胡燕,叶成志,赵恩榕,等.2024. 2024年初湖南两次区域性低温雨雪冰冻天气的成因对比[J].暴雨灾害,43(6):680-692. HU Yan, YE Chengzhi, ZHAO Enrong, et al. 2024. Comparison of causes of two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures in Hunan in early 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):680-692 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh. 2024-081

2024年初湖南两次区域性低温雨雪冰冻天气的成因对比

胡燕[1,2],叶成志[1,3],赵恩榕[1,2],陈红专[4],刘红武[1,2]

(1. 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118;2. 湖南省气象台,长沙 410118;3. 湖南省气象科学研究所,长沙 410118;4. 湖南省怀化市气象局,怀化 418000)

摘　要: 2024年2月湖南省出现2次区域性低温雨雪冰冻天气过程,即2—6日湘北低温雨雪冰冻过程(简称“2.02”过程)和21—26日全省性大范围雨雪冰冻过程(简称“2.21”过程)。使用常规地面高空观测资料、加密自动站资料与NCEP再分析资料,从环流形势、降温机制、水汽输送特征等方面,对上述两次过程的物理成因进行对比分析。结果表明: (1) 两次过程环流背景存在明显差异,“2.02”过程发生在南支槽和西风槽同位相叠加东移的大尺度背景下,而“2.21”过程则发生在阻塞高压崩溃导致寒潮爆发的背景下,受南支槽上小波动影响反复出现雨雪相态转换。(2) 两次过程均存在低层强锋区,而“2.21”过程还出现了少见的大于26 ℃南北温差梯度,这可能是此次极端寒潮天气发生的重要原因。(3) 温度平流对雨雪演变起重要作用,其中“2.02”过程主要受西风槽带动中层强冷平流入侵,整层气温下降,而“2.21”过程超低空强冷平流持续输入是导致持续冰冻天气的重要降温机制之一。另外,暖平流最强输送层对应垂直速度负值中心,对流层中低层垂直风切变更大,导致雨雪强度更强。(4) 两次过程主要水汽源地均为阿拉伯海,对流层中层西南暖湿空气随500 hPa低槽或其分裂出的小槽移动,且比湿和水汽贡献率最大,低槽既为冬季雨雪过程提供了有利的动力条件,也提供了充沛的水汽。其中“2.21”过程,来自南海和阿拉伯海洋面、低纬内陆的三条通道叠加传输暖湿气流,为湘南冰冻区提供了水汽和暖层条件,这也是造成该地强冰冻的重要原因。

关键词: 雨雪冰冻天气;环流背景;温度平流;水汽特征;物理成因

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-081

Comparison of causes of two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures in Hunan in early 2024

HU Yan[1,2], YE Chengzhi[1,3], ZHAO Enrong[1,2], CHEN Hongzhuan[4], LIU Hongwu[1,2]

(1. *Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Changsha* 410118; 2. *Hunan Meteorological Observatory, Changsha* 410118; 3. *Institute of Meteorological Sciences of Hunan Province, Changsha* 410118; 4. *Huaihua Meteorological Office of Hunan Province, Huaihua* 418000)

Abstract: In February 2024, Hunan encountered two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures, one in northern Hunan from February 2 to 6 (hereinafter referred to as the “2.02” event), and the other across the whole province from February 21 to 26 (hereinafter referred to as the “2.21” event). Using conventional upper-air and surface weather observations, regional automatic weather station data, and NCEP reanalysis data, we conducted a comparative analysis of the circulation background, cooling mechanism, and water vapor transport characteristics of the two events. The results are as follows. (1) There are obvious differences in the circulation background between the two events. The “2.02” event occurred in the background with eastward movement of both the southern branch trough and westerly trough overlapping in phase. However, the “2.21” event occurred under the cold wave caused by the collapse of the blocking high, with the transition of rain and snow phases appearing multiple times due to the small influence on the southern branch trough. (2) There were the strong low-level frontal zone in both events. A rare north-south temperature gradient greater than 26 °C was observed in the “2.21” event, which may be an important indication of this extreme cold wave weather. (3) Temperature advection played an important role in the transition of

收稿日期: 2024-05-08;**定稿日期:** 2024-09-20

资助项目: 湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0009);国家重点研发计划项目(2023YFC3007804);湖南省气象局重点项目(XQKJ22A004);湖南省创新发展专项(CXFZ2023-ZDZX07)

第一作者: 胡燕,主要从事暴雪、暴雨等灾害性天气预报技术研究。E-mail: 16491614@qq.com

通信作者: 叶成志,主要从事灾害性天气预报技术及数值模式研究。E-mail: yechengzhi_hunan@hotmail.com

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

rain and snow phases. In the "2.02" event, the strong cold advection intrusion in the middle level was driven by the westerly trough, causing a temperature decrease across the whole layer. In the "2.21" event, the continuous input of the ultra-low-level strong cold advection was one of the important cooling mechanisms. In addition, the strongest transport layer of warm advection corresponded to the negative center of vertical velocity, and the stronger vertical wind shear in the middle and lower troposphere resulted in stronger rain and snow intensity. (4) The Arabian Sea was the main source of water vapor for both events. Southwest warm and wet airflow in the middle troposphere moved with the low trough at 500 hPa or the small trough from it, with the highest contribution of specific humidity and water vapor flux to both events. The low troughs provided both favorable dynamical conditions and abundant water vapor for the occurrence of rain and snow weather. In the "2.21" event, the warm and wet air carried by three combined channels from the South China Sea channel, the Arabian Sea channel and the low latitude inland regions provided water vapor and warm layer conditions for the freezing area in the southern Hunan, which was an important reason for the severe freezing in this area.

Key words: rainfall/snowfall and freezing event; circulation background; temperature advection; water vapor characteristics; physical mechanism

引 言

雨雪冰冻是我国北方冬季最主要的灾害性天气之一，南方地区因水汽条件充沛在特定天气背景下也会产生严重雪灾或冰灾，常对农业、电力、交通等行业带来较大影响，甚至严重威胁社会公共安全。如，2008年我国中东部及江南大部遭遇罕见极端雨雪冰冻天气，其中湖南省受灾最严重，直接经济损失超过680亿元，达到特大型气象灾害级别(叶成志等，2009；姚蓉等，2012)。湖南地处亚热带季风湿润气候区，冬季雨雪天气常以"湿雪"或冻雨为主，其形成机理复杂，预报难度很大(预报要素包括相态转换时间、积冰厚度或积雪深度等)。近年来，国内外学者从环流背景、大气河等方面对雨雪冰冻天气成因进行了深入探讨，并取得较多有价值的成果(许爱华等，2011；江杨等，2017；Wiley and Mercer，2020；Rafiq et al.，2021；Chen et al.，2021；毛宇清等，2022)。有关雨雪冰冻灾害事件的研究表明，我国中东部及江南地区的雨雪冰冻天气与稳定少动的大尺度系统有关。如，对2008年初和2018年影响多个省市的极端雨雪冰冻天气的分析结果显示，副热带高压偏强、南支槽活跃是造成长时间冰冻、极端暴雪的主要原因(赵思雄和孙建华，2008；王东海等，2008；杨贵名等，2008)；南支槽不断波动东移，增强了雨雪的动力条件(欧建军等，2011)，槽前暖湿气流每一次加强均对应降雪或冰冻强度加大，并导致雨雪天气反复转换(陈百炼等，2020)。甘文强等(2018)对2018年1月贵州、刘红武等(2020)对2018年12月湖南暴雪事件的研究指出，乌拉尔山阻塞高压和南支槽较历年同期显著偏强是导致降雪持续时间长、强度大的重要环流背景，且南支锋区最强时段与降雪最强时段一致。另外，温度层结演变较好反映了雨雪相态转化过程，冷暖平流对降雪和冰冻强度也起重要作用。

水汽对降水强度和落区具有重要作用(Li et al.，2016；Chen et al.，2022)。我国南方地区冬季降水相态以雪和冻雨、冰粒为主，不同环流背景下水汽特征存在明显差异(Hu et al.，2023)。熊秋芬等(2018)和高松影等(2020)研究指出，我国北方区域性暴雪水汽源地主要来自西太平洋、日本海、东海和黄海，气块传输受海气作用影响经过洋面后水汽迅速增长是导致暴雪发生的重要原因；胡鹏宇等(2018)认为不同水汽源地的气团和冷暖气团的交绥是降雪量增大的关键因素。对于南方地区，南支槽前西南水汽输送对降雪和冰冻强度起重要作用(张腾飞等，2006；张万诚等，2011；张俊兰等，2013；唐明晖等，2023)。其中，华南地区水汽主要来源于孟加拉湾和南海(吴蔚等，2012；胡钰玲等，2017)。上述水汽输送研究均基于传统欧拉方法，未能反映远距离水汽贡献特征，也不能定量确定各源地水汽贡献。基于拉格朗日方法的后向轨迹模式(HYSPLIT)则能反映水汽输送轨迹及沿水汽轨迹的变化细节，并能定量确定各源地的水汽贡献，因此其在近年来有关研究中受到重视(Dirmeyer et al.，2009；Salih et al.，2015；Bottyan et al.，2017)，如对暴雨过程水汽输送及来源的相关研究(陈红专等，2019；Shi et al.，2020；Tian et al.，2022)。然而，对于HYSPLIT后向轨迹模式，鲜有将其应用于与强降雪相关的研究(王慧清等，2019；He and Qin，2021；胡燕等，2023)，关于其水汽源地及输送通道的研究则更少。

2024年2月湖南省遭遇两次低温雨雪冰冻天气过程，即2—6日湘北低温雨雪冰冻过程(简称"2.02"过程)和21—26日全省性大范围低温雨雪冰冻过程(简称"2.21"过程)。两次过程不仅出现了大范围持续性雨雪天气，且强降雪落区重叠，冰冻强度大，造成多地严重雪(冰)灾。其中，"2.02"过程因灾死亡5人，直接经济损失达59.13亿元，因其正值春节前夕，造成的社会影响更大。为此，本文利用常规地面高空资料、加密自动站资料和NCEP再分析资料，从环流背景、锋生、温度平流、水汽输送特征等方面，对这两次过程的物理成因进行细致分析，以期加深对湖南低温雨雪冰冻天气的认

识，为今后提高此类天气预报准确率提供参考依据。

1 资料与方法

本文所使用的资料包括：2024年2月1—27日湖南省97个国家基本站地面降水监测资料和积雪资料、人工加密小时观测数据以及NCAR/NCEP全球资料同化系统(global data assimilation system，GDAS)资料。其中，国家站资料主要为湖南各站小时降雨量、降雪量数据；人工加密观测数据为过程期间的逐小时加密资料，观测要素包括雪深、新增雪深及相态，用于补充夜间无观测记录的不足，使相态转换具有连续性；NCEP再分析资料时间分辨率为6 h，空间分辨率为1°×1°，主要用于环流背景、物理量诊断及气块模拟等分析。考虑到两次雨雪冰冻天气范围涵盖湖南全省，本文将物理量诊断区域设定为(108°—114°E、26°—30°N)。由于南岳高山站海拔高度达1 265 m，不具普适性，以下实况讨论分析中未使用该站数据。另外，文中所述“最大积冰厚度”为已减去电线直径后的量值。

本文对水汽输送特征的分析采用HYSPLIT v4.9轨迹模式。HYSPLIT v4.9是美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、澳大利亚气象局联合研发的质点轨道计算模型，该模型采用了基于欧拉和拉格朗日算法的轨迹模拟方法，能定量计算不同水汽源地对降水区域贡献率大小，可较好地用于刻画气块三维运动轨迹(周玉淑等，2019；曾钰婷等，2020)。本文选取的模拟区域分别为两次过程的强雨雪冰冻区，通过模拟雨雪中心区上空的气块后向120 h的三维运动轨迹，即每日02时(北京时，下同)、08时、14时、20时4次模拟3 000 m高度全部轨迹，并采用聚类算法分析水汽通道的贡献率。

2 天气概况

2024年2月2日08时—7日08时，湖南从北至南发生了一次低温雨雪冰冻天气过程(“2.02”过程)，2日湘北开始出现降雪，同时伴有轻冰冻；3日降雪区南扩至湘中一带，强度加大，湘北出现大范围暴雪和大暴雪，湘中、湘北冰冻发展；4日雪线继续南压到湘南地区；5日降雪减弱，但冰冻发展；6日降雪再度发展，冰冻加强；7日随着低槽逐渐移出湖南，过程结束。该过程全省82个县(市、区)出现雨雪冰冻天气，涵盖全省80%以上面积，17站累计降雪量大于10 mm (图1a)，过

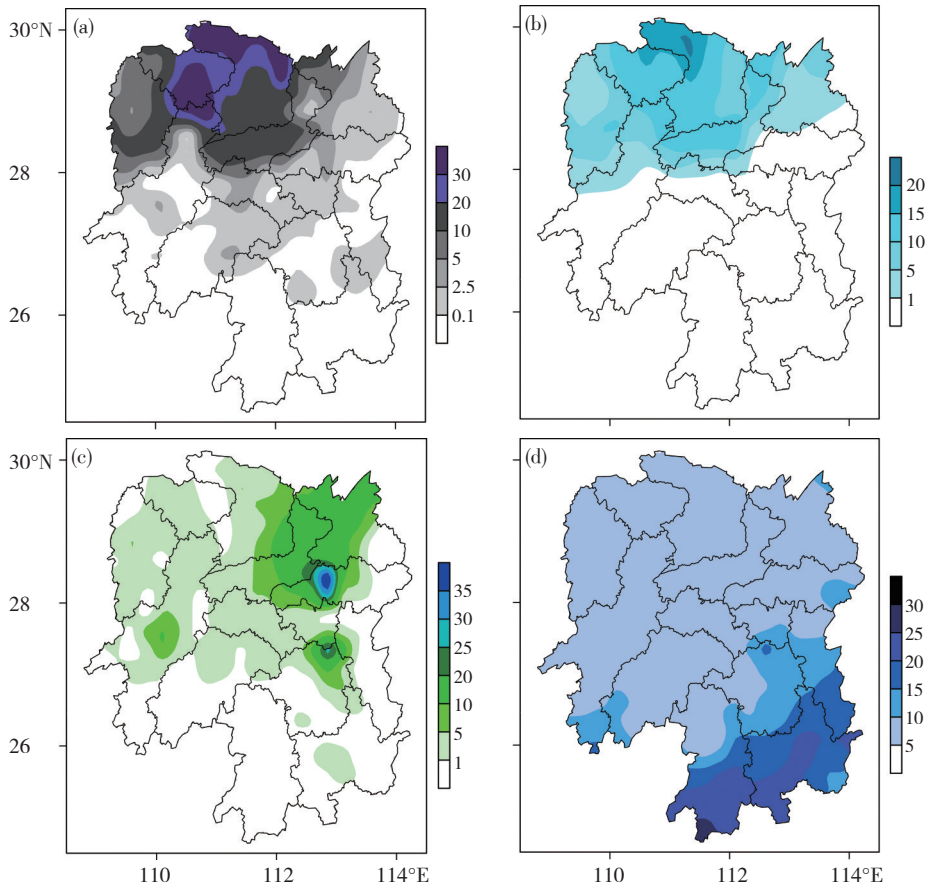


图1 2024年2月2日08时—7日08时湖南省累计降雪量(a，单位：mm)、积雪深度(b，单位：cm)、最大积冰厚度(c，单位：mm)以及最高气温降幅(d，单位：℃)的空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of (a) accumulated snowfall (unit: mm), (b) snow depth (unit: cm), (c) maximum ice thickness (unit: mm) and (d) the decrease of maximum temperature (unit: °C) in Hunan Province from 08:00 BT on February 2 to 08:00 BT on February 7, 2024

程最大累计降雪量42.8 mm (张家界永定站)，湘北出现积雪(图1b)，最大积雪深度20 cm (常德石门站)，湘中及以北地区71县(市、区)出现冰冻(图1c)，最大积冰厚度34.0 mm (长沙站)，常德、益阳、岳阳等地部分县(市、区)电线积冰厚度超过2008年1月。湘东南部分县市最高气温降幅超过10 ℃ (图1d)。

2024年2月21日08时—27日08时，受超强寒潮南下影响，湖南再次出现持续性低温雨雪冰冻天气(“2.21”过程)，21日湘北开始出现雨雪相态转换并逐渐南扩，湘北出现局地大暴雪和单点特大暴雪(临湘站)；22日雪线南压到湘南地区，23—24日全省出现大范围冻雨和纯雪，其中北部以降雪为主、南部以冻雨为主；25日湘北冻雨减弱消失，湘中湘南冻雨维持；26日随着低槽移出湖南，过程基本结束。该过程天气类型多，包括雨夹雪、雪、冻雨及冰粒，降雪主要出现在湘北(图2a)，局部出现暴雪，最大累积降雪量50 mm (临湘)，湘北8县(市、区)积雪深度超过5 cm (图2b)，最大积雪深度为11 cm (岳阳临湘站)，全省112个县(市、区)出现冰冻，主要出现在湘东南和湘西南地区(图2c)，最大积冰厚度出现在郴州站(36 mm)。全省最高气温平均降幅为18.6 ℃，最大降幅达29.6 ℃ (靖州站)，湘南降幅大于湘北(图2d)，全省均达到寒潮标准，其中100个县市区(占比82%)为超强寒潮，为湖南1961年有完整气象记录以来冬季最强寒潮过程。

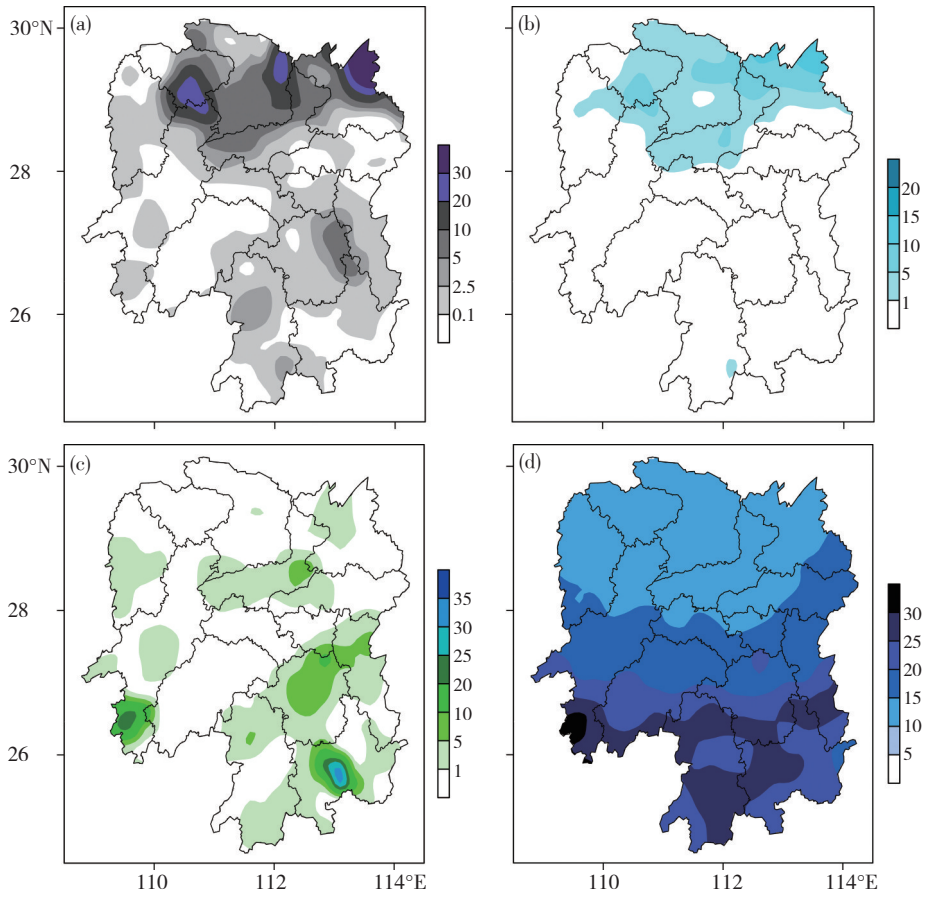


图2 同图1，但为2024年2月21日08时—27日08时

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for 08:00 BT 21 to 08:00 on February BT on February 27, 2024

对比两次过程最强中心张家界站和郴州站的相态演变(图3)可见，“2.02”过程中(图3a)，张家界站从3日凌晨转雨夹雪，3日白天降雪逐渐加大，夜间3 h降雪量最大达16 mm，3日20时—4日08时为过程雨雪最强时段，4日14时至5日05时降雪短暂停歇，5日白天再度出现雨夹雪、纯雪。“2.21”过程中(图3b)，冰冻大值区郴州站从22日开始交替出现毛毛雨、冻雨、雨，3 h最大雨量不超过0.5 mm，持续性弱降水导致积冰厚度不断增长。

综上可知，两次过程均具有低温雨雪冰冻持续时间长、相态复杂、部分站点降水相态多次转化等特点，且大雪以上量级强降雪落区重叠，前期以降雪为主，后期冰冻发展加强(“2.02”过程暴雪出现在3日，最大冰冻出现在7日，而“2.21”过程暴雪出现在21日，最大冰冻出现在26日，这与冰冻过程表现为逐渐积累有关)。不同点主要表现在：“2.02”过程降雪量和雪深均相对更大，冰冻区主要位于湘北；而“2.21”过程降雪位于湘北，冰冻区主要位于湘南，且降温幅度较“2.02”过程大。

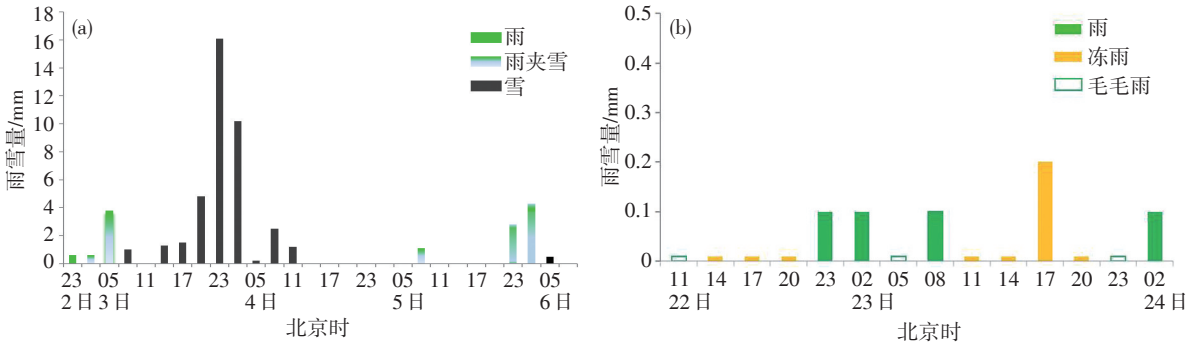


图3 2024年2月2日23时至6日08时张家界站(a)和22日11时至24日02时郴州站(b)降水相态及其量值逐3 h变化

Fig. 3 Variation of 3-hour precipitation phase and precipitation amount at (a) Zhangjiajie station from 23:00 BT on February 2 to 08:00 BT on February 6, 2024 and (b) Chenzhou station from 11:00 BT on February 22 to 02:00 BT on February 24, 2024

3 环流形势对比分析

3.1 “2.02”过程的环流特征

“2.02”过程发生前，2月1日20时(图略)，500 hPa亚欧大陆高纬度地区维持两槽一脊环流型，巴尔喀什湖与贝加尔湖之间为高压脊控制，乌拉尔山附近受冷涡控制，中心温度低于-40 ℃，低涡南侧分裂短波槽向东南方向移动；同时，孟加拉湾也不断有小槽发展东移，我国东部地区中低层受槽前一致西南气流控制。2日02时(图略)，随着850 hPa切变线缓慢南移到湘北，湘北开始出现降雪。3日08时，自高原东移的西风槽和南支槽同位相叠加(图4a)，850 hPa切变线位于湘北(图4b)，20时其南压到湘中以南，湘北出现暴雪到大暴雪。4—5日，上述切变线维持在湘中以南，雨雪持续但强度减弱。6日02时(图略)，850 hPa西南气流加强，切变线北抬至湘中以北，湘北降雪再度加强。7日08时(图略)，随高空槽东移，湖南处于低槽后的西北气流中，850 hPa切变线南压到华南，过程结束。此过程期间700 hPa一直维持较强的西南风，6日08时最大风速超过22 m·s^{-1}，0 ℃线也压到湘中以北地区(图4c)，而

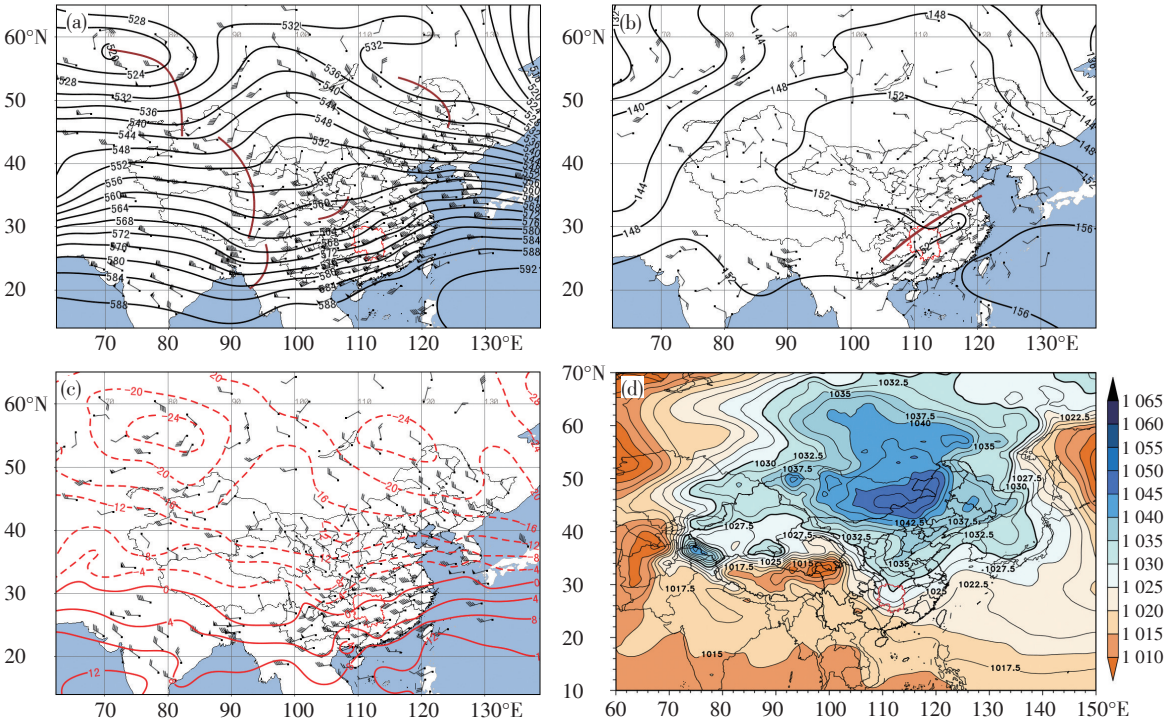


图4 2024年2月3日08时500 hPa (a)和850 hPa (b)高度场(等值线，单位：dagpm)与风场(风向杆，单位：m·s^{-1})，6日08时700 hPa温度场(等值线，单位：℃)与风场(风向杆，单位：m·s^{-1})(c)，及3日08时地面气压场(单位：hPa)(d)

图a、b中，棕色粗实线为槽线或切变线；红色不规则细闭合线为湖南省行政边界

Fig. 4 Geopotential height field (contours, unit: dagpm) and wind field (barbs, unit: m·s^{-1}) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 08:00 BT on February 3, 2024. (c) Temperature (contours, unit: °C) and wind field (barbs, unit: m·s^{-1}) at 700 hPa at 08:00 BT on February 6, 2024. (d) Sea level pressure (unit: hPa) at 08:00 BT on February 3, 2024. The thick brown solid lines in Fig. 4a and Fig. 4b denote trough lines or shear lines. The irregular closed thin red line represents the administrative boundary of Hunan Province

850 hPa湖南南部郴州站和广西北部桂林站也始终维持西南风，导致切变线在湖南中南部维持时间较长，湖南南部以降雨为主，而中北部出现持续雨雪冰冻天气。对应地面图上，蒙古西北部稳定维持一冷高压，中心气压最强达1 060 hPa，高压中心并未东移，但其分裂出冷高压中心向东偏南移动，因此使得冷空气不断自中路补充南下到湖南，致使地面气压1 030 hPa线最南界到达湖南北部(图4d)。

3.2 “2.21”过程的环流特征

“2.21”过程开始前的2月19日，500 hPa乌拉尔山阻塞高压建立，巴尔喀什湖与贝加尔湖之间受冷涡和横槽控制。自21日开始，阻塞高压崩溃，横槽转竖，寒潮爆发，气温快速下降，低纬南支槽东移，湖南受槽前西南气流控制(图5a)，850 hPa切变线位于湘北一线，切变线南侧西南风超过20 m·s^{-1}，与其北侧的较强东北风相遇，冷暖气流汇合导致湘北出现局地大暴雪和单站特大暴雪(图5b)。此后，500 hPa冷涡缓慢东移，湖南处于冷涡南侧，孟加拉湾南支槽不断分裂小槽东移影响湖南地区，21日20时850 hPa切变线南压，22—25日维持在湘中以南，湘北整层温度在0 ℃以下，以小雪为主；23日08时700 hPa长江以南均为超过28 m·s^{-1}强劲西南气流，湖南处于0 ℃以上(图5c)，湘南850 hPa以下温度小于0 ℃，850—700 hPa之间是暖层，暖式层结维持时间较长，导致冰冻维持和发展。26日切变线移出湖南，该过程结束。对应地面图上，21日20时，冷高压中心位于贝加尔湖南侧并缓慢东移，中心气压达1 074 hPa，地面冷锋已抵达湖南南部，湘北气温降至0 ℃附近，湘北降雪发展(图略)。22日08时，冷高压移至贝加尔湖东南部，其东移过程中减弱消失，同时巴尔喀什湖东部有新的冷高压发展，23日该冷高压移至贝加尔湖西侧后稳定少动(图略)。24日08时，强大的冷高压控制我国北方大部地区，1 055 hPa冷高中心主体偏西，位于巴尔喀什湖至贝加尔湖之间(图5d)，其冷高压强度明显强于“2.02”过程。冷锋前沿已越过南岭山脉，1 030 hPa湖南降雪特征线压至湘南并维持72 h，副冷锋位于河套一带，冷空气以东路分股南下，高纬强大的冷高压源源不断补充冷空气也是雨雪冰冻天气维持的主要原因之一。

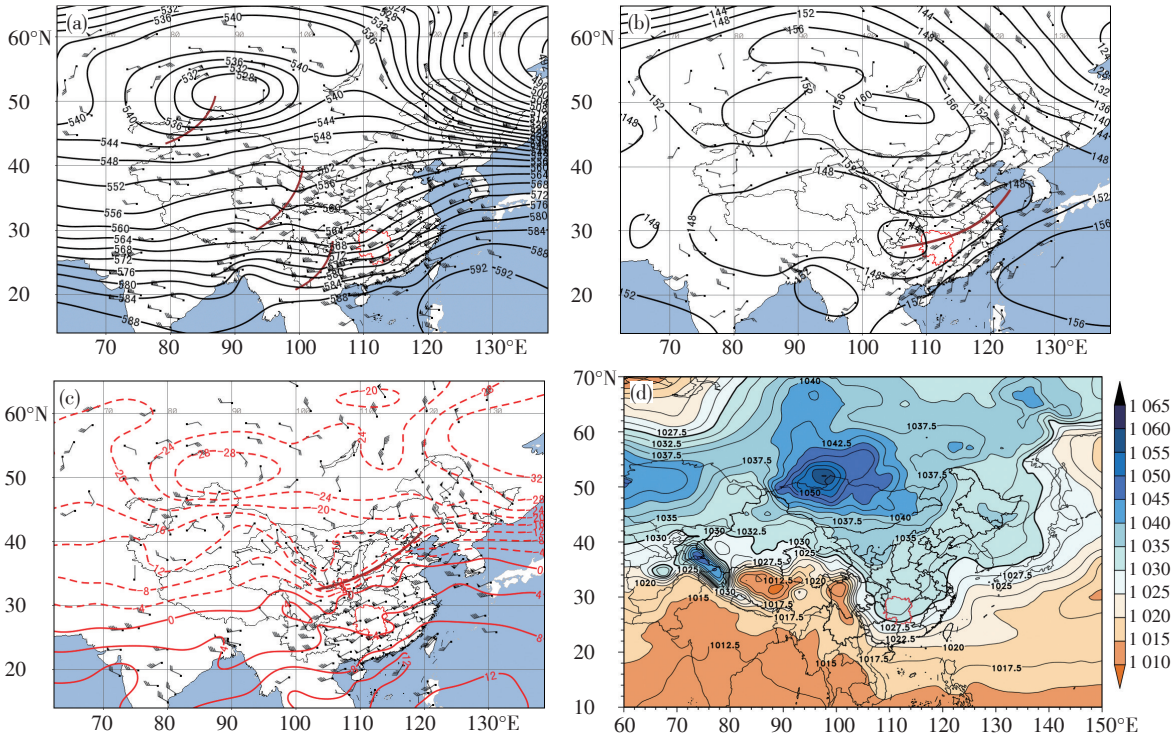


图5 2024年2月21日08时500 hPa (a)和850 hPa (b)高度场(等值线，单位：dagpm)与风场(风向杆，单位：m·s^{-1})，23日08时700 hPa温度场(等值线，单位：℃)与风场(风向杆，单位：m·s^{-1}) (c)，及24日08时地面气压场(单位：hPa) (d)

图a、b，棕色粗实线为槽线或切变线；红色不规则细闭合线为湖南省行政边界

Fig. 5 Geopotential height field (contours, unit: dagpm) and wind field (barbs, unit: m·s^{-1}) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 08:00 BT on February 21, 2024. (c) Temperature (contours, unit: °C) and wind field (barbs, unit: m·s^{-1}) at 700 hPa at 08:00 BT on February 23, 2024. (d) Sea level pressure (unit: hPa) at 08:00 BT on February 24, 2024. The plots and signs have represent the same means as those in Fig. 4

由上述分析可知，两次过程环流背景存在明显不同：“2.02”过程南支槽和自高原东移的西风槽同位相叠加后加强，动力作用更强，造成的降雪量更大；“2.21”过程大尺度系统稳定，切变线在湘中以南稳定维持有利于雨雪冰冻天气持续较长时间。另外，“2.21”过程高纬冷高压强度更强，使得冷空气从东路分股南下源源不

断向湖南补充，加上1 030 hPa特征线维持在湖南南部，更有利于雨雪冰冻天气发生并维持较长时间。

4 物理成因对比分析

已有研究表明(刘建勇等，2013；姚晨等，2018)，锋面是雨雪冰冻天气最重要的影响系统之一，相比我国北方，南方地区锋面系统浅薄而强，锋区强度可用来反映冷暖气流交汇的强度，锋生函数可用来表征冷暖空气聚集的程度。考虑到“2.02”过程和“2.21”过程既有强冷空气影响形成的雨转雪，也有冷暖空气对峙导致的雨雪相态反复交替，为完整体现雨雪天气过程发生前、结束后的演变，分别选取2月2—8日和20—27日时段，从锋生作用探讨其对雨雪冰冻强度的影响，并结合对温度平流演变特征的分析，讨论其形成的物理成因。

4.1 锋生作用

本文参照杨贵名等(2009)的方法，分别以T_{25}和T_{30}代表(108°—114°E、24°—26°N)范围和(108°—114°E、29°—31°N)范围的平均温度，再以T_{25}与T_{30}的差值表示锋区强度。图6a给出“2.02”过程湖南平均锋区强度的时间-高度垂直剖面。从中可见，低空锋区2日开始加强，3日20时至4日08时扩展至对流层上层，整层温差大于10 ℃，最强锋区位于850—1 000 hPa，最大南北温差超过14 ℃，锋区最强时段与降雪加强时段一致，低层强锋区维持达60 h。5日08时后，低层锋区减弱，对应降雪减弱、冰冻维持。再由“2.21”过程湖南平均锋区强度的时间-高度垂直剖面(图6b)可知，锋区自20日08时迅速增强，到21日14时近地层锋区超过20 ℃，可见强冷空气先从地面入侵带来强寒潮，使气温快速降低。从22日08时开始锋区从对流层低层向中层伸展，大于16 ℃强锋区中心在750—900 hPa，持续到24日08时，中低层锋区强烈发展，冷暖空气交汇剧烈，对应时段湘北降雪、湘南冻雨发展并维持。

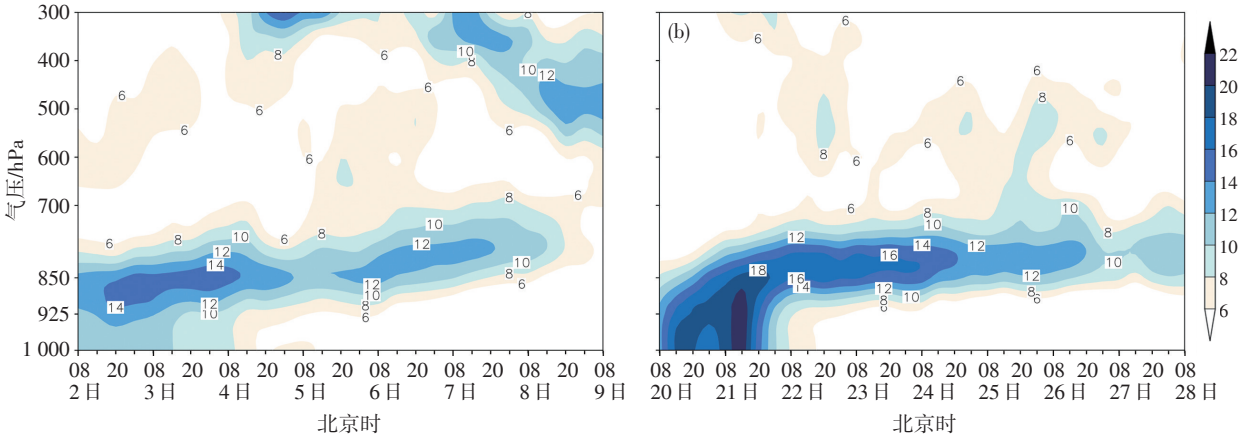


图6 2024年2月2—8日(a)和20—28日(b)湖南平均锋区强度(阴影，单位：℃)的时间-高度垂直剖面

Fig. 6 Height-time cross-section of average front-area intensity (shaded, unit: °C) over Hunan Province (a) from February 2 to 8 and (b) from February 20 to 28 in 2024

综上可知，低层锋区增强对雨雪或冰冻加强具有指示意义。这与Hu等(2023)在分析2022年两次极端雨雪成因时得到的结论“低层锋区增强时段对应雪量加大时段”一致。另外，刘红武等(2020)分析2018年湖南极端低温雨雪过程指出低层最大锋区强度大于18℃，而在“2.21”过程中，低层锋区强度超过26 ℃，这在湖南极为少见，也可能是导致此次极端寒潮天气发生的一个重要成因。

考虑到“2.02”和“2.21”两次过程低层锋区都较强，本文参考刘裕禄等(2024)的思路分析850 hPa锋生函数演变讨论雨雪天气变化。“2.02”过程中，2月3日02时(图略)锋生函数在湘黔交界地区开始加强，其中心最大值超过20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}，并不断向湖南境内东扩。从该过程降雪最强时段的3日20时850 hPa锋生函数分布图(图7a)上可见，湘中一带锋生函数达12×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}，4日08时强锋生带压至湘南，锋生函数增至20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1} (图略)。另从“2.21”过程20日14时锋生函数分布图上可见，其大值区快速移入湖南中北部地区，中心值达到20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}以上，21日02—20时锋生函数大值区范围呈楔形覆盖全省，到22日其高值区南压至湘中以南(图略)。从该过程冰冻最强时段的24日20时850 hPa锋生函数分布图(图7b)上可见，南岭山脉北麓出现了锋生函数高值中心，其量值超过20×10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}的高值带持续影响湖南长达90 h。西南暖湿气流的加强使得锋生函数加强，对应时段湖南北部降雪、南部冰冻最强。25日08时随着锋生函数减弱，冰冻强度随之减弱。由此可知，低层锋生函数加强与减弱对“2.02”和“2.21”两次过程雨雪冰冻强度的加强和减弱均有一定的指示意义，其中“2.21”过程锋生大值区在湘中以南维持时间较长导致了该区域持续性冰冻。

4.2 温度平流的作用

为了揭示“2.02”和“2.21”两次过程中雨雪相态的转换机理，基于降温机制分析最强雨雪冰冻时段温度

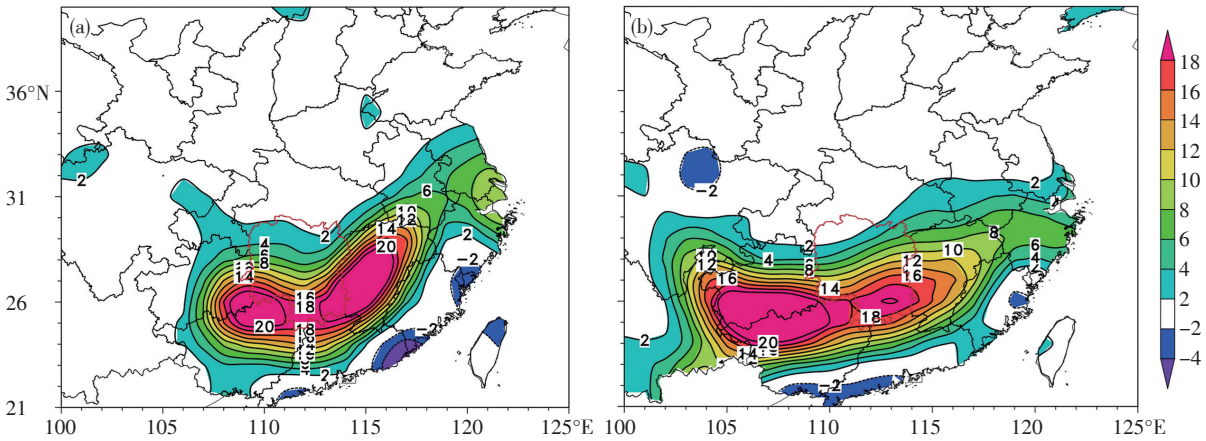


图7 2024年2月3日20时(a)和24日20时(b) 850 hPa水平锋生函数(单位: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1})的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of horizontal frontogenesis function (unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}) at 850 hPa at (a) 20:00 BT on February 3 and (b) 20:00 BT February 24, 2024

平流的演变。图8a、b给出“2.02”过程强降雪时段不同时刻沿29°N的温度平流、垂直速度和风场纬向垂直剖面。从中看到，3日20时(图8a)，暴雪区上空850 hPa至近地层为冷平流控制，对流层中层为显著增强的暖平流控制，暖平流最大中心位于500 hPa，强度达16×10^{-5} K·s^{-1}以上，冷垫厚度达1 500～2 000 m；4日08时(图8b)，暴雪区上空从边界层至500 hPa均转为冷平流控制，最大冷平流中心(-12×10^{-5} K·s^{-1})出现在600 hPa左右。进一步分析表明，850 hPa以下持续8～12 m·s^{-1}东北风，强盛的暖湿气流在冷垫上爬升，暴雪区上方对流层中低层垂直风切变可达28～32 m·s^{-1}。另外，从“2.21”过程最强冰冻时段不同时刻沿26°N的温度平流、垂直速度和风场纬向垂直剖面图可见，23日20时(图8c)，强冰冻区低空900 hPa以下为强冷平流控制，冷垫厚度更浅薄，仅800～1 000 m左右，最大冷平流中心(-10×10^{-5} K·s^{-1})位于950 hPa，850 hPa至对流层顶均为深厚暖平流控制，暖平流最大值出现在500 hPa，强度达16×10^{-5} K·s^{-1}；24日08时(图8d)，暴雪区上空暖平流有所减弱，但因暖平流过于深厚，整体仍维持下冷上暖层结，冰冻区上空850 hPa以下为4～8 m·s^{-1}偏北

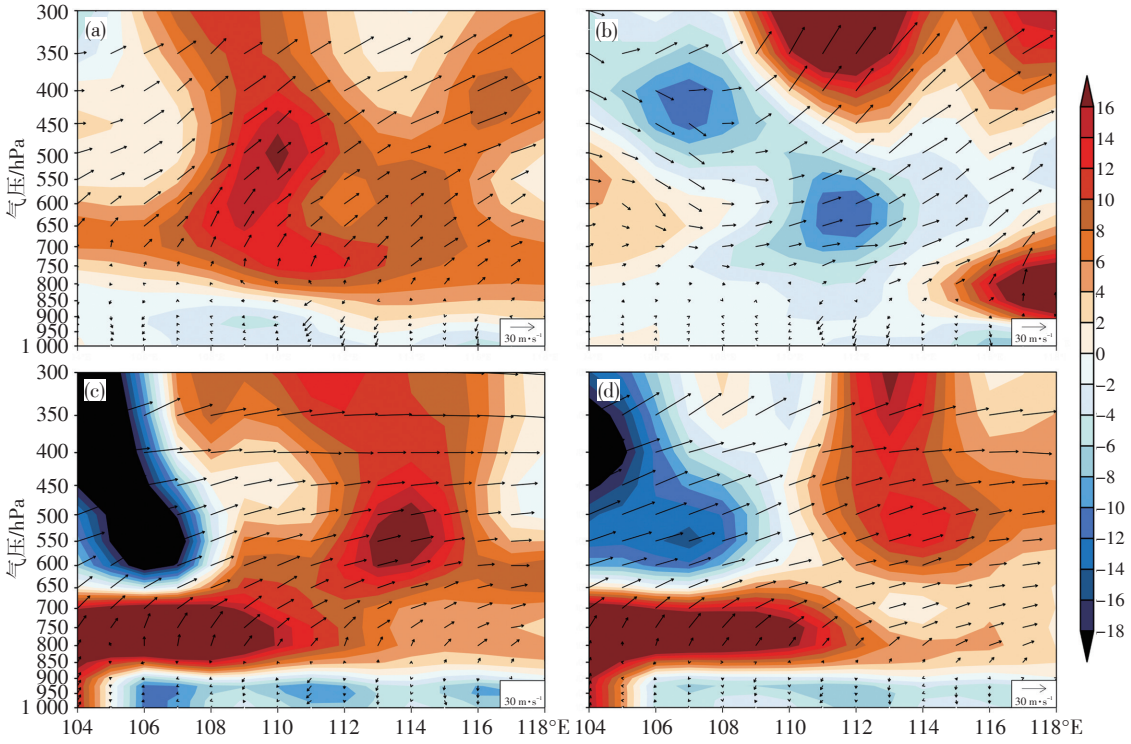


图8　2024年2月3日20时(a)、4日08时(b)沿29°N及23日20时(c)、24日08时(d)沿26°N温度平流(色斑，单位: 10^{-5} K·s^{-1})与风场(矢量)纬向剖面图

Fig. 8 Zonal cross section of temperature advection (color-filled areas, unit: 10^{-5} K·s^{-1}) and wind field (vector, unit: m·s^{-1}) along 29°N at (a) 20:00 BT on February 3 and (b) 08:00 BT on February 4 and along 26°N at (c) 20:00 BT on February 23 and (d) 08:00 BT on February 24, 2024

风，对流层中低层垂直风切变也达28～30 m·s^{-1}。

综上分析可知，“2.02”过程随着高原西风槽东移影响湖南，槽后强冷平流从中高层入侵并使得整层气温下降，为降雪提供了有利的热力条件；对流层中低层垂直风切变更大，导致雨雪强度更强，这与崔慧慧和苏爱芳(2019)在研究豫南特大暴雪过程得到的相关结论一致。而“2.21”过程低层冷平流更强、中高层暖平流更深厚，从而也更有利于产生持续性冰冻。

为进一步了解温度平流对上述两次过程不同雨雪相态转换的作用，选取两次过程降雪中心(张家界)和冰冻中心(郴州)分析温度平流的演变特征。图9a给出“2.02”过程张家界站温度平流的时间–高度剖面。从中可见，2日20时至3日14时冷平流从近地层侵入，对流层中高层暖平流增强，最大达16×10^{-5} K·s^{-1}，形成下冷上暖温度层结；从3日17时至4日11时，500 hPa冷平流发展，对流层中层形成冷平流中心，并向对流层顶扩展，边界层以上深厚暖平流结构被破坏，对应该时段张家界出现降雪。由此次过程张家界站不同时刻温度层结图(图10a)可知，4日02时之前，该站800—700 hPa维持0 ℃左右等温层或强度仅为1～2 ℃暖性逆温层，4日08—14时整层转为低于0 ℃的温度层结，4日20时对流层中低层又出现强度达3 ℃的暖性逆温层。由此表明，对流层中层冷平流入侵是张家界站反复出现冰粒或冻雨、纯雪等相态转变的主要成因。

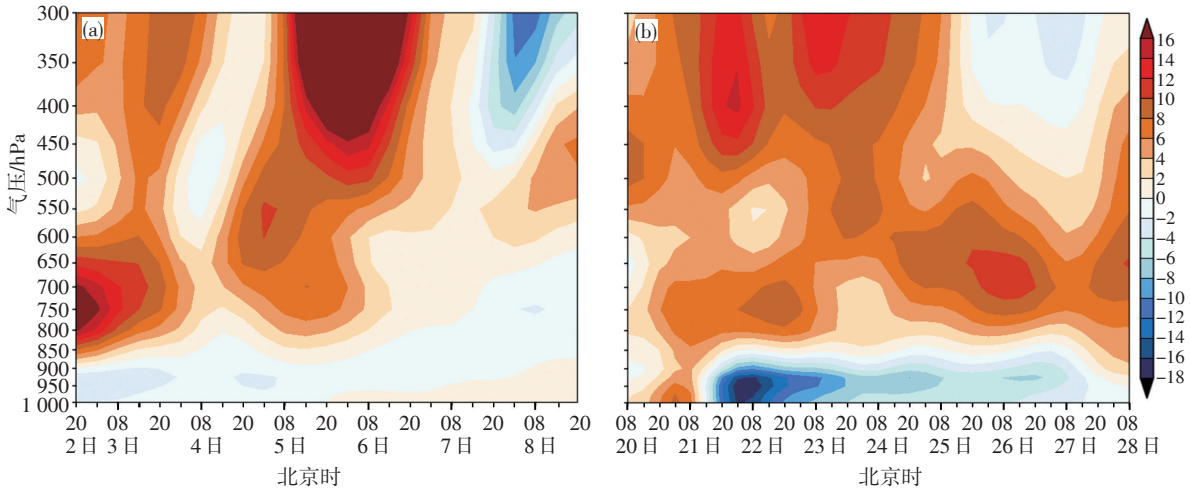


图9 2024年2月2日20时至8日20时张家界站(a)及20日08时至28日08时郴州站(b)温度平流(单位:10^{-5} K·s^{-1})时间–高度剖面

Fig. 9 Height–time cross–section of advection (unit: 10^{-5} K·s^{-1}) (a) at Zhangjiajie station from 20:00 BT on February 2 to 20:00 BT on February 8, 2024 and (b) at Chenzhou station from 08:00 BT on February 20 to 08:00 BT on February 28, 2024

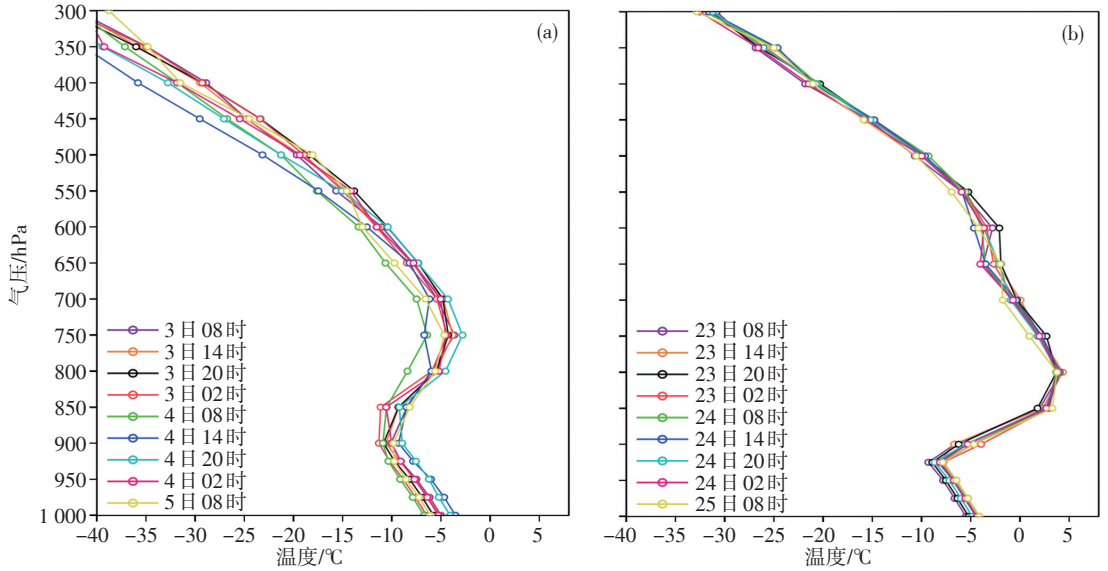


图10 2024年2月3日08时至5日08时张家界站(a)和2月23日08时至25日08时郴州站(b)不同时次温度层结曲线

Fig. 10 Temperature profiles every 6 hours (a) at Zhangjiajie station from 08:00 BT on February 3 to 08:00 BT on February 5, 2024 and (b) at Chenzhou station from 08:00 BT on February 23 to 08:00 BT on February 25, 2024

另从“2.21”过程郴州站温度平流、垂直速度、风场的时间–高度剖面(图9b)可见，22日02时降雪开始时该站边界层至1 000 hPa有强冷平流入侵，其中心达−14×10^{-5} K·s^{-1}，850 hPa以下均为强冷平流控制，对流层中层

至对流层顶为暖平流，这种下冷上暖层结持续到26日08时该过程结束。再从该过程郴州站不同时刻温度层结图(图10b)可见，前期近地层强冷平流造成1 000 hPa气温迅速降至-3 ℃左右，冻结层在1 000—900 hPa，其中925 hPa降幅最大，温度低至-8 ℃，暖性逆温层仍位于850—700 hPa，厚度1 500 m，最大逆温强度3～4 ℃。分析表明，“2.21”过程冻结层高度明显偏低，这与姚蓉等(2012)在分析2008年湖南极端冰冻过程温度层结特征时得出的结论“冰冻中心冻结层高度低于850 hPa”一致，同时也佐证了超低空强冷平流持续输入是此次雨雪冰冻天气能够维持的重要原因。

4.3 水汽输送与贡献

水汽输送层次及强度对雨雪冰冻强度起到重要作用。通过对比分析“2.02”和“2.21”过程湖南区域水汽通量散度演变(图略)可知，两次过程水汽汇合层均集中在对流层中低层。因此，针对两次过程降雪中心和冰冻大值区，选择3 000 m为初始追踪高度，其中“2.02”过程以暴雪区(110°—112°E，28°—30°N)为模拟区，模拟时段为2024年2月1日08时至7日08时，后向追踪120 h，计算得到486条轨迹参与聚类，依据方差增长率(TSV)聚类到4条通道时出现陡增，故最终聚类确定为4类。而“2.21”过程选取强降雪区(111°—114°E，25.5°—27°N)为模拟区，模拟时段为2024年2月21日08时至27日08时，后向追踪120 h，计算得到672条轨迹参与聚类，依据TSV聚类到3条通道时发生陡增，聚类通道确定为3类。为探讨两次过程强雨雪区水汽输送特征以及水汽在输送过程中热量变化带来的影响，图11给出“2.02”和“2.21”两次过程水汽通道的空间分布及其高度随时间变化，表1给出图8中两次过程不同通道轨迹总数与比湿、水汽通量的贡献率和假相当位温。

从图11a、c和表1中可见，“2.02”过程，源于阿拉伯海的偏西通道，轨迹数占比28.21%，比湿和水汽的贡献率约为31%，是主要传输通道，为强降雪区提供的水汽最多，假相当位温(θ_{se})达304 K，暖而湿的水汽经由阿拉伯海海面获得增加，气块移动速度较快，起始传输高度变化不大，以偏西气流东传时，越湖南西部的雪峰山脉高度略有上升，过山后下降输送至暴雪区。第二条地中海通道，气块传输高度较高，初始高度在500 hPa附近，气块经由伊朗高原东行，穿越云贵高原后，其高度降低至700 hPa以下，以西南通道向湖南地区输送水汽，轨迹数占比34.40%，该通道比湿和水汽贡献率接近30%，气块移速较慢，θ_{se}较大，为暴雪区输送暖湿而充沛的西南气流。第三条是来自非洲的远距离传输通道，占比为22.01%，比湿和水汽的贡献率为24%左右，水汽主要来源于非洲大陆，气块起

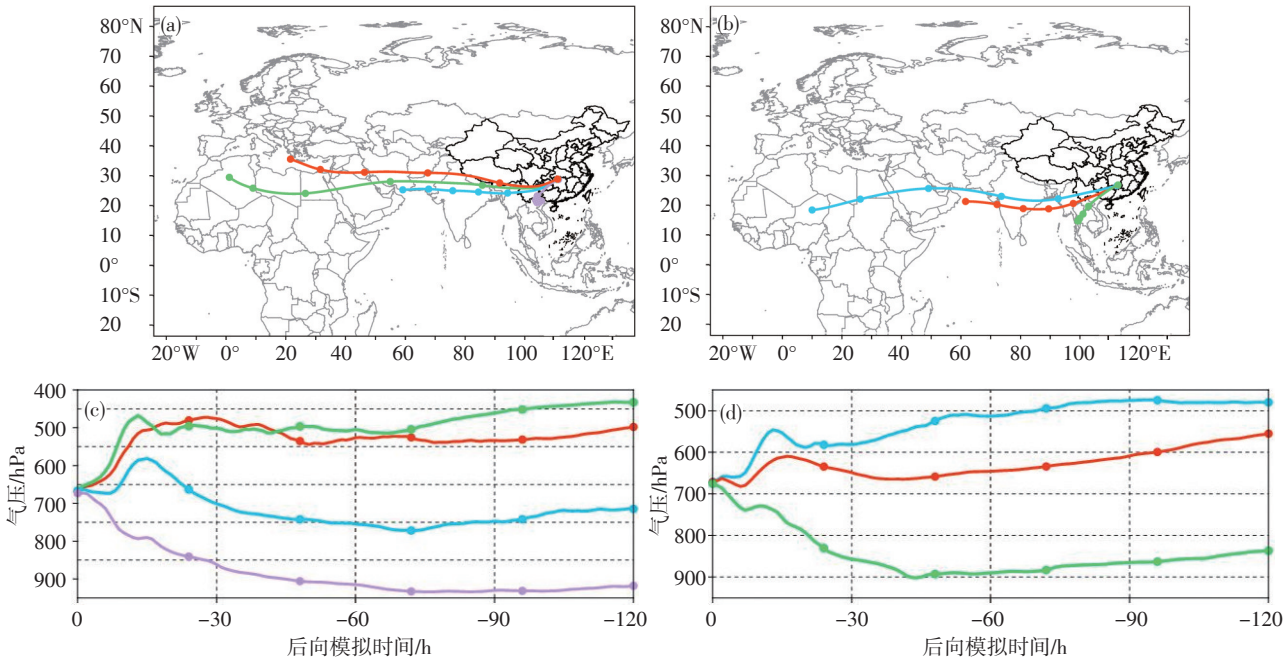


图11“2.02”过程(a, c)和“2.21”过程(b, d)的水汽通道空间分布(a, b)及其高度随时间变化(c, d)

图a、c中，红色、绿色、蓝色和紫色线段分别表示地中海通道、阿拉伯海通道、非洲通道、中南半岛通道；图b、d中，红色、绿色和蓝色线段分别表示阿拉伯海通道、南海通道、非洲通道

Fig. 11 (a, b) Spatial distribution and (c, d) the variation with time of water vapor channels during the two rainfall/snowfall and freezing events with low temperature in Hunan Province from (a, c) February 2 to 6 and (b, d) from February 21 to 26 in 2024. In Fig. 11a and Fig. 11c, red, green, blue and purple lines mark the Mediterranean channel, Arabian Sea channel, Africa channel and Indochina Peninsula channel, respectively. In Fig. 11b and Fig. 11d, red, green and blue lines mark the Mediterranean channel, Arabian Sea channel and Africa channel, respectively.

表1“2.02”和“2.21”湖南区域性低温雨雪冰冻天气过程各通道轨迹总数及比湿和水汽通量贡献率与假相当位温

Table 1 Total number of the trajectory of the different water vapor channels, contribution ratio of specific humidity and water vapor, and the pseudo-equivalent potential temperature for the two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures in Hunan Province from February 2 to 6 and from February 21 to 26 in 2024

天气过程	通道	轨迹总条数	比湿贡献率/%	水汽通量贡献率/%	假相当位温/K
“2.02”过程	地中海通道	161	29.59	29.30	303.62
	阿拉伯海通道	132	29.92	30.14	304.02
	非洲通道	103	24.10	23.82	303.80
	南海通道	72	16.49	16.75	303.47
“2.21”过程	阿拉伯海通道	364	55.10	55.66	309.77
	非洲通道	229	31.45	30.56	309.47
	南海通道	79	13.45	13.78	309.56

始高度达500 hPa，传输高度较高，传输速度很快，以偏东路径进入湖南北部强降雪区。而来自南海的水汽通道，气块高度很低，接近洋面，水汽贡献率不足15%，气块先西北行再转为东北行，移速很慢，可见冬季南海洋面的水汽远不如西南通道带来的水汽充沛。

再从图11b、d和表1中可见，“2.21”过程，阿拉伯海通道为主要传输通道，气块高度在700 hPa附近，经由印度半岛东行，在孟加拉湾水汽获得二次增长，最后过云贵高原南侧向湖南南部传输，该条通道轨迹数占比达54.17%，比湿和水汽贡献率也超过55%，θ_{se}最大，约310 K，为湘南冰冻区提供了丰富的暖湿水汽。第二条源自非洲地区的远距离通道初始高度较高，在500 hPa附近，前期水汽通道高度变化不大，水汽翻过云贵高原后高度下降传输至湘南地区，比湿和水汽贡献率30%左右。第三条通道为南海通道，暖湿气流以东北路径传输，遇南岭山脉爬升，水汽高度抬升后输送至冰冻区。可见三支气流均为暖湿气流，在黔桂交界处叠加传输，这种强的暖湿气流在边界层冷平流上爬升，形成下冷上暖层结，与前述结论一致。

综上可知，两次过程的主要水汽源地为阿拉伯海，对流层中层西南暖湿空气随500 hPa南支槽或其分裂的小槽移动，比湿和水汽贡献率最大，低槽不仅为冬季雨雪过程带来动力作用，同时还提供了充沛水汽。“2.02”过程中，源自非洲和地中海的两支远距离通道也为强降雪区提供了超过一半的水汽，“2.21”过程中，来自南海和阿拉伯海洋面及非洲的三条通道叠加传输暖湿气流，水汽含量更大，θ_{se}也更高，说明此次过程更暖的暖湿气流为冰冻提供了水汽和暖层条件，这是造成湘南强冰冻的重要原因。

5 结论与讨论

本文利用常规地面高空资料、加密自动站资料和NCEP再分析资料，从环流背景、物理机制方面，对这两次过程的物理成因进行了细致分析和诊断研究，主要结论如下：

(1) 两次过程的环流背景存在明显差异，“2.02”过程发生在南支槽和西风槽同位相叠加东移的大尺度背景下，“2.21”过程发生在阻高崩溃导致寒潮爆发的背景下，受南支槽上小波动影响反复出现雨雪转换。

(2) 两次过程均存在低层强锋区，其中“2.21”过程出现较大的南北温差梯度(大于20 ℃)，这可能是导致强寒潮天气发生的重要指征。另外，锋区增强时段与雨雪冰冻加强时段一致，低层锋生函数加强与减弱对两次过程雨雪冰冻强度演变都有较好的指示意义。

(3) 冷暖平流输送层次有所差异，但均表现出下冷上暖温度层结，其中“2.02”过程主要受南支槽东移带动中层强冷平流入侵，导致整层气温下降，“2.21”过程超低空强冷平流持续输入是导致此次雨雪冰冻天气的重要降温机制之一。另外，对流层中低层垂直风切变更大，导致雨雪强度更强。

(4) 两次过程主要水汽源地为阿拉伯海，对流层中层西南暖湿空气随500 hPa南支槽或其分裂的波动槽移动，比湿和水汽贡献率最大，低槽不仅为冬季雨雪过程带来动力作用，同时还提供了充沛水汽。“2.02”过程中，源自非洲和地中海的两支远距离通道也为强降雪区提供了超过一半的水汽。“2.21”过程中，来自南海和阿拉伯海洋面、低纬内陆的三条通道叠加传输暖湿气流，为冰冻提供了水汽和暖层条件，这也是造成湘南强冰冻的重要原因。

在湖南省以往雨雪冰冻天气预报业务中，预报员已经关注到槽、冷高压强度、气压特征线以及动热力物理量对雨雪相态转换、雨雪加强的部分诊断指征，但存在样本案例较少，每次均对应不同指标的不足。本文通过两次区域性雨雪冰冻过程的研究，探讨了雨雪冰冻天气的降温机制，提炼出湖南水汽主要输送通道及其对雨雪区的贡献。然而，在雨雪相态精细化预报技术上仍存在不足，其原因一是降水相态监测受自动观测误差影响较大且人工加密观测仅在国家基本

站开展，二是雨雪相态演变与气象要素垂直分布密切相关，现有的新型垂直观测布设密度不够，给预报指标提炼带来很大难度。下一步将通过对偏振雷达、微波辐射计、雨滴谱仪等新型观测资料的分析，揭示水凝物微物理结构特征，深化相态转换技术方法研究。

参考文献(References):

陈百炼,杨富燕,彭芳.2020. 凝冻灾害特征及其天气成因分析[J].自然灾害学报,29(1):175–182. Chen B L, Yang F Y, Peng F, 2020. Characteristics of the freezing disaster and its weather causes [J]. Journal of Natural Disasters,29(1):175–182 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2020.0118

陈红专,叶成志,陈静静,等.2019. 2017年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J].气象,45(9):1213–1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al. 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017 [J]. Meteorological Monthly,45(9):1213–1226 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.09.003

崔慧慧,苏爱芳.2019. 2018年初豫南特大暴雪过程的特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):169–176. Cui H H, Su A F. 2019. Analysis on characteristics and causes of a heavy snowstorm event in southern Henan in the beginning of January 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):169–176 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.02.009

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,2018, 37(5):410–420 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2018.05.003

高松影,赵婷婷,宋丽丽,等.2020.辽宁省冬季区域暴雪水汽输送特征[J].冰川冻土,42(2):439–446. Gao S Y, Zhao T T, Song L L, et al., 2020. Transporting characteristics of snowstorm water vapor over Liaoning Province in winter [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,42(2): 439–446 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0240. 2020. 0046.

胡鹏宇,徐爽,陈传雷,等.2018.辽宁省3次暴雪天气过程雷达特征对比分析[J].气象与环境学报,2018,34(3): 18–27. Hu P Y, Xu S, Chen C L, et al. 2018. Comparative analysis of the radar echo characteristics of three heavy snowfall events in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment,34(3):18–27 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2018.03.003

胡燕,刘红武,赵恩榕,等.2023. 2022年初湖南两次灾害性大暴雪成因分析[J].灾害学,38(1):80–87. Hu Y, Liu H W, Zhao E R, et al. 2023. Analysis of causes of two disaster heavy snowstorms in Hunan in early 2022 [J]. Journal of Catastrophology,38(1):80–87 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1000 –811X.2023.01.013

胡钰玲,赵中军,康彩燕,等.2017.中国南方2008年与2016年低温雨雪冰冻天气过程对比分析[J].冰川冻土,39(6):1180–1191. Hu Y L, Zhao Z G, Kang C Y. 2017. A comparative study of the two weather processes with cold and snowing in southern China in 2008 and 2016 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,39(6):1180 –1191 (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]. Torrential Rain and Disasters,36(6): 566–572 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.010

刘红武,李振,唐林,等.2020. 2018年12月湖南极端低温暴雪环流特征及成因分析[J].暴雨灾害,39(5):487–495. Liu H W, Li Z, Tang L, et al. 2020. Circulation characteristics and causes of extreme low temperature and blizzard in Hunan in December 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters, 39(5):487–495 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.05.007

刘建勇,顾思南,徐迪峰.2013.南方两次降雪过程的降水相态模拟研究[J].高原气象,32(1):179–190. Liu J Y, Gu S N, Xu D F. 2013. Simulation study on precipitation phase state in two snowfall processes of south China [J]. Plateau Meteorology,32(1):179–190 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00018.

刘裕禄,岳如画,姚叶青.2024.皖南山区一次暴雪过程地转适应锋生条件分析[J].暴雨灾害,43(1): 23–31. Liu Y L, Yue R H, Yao Y Q. 2024. Analysis of geostrophic adjustment to frontogenesis conditions during a heavy snowstorm in the mountainous area of southern Anhui Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):23–31 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2023–092.

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

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–temporal distributions and temperature–moisture structure of freezing rain in China [J]. Plateau Meteorology,30(3): 692–699 (in Chinese).

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

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).

王慧清,付亚男,孟雪峰.2019.内蒙古东北部地区一次极端降雪过程的水汽输送特征[J].干旱气象,37(2):277 –287. Wang H Q, Fu Y N, Meng X F, 2019. Analysis on Characteristics of water transportation during an extreme snowfall process in the Northeast of Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Meteorology,37(2):277 –287 (in Chinese). doi: 10.11755/j.issn.10036–7639(2019)–02–0277

吴蔚,温之平,陈运光,等.2012.华南冬春降水的年际变化及其与水汽输送的联系[J].热带气象学报,28(2):187–196. Wu W, Wen Z P, Chen Y G, et al. 2012. Interannual variability of winter and spring precipitation in South China and its relation to moisture transport [J]. Journal of Tropical Meteorology,28(2):187–196 (in Chinese)

熊秋芬, 张玉婷,姜晓飞,等.2018.锢囚气旋钩状云区暴雪过程的水汽源

地及输送分析[J].气象,44(10):1267-1274. Xiong Q F, Zhang Y T, Jiang X F, et al. 2018. Analysis of moisture source and transport of snowstorm in hooked cloud area of an occluded cyclone [J]. Meteorology,44(10): 1267-1274 (in Chinese)

许爱华,刘波,郑婧,等.2011.江西冻雨气候特征分析及频发地带成因探讨[J].暴雨灾害,30(1):6-10. Xu A H, Liu B, Zheng J, et al. 2011.Climatic characteristics and cause on frequent freezing rain zone in Jiangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,30(1):6-10 (in Chinese)

杨贵名,孔期,毛冬艳,等.2008. 2008年初"低温雨雪冰冻"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)

杨贵名,毛冬艳,孔期. 2009. "低温雨雪冰冻"天气过程锋区特征分析[J].气象学报,67(4):652-665. Yang G M, Mao D Y, Kong Q. 2009. Analysis of the characteristics of the cryogenic freezing rain and snow weather [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(4):652-665 (in Chinese)

姚晨,杨祖祥,朱月佳,等. 2018. 2018年初安徽省两次罕见大暴雪过程的对比分析[J].暴雨灾害,37(5):401-409. Yao C, Yang Z X, Zhu Y J, et al. 2018. Comparative analysis of two rare heavy snowstorm events in Anhui during January 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,37(5): 401-409 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.002

姚蓉,许霖,张海,等.2012.湖南2008/2011年两次低温雨雪冰冻灾害成因雨影响对比分析[J].灾害学,27(4): 75-79. Yao R, Xu L, Zhang H, et al. 2012. A comparative study of causes and effects of two cryogenic freezing rains in Hunan Province [J]. Journal of Catastrophology,27(4): 75-79 (in Chinese)

叶成志,吴贤云,黄小玉.2009.湖南省历史罕见的一次低温雨雪冰冻灾害天气分析[J].气象学报,67(3):488-500. Ye C Z, Wu X Y, Huang X Y. 2009. A synoptic analysis of the unprecedented severe event of the consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province [J]. Acta Meteorologica Sinica, 67(3):488-500 (in Chinese)

曾钰婷,张宇,周可,等.2020.青藏高原那曲地区夏季水汽来源及输送特征分析[J].高原气象,39(3):467-476. Zeng Y T, Zhang Y, Zhou K, et al. 2020. Analysis on the source and transport characteristics of moisture in Naqu of the Qinghai Tibetan Plateau in summer [J]. Plateau Meteorology,39(3):467-476 (in Chinese). doi:10. 7522/j. issn.1000-0534. 2019. 00120

张俊兰,崔彩霞,陈春艳.2013.北疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J].高原气象,32(4):1115-1125. Zhang J L, Cui C X, Chen C Y. 2013. Study on water vapor characteristic of typical heavy snowstorm case in Northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology,32(4):1115-1125 (in Chinese). doi:10.7522/ j.issn.1000-0534.2012.00105

张腾飞,鲁亚斌,张杰,等.2006.一次低纬高原地区大到暴雪天气过程的诊断分析[J].高原气象,25(4):696-703. Zhang T F, Lu Y B, Zhang J, et al. 2006. Diagnostic analysis of a heavy snowstorm processes in lower latitude plateau of China [J]. Plateau Meteorology,25(4):696-703 (in Chinese)

张万诚,万云霞,任菊章,等. 2011.水汽输送异常对2009年秋、冬季云南降水的影响研究[J].高原气象,30(6):1534-1542. Zhang W C, Wan Y X, Ren J Z. et al. 2011. Analysis of water vapor transportation and its influence on rainfall anomaly in Yunnan autumn and winter of 2009 [J]. Plateau Meteorology,30(6):1534-1542 (in Chinese)

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, Sun J H. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over Southern China during January-February 2008 [J]. Climate and Environmental Research, 13(4):351-367 (in Chinese)

周玉淑,颜玲,吴天贻,等. 2019.高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J].大气科学,43(4): 813-830. Zhou Y S, Yan L, Wu T Y, et al. 2019. Comparative analysis of two rainstorm processes in Sichuan Province affected by Tibetan Plateau vortex and Southwest vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(4):813-830 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18147

Bottyan E, Czuppon G, Weidinger T, et al. 2017. Moisture source diagnostics and isotope characteristics for precipitation in east Hungary: implications for their relationship [J]. Hydrological sciences journal,62(9): 2049-2060

Chen G, 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

Chen H Y, Chen Y N, Li D L, et al. 2022. Identifying water vapor sources of precipitation in forest and grassland in the north slope of the Tianshan mountains, Central Asia [J]. Journal of Arid LandIssue,14(3):297-309. doi:10.1007/s40333-022-0090-0

Dirmeyer P A, Schlosser C A, Brubaker K L. 2009. Precipitation, recycling, and land memory: An integrated analysis [J]. Journal of Hydrometeorology,10(1): 278-288. doi:10.1175/2008JHM1016.1

He X L, Qin Y W. 2021. Atmospheric Circulation and water vapor transport characteristics of heavy snowstorm in Northern Hubei on 3-4 January, 2018 [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,45(9): 28-33

Hu Y, Zhao E R, Liu H W, et al. 2023. Climatic characteristics of heavy snowfall and water vapor transport characteristics of its typical events in Hunan Province [J]. Advances in Meteorology, Ariticle ID 9509493: 1-15. doi:10.1155/2023/9509493

Li L T, Dolman A J, Xu Z X. 2016. Atmospheric moisture sources, paths, and the quantitative importance to the eastern Asian monsoon region [J]. Journal of Hydrometeorology,17(2):637-649. doi:10.1175/JHM-D-15-0082.1.2016

Rafiq M, Para J A, Kesarkar A P, et al. 2021. A study of extreme snowfall during 2019 and 2020 across the Kashmir Himalaya [J]. Weather,76(10): 333-337

Salih A M, Zhang Q, Tjernström M. 2015. Lagrangian tracing of Sahelian Sudan moisture sources [J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres,120(14):6793-6808. doi:10.1002/2015JD023238.

Shi Y, Jiang Z, Liu Z, et al. 2020. A Lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitation in East China in different stages of the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Climate,33(3): 977-992. doi:10.1175/JCLI-D-19-0089.1

Tian Y, Yao R, Zhao E R, et al. 2022. The Space conceptual models and water vapor characteristics of typical rainstorms during Plum Rain Season [J]. Advances in Meteorology, Article ID 6971110:1-16. doi: 10.1155/2022/6971110

Wiley J, Mercer A. 2020. An updated synoptic climatology of Lake Erie and Lake Ontario Heavy Lake-Effect snow events [J]. Atmosphere,11(8): 2-21, doi:10.3390/atmos11080872

(责任编辑 王银平)