-rain event in southern China [J]. Scientia Sinica (Terrace),29(6):787-798 (in Chinese). doi:10.1360/zd2009-39-6-787

孙晓娟,李驷焱,虞越越,等.2022. 1951—2017年冬季中国南方持续性冰冻雨雪事件的气候特征及其与环流异常的联系[J].大气科学学报,45(5):768-777. Sun X J, Li S Y, Yu Y Y, et al. 2022. Climatic characterstics of winter long-time freezing rain and snow evnts in south China from 1951 to 2017 and their relationship with circulation anomalies [J]. Transactions of Atmosphere Sciences,45(5):68-777 (in Chinese) doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201112002

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):337-350. 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):337-350 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01

陶祖钰,郑永光,张小玲.2008. 2008年初冰雪灾害和华南准静止锋[J].气象学报,66(5):850-855. Tao Z Y, Zheng Y G, Zhang X L. 2008. China Southern China quasistationary front during ice-snow disaster of January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(5):850-854 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2008.077

王遵娅.2011.中国冰冻日数的气候及变化特征[J].大气科学,35(3):411-421. Wang Z Y. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,35(3):411-421 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.03.03

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. 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

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. Zhao S X, Wei J. 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

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

(责任编辑 唐永兰)