张博,张芳华.2024. 2024年2月我国中东部两次持续性低温雨雪冰冻过程的环流异常特征分析[J].暴雨灾害,43(4):384-394. ZHANG Bo, ZHANG Fanghua. 2024. Characteristics of large-scale circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):384-394 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2024-108

2024年2月我国中东部两次持续性低温雨雪冰冻过程的环流异常特征分析

张博,张芳华
(国家气象中心,北京 10081)

摘　要:2024年1月31日—2月6日和2月19—25日我国中东部地区先后发生两次持续性低温雨雪冰冻过程,均表现为降水范围广、持续时间长、降水量极端、降水相态复杂、气温显著偏低等特征,春运出行受到其较大影响。采用国家站气象观测资料和NCEP/NCAR再分析资料,对这两次过程的大尺度环流异常特征进行分析,试图揭示西太平洋副热带高压(以下简称副高)北抬原因及强冷空气活动的平流层前兆信号。结果表明:(1) 我国大陆上空500 hPa"西低东高"环流形势有利于中东部地区出现持续性降水。2024年1月31日—2月6日(以下简称过程Ⅰ)乌拉尔山附近并无明显的阻塞系统;2月19—25日(以下简称过程Ⅱ)在贝加尔湖以北地区有阻塞高压发展维持。两次过程副高较常年同期偏北、显著偏强,与南支槽共同作用有利于暖湿气流向我国中东部地区输送,低层冷空气南下、暖湿空气沿低层冷垫爬升,为大范围雨雪天气提供重要的动力抬升和温度层结条件。(2) 过程Ⅰ主要的水汽来源是孟加拉湾北部的偏西风输送,过程Ⅱ来自西北太平洋的水汽输送贡献更大,且江南地区整层水汽辐合强于过程Ⅰ。(3) 副高偏北的原因可能是受到来自西非至北欧一带对流层中高层Rossby波能量在中纬度和副热带地区向下游传播的影响。(4) 发生在2月第3候前后的平流层极涡下传可作为过程Ⅱ寒潮活动的前兆信号,平流层极涡下传超前于对流层,可为冬季我国冷空气过程提供预报依据。

关键词:低温雨雪冰冻;西太平洋副热带高压;阻塞高压;平流层极涡;Rossby波
中图法分类号: P458　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-108

Characteristics of circulation anomalies of two continuous low temperature rain and snow freezing weather processes in eastern China in February 2024

ZHANG Bo, ZHANG Fanghua

(*National Meteorological Centre, Beijing* 100081)

Abstract: Two persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing processes occurred in the central and eastern regions of China from January 1-4 and February 19-24, 2024, which are mainly characterized by precipitation of wide range, long duration, extreme rainfall amount, and complex precipitation phase, and combined with significantly low temperature. These events brought serious impacts on the traffic during the Spring Festival. Using observation data from the National Meteorological Information Center, NCEP/NCAR reanalysis data, this work analyzed the characteristics of the large-scale circulation anomaly to reveal the reasons for the northward movement of Western Pacific subtropical high and the stratospheric precursor signal of the strong cold air. The results show that: (1) The situation of "low in the west and high in the east" at 500 hPa over the Chinese mainland was conducive to the occurrence of sustained precipitation in the central and eastern regions. During the first process (from January 31 to February 6, 2024), there was no obvious blocking near the Ural Mountains. The second process (from February 19 to February 25, 2024) was sustained by the development of blocking high in the north of Lake Baikal. During both processes, the West Pacific subtropical high was stronger and further north than usual. Combined with the southern trough, it was conducive to the transport of warm and humid air to the central and eastern regions of China. The cold air at the lower level moved south and

收稿日期: 2024-05-27;**定稿日期**:2024-07-01
资助项目: 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(23SWQXM042);国家自然科学基金项目(42230612);国家重点研发计划项目(2022YFC3003905)
第一作者: 张博,主要从事中长期天气预报和模式检验工作。E-mail: zhangb81@yeah.net
通信作者: 张芳华,主要从事天气预报业务和技术研究。E-mail: zfhnmc@126.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

the warm and humid air climbed along the cold pad at the lower level, providing important dynamic lifting and temperature stratification conditions for a wide range of rain and snow. (2) The main source of water vapor for the first process was the abnormal westerly wind transport from the north of the Bay of Bengal. For the second process, the abnormal water vapor transport from the northwest Pacific contributed greater, with a stronger water vapor transport flux intensity. (3) The northward deviation of the West Pacific subtropical high was possibly influenced by the Rossby wave energy in the middle and upper troposphere from West Africa to Northern Europe propagating downstream in the middle latitudes and subtropical regions. (4) The descent of the stratospheric polar vortex occurring around the 3rd pentad of February 2024 could be used as a precursor signal for the cold wave activity of the second process. The descent of the stratospheric polar vortex was ahead of the troposphere, providing a new basis for forecasting the cold air activities in China during winter.

Key words: disaster of low temperature heavy snowfall and freezing; Western Pacific subtropical high; blocking; stratosphere polar vortex; Rossby wave

引 言

低温雨雪冰冻是冬季我国南方地区常见的气象灾害。持续性低温雨雪冰冻事件往往具有群发性特征，通过灾害链的形式跨行业跨区域发展，对国民经济和人民生命财产造成巨大的损害(郑国光等，2019)。受北极增暖及其放大效应的影响，本世纪欧亚大陆中纬度极端冷事件呈增多趋势(Cohen et al.，2012；李维京等，2013)。例如2005年2月上中旬湖南、湖北和贵州等地出现大范围雨雪和冰冻，其中湖北五峰县出现了1964年以来最严重的冰冻灾害。2008年1月10日—2月5日，我国南方地区接连遭受四次的低温雨雪冰冻天气过程，直接经济损失高达1 595亿元(矫梅燕和曲晓波，2008；国家气候中心，2008；王遵娅等，2008；郑国光等，2019)。2011年1月南方地区出现四次较强的低温雨雪冰冻天气过程，贵州尤其明显(杜小玲等，2014)。2016年初发生“霸王级”寒潮，广东、广西、香港、澳门、台湾等地出现有气象记录以来仅有的一次降雪天气(Ma and Zhu，2019，刘红武等，2020)。

关于我国冬季低温雨雪冰冻事件的天气和气候学成因已有较多研究，其中对2008年年初的低温雨雪冰冻灾害研究尤为深入，中国气象局在第一时间复盘了本次事件的特征(国家气候中心，2008)和天气学、气候学成因(矫梅燕和曲晓波，2008，叶成志等，2009)。气候学分析表明，2007年8月至2008年初发展迅速的拉尼娜事件是该次灾害发生的气候背景(高辉等，2008；李灿等，2010；张韧等，2012)。多环流因子的协同作用则是本次事件的直接天气学机制，包括乌拉尔山阻塞高压和贝加尔湖–巴尔喀什湖的横槽，东亚和日本地区的高度正异常，副高偏强偏西、印缅槽持续偏强以及来自印度洋和孟加拉湾的暖湿气流沿云贵高原不断输送等(杨贵名等，2008；李灿等，2009；李艳等，2012；李崇银等，2019)。丁一汇等(2008)和布和朝鲁等(2008)从动力学角度出发分析了亚非副热带急流低频波、副热带高压(以下简称副高)、青藏高压–孟加拉湾气压槽在这次灾害天气过程中的作用。施宁等(2008)指出南支槽区的Rossby波能量频散是2008年年初低温雨雪冰冻灾害中副高偏强的主要原因，王东海等(2008)发现北极涛动异常活跃有利于中高纬度行星尺度波动稳定维持。此外，平流层与对流层的动力耦合对对流层的天气系统发展也非常重要(Wallace et al.，1981)，2007年冬季北半球准定常行星波向低纬对流层上层传播的加强和平流层极涡的下传也可能是造成2008年1月我国低温雨雪冰冻灾害的主要原因之一(顾雷等，2008)。对近几年我国发生的其他低温或雨雪天气过程学者们也进行了分析。李艳等(2019)针对2016年“霸王级”寒潮过程分析了极涡、阻塞高压和西伯利亚高压的组合性异常特征。彭京备等(2019)分析了2018年1月我国南方两次雨雪天气形成原因及其与东亚冬季风异常的关系。

2024年1月31日—2月6日和2月19—25日我国中东部地区出现两次大范围低温雨雪冰冻天气，具有降水范围广、持续时间长、降水相态复杂等特点，两次灾害性天气恰逢春运期，给交通、电力、农业等行业及城乡居民生活带来严重影响。本文着重分析了两次过程中多个大气环流系统的异常特征，讨论造成两次事件的环流成因异同点，并从平流层对对流层系统影响的角度尝试寻找相关事件的前兆信号。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括国家气象信息中心提供的2024年1月31日—2月25日全国地面国家气象站降水量观测资料、NCEP/NCAR第一套逐日再分析资料，要素包括位势高度、风、比湿、温度、海平面气压、表面气压等，水平分辨率为2.5°×2.5°，位势高度、风、温度场要素垂直方向为17层，比湿场为8层。本文气候态选取1991—2020年的平均，距平是指与气候态同期的差值。

1.2 研究方法

由于中高纬度闭合性阻塞高压或开放性高压脊

的维持均可对天气状况产生很大影响，本文对500 hPa持续高值事件追踪方法采用Liu等(2018)开发的500 hPa持续性高压脊和阻塞高压系统追踪方法，具体算法详见Zhang等(2019)和张博等(2021)的文献。

为了定量描述平流层极涡的变化特征，使用了李崇银等(2019)定义的平流层极涡强度指数，即50 hPa等压面上(0°—360°E，75°—90°N)范围内的平均位势高度。该指数越低，表明极涡越强。

为了揭示灾害发生过程中水汽输送特征，本文计算了垂直积分的水汽通量 Q 以及纬向水汽输送通量 Q_λ 和经向水汽输送通量 Q_ϕ，其计算公式为

$$Q=Q_\lambda\vec{i}+Q_\phi\vec{j} \tag{1}$$

$$Q_\lambda=-\frac{1}{g}\int_{p_s}^{p}qu\mathrm{d}p \tag{2}$$

$$Q_\phi=-\frac{1}{g}\int_{p_s}^{p}qv\mathrm{d}p \tag{3}$$

其中，P_s 为地表面气压，P 取为300 hPa，q 为比湿，g 为重力加速度。

本文在描述准定常Rossby波的能量频散特征时，采用的是Takaya和Nakamura (2001)推导出的三维波作用通量(以下简称TN通量)。

2 降水实况

过程Ⅰ、过程Ⅱ我国中东部地区先后出现两次大范围持续性低温雨雪冰冻天气过程，两次过程均具有降水范围广、持续时间长、降水量极端、降水相态复杂、气温显著偏低等特征。图1分别给出两次过程累计降水量、1981年以来(110°—122°E，25°—35°N)区域2月平均降水量的逐年演变以及该区域2024年1月1日—2月28日的逐日变化。过程Ⅰ(图1a)中，西北地区东部、华北至华南等地出现雨雪天气，江淮、江汉东部、江南、华南北部和贵州东部等地累计降水量25～40 mm，江淮西部和江南大部50～90 mm，局地100 mm以上，湖南、江苏、贵州、上海等省(市)有10个国家气象观测站日降水量突破当地2月极值，本次过程雨雪分界线南压至浙江中部、江西中北部、湖南南部至贵州东南部，安徽中部、湖北东部、湖南中北部及贵州东南

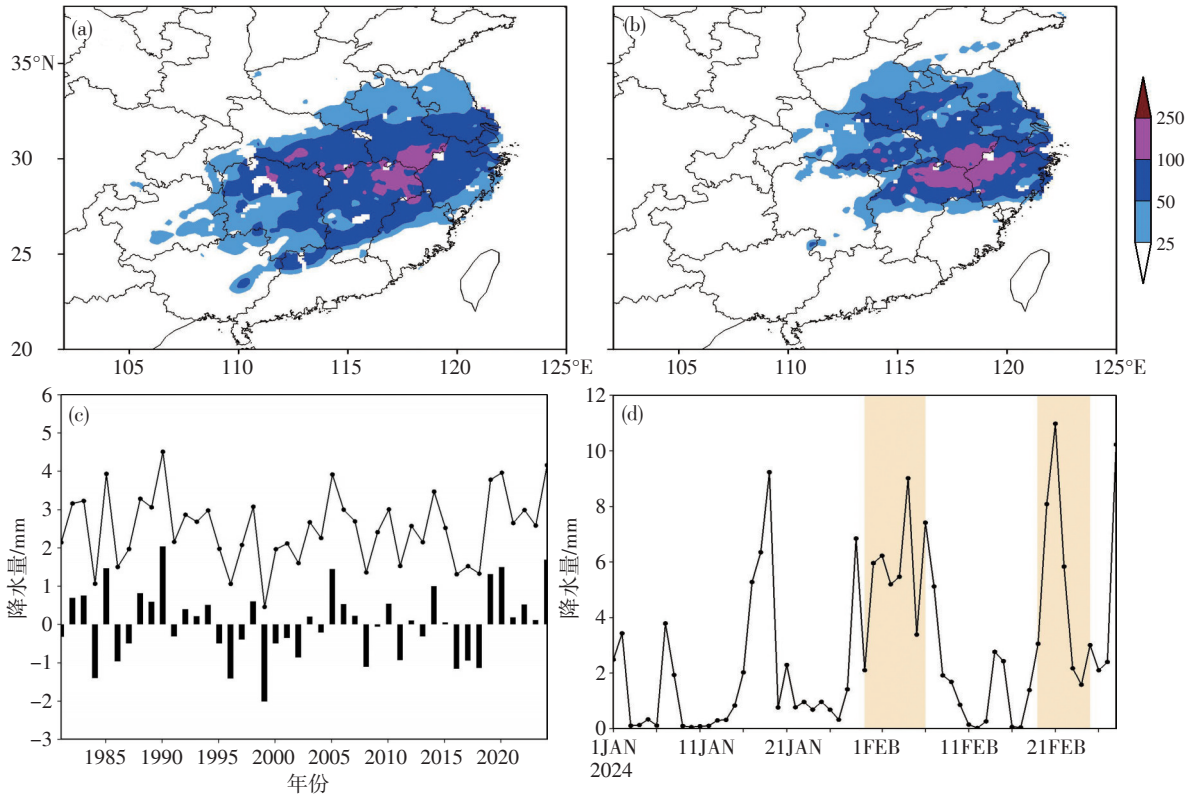


图1 2024年1月31日—2月6日(a)、2月19日—2月25日(b)累计降水量(单位: mm)、1981—2024年2月(110°—122°E，25°—35°N)区域平均降水量(实线，单位: mm)和距平(柱状，单位: mm)的年际变化(c)以及2024年1月1日—2月28日(110°—122°E，25°—35°N)区域平均降水量(单位: mm)逐日变化(d，黄色矩形阴影为两次过程发生时段，下同)

Fig. 1 Interannual varibility of total precipitation (unit: mm) from (a) January 31 to February 6 and (b) February 19 to 25 in 2024, (c) annual variation of the regional mean precipitation (solid line, unit: mm) and anomalies (column, unit: mm) in February from 1981 to 2024 averaged over the region (110°—122°E, 25°—35°N) and (d) daily variation of the regional mean precipitation (unit: mm) from January 1 to February 28, 2024 over the region (110°—122°E, 25°—35°N) (The yellow rectangular shadow mark the two process periods, the same hereinafter)

部出现冻雨。过程Ⅱ(图1b)，受强寒潮影响，我国再次出现大范围持续性雨雪天气，黄淮西部、江汉东部、江淮、江南中北部等地累计降水量25～30 mm，其中，黄淮南部、江淮、江南中北部等地50～80 mm，安徽南部、浙江中部和西部、江西东北部等地累计100～150 mm，河南、安徽、湖北、江苏、江西、浙江等地82个气象站日降水量突破建站以来2月极值，本次过程雨雪分界线东段与过程Ⅰ接近，但西段偏南，湖北东部、湖南中南部及贵州东部出现冻雨、广西东北部也出现降雪或雨夹雪。从1981年以来2月份资料分析发现，2024年2月关键区内(110°—122°E，25°—35°N)平均日雨量为4.2 mm，较气候平均值2.5 mm偏多1.7 mm，仅次于1990年2月(图1c)，为1981年以来第二高值。从关键区逐日降水时序图(图1d)可以看出，1月第6候至2月第2候关键区出现第一轮持续性降水，2月第4候至第5候为第二轮持续性降水，过程Ⅰ日雨量超过2月平均雨量(4.2 mm)的时间长、过程Ⅱ单日峰值降水量大。

3 对流层大尺度环流的异常特征分析

3.1 对流层中层环流异常

两次过程均发生在高空槽东移配合南下冷空气的大尺度环流背景下，但关键影响系统的位置、强弱以及冷暖气流的强度存在差异。图2给出两次过程500 hPa高度场和高度异常分布，过程Ⅰ亚欧中高纬环流呈现“两槽一脊”型(图2a)，第二次过程主要为“一槽一脊”型(图2b)，两次过程鄂霍茨克海附近均存在低槽，位势高度负距平。过程Ⅰ斯堪的纳维亚半岛到巴尔喀什湖一带为低槽区、高度负距平，过程Ⅱ从贝加尔湖(以下简称贝湖)经巴尔喀什湖(以下简称巴湖)到里海东部一带有低槽、较常年同期偏强低槽位置较过程Ⅰ偏东。两次过程我国东部沿海到日本一带为高度正距平区，影响我国的东亚大槽偏弱。此外，两次过程在亚洲东部到西北太平洋副热带地区均为高度正距平区，在菲律宾以东地区有592 dagpm等值线的副高中心，位势高度超过2倍标准差，较常年同期偏北、强度显著偏强，我国大陆上空位势高度距平呈现的“西低东高”特征有利于中东部地区出现持续性降水天气。李艳等(2019)指出2008年雨雪冰冻事件中乌拉尔山(以下简称乌山)地区阻塞高压系统的发展和维持有利于其下游地区冷空气不断分裂南下，2008年阻塞高压频率偏高50%。

图3给出两次过程中高纬度发生的持续性阻塞事件的中心位置及出现时间，过程Ⅰ在北非到西欧一带出现持续6 d的阻塞事件，高压系统在该位置稳定少动，另外2月3—5日在远东地区西北部出现维持3 d的阻塞事件，亚洲东部沿海到远东地区北部为一致位势高度正距平，阻挡其上游的低压系统东移(图3a)；过程Ⅱ2月19—21日在西欧附近出现持续性高压脊(19日和21日中心位置重合)，但维持时间小于过程Ⅰ(图3b)，由图2b可见从黑海到西伯利亚一带有高压脊系统向东北方向伸展，对应2月21—24日出现4 d中心位置位于贝湖以北地区的持续性高压脊事件。由两次过程500 hPa阻塞系统分析可以看出，过程Ⅱ乌山附近高压脊向东北方向强烈发展，这与2008年1月的形势更为接近(高辉等，2008)，而过程Ⅰ乌山附近并无明显的阻塞系统发展和维持。

为了了解过程Ⅱ阻塞系统发展和维持的原因，分析了2月19—25日逐日500 hPa涡度平流和温度平流的演变(图略)。19—20日，巴湖和贝湖之间存在东北–西南向横槽，其西北侧为强大高压脊，槽后脊前有负涡度平流，使得低槽向东移动，同时巴湖和贝湖以北地区的暖平流促使高压脊进一步加强；21日，巴湖东北侧的低涡与远东地区低槽分离，贝湖附近为高压脊，脊前的负涡度平流使高压脊继续东移，高压脊强度维持；22—24日，贝湖以北高压脊前的负涡度平流减弱，高压脊移速减慢，高压脊区弱冷平流使高压脊的强度略有减弱，25日持续性高压脊事件结束。

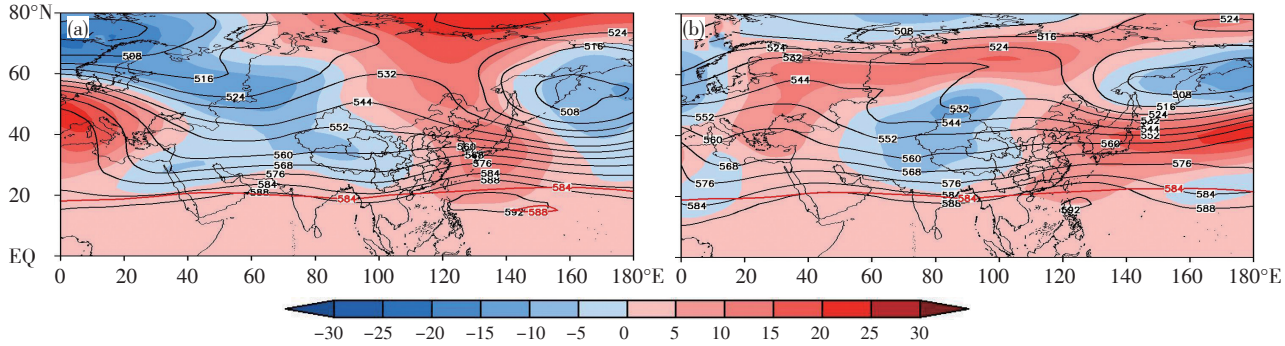


图2 2024年1月31日—2月6日(a)和2月19—25日(b) 500 hPa位势高度(黑色等值线，单位：dagpm)和距平场(阴影，单位：dagpm)和同期气候平均态(红色等值线，单位：dagpm)

Fig. 2 The original (black contour) and anomalies (shaded) of the averaged 500 hPa geopotential height (unit: dagpm) and the climatology of the same period (red line, unit: dagpm) (a) from January 31 to February 6, 2024, and (b) from February 19 to 25, 2024

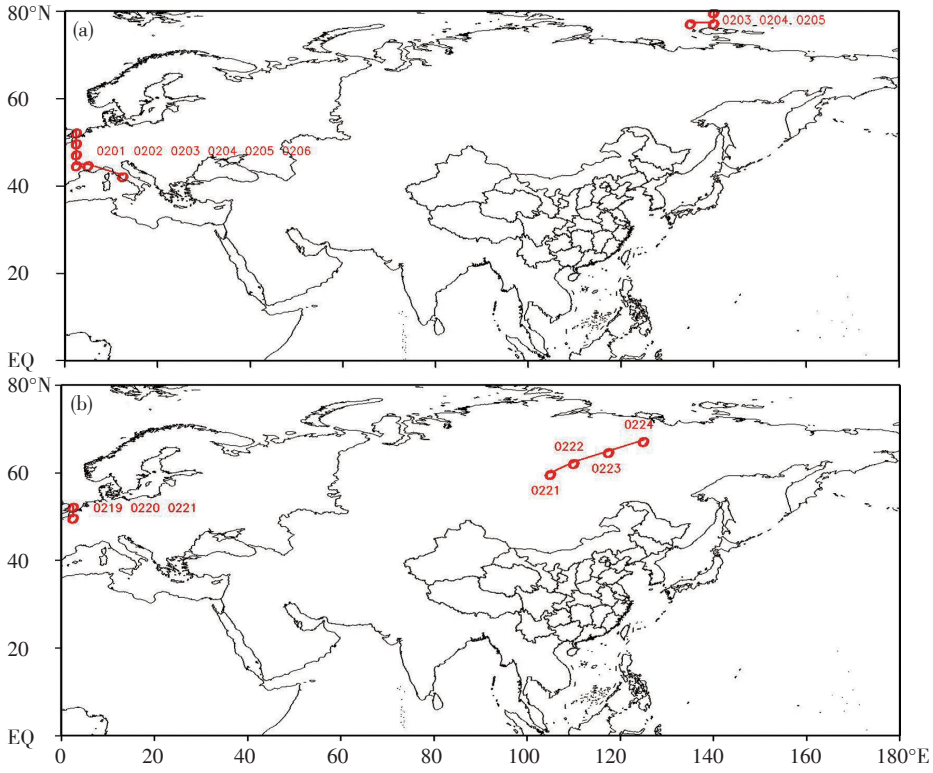


图3 2024年1月31日—2月6日(a)和2月19—25日(b) 阻塞中心位置(圆圈所示)

Fig. 3 Central positions of blocking from (a) January 31 to February 6 and (b) February 19 to 25, 2024 (The circles represent the position of blocking)

综合以上分析,两次过程我国大陆西部至贝湖一带为低槽,其下游有高压脊,“西低东高”的形势有利于中东部地区出现持续性降水。副高较常年同期偏北、显著偏强,有利于暖湿气流沿副高外围向我国中东部地区输送,冷暖空气交汇在中东部地区,出现大范围雨雪天气。过程Ⅱ在贝湖以北地区有阻塞高压发展维持,其前部横槽旋转南下带来强寒潮天气,西段雪线较过程Ⅰ偏南。

3.2 低层环流异常

两次过程均发生在低层冷空气南下与西南暖湿气流相互作用的背景下,低层东北风或偏东风为强雨雪天气的产生提供了深厚的冷垫,中低层西南暖湿气流在冷垫上爬升,是产生雨雪冰冻天气的主要动力机制,并为冻雨和降雪等复杂的降水相态变化提供了逆温层、融化层及冻结层的温度条件(张芳华等,2024)。

图4给出两次过程平均的850 hPa风矢量距平和700 hPa经向风扰动距平的空间分布,其中经向风扰动指经向风纬向偏差的平方,表示经向风与同纬圈经向风平均值的偏离程度,扰动正距平表示经向风扰动偏强,负距平表示经向风扰动偏弱(彭京备等,2019)。过程

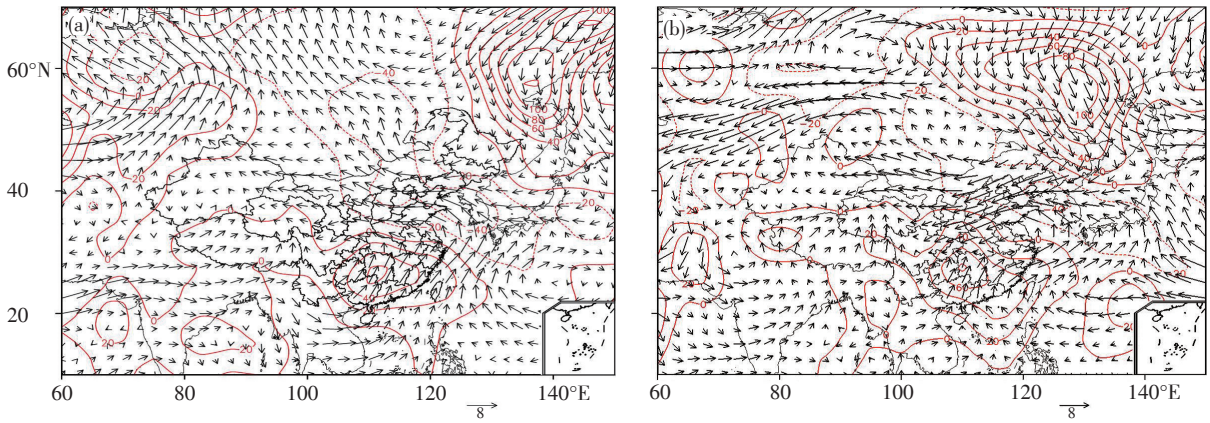


图4 2024年1月31日—2月6日(a)和2月19—25日(b) 850 hPa风矢量距平场(风向杆,单位: m·s^{-1})和700 hPa副热带扰动距平(等值线,单位: m^2·s^{-2})

Fig. 4 The 850 hPa wind anomalies (barb, unit: m·s^{-1}) and 700 hPa subtropical disturbance anomalies (contour, unit: m^2·s^{-2}) from (a) January 31 to February 6,2024 and (b) February 19 to 25,2024

Ⅰ(图4a)从我国东北地区南部至黄淮850 hPa上空为东北风距平或偏东风距平，而从中南半岛经中国南海到华南、江南至江淮地区为偏南风距平，江淮、江汉一带形成西南与东南距平风场的辐合；过程Ⅱ(图4b)，850 hPa东北风距平分布在东北地区到黄淮、江淮一带，较过程Ⅰ更偏南，表明低层冷空气影响范围更广，低纬度地区从南海北部到长江以南为西南风距平，在长江中下游到淮河流域一带形成气旋式距平环流。从两次过程的700 hPa经向风扰动距平来看，过程Ⅰ(图4a)在青藏高原东部至我国南方地区为扰动正距平区，中心位于华南北部至江南西部，强度超过40 $m^2 \cdot s^{-2}$；过程Ⅱ(图4b)最大扰动正距平中心位置与过程Ⅰ接近，但强度超过过程Ⅰ，且正距平北界较过程Ⅰ偏北。

以上分析表明，两次过程中，850 hPa在江淮、江汉至江南北部均存在距平风场的辐合，有利于上述地区出现明显雨雪天气；过程Ⅱ低层冷空气及其上方西南暖湿气流扰动的距平均大于过程Ⅰ，偏南风扰动正距平范围更偏北，与过程Ⅱ降水强度大、影响范围偏北相一致。

进一步以湖北东南部和湖南中部单点为例，分析两次过程中低层风场的时间演变及其对降水相态的影响。图5分别是沿湖北东南部(武汉附近)和湖南中部(长沙附近)的水平风场、温度和相对湿度的时间-空间剖面。可见，在两次过程的开始阶段，850 hPa及以下的风场均出现由西南风向偏北风的转变，低层气温随之降低，形成冷垫，冷垫之上700 hPa附近维持西南风，形成0～4 ℃的融化层。湖北东南部(图5a)2日温度层结呈“冷-暖-冷”的结构，出现冻雨，3日之后各层气温持续下降，降水相态转为以降雪为主；过程Ⅱ的前期，即2月19—20日，云内各层温度都大于0 ℃，湖北东南部出现明显降雨，21日之后受强寒潮影响，低层气温迅速降低，中层融化层也减弱，降水相态逐渐由雨转为以降雪为主。湖南中部(图5b)风场与气温的总体演变特征与湖北东南部(图5a)相似，2日之前各层温度超过0 ℃，湖南中部出现降雨，3—6日温度层结出现“冷-暖-冷”结构，700—850 hPa附近形成融化层，低层为-4~0 ℃的冻结层，湖南中部以冻雨为主；过程Ⅱ21日以后受低层冷空气南下影响，低层冷垫再次建立，600—850 hPa附近存在逆温层，“冷-暖-冷”的温度层结出现，湖南中部降水相态以冻雨或雨夹雪为主。由此可见，低层冷空气和中层西南暖湿气流的强度及其变化对降水相态有重要影响。

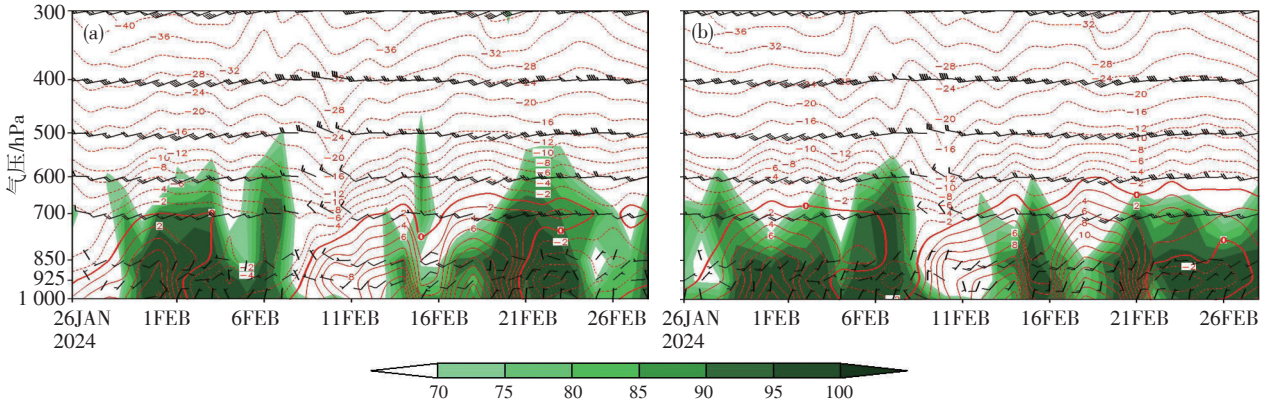


图5 2024年1月26日—2月27日11日沿(a) (115°E，30°N)和(b) (112.5°E，27.5°N)的水平风场(风向杆，单位：$m \cdot s^{-1}$)，温度(红色等值线，单位：°C)，相对湿度(填色，单位：%)的高度-时间垂直剖面

Fig. 5 Height-time profiles of horizontal wind field (barb, unit: $m \cdot s^{-1}$), temperature (red contour, unit: °C) and relative humidity (shaded,unit:%) at positions (a) (115°E, 30°N) and (b) (112.5°E, 27.5°N) from January 26 to February 27, 2024

4 水汽输送

水汽条件是降水发生的必要条件之一，过程Ⅰ有10个国家气象观测站、过程Ⅱ有82个气象站日降水量突破建站以来2月极值。两次过程江南北部和江淮地区700 hPa比湿超过1倍标准差(图略)，为突破同期极值降水的发生提供了水汽条件。从两次过程水汽输送图上可以看出(图6a、b)，影响我国南方地区的主要有两支水汽输送带，一支是从阿拉伯海北部经过印度半岛、孟加拉湾北部、中南半岛的偏西风水汽输送带，另一支是副高外围偏东风水汽输送带，其经南海转向为偏南风水汽向我国南方输送，两次过程相比过程Ⅱ偏西风水汽输送弱于过程Ⅰ，副高外围经南海转向的水汽输送通量高于过程Ⅰ。两次过程水汽辐合大值中心位于贵州至广西一带，其东部为东北向的带状水汽通量辐合区延伸至江南地区。江南大部过程Ⅰ整层水汽通量散度平均值为-3×10^{-5} $g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$左右，而第二次过程更强，达$-3\sim-6\times10^{-5}$ $g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$；且二者均表现为$-3\sim-6\times10^{-5}$ $g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$左右的负距平，即整层水汽通量辐合强于历史同期。

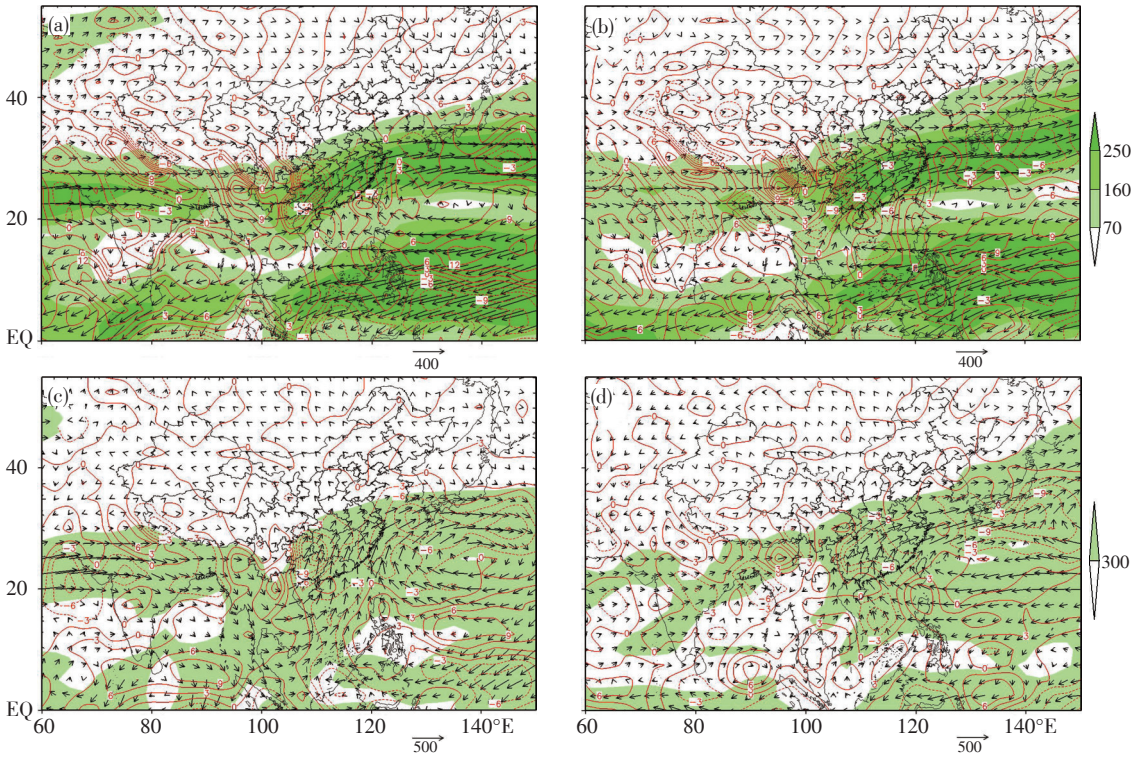


图6 2024年1月31日—2月6日(a)、2月19—25日(b)整层水汽通量(阴影,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(红色等值线,单位:10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1})以及2024年1月31日—2月6日(c)、2月19—25日(d)整层水汽通量距平(阴影,单位:kg·m^{-1}·s^{-1})和通量散度距平(红色等值线,单位:10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1})

Fig. 6 Water vapor flux (shaded, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and flux divergence (red line, unit: 10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) (a) from January 31 to February 6, 2024 and (b) from February 19 to 25, 2024. Water vapor flux anomalies (shaded, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and flux divergence anomalies (red line, unit: 10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}) (c) from January 31 to February 6, 2024 and (d) from February 19 to 25, 2024

2024年2月两次过程和气候平均状态相比,过程Ⅰ(图6c)来自孟加拉湾北部的异常偏西风水汽输送尤为强盛,我国南方地区几乎都在该异常水汽输送影响下,我国江南大部、华南中西部及贵州一带整层水汽通量散度距平超过-3×10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1};过程Ⅱ(图6d)有两支异常水汽输送控制我国南方地区,一支是来自孟加拉湾北部的异常偏西风但其强度较弱,另一支是副高外围转向的异常西南风水汽输送,其控制我国南方大部地区,湖南大部、华南北部及贵州东南部整层水汽通量散度距平超过-6×10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1}。由以上两次过程的水汽输送通道对比可知,过程Ⅰ以来自孟加拉湾的异常水汽输送为主,而第二次以来自西北太平洋转向的异常水汽输送为主。从110°—120°E平均偏南风水汽输送来看,两次低温雨雪冰冻过程在我国中东部地区发生和维持均对应出现偏南风水汽输送大值区,过程结束水汽输送通量数值明显减弱(图略)。1月第6候开始18°—30°N出现偏南风水汽输送大值区,1月30日左右水汽输送显著加强,31日出现超过250 kg·m^{-1}·s^{-1}的大值中心,对应过程Ⅰ发生,2月6日后水汽输送明显减弱,雨雪过程结束。2月第4候15°—35°N偏南风水汽输送再一次增强,在20日前后我国华南至江南一带出现超过300 kg·m^{-1}·s^{-1}的大值中心,23日水汽输送减弱,25日后江南和华南地区偏南风水汽输送低于30 kg·m^{-1}·s^{-1}。

通过以上分析可知,过程Ⅰ主要的水汽来源是来自孟加拉湾北部的偏西风输送,过程Ⅱ则是来自西北太平洋的水汽输送贡献更大。过程Ⅱ水汽通量散度在江南地区可以达到-3~-6×10^{-5} g·hPa^{-1}·cm^{-2}·s^{-1},强于过程Ⅰ,对应着过程Ⅱ降水强度更强;过程Ⅱ水汽通量大值区也较第一次偏北,过程Ⅱ强的降水落区北界较第一次偏北。

5 副高北抬成因及寒潮爆发的平流层前兆信号

与2008年1月相比2024年2月中高纬阻塞形势并不显著,南支槽强度也没有偏强,但两次过程副高都偏北,接下来将分析副高偏北的可能原因。图2为两次过程200 hPa纬向风及其异常,可以看出从北非经中亚到日本以南地区存在急流带,急流中心位于中东及日本附近。Karoly和Hoskins(1982)提出急流的分布决定着Rossby波能量频散的基本特征。图8为对流层中高层的Rossby波能量频散,过程Ⅰ(图7a)北非到西欧地区存在正异常环流区,该Rossby波能量向中亚

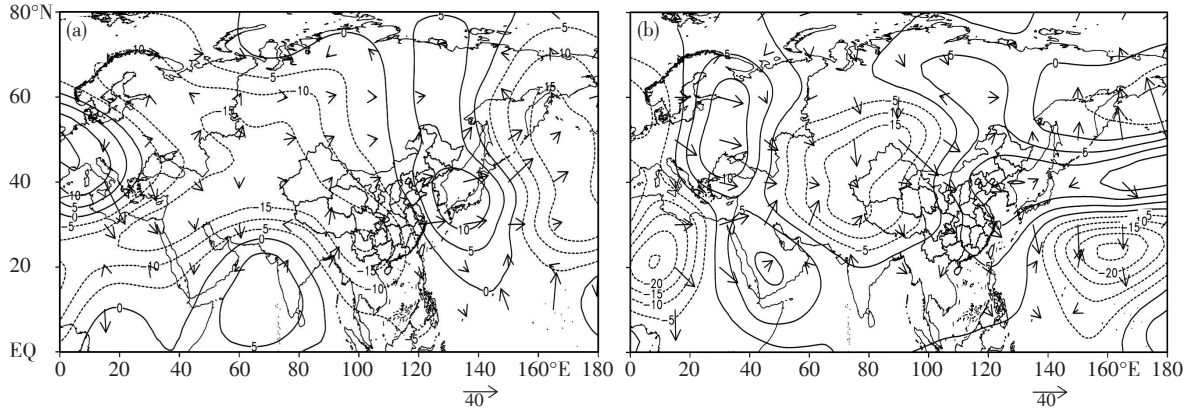


图7 2024年1月31日—2月6日(a)、2月19—25日(b)300 hPa流函数距平(等值线，单位：10^6 $m^2\cdot s^{-1}$)和对应的TN波作用通量(矢量，单位：$m^2\cdot s^{-2}$)

Fig. 7 Mean anomalies of 300 hPa stream function and wave activity flux(vector, unit: $m^2\cdot s^{-2}$; contour line, unit: 10^6 $m^2\cdot s^{-1}$) from (a) January 31 to February 6,2024, and (b) February 19 to 25, 2024

至日本急流区频散，从北非到东亚沿海表现为“正-负-正”的异常分布，东亚沿海处的正异常中心主要由来自北非异常中心的Rossby波能量维持。通过逐日的波能量频散(图略)特征可知，1月24日来自北非到西欧一带的Rossby波能量沿亚非副热带急流向下游传播，导致南支槽加深，引起副高加强，之后从北非到东亚沿海的“正-负-正”能量频散是维持副高北抬的部分原因。过程Ⅱ(图7b)西欧到北非出现一个经向度较大的纵向负异常区，其沿南北两支路径将Rossby波能量向下游频散，北支在黑海北部有正异常中心，南支在阿拉伯半岛存在正异常中心，而后两支波矢量在巴尔喀什湖一带汇合，形成负异常中心再向下游频散，东亚沿海至中国南海为正异常带。逐日的波能量频散(图略)特征表现出，2月16日沿亚非副热带急流的Rossby波能量激发副高增强，之后与沿中纬度传播在远东地区激发的正距平中心结合，副高北抬。由两次过程的OLR异常分布(图略)可知，在中国南海到菲律宾以东洋面均为OLR正距平表明该地区对流活动减弱，在500 hPa也均未发现由热带平洋地区向北Rossby波能量频散的表征。由以上分析可知，两次过程副高的异常北抬主要是受来自西非至北欧一带对流层中高层Rossby波能量在中纬度和副热带地区向下游传播的影响，并非是由南海至热带西太平洋一带的对流活动所导致。两次过程副高阶段性北抬的可能机理与施宁等(2008)结论较为一致。

冬季极地冷空气主要集中在极地区域内，当平流层极涡被扰动，极涡变形或崩溃使得极地区域内的冷空气被平流层破坏，其效应向对流层传导，迫使对流层极区内的冷空气向南扩散，引导寒潮南下影响中低纬度地区。平流层极涡对冷空气过程影响已有学者进行过研究(李艳等，2019)。Deng和Chen(2008)发现当平流层极涡减弱时，亚洲大陆东部(100°—150°E，45°—65°N)大槽会有所加强，当极涡加强时上述区域大槽强度会减弱。可以看出平流层极涡强度

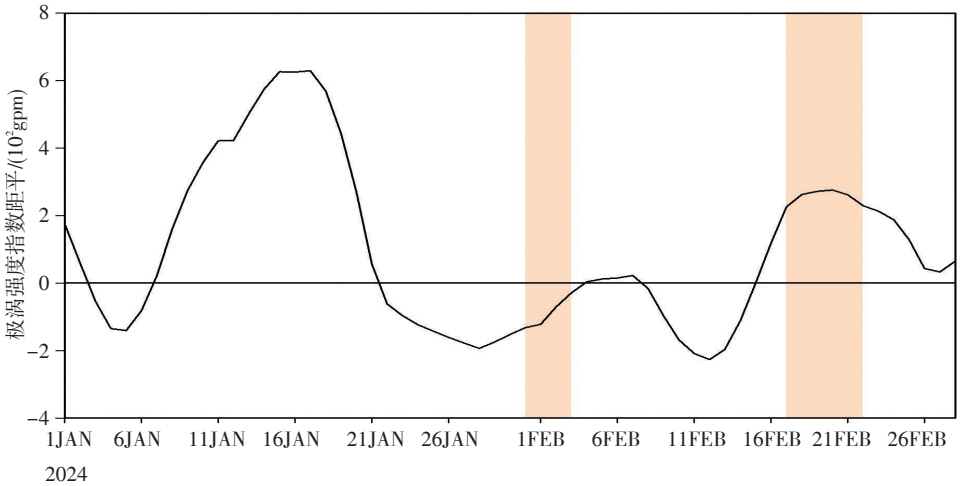


图8 2024年1月1日—2月29日平流层极涡强度指数距平(单位：10^2 gpm)时序图

Fig. 8 Time series of stratosphere polar vortex intensity anomaly (solid, unit: 10^2 gpm) from January 1 to February 29, 2024

的变化影响了东亚大槽的强弱，进而会使影响我国的冷空气强度发生变化。在大范围低温雨雪冰冻天气过程的初始阶段，中东部地区均受冷空气影响，分别是1月31日—2月2日的较强冷空气和2月17—22日的强寒潮(许先煌和张芳华，2024)。通过分析极涡强度指数距平的演变可以看出(图8)，1月31日—2月2日极涡强度指数为负异常，表征极涡强度较常年同期略偏强，2月17—22日强寒潮影响时极涡强度指数为显著正异常，极涡强度偏弱，对应亚洲大陆东部低槽强度强于第一次冷空气过程。由2月17—22日与2月12—16日的海平面气压差值可知西伯利亚高压增强，增幅中心强度超过30 hPa，高压前部东亚沿岸的北风也显著增强，引起过程Ⅱ我国北方到华中地区气温较常年同期偏低(图略)。过程Ⅰ极涡强度较常年同期略偏强，冷高压增幅小，低于10 hPa，表明过程Ⅰ冷空气势力弱，对应850 hPa仅在我国中西部地区出现2 ℃左右的负异常，明显弱于过程Ⅱ。

由于平流层变化通常维持时间长，并且平流层极涡异常下传领先于对流层，可为冬季我国南方地区天气气候异常提供一个新的预报依据。通过2024年2月位势高度距平沿60°N的经度-高度剖面可以看出，2月1日(图9a)在10 hPa的平流层120°E左右有降压中心，200 hPa以下60—120°E为升压区。2月5日(图9b)，平流层20 hPa以上在50°E左右出现降压中心，此时东亚东部120°E附近为弱升压区，亚洲大陆呈现西低东高形势。2月11日(图9c)，平流层100°E以西的降压中心强度增强，降压区逐渐下传，亚洲东部对流层的升压区转变为弱降压区。2月15日(图9d)，亚洲东部(60—120°E)平流层的降压区继续增强，120—150°E的-20 dagpm等值线延伸到了500 hPa以下的高度，亚洲东部500 hPa低槽增强，随后位于西伯利亚一带的横槽转竖并东移南压(图略)，17日起强寒潮影响我国大部地区。2月21日起(图9e)平流层降压区向下传播开始不明显，25日(图9f)极涡进一步收缩，30°E以东都变为升压区，亚洲东部对流层500 hPa降压区域明显缩小。在过程Ⅱ开始的前10 d左右平流层极涡开始下传，促使亚洲东部中高纬度低槽增强，有利于冷空气向南渗透，为中东部地区冷暖空气交汇产生低温雨雪冰冻创造环流条件。由以上分析可以得出发生在2月第3候左右的平流层极涡下传可作为第二次强寒潮过程的前兆信号。

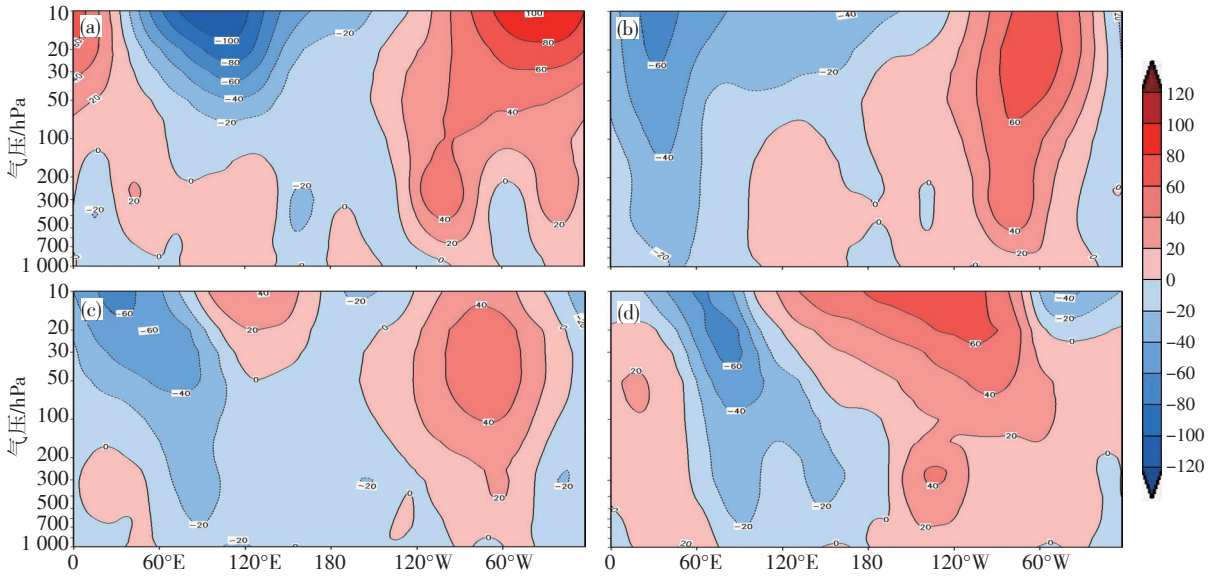


图9 2024年2月1日(a)、5日(b)、11日(c)、15日(d)、21日(e)和25日(f)沿60°N的位势高度距平(单位：dagpm)经度-高度剖面

Fig. 9 The longitude-height cross-section of height anomaly along 60°N (unit: dagpm) on (a) February 1, (b) February 5, (c) February 11, (d) February 15, (e) February 21, and (f) February 25, 2024

6 结论和讨论

本文以2024年2月发生的两次低温雨雪冰冻过程为研究对象，分析造成该异常天气出现的大尺度环流异常特征，并从平流层对对流层影响的角度出发寻找预报冷空气的前兆信号。得出主要结论如下：

(1) 2024年2月我国中东部地区出现了两次大范围持续性低温雨雪冰冻过程，时间段分别为1月31日—2月6日、2月19—25日。两次过程均具有降水范围广、持续时间长、降水量极端、降水相态复杂和气温显著偏低等特征。与历史同期对比，2024年2月关键区内(110°—122°E，25°—35°N)平均日降水量为1981年以来同期第二高值，过程Ⅱ降水强度大于过程Ⅰ。

(2) 两次过程我国大陆上空500 hPa高度场呈现“西低东高”形势，有利于中东部地区出现持续性降水。过程Ⅰ中高纬度地区没有明显的阻塞系统；过程

Ⅱ在贝加尔湖以北地区有阻塞高压发展,该形势与2008年1月更为接近,暖平流和负涡度平流的共同作用使得阻高系统发展和维持。

(3) 两次过程均出现在低层冷空气南下、中层西南暖湿气流发展的背景下,暖湿空气沿低层冷垫爬升,为大范围雨雪天气提供重要的动力抬升条件,并为冻雨和降雪等复杂的降水相态变化提供了逆温层、融化层及冻结层的温度条件。两次过程副高较常年同期偏北、显著偏强,有利于暖湿气流沿副高外围向我国输送。过程Ⅰ主要的水汽来源是孟加拉湾北部,经南支槽前显著偏强的偏西风向我国中东部地区输送,而过程Ⅱ来自西北太平洋的水汽输送贡献更大,且江南地区整层水汽辐合强于过程Ⅰ。

(4) 副高偏北的可能原因是受到来自西非至北欧一带对流层中高层Rossby波能量在中纬度和副热带地区向下游传播的影响,并非由南海至热带西太平洋一带的对流活动所导致。

(5) 发生在2月第3候左右的平流层极涡下传可作为过程Ⅱ寒潮活动的前兆信号,平流层极涡下传超前于对流层,可为我国冬季冷空气过程预报提供一种新的依据。

本文主要从对流层大尺度环流异常特征和水汽输送条件等方面,对两次持续性低温雨雪冰冻过程进行了研究,并探讨了强冷空气过程的前兆预报信号,得到了上述几点对低温雨雪冰冻过程和冷空气过程预报有应用价值或指导意义的结论,可望为中长期冷空气预报提供参考依据。但对于短时间内同类异常天气接连出现的大尺度外强迫原因仍需进一步探讨。此外,两次过程低纬度环流形势相似,但是亚欧中高纬环流差异较大,表明产生大范围持续性低温雨雪冰冻天气过程的环流形势复杂多样,未来需要更深入的分类研究。

参考文献(References):

布和朝鲁,纪立人,施宁.2008.2008年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析Ⅰ:亚非副热带急流低频波[J].气候与环境研究,13(4):419-433. Bu H, Ji L R, Shi N. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008 part Ⅰ: low frequency waves embedded in the Asian African subtropical jet [J]. Climatic and Environmental Research,13(4):419-433 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.07

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 the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warning [J]. Acta Meteorologica Sinica,66(5):808-825 (in Chinese). doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014

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

高辉,陈丽娟,贾小龙,等.2008. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析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 disastes in South China during January 2008: Ⅱ.possible climatic causes [J]. Meteorological Monthly,34(4):101-106 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2008.4.013

顾雷,魏科,黄荣辉.2008.2008年1月我国严重低温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)

国家气候中心.2008. 2008年初我国南方低温雨雪冰冻灾害及气候分析[M].气象出版社. National Climate Centre. 2008. Disaster and climate analysis of low temperature rain and snow freezing in south China in early 2008 [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese)

矫梅燕,曲晓波.2008. 2008年初中国南方持续性低温雨雪冰冻灾害天气分析[M].气象出版社. Jiao M Y, Qu X B. 2008. Weather analysis of continuous cold rain and snow freezing disaster in southern China in early 2008 [M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese)

李灿,张端禹,冯明媚,等.2009.南方极端低温雨雪冰冻过程天气学特征分析[J].暴雪灾害,28(4):321-327. Li C, Zhang D Y, Feng M, et al. 2009. Analysis of Synoptic characteristic of extremely low temperature and snow-ice weather in South China [J]. Torrential rain and disasters,28(4):321-327 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.04.006

李灿,张礼平,吴义城,等.2010.南方极端雨雪冰冻过程东亚冬季风环流特征及与El Nino/La Nina事件的关系[J].暴雨灾害,29(2):142-147. Li C, Zhang L P, Wu Y C, et al. 2010. Circulation characteristic of East Asia winter monsoon of extremely low temperature and snow-ice weather in Southern China and its correlation with El Nino/La Nina events [J]. Torrential rain and disasters,29(2):142-147 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2010.02.007

李崇银,杨辉,赵晶晶.2019.大气环流系统组合性异常与极端天气气候事件发生[J].大气科学学报,42(3):321-333. Li C Y, Yang H, Zhao J J. 2019. Combinational anomalies of atmospheric circulation system and occurrences of extreme weather/climate events [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,42(3):321-333 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190302001

李维京,李怡,陈丽娟,等.2013.我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J].应用气象学报,24(4):385-396. Li W J, Li Y, Chen L J, et al. 2013. Inter-decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors [J]. Journal of Applied Meteorological Sciencs,24(4):385-396 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20130401

李艳,王嘉禾,王式功.2019.极涡、阻塞高压和西伯利亚高压在极端低温事件中的组合性异常特征[J].兰州大学学报:自然科学版,55(1):51-63. Li Y, Wang J H, Wang S G. 2019. The integrated circulation anomalies of polar vortex, blocking and the Siberian high over the extreme low-temperature events [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences,55(1):51-63 (in Chinese). doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2019.01.007

李艳,王式功,金荣花,等.2012.我国南方低温雨雪冰冻灾害期间阻塞高压异常特征分析[J].高原气象,31(1):94-101. Li Y, Wang S G, Jin R G, et al. 2012. Abnormal characteristics of blocking high during durative low temperature, snowfall and freezing weather in Southern China [J]. Plateau Meteorology,31(1):94-101 (in Chinese)

刘舸,纪立人,孙淑清,等.2013.关于东亚冬季风指数的一个讨论—东亚中低纬冬季风的差异[J].大气科学,37(3):755-764. Liu G, Ji L R, Sun S Q, et al.2013. A discussion on the East Asian winter monsoon index-differences between the East Asian winter monsoon at mid-high and low latitudes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,37(3):755-764 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12054

刘红武,李振,陈龙,等.2020.湖南一次罕见低温雨雪冰冻天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,14(2):18-26. Liu H W, Li Z, Chen L, et al. 2020. Analysis of a rare consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(2):18-26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.02003

彭京备,孙淑清.2019. 2018年1月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系[J].大气科学,43(6):1233-1244. Peng J B, Sun S Q. 2019. Formation of rainy and snowy weather in South China in January 2018 and its relationship with the abnormal East Asian winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(6):1233-1244 (in Chinese). doi:10.3878/j/issn.1006-9895.1901.18188

施宁,布和朝鲁,纪立人,等.2008. 2008年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析Ⅱ:西太平洋副热带高压的特征[J].气候与环境研究,13(4):434-445. Shi N, Bu H, Ji L R, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008 Part Ⅱ: characteristics of the Western Pacific Subtropical High [J]. Climate and Environmental Research,13(4):434-445 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QHYH.0.2008-04-008

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)

王遵娅,张强,陈峪,等.2008. 2008年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征[J].气候变化研究进展,4(2):63-67. Wang Z Y, Zhang Q, Chen Y, et al. 2008. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China [J]. Advances In Climate Change Research,4(2):63-67 (in Chinese)

许先煌,张芳华.2024. 2024年2月大气环流和天气分析[J].气象,50(5):642-648. Xu X H, Zhang F H. 2024. Analysis of the February 2024 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly,50(5):642-648 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2024.041801

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). doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008. 05.016

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). doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.03.016

周长艳,高文良,李跃清.2008. 2008年1月我国低温雨雪冰冻气象灾害中的水汽输送特征[J].高原山地气象研究,28(4):25-30. Zhou C Y, Gao W L, Li Y Q. 2008. Water vapor transport analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in China during January 2008 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,28(4):25-30 (in Chinese).doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2008.04.004

张博,于超,黄威,等.2021.欧亚持续性阻塞对6月大兴安岭地区气温和降水的影响及气温的前兆信号研究[J].气象与环境学报,37(4):63-69. Zhang B, Yu C, Huang W, et al. 2021. Effect of persistent blocking in Eurasian on temperature and precipitation in June in Greater Khingan Mountains and the precursor signal of temperature [J]. Journal of Meteorology and Environment.37(4):63-69 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X. 2021.04.009

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:CNKI:32-1083/P.20111207.1055.001

Cohen J, Furtado J C, Barlow M A, et al. 2012. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling [J]. Environmental Research Letters,7(1):014007. doi:10.1088/1748-9326/7/1/014007

Deng S M, Chen Y J, Luo T, et al. 2008. The possible influence of stratospheric sudden warming on East Asian weather [J]. Advance in Atmospheric Sciences,25(5):841-846

Karoly D J, Hoskins B J. 1982. Three dimensional propagation of planetary waves [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,60:109-123. doi:10.2151/jmsj1965.60.1_109

Liu G, Ji L R, Sun S Q, et al. 2012. Low-and mid-high latitude components of the East Asian winter monsoon and their reflecting variations in winter climate over eastern China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,5(3):195-200

Liu P, Zhu Y J, Zhang Q, et al. 2018. Climatology of tracked persistent maxima of 500-hPa geopotential height [J]. Climate Dynamics,51:701-717. doi:10.1007/s00382-017-3950-0

Ma S M, Zhu C W, 2019. Extreme cold wave over East Asia in January 2016: A possible response to the larger internal atmospheric variability induced by Arctic warming [J]. Journal of Climate,32,1203-1216. doi:10.1175/JCLI-D-18-0234.1

Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase independent wave activity flux for stationary and migratory quasi geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,58(6):608-627.doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern hemisphere winter [J]. Monthly Weather Review,109:784-812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2

Zhang B, Liu G, Zhu Y J, et al. 2019. Frequency of persistent blocking and ridge events related to precipitation over eastern China during August and its preceding atmospheric signals [J]. Weather and Forecasting,34(6):1705-1719. doi: 10.1175/WAF-D-19-0047.1

(责任编辑 闵爱荣)