陶亦为,张芳华,于碧馨,等.2024. 2024年1月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析[J].暴雨灾害,43(4):407-418. TAO Yiwei, ZHANG Fanghua,YU Bixin, et al. 2024. Analysis of the causes and forecast of the extremely heavy snowfall in Altay Area that triggered avalanches in January 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):407-418 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-059

2024年1月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析

陶亦为[1,2],张芳华[1],于碧馨[2],李桉孛[2],胡艺[1],王丹[3]

(1. 国家气象中心,北京 100081;2. 新疆气象台,乌鲁木齐 830002;3. 新疆阿勒泰地区气象局,阿勒泰 836500)

摘　要:在北疆典型双阻型暖区暴雪天气环流形势稳定影响下,2024年1月6—12日新疆北部阿勒泰出现一次极端强降雪过程,多站突破历史同期极值,导致阿勒泰山区多处出现雪崩,本文基于国家站和区域气象观测站逐小时实况观测资料、ERA5再分析资料、区域模式(CMA-MESO、CMA-TYM)和全球模式(CMA-GFS、ECMWF)预报资料,对此次过程的降雪特征、环流形势、极端性成因及模式预报性能进行分析,结果表明:(1) 强降雪过程呈持续时间长、累积降水量大、小时降水量多等极端性特征,根据环流形势演变和降雪特征,降雪过程可分为三个阶段。累积降水量分布呈平原地区向山区递增的特征,强降雪主要集中在第二、三阶段,以上两个阶段阿勒泰北部沿山地区和山区新增积雪大、小时积雪多、雪水比大,满足雪崩形成的关键气象条件。(2) 此次过程500 hPa强盛极锋锋区不断分裂短波系统先后东移影响阿勒泰,850—700 hPa长时间维持暖式切变线,并伴随强暖锋锋生,强降雪发生在300 hPa极锋急流出口辐散区、850 hPa切变线以北至700 hPa切变线附近区域。(3) 第二、三阶段阿勒泰北部尤其是北部山区水汽条件异常偏强,叠加地形增幅作用,低层动力抬升作用异常强盛,并长时间维持,是造成极端强降雪的重要原因。(4) 区域模式对强降雪预报好于全球模式,但对极端性预报能力仍有限。ECMWF极端预报指数预报产品(EFI)和国家气象中心集合平均异常天气预报产品(EMAF)在中期时效能较好地发现了极端天气信号,强化相关产品的应用,并结合模式定量预报结果作出调整,可进一步提升对极端天气事件的预报预警精细化服务效果。

关键词:新疆地区;阿勒泰;强降雪;极端性;雪崩

中图法分类号: P458.1　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-059

Analysis of the causes and forecast of the extremely heavy snowfall in Altay Area that triggered avalanches in January 2024

TAO Yiwei[1,2], ZHANG Fanghua[1], YU Bixin[2], LI Anbei[2], HU Yi[1], WANG Dan[3]

(1. *National Meteorological Center of CMA, Beijing* 100081; 2. *Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi* 830002; 3. *Altay Meteorological Bureau, Altay* 836500)

Abstract: Under the influence of the stable snowstorm circulation situation of the typical double-resistance type warm area in northern Xinjiang, an extremely heavy snowfall event occurred in Altay, from January 6 to 12, 2024. Several meteorological stations broke the historical maximum records for the same period, resulting in avalanches in several places of the Altay Mountains. This event can be divided into three stages according to the evolution of circulation situation and snowfall characteristics. In this study, the snowfall characteristics, circulation situation, extreme causes, and model forecasting performance of the event were analyzed using the hourly observation data of national and regional meteorological stations, ERA5 reanalysis data, and CMA-GFS, CMA-MESO, CMA-TYM, ECMWF model forecast data. The results are as follows: (1) The event was characterized by several extreme features, such as long duration, large accumulated precipitation, and large

收稿日期: 2024-04-03;**定稿日期:**2024-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42230612); 国家重点研发计划项目(2022YFC3003905); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01B54); 中国气象局青年创新团队项目(CMA2024QN04)

第一作者: 陶亦为,主要从事天气预报技术研究。E-mail: taoyw@cma.gov.cn

通信作者: 张芳华,主要从事天气预报技术研究。E-mail: zfhnmc@126.com

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

hourly precipitation. The precipitation distribution was increasing from the plain areas to the mountain areas. The strong snowfall process mainly concentrated in the second and third stages. In these two stages, the increase in snow accumulation, large hourly snowfall, and high snow-to-water ratio in the mountainous areas along the northern Altay provided key meteorological conditions for the avalanches. (2) During this event, a strong polar front at 500 hPa continuously split short-wave systems, which successively moved eastward to affect Altay. The warm shear line at 850-700 hPa was maintained for a long time, accompanied by strong warm front frontogenesis. Heavy snowfall occurred in the divergence area at the exit of the polar front jet at 300 hPa, from the north of the shear line at 850 hPa to the regions near the shear line at 700 hPa. (3) In the second and third stages, the water vapor conditions in the north of Altay, especially in the northern mountains, were abnormally strong. With the effect of terrain amplification, the low-level dynamic uplift was exceptionally strong and maintained for a long time. These were the important reasons for the extremely heavy snowfall. (4) The regional model performed better than the global model in predicting heavy snowfall, but the capability to forecast extreme snowfall was still limited. ECMWF Extreme Forecast Index (EFI) forecast product and the Ensemble Average Abnormal Weather Forecast (EMAF) product were better at identifying extreme weather signals at medium-range lead time. It is suggested to strengthen the application of related products and make adjustments according to the quantitative forecast results of the model to further improve the precision service effect of forecasting and warning of extreme weather events.

Key words: Xinjiang; Altay Area; heavy snowfall; extreme; avalanche

引 言

2024年1月6—12日，新疆北部阿勒泰出现一次极端强降雪过程，过程持续时间长，多站日降水量突破1月极值。受其影响，8—10日，阿勒泰各市县发生雪崩18处，其中，喀纳斯和禾木景区14处，哈巴河县2处，阿勒泰市公园路2处；至13日，共计至少发生31处雪崩，造成通向喀纳斯景区的道路中断，多车被埋，部分人员伤亡。强降雪是我国北方冬季发生的主要灾害性天气之一，严重影响交通、运输及工农业生产。新疆是我国冬季强降雪主要集中区之一，北疆则是新疆强降雪的高频区(刘玉莲等，2013)，且近年来北疆降雪呈逐渐增多趋势(杨霞等，2020)。尤其2010年1月北疆阿勒泰发生强降雪，降水量超历史均值7倍，给北疆人民生命财产造成严重威胁和巨大经济损失(赵俊荣等，2010；李如琦等，2015)，这引起了气象专家们对北疆强降雪的成因和机理的关注(于晓晶等，2017；朱蕾等，2020)。

暖区暴雪是北疆强降雪形成的主要天气形势之一(郭城等，2012)，暖区暴雪典型大尺度环流形势可分为双阻型、单阻型和两只锋区型(杨霞等，2013)，并且极锋急流在暖区暴雪中占主导地位(庄晓翠等，2016)。暖区暴雪的水汽主要源头在500 hPa上为大西洋及其沿岸，700 hPa上为大西洋、地中海和黑海及其沿岸；850 hPa上为中亚、地中海和黑海及其附近(庄晓翠等，2024)，并且上述源地水汽输送呈增长的趋势，这也造成近年来北疆降雪显著增加(Wang et al，2020)。王磊等(2016)基于T639模式对新疆北部暖区强降雪过程的预报效果开展了检验分析，结果表明模式在48 h预报时效内对暖区强降雪具有一定参考价值。

地形对降水的发生发展影响巨大(Roe，2005；Rotunno and Houze，2007)，北疆阿勒泰地处于阿尔泰山南麓，准噶尔盆地北缘，强降雪的发生和演变与阿勒泰北部东西向阿尔泰山的地形密切相关，由于地形因素造成的锋面结构变化对北疆降雪的微物理过程有明显影响(陈涛和崔彩霞，2012)。隆霄等(2012)通过地形敏感性数值试验进一步证明北疆阿勒泰地形对强降雪的落区与降雪强度影响重大。此外，阿勒泰北部山区是雪崩的高风险区(陈联君，2021)，雪崩的形成与气象条件(降水、气温、风等)及地形有直接关系(汶林科等，2016)。通常新增积雪达到30～50 cm是自然雪崩形成的关键，新增积雪达到1 m是引发极端雪崩的关键因素，同时当积雪密度和含水率相对低，新增积雪强度强(小时新增积雪深度≥2.5 cm)易形成持久脆弱层，从而形成不稳定雪层，有利于雪崩的形成(Schweizer et al.，2003；郝建盛等，2022)。

本文利用国家和区域气象观测站逐小时实况观测资料、ERA5再分析资料和CMA-GFS、CMA-MESO、CMA-TYM、ECMWF等模式预报资料，分析2024年1月6—12日发生在阿勒泰的极端强降雪过程的降雪特征、影响系统、环流形势演变、极端性成因及模式预报性能，并试图揭示本次气象有利条件和雪崩形成的关系，进一步提升对北疆极端强降雪的认识，以期为此类强降雪过程和次生灾害预警提供科学支撑。

1 资料和方法

本文使用的资料时段均为2024年1月6—12日，主要包括：(1) 国家气象信息中心提供的国家和区域气象观测站的逐小时降水量观测资料，用于分析强降雪实况特征。(2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代全球再分析资料(ERA5)，时空分辨率分别为1 h和0.25°×0.25°，要素包含不同高度层的高度场、温度场、风场、相对湿度、垂直速度等(Hersbach et al.，2020)，用于分析天气环流形势。天气环流形势异常性分析采用标准化异常度(记为S_A)方法(Hart and

Grumm，2001)，用于分析此过程天气环流形势偏离气候态的情况，计算公式如下

$$S_{\mathrm{A}}=\frac{O-\bar{H}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(H_t-\bar{H})^2}} \tag{1}$$

其中O为所分析时刻的变量，H和$\bar{H}$分别为气候样本变量和气候均值，n为气候样本集样本数，气候样本集的构建为某日前后15 d，即为31 d×30 a (气候态采用1991—2020年)，共计930个样本。(3) 采用中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)和ECMWF两家全球模式及中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)和中国气象局区域台风数值预报系统(CMA-TYM)两家区域模式，通过TS检验评估模式预报性能。并利用ECMWF极端预报指数(Extreme Forecast Index，EFI)预报产品(Lalaurette，2003；Zsótér，2006)和国家气象中心开发的集合平均异常天气预报产品(Ensemble Mean of Anomaly Forecast，EMAF) (陶亦为等，2023)开展强降雪预报评估。

2 强降雪实况

2024年1月6日09时—12日18时(北京时，下同)，新疆北部阿勒泰出现一次极端强降雪过程，过程持续达153 h，塔城和阿勒泰地区共43个测站降水量打破本站有记录以来1月日降水量极值。累积降水量分布呈平原向山区递增的特点，西部强于东部，阿勒泰河谷和平原地区累积降水量为1~23.3 mm，北部沿山及东部山区为11.8~62.1 mm，北部山区累积降水量为22.2~122.7 mm (图1)，禾木售票站(该站近喀纳斯和禾木景区雪崩区域)过程最大，累积降水量达122.7 mm。吉木乃县、哈巴河县、富蕴县、青河县新增积雪5~13 cm，北部沿山及东部山区部分地区新增积雪22~37 cm，北部山区部分地区新增积雪80~102 cm，局地累积雪深超200 cm，累积积雪深度极厚，有利于雪崩的形成。

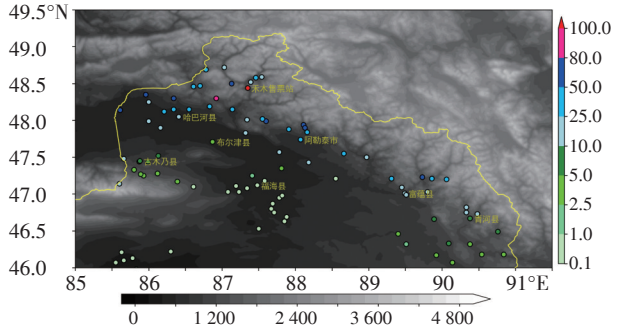


图1 2024年1月6日09时—12日18时阿勒泰气象观测站累积降水量(彩色圆点，单位：mm)和地形(阴影，单位：m)空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of accumulated precipitation (colored dot, unit: mm) at meteorological observation stations from 09:00 BT on 6 January to 18:00 BT on 12 January 2024, and topography (shaded, unit: m) in Altay Area

选取阿勒泰北部沿山地区西部、中部、东部的哈巴河县、阿勒泰市、富蕴县国家气象站，及北部山区的禾木售票站区域气象站数据，分析此次强降水过程的阶段性特征。根据环流形势演变和降水特征将过程分为三个阶段(图2)，第一阶段为1月6日09时—7日23时，阿勒泰北部山区先开始降雪，并向东、向南发展，山区降雪强于沿山及平原地区，北部山区各站累积降水量超10 mm，禾木售票站13.9 mm (图2d)，沿山及平原地区累积降水量为1~2.4 mm，上述地区小时降水量约0.1~1 mm。第二阶段为1月8日19时—10日09时，是阿勒泰西部和中部区域降雪最强阶段，哈巴河县(图2a)、阿勒泰市(图2b)累积降水量分别达15.1 mm和26.7 mm，其中阿勒泰市9日08时—10日08时日降水量突破该站1月极值；此阶段山区降雪仍最强，禾木售票站达36 mm (图2d)，占过程总降水量的29.3%；沿山和山区小时降水量约0.1~3 mm。第三阶段为10日11时—12日18时，是阿勒泰北部山区和东部区域降雪最强阶段，禾木售票站累积降水量达72.6 mm (图2d)，占过程总降水量的59.2%，该站10日08时—11日08时日降水量达59.5 mm，突破日降水量极值，最大小时降水量达8 mm；哈巴河县(图2a)、富蕴县(图2c)站最大小时降水量接近2.5 mm，也强于其他阶段。

综上，此次强降雪过程整体呈持续时间长、累积降水量大、小时降水强等极端性特征。降水量由平原地区向山区递增，强降水过程主要集中于第二、三阶段，其中第二阶段降水持续时间长，第三阶段小时降水强。有研究表明北疆雪水比气候均值为10:1~15:1 (符娇兰等，2022)，按照雪水比关系下限10:1统计，第二和第三阶段北部沿山地区和山区满足新增积雪深度厚、累积积雪深度大、小时积雪多的特征，又地处山区，以上特征满足Schweizer等(2003)和郝建盛等(2022)提出雪崩形成的关键气象条件和地形条件，尤其是禾木售票站过程累积积雪深度超过1 m，最大小时新增积雪达8 cm，有利于形成雪崩。后文将重点分析第二、第三阶段。

3 环流特征和影响系统

整个极端强降雪过程500 hPa欧亚中高纬一直维持“两脊一槽”经向环流，欧洲北部保持阻塞形势，贝加尔湖为高压脊区，新地岛至泰米尔半岛之间为深厚低涡，北疆处于槽前脊后区域，为典型双阻型暖区暴雪天气形势，300 hPa极锋急流在乌拉尔山南侧45—55°N南北摆动，中心风速达60 m·s^{-1}，北疆北部一直位于高空急流出口区右侧的分流区(图略)，为强降雪提

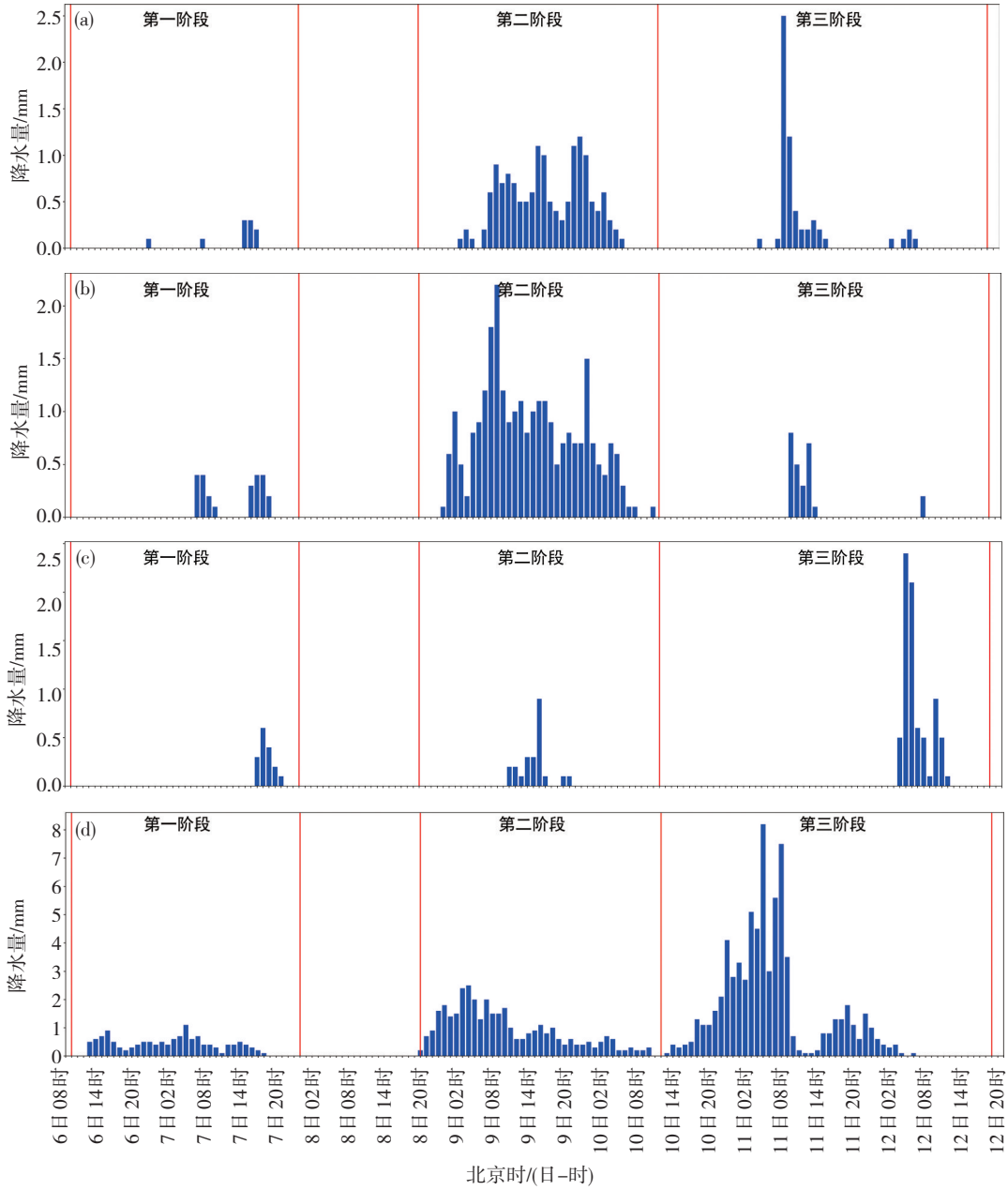


图2 2024年1月6日09时—12日18时阿勒泰地区哈巴河站(a)、阿勒泰站(b)、富蕴站(c)和禾木售票站(d)逐小时降水量

Fig. 2 Hourly precipitation at (a) Haba He County, (b) Altay City, (c) Fuyun County, and (d) Hemu ticket station in Altay Area from 09:00 BT on 6 January to 18:00 BT on 12 January in 2024

供了高空辐散条件。第二阶段(图3a)低涡中心略有南调,槽区向南伸至乌拉尔山南端,低涡逆转过程中东移北收,平直极锋锋区南压至50°N,分裂波动不断影响阿勒泰,阿勒泰位于500 hPa极锋锋区50 m·s^{-1}风速核右前方,强于典型过程风速核44 m·s^{-1} (杨霞等,2013),8日23时—10日04时阿勒泰上空强西风一直持续在32 m·s^{-1}以上,正涡度平流与上升运动强烈发展,产生第二阶段强降雪,且持续较长时间。第三阶段(图3b)欧洲北部500 hPa脊前偏北急流发展至52 m·s^{-1},环流经向度加大,引导极地冷空气向低涡内输送,低涡低槽发展东移南压,阿勒泰上空500 hPa风速进一步增大至36 m·s^{-1}以上,并维持7 h,受锋区波动影响产生第三阶段山区的强降雪。至12日白天阿勒泰上空偏北风量逐渐加大,冷空气侵入,降雪逐渐减弱结束。

整个过程阿勒泰700 hPa上均受暖式切变线影响,为位于48°N附近超过20 m·s^{-1}的偏西急流与迎着阿尔泰山的西南风所形成的西北-东南向切变系统,尤其第二、第三阶段切变系统更为显著(图3c、d),并在切变线周围形成强暖锋锋生(图3e、f)。在850 hPa上(图略),为位于47°N附近的偏西风与顺着阿尔泰山的东南风(第二阶段)或南风(第三阶段)所形成的西北—东南向切变线以及暖脊控制,同样伴随暖锋锋生,

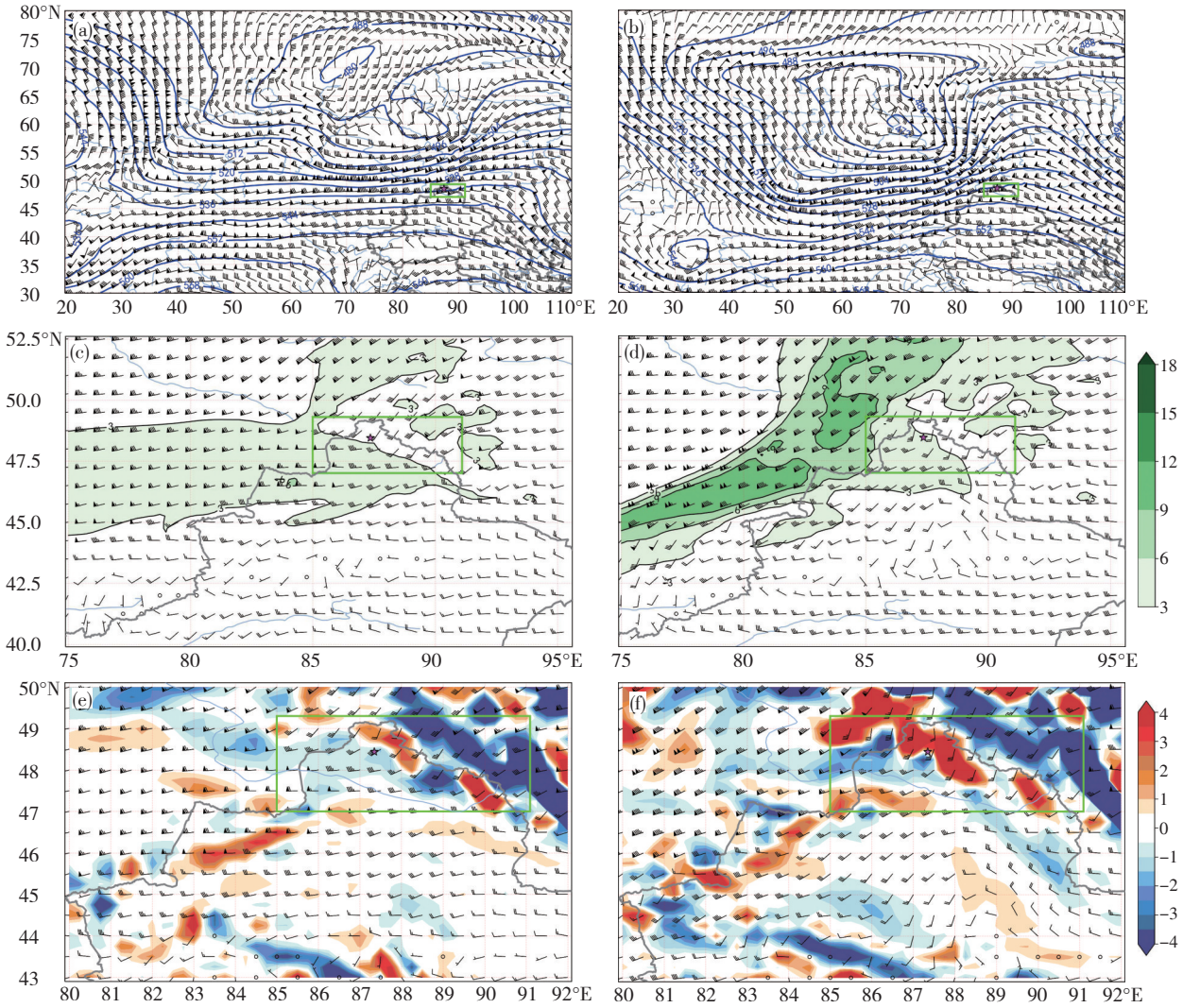


图3 2024年1月9日08时(a，c，e)和11日02时(b，d，f) 500 hPa位势高度场(等值线)和风场(风向杆，单位：m·s^{-1}) (a，b)、700 hPa风场和水汽通量(填色，单位：g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) (c，d)和700 hPa风场和锋生函数(填色，单位：10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) (e，f)(粉色五角星和绿色框分别代表禾木售票站和阿勒泰地区，下同)

Fig. 3 The distribution of (a, b) 500 hPa geopotential (isoline) and wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}), (c, d) 700 hPa wind field and water vapor flux (color-filled, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), and (e, f) 700 hPa wind field and frontogenesis function (color-filled, unit: 10^{-9}·K·m^{-1}·s^{-1}) at (a, c, e) 08:00 BT on 9 January and (b, d, f) 02:00 BT on 11 January, 2024 (The pink star and green box represent HeMu ticket station and Altay Area, respectively, the same below)

且第三阶段700 hPa (图3f)和850 hPa (图略)锋生更强，以上两个阶段强降雪区位于850 hPa切变线以北至700 hPa切变线附近，且受低层切变系统和强暖锋锋生作用影响第三阶段山区降雪更强。

从水汽源地与水汽输送来看，整个过程500—850 hPa水汽输送通道一直维持，其中500 hPa存在两支水汽输送通道(图略)，北支为欧洲北大西洋-里海、南支为地中海-黑海-里海，两支在中亚合并，并在阿勒泰上空维持；700 hPa上不同阶段的水汽源地有所不同，第二阶段水汽源地为黑海-里海，水汽通道在阿勒泰维持(图3c)，第三阶段为印度洋-里海，水汽通道持续影响阿勒泰，且阿勒泰西部水汽输送作用更强(图3d)；在低层850 hPa上水汽源地均为黑海-里海(图略)。以上均符合典型北疆暖区暴雪水汽源地及输送特征(庄晓翠等，2024)。

综上，此次极端强降雪过程是一次典型的双阻型暖区暴雪天气形势，500 hPa强盛极锋锋区不断分裂短波系统先后东移影响阿勒泰，850—700 hPa长时间维持暖式切变线，并伴随强暖锋锋生，且500—850 hPa一直维持水汽输送通道，强降雪发生在300 hPa极锋急流出口辐散区、850 hPa切变线以北至700 hPa切变线附近区域，尤其第三阶段北部山区大尺度上升运动、暖锋锋生和水汽输送更强，这也是第三阶段山区强降雪更强的原因。

4 强降雪极端性及成因分析

4.1 水汽和动力条件

上节分析可见，此次过程受高空低涡前部持续偏西或西南气流影响，500—850 hPa水汽输送维持，第一阶段阿勒泰大部整层可降水量在2～4 mm，到第二、三阶段整层可降水量上升至4～12 mm (图略)，第三阶段禾木售票站1月11日02时降雪最强时段整层可降水量超6 mm (图4a)，阿勒泰整层可降水量标准化异常度(S_A)≥2个标准差(σ)，尤其北部山区超3 σ。哈巴河县、阿勒泰市、富蕴县、禾木售票站四站强降雪过程整层可降水量S_A均大于0 σ (图4b)，尤其在第二和第三阶段极端偏多，部分时段S_A≥3 σ。Grumm and Hart (2001)指出S_A=3σ相当于正态分布99.9 %，反映出强降雪过程阿勒泰北部尤其是北部山区水汽条件异常偏强。

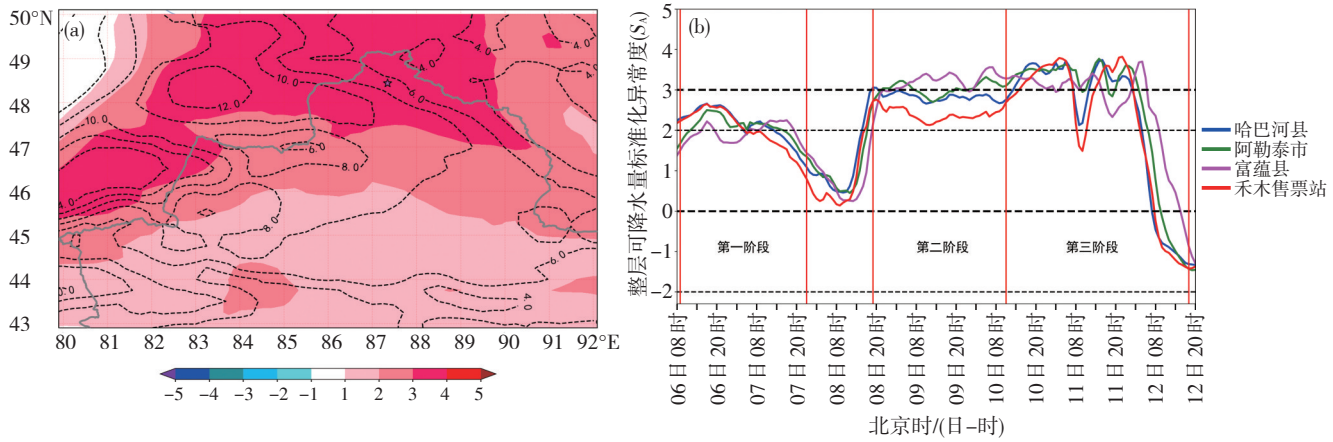


图4 2024年1月11日02时大气整层可降水量(等值线, 单位: mm)及其标准化异常度(S_A) (填色, 单位: σ)空间分布(a)和1月6日08时—12日20时哈巴河县、阿勒泰市、富蕴县和禾木售票站大气整层可降水量标准化异常度(S_A)随时间变化(b)

Fig. 4 The spatial distribution of (a) atmospheric precipitable water (isoline, unit: mm) and standardized anomaly (S_A) value (color-filled, unit: σ) at 02:00 BT on 11 January, (b) S_A value of atmospheric precipitable water in Haba He County, Altay City, Fuyun County, and Hemu ticket station from 08:00 BT on 6 January to 20:00 BT on 12 January, 2024

在第二、三阶段大部分时间，哈巴河县、阿勒泰市、富蕴县、禾木售票站四站700 hPa南风分量S_A＞1 σ、垂直速度S_A＜−2 σ (图5b、6b)，均异常偏强；850 hPa情况类似(图略)，说明阿勒泰北部低层动力抬升作用异常强盛，对区域性强降雪非常有利。尤其第三阶段阿勒泰11日02时700 hPa (图5a)和850 hPa (图略)南风风量异常偏强，尤其山区南风风量S_A≥2 σ，南风风量异常偏强一方面对于暖区的发展和维持起到重要作用，另外也增强了地形强迫作用。相应地，阿勒泰北部700 hPa (图6a)和850 hPa (图略)垂直上升速度也异常偏强。

由图4b、5b和6b也可看出，禾木售票站第三阶段的整层可降水量、中低层南风分量和垂直速度均异常偏强，且持续时间较长，尤其是11日02时前后禾木售票站700 hPa垂直速度S_A≤−5 σ，体现出极端强盛的动力作用，与该站降雪效率最高时段吻合，说明北部山

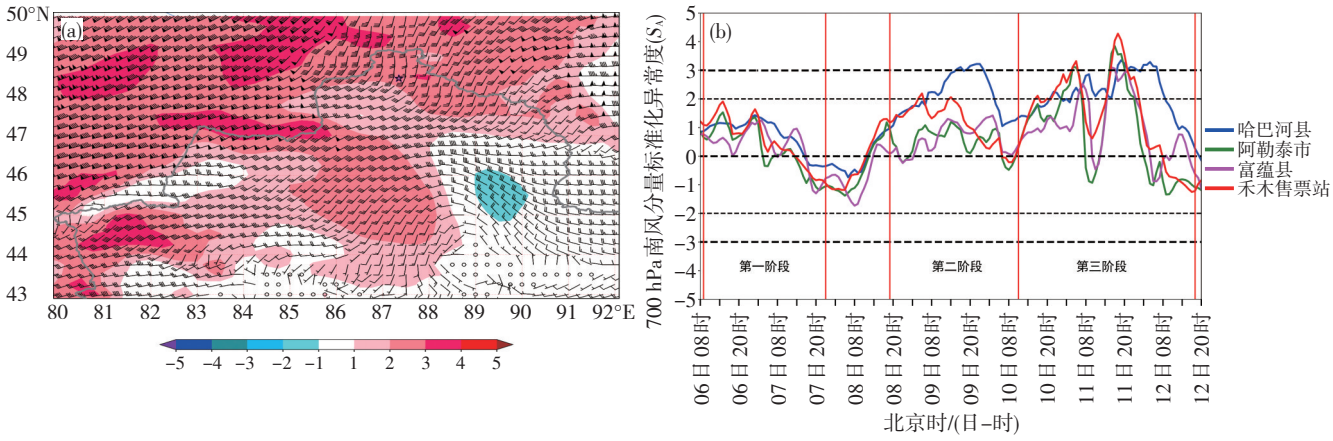


图5 2024年1月11日02时700 hPa风场(风向杆)及其南风分量标准化异常度(S_A) (填色, 单位: σ)空间分布(a)和1月6日08时—12日20时南风分量标准化异常度(S_A)随时间变化(b)

Fig. 5 The spatial distribution of (a) 700 hPa wind field (wind barb) and southerly wind components S_A value (color-filled, unit: σ) at 02:00 BT on 11 Jan and (b) the temporal variation of S_A value of southerly wind components from 08:00 BT on 6 January to 20:00 BT on 12 January in 2024

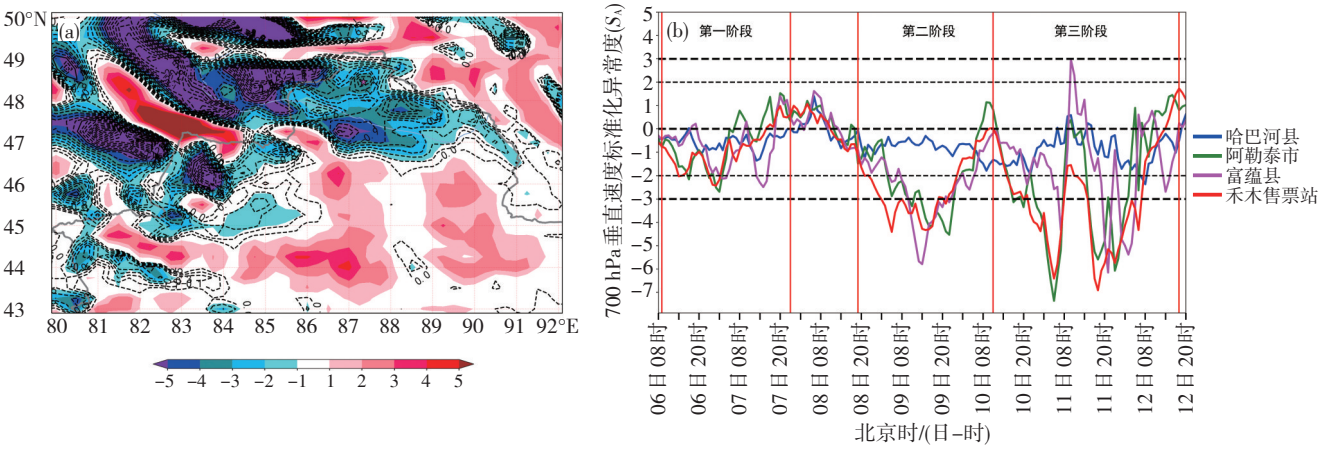


图6 2024年1月11日02时700 hPa垂直速度(等值线，单位：Pa·s^{-1})及其标准化异常度(S_A)(填色，单位：σ)空间分布(a)和1月6日08时—12日20时700 hPa垂直速度标准化异常度(S_A)随时间变化(b)

Fig. 6 The spatial distribution of (a) 700 hPa vertical velocity (isoline, unit: Pa·s^{-1}) and vertical velocity S_A value (color-filled, unit: σ) at 02:00 BT on 11 January and (b) the temporal variation of S_A value of 700 hPa vertical velocity from 08:00 BT on 6 January to 20:00 BT on 12 January, 2024

区异常偏强水汽和动力条件是造成第三阶段北部山区强降雪的重要原因。

4.2 地形增幅作用

阿勒泰存在两条山脉，主山脉阿尔泰山为西北—东南走向，西部吉木乃县与塔城地区北部为东西走向的萨乌尔山脉。此次过程中来自欧洲北大西洋、地中海、印度洋、黑海、里海的多层水汽沿着西风带、极锋锋区气流经过咸海接力输送至阿勒泰(图略)，700 hPa西南气流和850 hPa东南气流沿着阿尔泰山爬升，在低层切变线和地形辐合的共同作用下，水汽迅速汇聚并被抬升，有利于阿勒泰北部地区出现强降雪。

以禾木售票站为例，具体分析地形对极端强降雪的作用。图7为沿禾木售票站87.345°E做垂直环流经向剖面图，可见在第二阶段925—850 hPa风速为8~12 m·s^{-1}的偏东南风沿着阿勒泰北部平原至沿山地区爬升，受地形阻挡，进一步增强上升运动，低层水汽接近饱和(图7a)，实况表现为该阶段哈巴河县、阿勒泰市降雪较强；800 hPa偏南风和700 hPa偏西南风沿山爬升，受地形强迫作用，禾木售票站整层均为上升运动，700—800 hPa存在较强上升运动中心，达−1.2 Pa·s^{-1}，整层均为饱和湿层。进入第三阶段(图7b)，阿勒泰北部沿山和平原区域700 hPa以下相对湿度降至60%及以下，实况表现为该阶段哈巴河县、阿勒泰市降水有所减弱，北部山区700 hPa风速达到14 m·s^{-1}，并由偏西南风转为偏南风，风向与地形正交，进一步增强地形强迫作用，禾木售票站仍保持整层上升运动，上升运动中心抬高至700 hPa附近，增强至−1.4 Pa·s^{-1}，配合整层饱和湿层。可见第二、三阶段北部山区一直维持较强的上升运动和深厚的水汽饱和层，降水粒子大量凝结，有利于维持较长的降雪时间。

有研究表明，−18~−12℃温度层、上升运动中心与饱和湿层重合，有利于较大雪水比的降雪产生

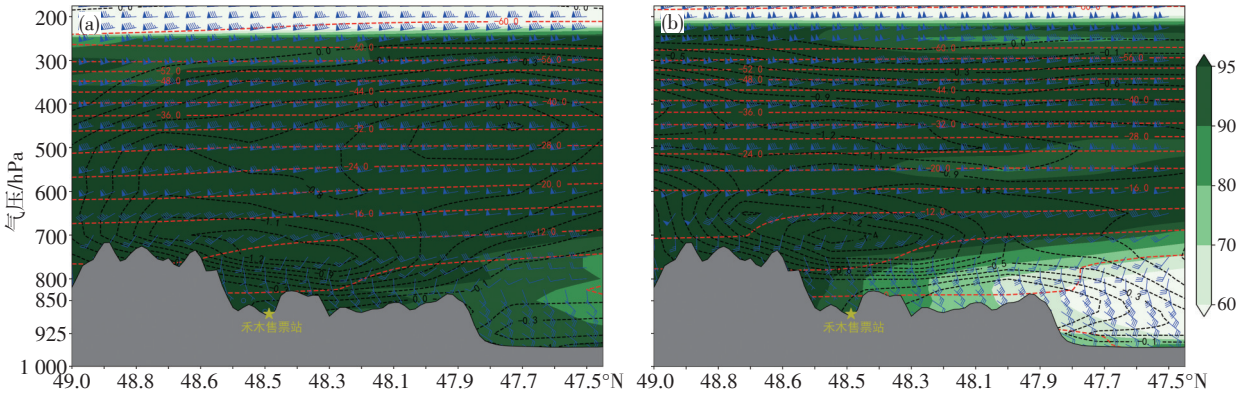


图7 2024年1月9日08时(a)和1月11日02时(b)沿禾木售票站(87.345°E)的垂直环流(风向杆)、温度(红色等值线，单位：℃)、上升运动(黑色等值线，单位：Pa·s^{-1})和相对湿度(填色，单位：%)的经向垂直剖面(灰色表示地形)

Fig. 7 The longitudinal vertical profile of vertical circulation (wind barb), temperature (red isoline, unit: °C), upward movement (black isoline, unit: pa·s^{-1}), and relative humidity (color-filled, unit: %) along Hemu ticket station (87.345°E) at (a) 08:00 BT on 9 January and (b) 02:00 BT on 11 January, 2024 (The gray represent the terrain)

(Cobb and Waldstreicher, 2005)，第二、三阶段在山区整层均为饱和湿层，且2 m气温低于0 ℃，第二阶段−18—−12 ℃温度层在650—750 hPa，上升运动中心在700—800 hPa，两者部分重合；第三阶段上升运动中心在700 hPa附近略低于−18—−12 ℃的温度层(550—650 hPa)。均有利于两个阶段在山区产生较大雪水比的降雪，尤其对第二阶段作用更为明显，产生了较厚的积雪。

5 强降雪数值模式预报效果对比

本节重点分析区域模式(CMA-MESO、CMA-TYM)和全球模式(CMA-GFS、ECMWF)四家模式36 h时效及ECMWF极端预报指数预报产品(EFI)和国家气象中心开发的集合平均异常天气预报产品(EMAF) 120 h时效对1月9日和10日两日强降雪的预报情况，检验区域为阿勒泰主要范围(85°—91.5°E，46°—49.5°N)。

对比实况降雪与四家模式1月9日的预报情况(图8a—d)，可见强降雪落区和形状预报与实况基本一致，均较好预报出暴雪及以下量级的降雪。对沿山区域出现的大暴雪和特大暴雪，CMA-GFS预报偏弱，预报最大值为19.5 mm (图8a)；ECMWF预报出大暴雪，但落区略偏北(图8b)；CMA-MESO预报出大范围特大暴雪，强度偏强(图8c)；CMA-TYM预报的大暴雪范围和落区形状与实况较为接近，特大暴雪范围较实况偏西偏北，预报最大值35.3 mm (图8d)，与实况31.5 mm较接近。TS评分(图8e)表明各家模式暴雪及以下量级预报均较好，但大暴雪及以上量级区域模式好于全球模式。

此外，从模式预报稳定性来看(图略)，CMA-GFS短期时效(84 h内)预报均偏弱，没有报出大暴雪及以上量级；ECMWF预报落区范围比较稳定，临近时效逐渐调强，60 h时效开始体现大暴雪；CMA-TYM模式60 h时效以内对大暴雪量级落区和强度预报稳定，更接近实况。

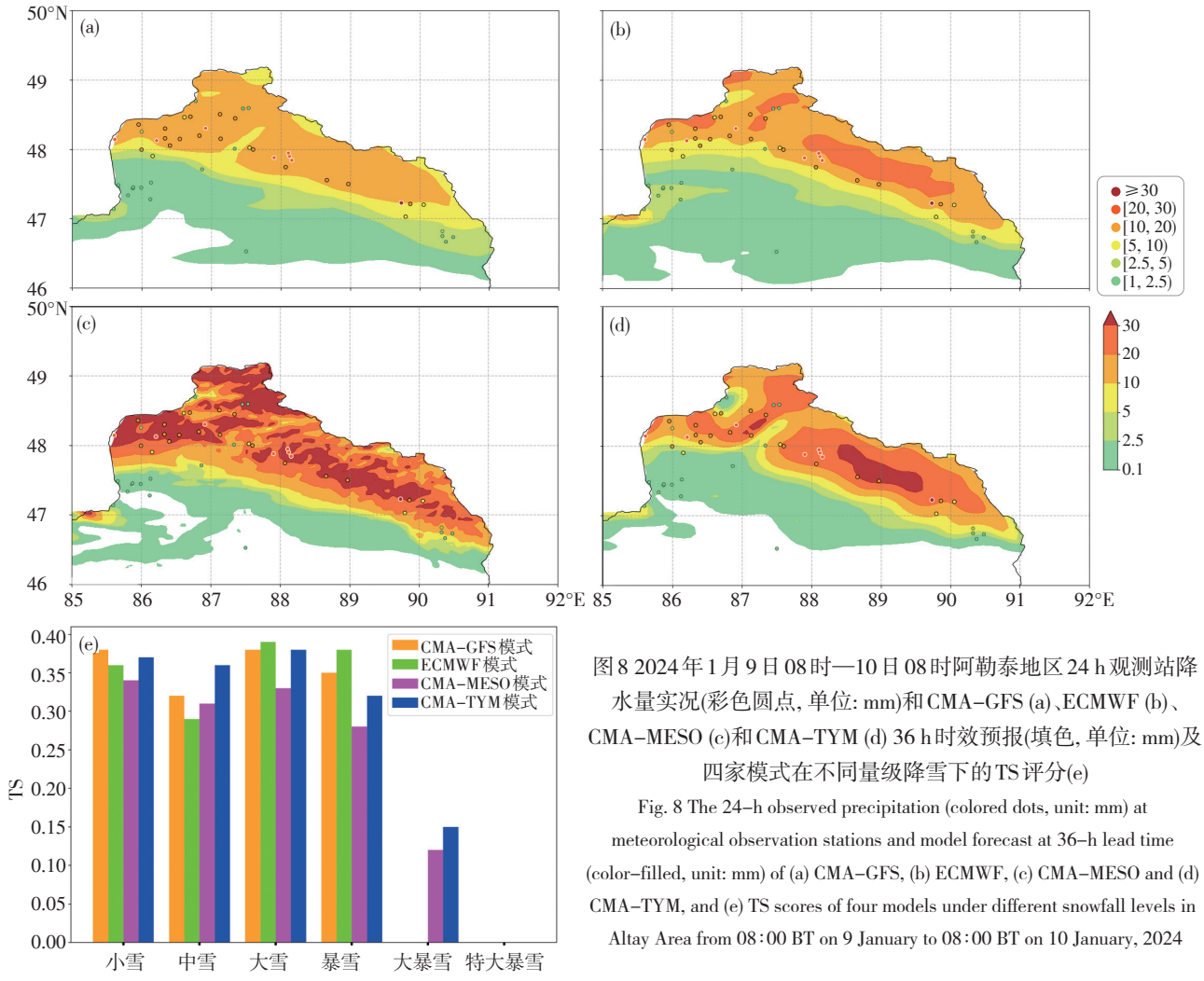


图8 2024年1月9日08时—10日08时阿勒泰地区24 h观测站降水量实况(彩色圆点，单位：mm)和CMA-GFS (a)、ECMWF (b)、CMA-MESO (c)和CMA-TYM (d) 36 h时效预报(填色，单位：mm)及四家模式在不同量级降雪下的TS评分(e)

Fig. 8 The 24-h observed precipitation (colored dots, unit: mm) at meteorological observation stations and model forecast at 36-h lead time (color-filled, unit: mm) of (a) CMA-GFS, (b) ECMWF, (c) CMA-MESO and (d) CMA-TYM, and (e) TS scores of four models under different snowfall levels in Altay Area from 08:00 BT on 9 January to 08:00 BT on 10 January, 2024

比较1月10日实况降雪与四家模式预报情况(图9a—d)，实况暴雪范围北抬至阿勒泰北部山区，沿山区域降雪有所减弱，各家模式对此趋势预报准确，但中雪和大雪预报范围偏大，区域模式均提示有特大

暴雪。对禾木售票站59.5 mm的特大暴雪，CMA-MESO预报出该站附近降水量为49.7 mm(图9c)，CMA-TYM在该站东北方向预报出特大暴雪，中心值为33.6 mm(图9d)，全球模式预报强度不够，最高到大暴雪量级(图9a—b)。TS评分(图9e)反映出各家模式小雪预报较好，中雪至大雪空报较多，评分较9日有所下降；ECMWF、CMA-MESO、CMA-TYM的大暴雪TS评分接近。

从模式稳定性来看(图略)，CMA-GFS 48~84 h时效预报偏弱，最大预报出暴雪量级，临近36 h预报时效预报明显调强，但对大暴雪范围预报范围仍偏小；ECMWF预报较稳定，60 h时效以内均预报禾木售票站周围存在大暴雪落区；CMA-TYM模式84 h时效以内预报强降雪落区和强度稳定，对大暴雪落区有所体现。

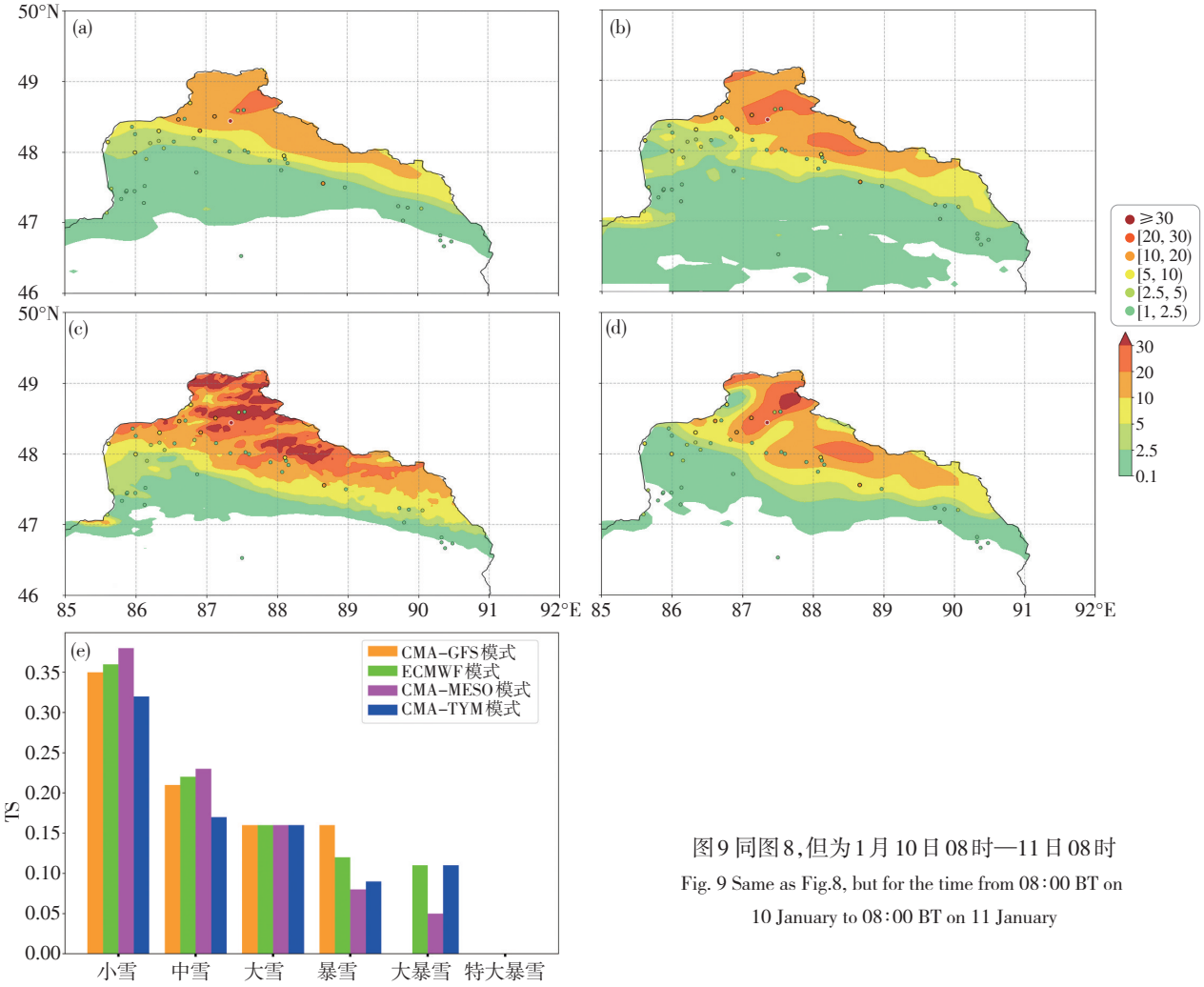


图9 同图8，但为1月10日08时—11日08时

Fig. 9 Same as Fig.8, but for the time from 08:00 BT on 10 January to 08:00 BT on 11 January

以第二、三阶段禾木售票站为例，由于CMA-MESO模式最长预报时效为72 h，无法覆盖整个第二、三阶段，因此主要对比分析CMA-GFS、ECMWF和CMA-TYM三家模式8日08时起报逐3 h降雪量预报(图10)。第二、三阶段禾木售票站累积降雪量为108.8 mm，CMA-GFS、ECMWF和CMA-TYM模式预报分别为32.2 mm、60.8 mm和126 mm，可见CMA-GFS和ECMWF预报明显偏弱，CMA-TYM模式接近实况。三家模式对降雪起始时刻的预报均较准确，但CMA-GFS和ECMWF模式对降雪结束时间的预报较实况偏晚约15 h，CMA-TYM模式更接近实况。第二阶段三家模式对降雪增强和减弱趋势均预报较好，ECMWF和CMA-TYM模式对量级预报整体较好。第三阶段中10日17时—11日08时为降水效率最高时段，CMA-GFS模式预报显著偏弱，部分时刻存在漏报，ECMWF模式对降雪强度和演变趋势预报有一定体现，但强度明显偏弱，CMA-TYM模式对降雪增强趋势预报与实况吻合较好，降雪强度也最为接近实况。综上，CMA-TYM模式在强降雪范围、量级、降雪量演变及预报稳定性等方面表现均为最好。但同时也可以看出，CMA-TYM模式在强降雪减弱阶段预报较实况偏大，ECMWF也存在类似情况。

比较ECMWF极端预报指数(EFI)预报产品和国家气象中心集合平均异常天气预报产品(EMAF)对此次

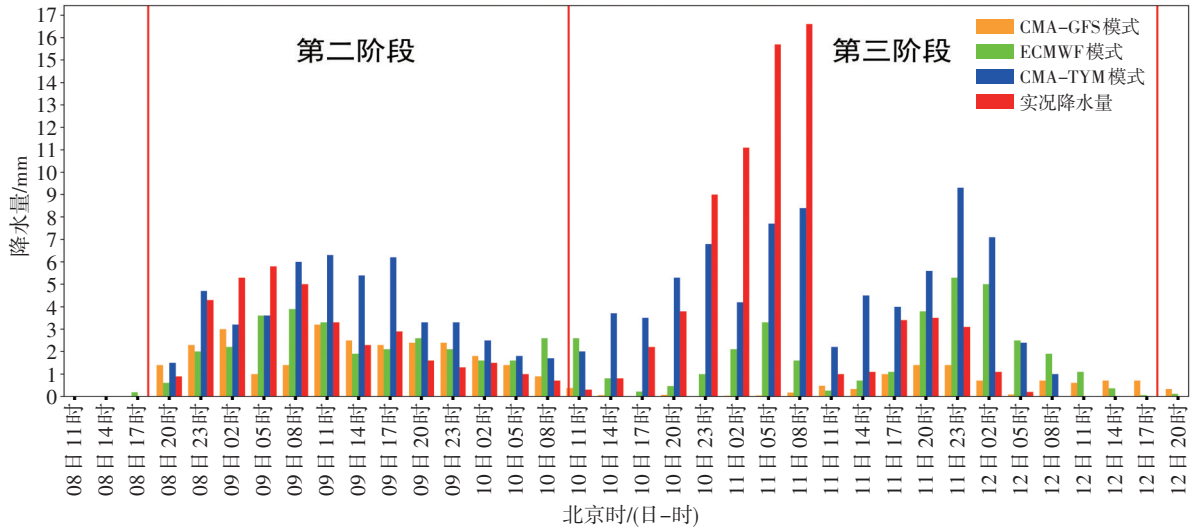


图10 2024年1月8日08时—12日20时禾木售票站逐3 h降水量实况与CMA-GFS、ECMWF和CMA-TYM模式预报随时间变化

Fig. 10 The observed 3-h accumulated precipitation at Hemu ticket station and the variation of the CMA-GFS, ECMWF, and CMA-TYM model forecasts from 08:00 BT on 8 January to 20:00 BT on 12 January, 2024

强降雪极端性的预报效果。两类产品对1月9日阿勒泰北部沿山地区和山区强降雪均提前120 h预报出极端强降雪信号，其中EFI产品预报值超0.8 (图11a)，EMAF预报超3 σ(图11b)。两类产品对1月10日阿勒泰北部山区强降雪均提前120 h预报出强降雪范围北抬(图12a—b)，对禾木售票站EFI预报值超过0.9，EMAF预报超过4 σ，预报出北部山区降雪极端性增强趋势与实况比较一致。值得注意的是两类产品均提前168 h就预报出1月9日和10日强降雪极端信号和范围(图略)，而ECMWF、CMA-TYM等确定性模式均提前60~84 h预报出大暴雪落区，但对极值预报能力有限。预报员在中期时段可加强对EFI和EMAF产品的

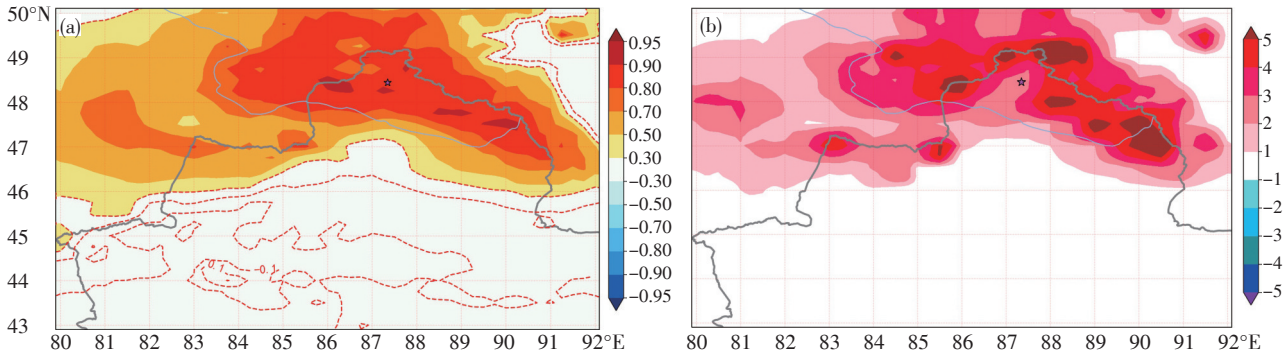


图11 ECWMF极端预报指数(EFI)产品预报值(填色) (a)和国家气象中心集合平均异常天气预报产品(EMAF) (填色，单位：σ)
(b) 120 h预报时效对阿勒泰地区2024年1月9日08时—10日08时24 h降水量预报

Fig. 11 The ECWMF EFI (a) and EMAF (b) at 120-h lead time for 24-h precipitation forecast in Altay Area from 08:00 BT on 9 Jan to 20:00 BT on 10 Jan in 2024

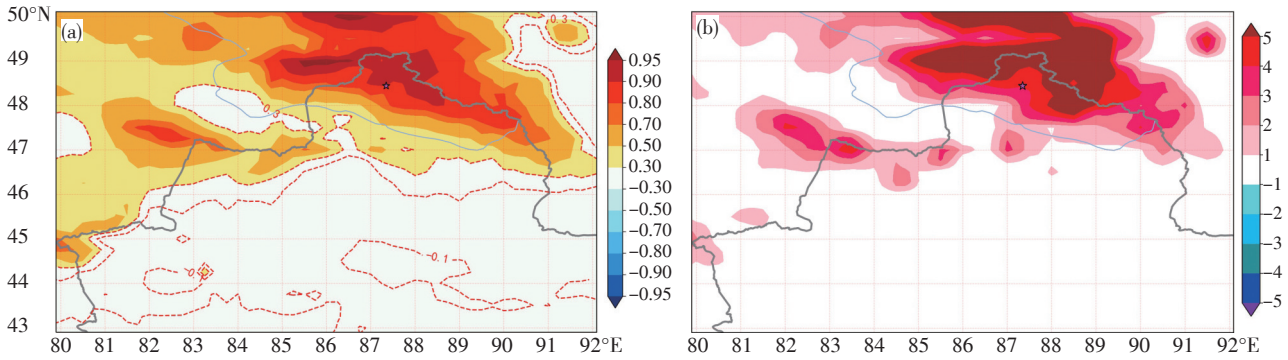


图12 同图11，但为1月10日08时—11日08时

Fig. 12 Same as Fig.11, but for the time from 08:00 BT on 10 Jan to 08:00 BT on 11 Jan

应用,对出现极端天气信号的区域,作出早期判断和预报预警,结合CMA-TYM等模式在其定量预报结果的基础上往偏强方向进行订正。

6 结论与讨论

基于国家和区域气象观测站逐小时实况观测资料,并结合ERA5再分析资料和CMA-GFS、ECMWF、CMA-MESO、CMA-TYM四家模式及ECWMF极端预报指数(EFI)和国家气象中心集合平均异常天气预报(EMAF)产品,对2024年1月6—12日新疆阿勒泰极端强降雪实况特征、影响系统、环流形势演变、极端性成因及模式预报性能进行分析,得到以下主要结论:

(1) 此次强降雪过程现持续时间长(153 h)、累积降水量大(最大累积降水量达122.7 mm)、小时降水量强(小时降水量达8 mm)等极端性特征;降水量由平原地区向山区递增,多站日降水量突破1月或建站极值。根据环流形势演变和降水特征过程可分为三个阶段,强降雪主要发生在第二、三阶段,两个阶段阿勒泰北部沿山和山区累积降水量大、新增积雪大、小时新增积雪多,且-18~-12℃温度层、上升运动中心与饱和湿层配合较好,有利于在山区产生较大雪水比的降雪,形成较厚的积雪,尤其是阿勒泰北部山区代表站禾木售票站过程累积积雪深度超过1 m,过程最大小时新增积雪达8 cm,又地处山区,满足雪崩形成的关键气象条件。

(2) 此次过程为北疆典型双阻型暖区暴雪天气形势,阿勒泰在500 hPa强盛极锋锋区不断分裂短波系统先后东移影响下,配合850—700 hPa维持暖式切变系统,并伴随强暖锋锋生,且500—850 hPa水汽输送通道的持续维持,强降雪在300 hPa极锋急流出口辐散区、850 hPa切变线以北至700 hPa切变线附近区域内产生,尤其第三阶段北部山区大尺度上升运动、暖锋锋生和水汽输送更强,导致第三阶段山区强降雪更强。

(3) 在第二、三阶段,阿勒泰北部尤其是北部山区水汽条件异常偏强,并伴随低层动力抬升作用异常强盛,是造成极端性强降雪的重要原因。同时地形增幅作用也对此次强降雪过程起到关键作用,700 hPa及以下的偏强气流进入阿勒泰北部山区,地形增幅作用明显,进一步增加低层动力抬升作用,使得山区维持较强的上升运动和深厚的水汽饱和层,有利于强降雪持续维持,这也是过程累积积降水量分布呈现平原向山区递增的主因之一。

(4) CMA-TYM模式在强降雪范围、量级、降雪量演变以及预报稳定性等方面表现最好。区域模式对大暴雪预报好于全球模式,尤其对山区特大暴雪也有所提示,但对极端性预报能力仍然有限。EFI和EMAF 120 h时效对极端强降雪落区和强度预报有较好的效果,168 h时效就可发现极端信号。预报业务中,应在中期时段加强相关产品应用,对出现极端天气信号的区域,作出早期判断和预报预警,并结合CMA-TYM等模式对定量预报结果向大量级方向进行订正。

本文分析了2024年1月6—12日新疆阿勒泰极端强降雪实况特征、影响系统、极端性成因和数值模式预报效果,对此类阿勒泰极端强降雪的预报预警有较好的业务应用价值。需要指出的是,本次强降雪过程集中在阿勒泰沿山及北部山区,自动气象站偏少,加之极端降雪对观测带来很大挑战,实况分析结果不能完全反映出北部山区降雪极端性特征,下一步将尝试应用卫星等遥感数据分析积雪覆盖情况,进一步深入分析此次强降雪对阿勒泰北部山区的影响。

参考文献(References):

陈联君.2021.基于多源数据的雪崩危险性评价—以北疆地区为例[D].北京:中国地质大学,149-153. Chen L J. 2021. Avalanche hazard assessment based on multi-source data: a case study in Northern Xinjiang [D]. Beijing:China University of Geosciences,149-153 (in Chinese)

陈涛,崔彩霞.2012. “2010.1.6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制[J].气象,38(8):921-931. Chen T, Cui C X. 2012. The frontal structure and precipitation mechanism in the 6 January 2010 heavy snowfall event happening in North Xinjiang [J]. Meteorological Monthly, 38(8):921-931 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.08.004

符娇兰,陈博宇,陈双,等.2022.新增积雪深度客观预报技术研究及其应用[J].气象,48(10):1230-1241. Fu J L, Chen B Y, Chen S, et al. 2022. Fresh snowfall depth forecast technology and its application [J]. Meteorological Monthly,48(10):1230-1241 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.040102

郭城,李博渊,杨森,等.2012.新疆阿勒泰地区大到暴雪天气气候特征[J].干旱气象,30(4):604-608. Guo C, Li B Y, Yang S, et al. 2012. Analysis of climate characteristic of heavy snowstorm in Altay region of Xinjiang [J]. Journal of Arid Meteorology,30(4):604-608 (in Chinese)

郝建盛,李兰海.2022.雪崩灾害防治研究进展及展望[J].冰川冻土,44(3):762-770. Hao J S, Li L H. 2022. Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,44(3):762-770 (in Chinese). doi:10.7522/j. issn.1000-0240.2022.0075

李如琦,唐冶,肉孜·阿基.2015. 2010年新疆北部暴雪异常的环流和水汽特征分析[J].高原气象,34(1):155-162. Li R Q, Tang Y, Rouzi·A J. 2015. Atmospheric circulation and water vapor characteristics of snowstorm anomalies in Northern Xinjiang in 2010 [J]. Plateau Meteorology, 34(1):155-162 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00163

刘玉莲,任国玉,于宏敏,等.2013.我国强降雪气候特征及其变化[J].应用气象学报,24(3):304-313. Liu Y L, Ren G Y, Yu H M, et al. 2013. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation [J]. Journal of Applied Meteorological Science,24(3):304-313 (in Chinese)

隆霄,赵建华,王晖,等.2012.阿勒泰山脉对新疆北部地区强暴雪过程影

响的数值模拟研究[J].沙漠与绿洲气象,6(6):15–20. Long X, Zhao J H, Wang H, et al. 2012. Numerical studies on the effect of Altai mountain on the severe snowstorm in North of XinJiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,6(6):15–20 (in Chinese)

陶亦为,张恒德,代刊,等.2023.基于集合预报的异常温度预报产品在中国的应用分析[J].气象,49(12):1532–1541. Tao Y W, Zhang H D, Dai K, et al. 2023. Application research on abnormal temperature forecast products in China based on ensemble forecast [J]. Meteorological Monthly,49(12):1532–1541 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2023.101101

王磊,白松竹,庄晓翠. 2016. T639模式对新疆北部暖区强降雪过程的预报效果检验[J].暴雨灾害,35(5):489–496. Wang L, Bai S Z, Zhuang X C. 2016. Validations of T639 model forecast skill forsevere snowfall events in the warm sector in northern Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters, 35(5):489–496 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2016.05.011

汶林科,向灵芝,蔡毅,等.2016.雪崩的形成机理研究[J].山地学报,34(1):1–11. Wen L K, Xiang L Z, Cai Y, et al. 2016. Research on the formation mechanism of avalanche [J].Mountain Research,34(1):1–11 (in Chinese). doi:10.16089/j.cnki.1008–2786.000094

杨霞,崔彩霞,阿不力米提江·阿布力克木,等.2013.新疆暖区暴雪天气研究概述[J].沙漠与绿洲气象,7(4):21–25. Yang X, Cui C X, Abulikemu A, et al. 2013. Review on study of warm sector heavy snowstorm weather in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,7(4):21–25 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002–0799.2013.04.004

杨霞,李阿桥,赵逸舟,等.2020. 1961—2018年新疆北部冬季暴雪时空分布及其环流特征[J].冰川冻土,42(3):756–765. Yang X, Li A Q, Zhao Y Z, et al. 2020. Spatial–temporal distribution and general circulation of snowstorm in northern Xinjiang from 1961 to 2018 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,42(3):756–765 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0240.2020.0060

于晓晶,于志翔,唐永兰,等.2017.不同云微物理方案对新疆冷锋暴雪的预报影响分析[J].暴雨灾害,36(1):33–41. Yu X J, Yu Z X, Tang Y L, et al. 2017. Influence of different cloud microphysical schemes on forecasts of a cold–font snowstorm in Xinjiang [J]. Torrential Rain and Disasters,36(1):33–41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.01.005

赵俊荣,杨雪,杨景辉.2010.新疆北部冬季暖区大降雪过程中尺度云团特征分析[J].高原气象,29(5):1280–1288. Zhao J R, Yang X, Yang J H. 2010. Analysis on mesoscale cloud characteristic of severe snowfall process in warm zone of Northern Xinjiang winter [J]. Plateau Meteorology,29(5):1280–1288 (in Chinese)

朱蕾,王清平,王勇,等.2020.乌鲁木齐两次极端暴雪天气过程对比分析[J].暴雨灾害,39(3):225–233. Zhu L, Wang Q P, Wang Y, et al. 2020. Comparative analysis of two extreme blizzard processes in Urumqi [J]. Torrential Rain and Disasters,39(3):225–233 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.03.002

庄晓翠,李博渊,李如琦,等.2016.新疆北部强降雪天气研究若干进展[J].沙漠与绿洲气象,10(1):1–8. Zhuang X C, Li B Y, Li R Q, et al. 2016. Some advances on study of strong snowfall in Northern Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,10(1):1–8 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002–0799.2016.01.001

庄晓翠,陈丽娟,李博渊,等.2024.新疆北部不同区域暖区暴雪过程水汽特征分析[J].高原气象22,43(1):141–155. Zhuang X C, Chen L J, Li B Y, et al. 2024. Analysis of water vapor characteristics during heavy snow in different warm regions of Northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology,43(1):141–155 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.000–0534.2023.00041

Cobb D K Jr, Waldstreicher J. 2005. A simple physically based snowfall algorithm [C]. Proceedings of the 21st Conference on Weather Analysis and Forecasting 17th Conference on Numerical Weather Prediction. Washington D.C. American Meteorological Society

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)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146(730):1999–2049. doi:10.1002/qj.3803

Lalaurette F. 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,129(594):3037–3057. doi:10.1256/qj.02.152

Roe G H. 2005. Orographic precipitation [J]. Annual Review Of Earth And Planetary Sciences,33:645–671. doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122541

Rotunno R, Houze R A. 2007. Lessons on orographic precipitation from the Mesoscale Alpine Programme [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,133(625):811–830. doi:10.1002/qj.67

Schweizer J, Bruce Jamieson J, Schneebeli M. 2003. Snow avalanche formation [J]. Reviews of Geophysics,41(4):1–25. doi:10.1029/2002RG000123

Wang W G, Li H Y, Wang J, et al. 2020. Water vapor from western Eurasia promotes precipitation during the snow season in Northern Xinjiang, a typical arid region in central Asia [J]. Water,12(1):141. doi:10.3390/w12010141

Zsótér E. 2006. Recent developments in extreme weather forecasting [J]. ECMWF Newsletter,107:8–17. doi:10.21957/kl9821hnc7

（责任编辑　唐国瑛）