

甘肃省平凉市春季一次罕见寒潮 低温天气的极端性分析

李晓霞¹ 李常德¹ 马真¹ 赵慧¹ 高玲²

(1 甘肃省平凉市气象局, 平凉 744000; 2 甘肃省白银市气象局, 白银 730900)

摘要: 基于常规观测资料、NCEP ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) 再分析等资料对2018年4月4—7日发生在甘肃省平凉市的罕见寒潮低温天气过程进行分析, 得出以下结论: 1) 此次寒潮天气的冷空气源地位于新地岛以东洋面上。寒潮爆发前5 d, 北半球100 hPa有一偏心型极涡。寒潮爆发期, 对流层中、上部的极涡发生了一次分裂, 因靠近我国的极涡中心偏强, 造成的低温天气也偏强。2) 此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽, 热力、动力因子共同促使槽、脊发展东移, 随着脊前偏北风加强, 引导槽后冷空气大举向南爆发。3) 寒潮爆发前后, 主力冷空气以分裂形式配合副冷锋影响寒潮区, 变形场和地面倒槽的动力、热力作用有利于地面(副)冷锋的生成和地面气旋加强。4) 寒潮爆发前, 平凉地区处于明显的升温环境中。爆发期, 因受强冷平流的长时间影响, 出现显著的持续性降温; 因平凉地区存在明显的上升绝热膨胀冷却效应, 利于降温天气的进一步加剧。5) 湿位涡中第二项湿斜压项的时、空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程, 有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

关键词: 寒潮, 极涡, 冷(副)锋, 冷平流, 湿位涡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.06.006

Extreme Analysis of a Rare Cold Wave and Low Temperature Weather in Spring in Pingliang City, Gansu Province

Li Xiaoxia¹, Li Changde¹, Ma Zhen¹, Zhao Hui¹, Gao Lin²

(1 Meteorological Bureau of Pingliang, Pingliang 744000 2 Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin 730900)

Abstract: Based on conventional observation data, NCEP reanalysis data ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$), a rare cold wave and low temperature weather process which occurred in Pingliang City of Gansu Province from 4 to 7 in April 2018 was done. The results show that: 1) the cold air source of this cold wave weather is in the ocean surface to the east of Novaya Zemlya. Five days before the cold wave broken out, there was an off-center polar vortex at 100 hPa in the Northern Hemisphere. During the outbreak period of cold wave, the polar vortex in the middle and upper troposphere occurred a split. Because the center of polar vortex near China was stronger, the cold weather was also stronger. 2) The type of this cold wave process belonged to the development of unstable trough which in the fore part of high-pressure ridge. The main influence systems of high altitude were high pressure ridge in Ural Mountain and low-pressure trough. The thermal and dynamic factors jointly promoted the development and eastward movement of the trough and the ridge. With the strengthening of northerly wind in front of the high-pressure ridge, the cold air behind the low-pressure trough violent erupted to the south. 3) Around the outbreak of the cold wave, the main cold air with secondary cold front affected the cold wave area in the form of splitting. The dynamic and thermal effects of the deformation field and surface trough were conducive to the formation of surface (secondary) cold front and the strengthening of surface cyclone. 4) the intensity of 500 hPa high altitude cold center and ground cold high pressure all reached or exceeded the corresponding index value of the regional cold wave in Gansu Province in April; before the cold wave broke out, Pingliang Prefecture was in an obvious warming environment. During the outbreak period, due to the influence of strong cold advection for a long time, the temperature of Pingliang Prefecture occurred a significant sustained reduction. Pingliang Prefecture has obvious ascending motion and adiabatic expansion cooling effect, which was conducive to the further intensification of the cooling weather. (5) The temporal and spatial evolution characteristics of the second wet also baroclinic term in the wet potential vortex could well describe the movement and development of cold air, which was conducive to the judgment and research of the cooling situation in the cold wave weather.

收稿日期: 2020年7月27日; 修回日期: 2020年11月4日

第一作者: 李晓霞(1989—), Email: qx53915@163.com

资助信息: 甘肃省气象局气象科研项目(人才专项)
(GSMARc2019-16)

Keywords: cold wave, polar vortex, cold (secondary) front, cold advection, wet potential vortex

0 引言

寒潮天气过程是一种大规模的强冷空气活动过程。寒潮天气的主要特点是剧烈的降温和大风,有时还伴有雨、雪、雨淞或霜冻^[1]。寒潮是我国冬春季严重的灾害性天气之一,能给工农业生产和人们日常生活带来很大的影响。对寒潮天气的认识和研究已较为广泛,阎琦等^[2-6]从气候角度分析了各地寒潮天气的变化特征及影响因子。周星妍^[7]指出北大西洋风暴轴位置异常与我国寒潮频次变化存在显著的相关关系。张琳^[8]发现极端气旋的生成和移动是中国寒潮天气发生的重要原因之一。近年来,对不同寒潮天气过程的发生机制进行对比分析的研究较多,田秀霞等^[9-13]对相关寒潮天气的影响系统、发生背景、水汽、动力、热力机制等进行了诊断对比分析,得出一些重要的寒潮预报经验和指标。董全等^[14]利用欧洲中期天气预报中心再分析资料和极端天气指数对某一次强寒潮天气活动进行了分析检验,探讨了如何有效利用极端天气指数来提高对极端灾害性天气过程预报的准确率。韦志刚等^[15]评估了CFSv2系统对寒潮天气预报的能力,发现该系统对寒潮降温情况具有一定的提前预报能力。王丽等^[16]将湿位涡应用到暴雨、强对流、寒潮等灾害性天气时,得出了有意义的结果。近年来,不少气象学者利用多种气象资料及相关产品对诸多典型寒潮天气个例做了深入的研究^[17-22],虽然引发寒潮爆发的环流形势和天气系统基本都是我们所熟知的,但是我国幅员辽阔,气候条件差异很大,各地寒潮天气特征存在一定的差异性,这就需要我们气象工作者根据当地的具体情况来研究寒潮预报的经验和指标,并做到本地化应用。目前而言,关于甘肃省平凉市本地的寒潮天气研究较少,对寒潮天气的极端性判断和预报也就更加欠缺。

2018年4月4—7日,甘肃省大部地方爆发了一次大范围的强寒潮天气,就平凉市而言,7个县(市、区)连续2日均出现寒潮天气,最低温度降幅最大达13.9℃,最低气温均达到或超过历史极值,属于一次极端性罕见强寒潮天气。各县区均出现不同程度的冷冻灾害,主要灾情出现在泾川县和灵台县,其中,泾川县有14个乡镇受灾,造成农作物受灾面积达27.85万亩(1亩≈666.7 m²),直接经济损失25882.66万元。灵台县有11个乡镇灾情较严重,造成果树、农作物等受灾面积达5.66万亩,直接经济损失16977.81万元。本文主要从寒潮天气系统、寒潮降温条件等方面入手,分析此次极端性寒潮天气的形成原因,为平凉市寒潮天气的预报及由此产生的气象灾害的预防提供参考。

1 天气实况

2018年4月4—7日,甘肃省平凉市爆发了入春以来最强的一次寒潮天气过程,造成7个县(市、区)出现大范围的剧烈降温天气,从寒潮强度和连续日数来看,4—7日研究区出现连续2天的区域性强寒潮天气,属于历史罕见寒潮天气。过程前后,全市日最低气温下降幅度普遍在8.5~13.9℃,其中,4—6日,庄浪县降温幅度最大,达到13.9℃;5—7日,灵台县降温幅度最大,达到13.8℃(图1)。7日清晨全市最低气温均降到-9.4~-5.0℃,最低气温和近20年同期相比较,7个县(市、区)均达到或超过历史极值,尤其静宁县的最低气温低于历史极值2.7℃。另外,4—5日寒潮区还出现了瞬时风力达6~7级的偏北大风,其中崆峒区极大风速达20.4 m/s。此次寒潮天气过程出现范围之广,强度之大,为历史罕见。

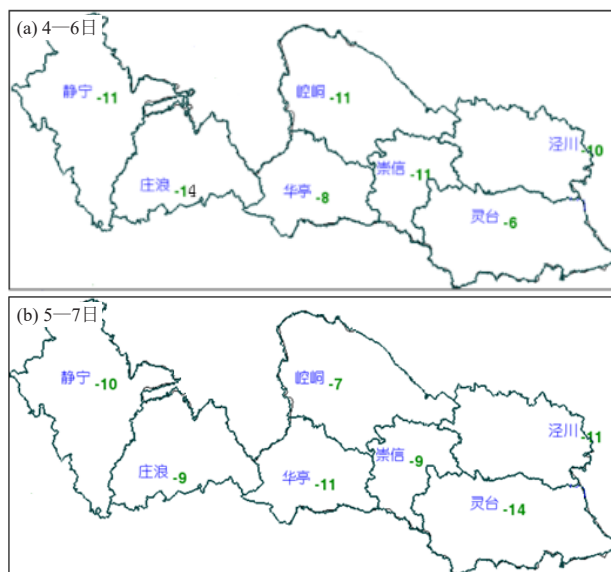


图1 2018年4月4—7日平凉市各县(市、区)48小时最低气温降温幅度(单位:℃)

Fig. 1 Drop range of minimum temperature for 48 h in Pingliang of all counties (cities, districts) in 4-7 April 2018 (unit: °C)

2 影响系统及降温条件

2.1 100 hPa 极涡

亚洲高纬度地区维持一个强大的极涡时,对我国的寒潮天气过程有很好的指示意义^[1]。利用NCEP再分析资料对寒潮的中短期形势做了分析,分析寒潮发生前5 d、前1 d和发生时100 hPa极涡的分布特征发现,寒潮发生前5 d,有一极涡中心稳定于新地岛以东的喀拉海一带,中心强度在1512~1516 gpm左右,呈不对称的单波型,可见寒潮爆发前5 d,在北半球就出现了东西向偏心型极涡。寒潮爆发前1 d,3日08

时,极涡中心位于80°N以南,较前期相比强度增强,中心位置有所南压。3日20时,极涡继续加强南压至70°N附近,中心强度达1540 gpm左右。寒潮爆发时,4日08时,极涡进一步加强南压,极涡由东西向转为西北东南向,径向度加大,影响范围也大幅扩大。5日20时,极涡发生了一次分裂,2个中心分别位于70°N以北(极涡I)和贝加尔湖附近(极涡II),2个极涡均位于欧亚大陆,中心强度分别为1552 gpm和1564 gpm,且靠近我国的极涡II偏强,说明伴随我国的大范围寒潮低温天气也是偏强的,甘肃省平凉市位于极涡II底部,受其影响将出现持续低温冷冻天气。

此次寒潮天气过程冷空气的源地位于新地岛以东的洋面上,而后经喀拉海、太梅尔半岛、西伯利亚一带进入我国。寒潮爆发期间,对流层中、上部的极涡发生了一次断裂,分为两个中心,形成偶极型环流,这表明此次冷空气的强度为中等以上强度,由于靠近我国的极涡中心偏强,且位于西伯利亚北部,这样冷空气从西伯利亚源源南下,造成我国大范围持续低温天气,也是形成此次甘肃省平凉市极端寒潮天气的重要原因之一。

2.2 500 hPa 环流形势

寒潮能否爆发与冷空气的源地和堆积程度有着密切的关系^[23]。分析500 hPa的环流形势可以看出,此次寒潮爆发前,2日20时,乌拉尔山附近为一高压脊,脊前有一弱的短波小槽,从温压场的配置来看,温度场落后于高度场,预示着上述槽、脊将会发展加强。3日08时,脊前不稳定小槽加强并东移南压至西西伯利亚一带。3日20时(图2a),乌拉尔山高压脊前冷槽分裂为南、北两支小槽,南支低槽位于新疆东部,等温线与等高线的交角大,槽后冷平流强。等高线也呈疏散结构,即槽线上有正涡度平流,两种因子共同促使该冷槽持续发展。同时,乌拉尔山高压脊线附近的暖平流和负涡度平流使得高压脊继续加强,使得脊前偏北风加大,这意味着冷平流的加强,将进一步促进脊前冷槽的发展。乌拉尔山高压脊和其前冷槽边发展边随着基本气流向东移动,至4日20时(图2b),乌拉尔山高压脊东移至亚洲西部,并由南北向逐渐向东北西南向发展,冷空气在脊前槽后持续堆积加强。5日08时,南北两支低槽同位相叠加,同时,亚洲西部高压脊同中亚高压脊有所合并加强,这将使得环流径向度进一步加大,脊前偏北风加强,引导槽后冷空气大举向南爆发,形成寒潮爆发的诱因。6日08时,亚洲中部受高压脊控制,低槽东移至我国东部,东亚大槽完成了一次重建,此时寒潮研究区仍受槽后冷平流的影响,前后出现了连续性的强寒潮天气。

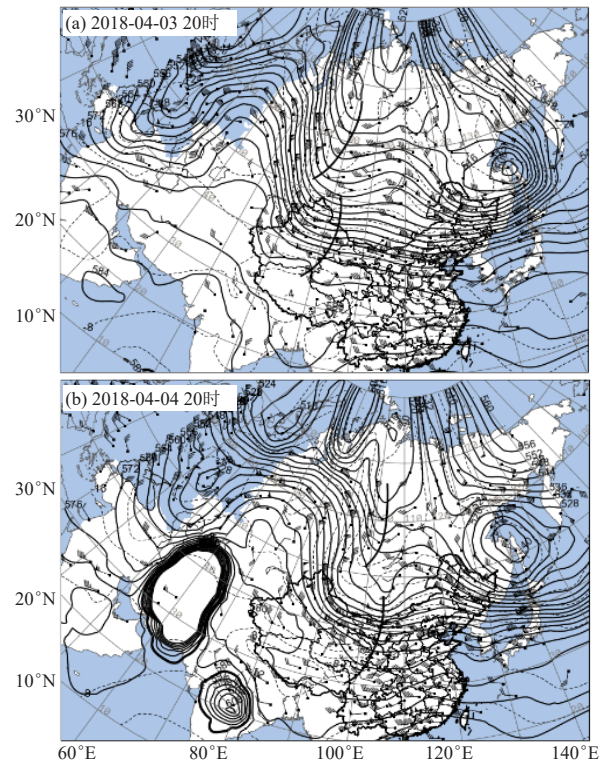


图2 2018年4月4—6日500 hPa环流形势
(实线:等高线;虚线:等温线)

Fig. 2 Circulation situation of 500 hPa in 4-6 April 2018
(solid: contours, dashed: isotherms)

此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽,不断东传的低槽持续影响寒潮研究区,加之强冷平流的长时间维持,使得此次寒潮天气过程具备了持续时间长,强度大,范围广的特征。

2.3 地面冷高压及冷锋

分析地面形势(图3)发现,此次寒潮爆发前后,在寒潮地面高压的前缘都有一条强度较强的冷锋作为寒潮的前锋,并且在300 hPa以下各等压面上都配合有明显的高空冷槽和锋区,同样,在寒潮冷锋的后部都有一地面冷高压存在,从冷高压的移动路径可以看出冷空气的移动路径为西北—东南向。对比上一节分析可以发现,地面寒潮冷锋均位于500 hPa冷槽前部,属于后倾形势。寒潮爆发过程中,随着高空冷槽的加深,地面冷锋后的气流径向度也加大,利于寒潮冷锋的南下。3日08时,地面冷高压位于乌拉尔山脊底部下游,寒潮冷锋位于两个冷高压之间的低压变形场中。3日20时(图3a),高压中心强度达1042.5 hPa,冷空气扩散到北疆,变形场中生成气旋中心,位于贝加尔湖西侧,寒潮冷锋位于贝加尔湖西侧至新疆北部。4日08时(图3b),冷高压位置少动,但主力冷空气分裂一闭合冷性小高压南压至河西

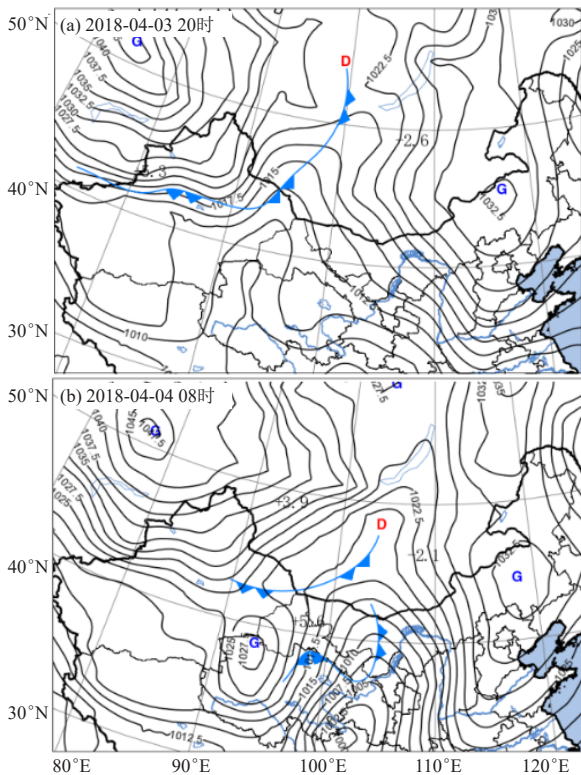


图3 2018年4月3—4日地面形势
Fig. 3 Ground situation in 3-4 April 2018

西部和青海高原西部一带，其前有副冷锋生成，是发展的低压倒槽与柴达木冷空气前锋结合地形锢囚锋，此时主锋仍位于蒙古气旋中心向西延伸的低压槽中。4日20时，随着主冷锋下摆转向，与其前副冷锋合并，形成一支更强的冷锋位于蒙古中部至甘肃东南部一带，其后部的地面高压中心强度分别增强到1045.8 hPa、1028.4 hPa，这也预示着冷空气强度的增强，此时，甘肃省平凉市位于冷锋后3 h显著升压区内，锋后正变压中心值达+10.0 hPa，变压差增大到11.0 hPa左右，这与该时段内平凉全市出现偏北大风天气密切相关。5日08时，地面冷高压位置少动，强度增强到1057.1 hPa，伸出的地面高压脊伸向东南，沿河西走廊不断延伸，其前冷锋东移，前后变压差在10.5 hPa左右；5日20时，切断出闭合冷高压，中心位于马鬃山-额济纳一带，中心强度达1042.5 hPa，平凉市仍位于冷锋后3 h显著升压区内，锋后正变压中心值达+9.0 hPa，变压差在8.5 hPa左右，而锋后强冷空气和较大变压差是形成平凉市寒潮和大风天气的重要影响因子；6日08时，冷高压中心沿河西走廊东移南下直至甘肃省河东地区，之后的24小时内北部冷高压中心缓慢变性，高压前冷锋也逐渐东移减弱消失。

从地面冷锋、气旋和冷高压的演变来看，冷空气主力并未爆发性东移南下，而是以冷高压分裂的形

式影响甘肃省东部地区。分裂的冷空气出现向南爆发的现象，冷高压中心沿河西走廊南下，其空间尺度较小，降温集中。另外，变形场和地面倒槽的动力、热力作用有利于地面（副）冷锋的生成和地面气旋加强。

2.4 温度平流

在水平气流方向上气温分布不均匀时，空气水平运动将引起气温的局地变化，暖平流使局地气温上升，冷平流使局地气温下降，因而气温变化的程度决定于温度平流的强度^[1]。

本文利用NCEP再分析资料对温度平流进行诊断分析，沿35.3°N做温度平流的垂直剖面，发现寒潮爆发前期，4月2—3日，研究区基本受暖平流或弱冷平流控制，以3日14时为例，在对流层中层有一个暖平流中心，强度达 $4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，可见过程前期研究区处于明显的升温环境中，为后期的寒潮降温和降温强度提供了温度基础。4日20时（图4a），600 hPa以下到近地面层，研究区转为受冷平流控制，最强中心位于近地面层，中心值达 $-1.6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，表明低层已有冷空气入侵。5日08时（图4b），从近地面层至对流层高层，研究区均受冷平流控制，中心位于700 hPa附近，值达到 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ ，可见冷空气逐渐变得深厚，强度也大大增强，为连续两日寒潮天气提供了

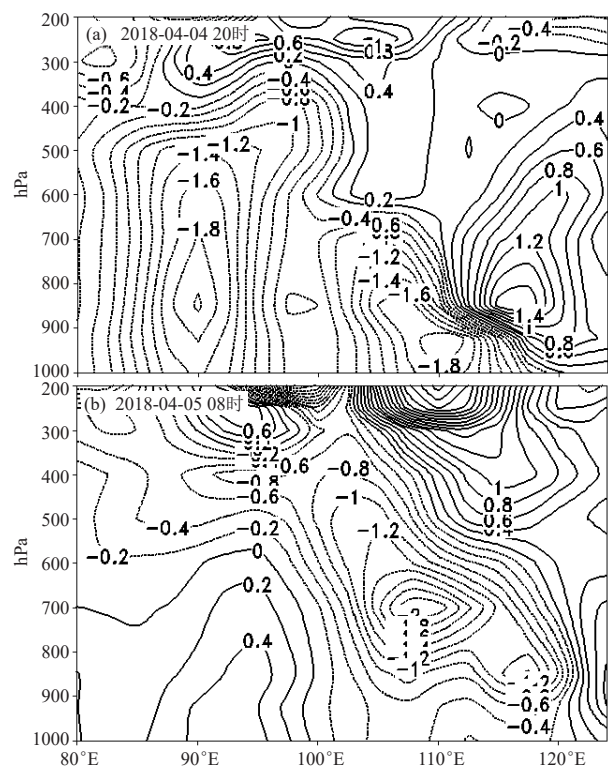


图4 2018年4月4—5日沿35.3°N温度平流的经向剖面(单位： $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$)

Fig. 4 The meridional section along 35.3°N of temperature advection in 2-5 April 2018 (unit: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$)

冷空气条件。到5日20时，冷空气持续加强，冷平流区域贯穿到对流层顶，最强中心位于500~400 hPa，研究区偏东一带更为显著，灵台县境内中心强度达 $-2.2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 左右。另外，从5日午后到前半夜，温度平流具有明显的上冷下暖分布特征，这种配置有利于不稳定层结的形成，可促使冷暖空气的上下对流，利于动量下传，形成地面大风。

2.5 垂直速度

本节主要分析垂直运动对局地气温变化的影响，垂直运动对局地气温变化的影响主要是通过垂直运动的方向、强度和大气温度来实现的。在稳定大气层结状态下，如有上升运动，即 $\omega < 0$ ，当地气温就下降，反之，如有下沉运动，即 $\omega > 0$ ，当地气温就上升。

本文沿 35.3°N 做垂直速度的垂直剖面，可以看出，4月3日20时，寒潮研究区500 hPa以下均为上升运动，中心值为 $-20 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ ，对流层中低层这种垂直运动的分布，可产生绝热膨胀冷却效应，从而利于研究区降温天气的加剧。4日20时，从近地层到对流层顶，研究区整层均为强的上升运动，中心最大值达 $-52 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ 以上，且最强上升运动区位于寒潮研究区境内，这说明此次寒潮天气过程中，垂直运动剧烈，从而引起的局地降温也就较强。5日20时，上升运动的强度有所减弱，但其伸展高度仍达300 hPa左右。至7日08时，研究区整层均转为下沉运动，由垂直运动项对局地温度变化所造成的影响转为升温效应。

3 湿位涡

湿位涡 (MPV) 是能够反映大气动力、热力和水汽作用的综合物理量。

在 p 坐标系中，湿位涡守恒的表达式为：

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}, \quad (1)$$

$$MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}, \quad (2)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}. \quad (3)$$

其中：式(2)为湿正压项，式(3)为湿斜压项。湿正压项表示惯性稳定性和对流稳定性作用。湿斜压项包含了湿斜压性和水平风垂直切变的作用，标志了大气斜压性的发展，而大气的斜压性有利于气旋性涡度的发展。MPV2与高空冷平流有很好的对应关系，可以很好的应用到寒潮天气的预报诊断中，当 $MPV2 < 0$ ， $|MPV2|$ 越大时，表示大气斜压性越强，等压面上的等温线越密集（即温度梯度越大），冷空气锋生越强，利于寒潮天气过程中的气温下降。

利用NCEP再分析资料，分别计算出500 hPa、700 hPa等压面上的MPV2项以及沿 35.3°N 的MPV2纬向垂直剖面，分析MPV2项在此次强寒潮天气过程中的作用。以500 hPa为例，3日20时，在甘肃省河东西部地区有一个MPV的密集带，中心值为 -1.3 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)，平凉市位于零线范围内。4日08时（图5a），MPV2密集带南压到甘肃省河东地区，研究区的值为 $-0.6 \sim -0.3 \text{ PVU}$ ，表明此时冷空气已南压并开始影响研究区，且500 hPa冷平流增强。5日08时（图5b），MPV2高值中心整体东移，研究区 $|MPV2|$ 增大，为 $-1.4 \sim -1.0 \text{ PVU}$ ，大气斜压性进一步增强，冷空气锋生加强，平凉市出现了明显的气温下降。之后MPV2密集带和大值中心逐渐东移，直到6日20时，研究区均位于MPV2负值区，但强度减弱。700 hPa的MPV2分布特征基本类似于500 hPa，3日20时—6日08时，研究区均位MPV2负值区，最强时段为3日夜到4日白天，最强值达 $-0.9 \sim -0.6 \text{ PVU}$ 。

再沿 35.3°N 做MPV2纬向垂直剖面图分析发现，3日02时，寒潮研究区700 hPa以上开始出现MPV2负值。4日20时（图5c），从近地面到对流层中上层，MPV2均为负值， $|MPV2|$ 普遍增大，最强中心位于600 hPa附近，值达 -1.1 PVU 左右，表明冷空气变深厚，强度增强。5日14时（图5d），MPV2大值中心东移，而寒潮区仍持续深厚MPV2的负值区。直到6日14时，研究区内MPV2值上下层均转为正值或弱的负值。

可见，湿位涡中第二项湿斜压项在此次寒潮天气过程中有着很好的指示意义，其时、空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程，从而有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

4 结论

(1) 此次寒潮天气的冷空气源地位于新地岛以东洋面上，而后经喀拉海、太梅尔半岛、西伯利亚一带进入我国。寒潮爆发前5 d，100 hPa在北半球有一东西向偏心型极涡。寒潮爆发期间，对流层中、上部的极涡发生了一次分裂，表明此次冷空气强度为中等以上强度，因靠近我国的极涡中心偏强，造成我国大范围的持续低温天气也偏强。

(2) 此次寒潮天气过程属于脊前不稳定小槽发展型。高空主要影响系统为乌拉尔山高压脊及其前低压槽，不断东传的低槽持续影响寒潮研究区，加之强冷平流的长时间维持，使得此次寒潮天气过程具备了持续时间久，强度大，范围广的特征。

(3) 从地面冷锋、气旋和冷高压的演变来看，

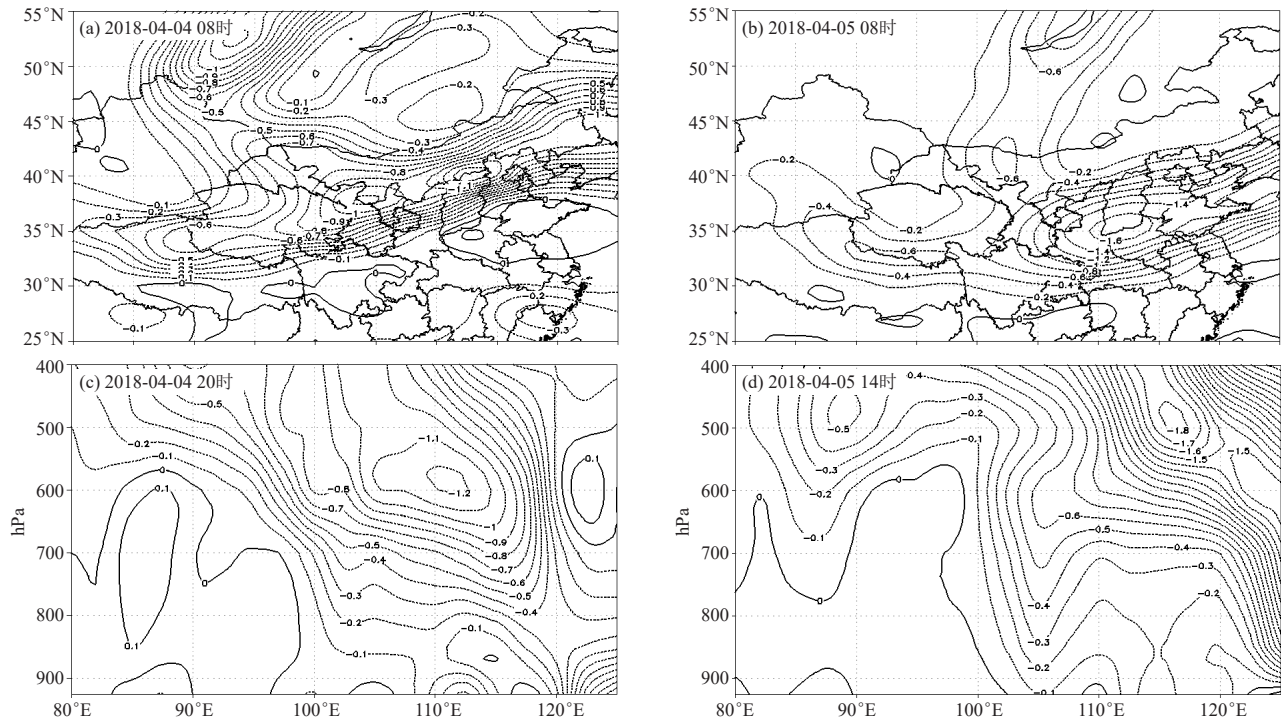


图5 500 hPa MPV2的分布特征 (a, b) 及沿35.3°N MPV2的纬向垂直剖面 (c, d) 图 (单位: PVU)

Fig. 5 The distribution characteristics of 500 hPa MPV2 and the vertical zonal section along 35.3°N of MPV2 (unit: PVU)

此次寒潮爆发前后,在寒潮地面高压的前缘都有一条强度较强的冷锋作为寒潮的前锋,主体冷高压位置少动,后期分裂形成一闭合小高压南压,并配合有副冷锋生成,随着主冷锋下摆转向,与其前副冷锋合并,形成一支更强的冷锋影响寒潮区。

(4) 从高空冷暖平流的分布可以得出,寒潮爆发前,研究区处于明显的升温环境中,这为后期的寒潮降温 and 降温强度提供了一定的温度基础。爆发期,研究区受强冷平流的长时间持续影响,因高空冷平流项引起的局地降温也是显著的;寒潮期间,研究区存在明显的上升运动,可产生显著的绝热膨胀冷却效应,从而利于研究区降温天气的加剧。

(5) 将湿位涡应用到此次寒潮天气的分析中,发现湿位涡中第二项湿斜压项在此次寒潮天气过程中有着很好的指示意义,其时空演变特征能够很好地描述冷空气的移动、发展过程,从而有助于寒潮天气过程中降温情况的判断和研究。

参考文献

[1] 朱乾根,林锦瑞,寿邵文,等.天气学原理和方法.北京:气象出版社,2007.
 [2] 阎琦,田莉,李爽,等.辽宁区域性冷空气多时间尺度变化特征及影响因子.冰川冻土,2016,38(2): 379-387.
 [3] 黄炜楠,李雪,董胜.基于小波分析的山东寒潮强弱时空变化特征研究.自然灾害学报,2017,26(3): 56-62.
 [4] 康志明,金荣花,鲍媛媛.1951—2006年期间我国寒潮活动特征分析.高原气象,2010,29(2): 420-428.
 [5] 陈永林,邵玲玲,漆梁波,等.2008年初上海冰雪天气与冷空气路径的相关性研究.气象科学,2010,30(3): 414-419.

[6] 白松竹,博尔楠·哈不都拉,谢秀琴.气候变暖背景下阿勒泰地区寒潮活动变化特征.冰川冻土,2015,37(2): 387-394.
 [7] 周星妍,朱伟军,顾聪.冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响.大气科学,2015,39(5): 978-990.
 [8] 张琳,吕俊梅,丁明虎.2015年初北极极端气旋对中国寒潮的影响.应用气象学报,2020,31(3): 315-327.
 [9] 田秀霞,寿邵文.2008年12月两次强寒潮过程的等熵位涡分析.气象科学,2013,33(1): 102-108.
 [10] 李向红,廖幕科,熊英明.影响广西的三次寒潮过程对比研究.气象科学,2011,31(2): 228-235.
 [11] 孙玉莲,任余龙,韦伯龙,等.甘肃临夏地区2次沙尘寒潮天气成因对比.干旱气象,2013,31(1): 150-156.
 [12] 李艳,张金玉,李旭,等.两次典型极端低温过程低频特征分析.高原气象,2018,37(5): 1341-1352.
 [13] 周翠芳,张广平,杨海山.宁夏冬季寒潮天气过程对比分析.干旱气象,2009,27(2): 142-147.
 [14] 董全,代刊,陶亦为.ECMWF集合预报的极端气温预报产品应用和检验.气象,2016,8(4): 41-51.
 [15] 韦志刚,董文杰,朱献,等.CFSv2系统对2015年11月中国一次寒潮过程及其欧亚冷空气活动的预报评估.高原气象,2019,38(4): 673-684.
 [16] 王丽,韦惠红,金琪,等.湖北省一次罕见寒潮天气过程气温陡降分析.气象,2006,32(9): 71-76.
 [17] 孙淑芳,张广兴,李曼.2014年4月22日新疆寒潮天气过程锋面结构演变特征分析.沙漠与绿洲气象,2018,12(6): 40-48.
 [18] 高振荣,刘晓云,田庆明,等.甘肃河西地区一次强寒潮天气个例诊断分析.干旱气象,2009,27(1): 34-39.
 [19] 阎琦,崔峰,赵梓淇,等.辽宁“11·24”强寒潮过程分析.沙漠与绿洲气象,2019,13(1): 39-43.
 [20] 吕新生,万瑜,尹冰霞,等.新疆北部一次强寒潮天气特征及成因.干旱气象,2017,35(1): 82-90.
 [21] 王晓芳,程正泉,姜丽萍.2016年广东一次罕见寒潮雨雪冰冻天气过程分析.气象科技,2019,47(1): 106-115.
 [22] 张备,尹东屏,孙燕,等.一次寒潮过程的多种相态降水机理分析.高原气象,2014,33(1): 190-198.
 [23] 牛若云,乔林,陈涛,等.2008年12月2—6日寒潮天气过程分析.气象,2009,35(12): 74-82.