## 乌拉尔阻塞高压的维持发展及其与 2020/2021 年冬季强寒潮活动的关系1

彭京备1孙淑清1陈伯民2

1 中国科学院大气物理研究所,国际气候与环境科学中心,北京,100029

2 上海市气候中心,上海,200030

摘要2020年岁末至2021年初前后两次强寒潮侵入我国,引起大范围的强烈而持续的降温。本文对于其相应的环流特点及成因进行了分析研究,主要结论是:1)从环流形势看,两次寒潮的发展过程,都是属于"横槽转竖"的类型。但是,自2020年的12月中旬至第二次寒潮结束,乌拉尔地区始终维持着宽广的高压脊(阻高),并未出现阻塞崩溃或不连续后退的现象。这与多数东亚地区寒潮爆发时的环流特点有差别。2)乌拉尔阻塞高压及其脊前北风的加强和维持,使其前侧的斜压性大大加强。下游槽底的等高线日益密集,冷平流也不断发展,增强和向南推进。这些都推动了西伯利亚高压的加强和南扩。3)在两次寒潮过程发生之前,源自0℃附近的低频静止波能量向东传播,有利于乌拉尔高压脊的维持、加强以及其下游低槽发展,为冷空气的向南爆发提供有利条件。

关键词: 2020/2021 冬季, 强寒潮, 乌拉尔山阻塞, 准静止波能量频散

### The Maintenance and Development of Ural Blocking High and its Relationship

# with Severe Cold Wave Activities in 2020/2021 Winter

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Shanghai Climate Center, Shanghai, 200030, China

Abstract Two successive severe cold waves invaded eastern China during the period from the late 2020 to early 2021, leading to extensive, severe and persistent drop in temperature. The paper investigates the features and formation mechanisms of the circulations associated with these two cold waves. The main results are as follows: 1) The circulations of these two cold waves are both be recognized as a kind of "anticlockwise turning of transverse trough". However, a broad ridge (or blocking high) was maintained over the Ural area from mid-December 2020 till the end of the second cold wave. No breakdown or "discontinuous westward shift" of blocking high was observed, which is different from the common cold waves in eastern Asia. 2) The maintenance and strengthening of northerly wind in front of the Ural high leads to the increase of baroclinicity in situ. In the downstream, the gradient of the geopotential height contour in the south of the transverse trough rapidly increases and the cold temperature advections are consistently enhanced and southward advanced. All of these cause the intensification and southward expansion of the Siberian High. 3) Prior to the occurrence of the two cold waves, the energy of low frequency stationary wave originating from at 0°E (or even to the west) propagates eastward, which favors the maintenance and intensification of the Ural ridge and the development of the trough downstream, providing a favorable condition for the southward outbreak of cold air.

Keywords: 2020/2021 winter, severe cold wave, the Ural ridge, dispersion of energy of quasi-stationary wave 1 引言

2020年末至2021年初,中国大陆相继受到两次强寒潮的袭击,引起大范围的大风降温天气。2020年12 月27-31日,发生了一次全国性寒潮天气。100°E以东的中国大部分地区都出现了超过12℃的降温,其中华 北、华东中部和北部降温幅度超过16℃。浙江、安徽、江苏等地共20站气温达到或突破12月历史极值(迟 茜元等,2021)。2021年1月6-8日,中国再次受到强寒潮侵袭。中东部地区出现明显大风降温天气,降温 8°C以上的国土面积达到250万km<sup>2</sup>,降温12°C以上面积达40万km<sup>2</sup>。虽然这次寒潮降温幅度略小于上一次, 但由于基础气温低,因此多地出现了极端低温。华北等地共有60个气象站的最低气温突破或达到建站以来

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 本文由国家自然科学基金重点项目(41730959)、国家重点研发计划课题(2018YFC1505601)和国家自然科学基金面上项目(41975072)资助

历史极值(徐冉等,2021)。由于两次过程间隔短,降温幅度大,持续时间长,不仅给人民生活和经济带 来损失和影响,它的发生过程和机理,也受到了学者们广泛的关注(Bueh et al., 2021; Dai et al., 2021; Wang et al., 2021; Yao et al., 2021; Zheng et al. 2021)。

寒潮活动是冬季影响中国气候的主要天气过程。气象学家对东亚寒潮的冷空气源地、路径、关键环流 系统、外强迫因子等进行了广泛的研究(陶诗言等,1959;仇永炎等,1983a,1983b;Ding等,1990;谢 安等,1992;朱乾根等,1992;Park等,2011;王林等,2014)。研究指出,不论是在天气尺度上还是年际 尺度上,对流层低层西伯利亚冷高压的加强和南伸都是寒潮爆发的重要因子(Qian等,2001;王遵娅等, 2006)。

从大尺度环流的特点来说,乌拉尔阻塞高压的存在与活动,在东亚寒潮爆发中,扮演了十分重要的角 色。它的发展和崩溃不仅影响到下游大槽的走向,也关系到与寒潮密切相关的西伯利亚高压的发展。仇永 炎(1985)认为,乌拉尔山高压的向极地发展可导致极涡分裂,促使冷空气南侵。研究显示,乌拉尔山高 压脊及其东南的低压槽,可导致低层冷平流,进而加强西伯利亚高压(Takaya等,2005; Bueh等,2015)。 因此,在预测实践中,乌拉尔山高压脊是预报寒潮的关键系统(朱乾根等,1992)。研究显示,乌拉尔山阻 塞高压在2020年末至2021年初的寒潮中扮演了重要的角色(Bueh et al., 2021; Dai et al., 2021; Yao et al., 2021)。

一般来说,东亚地区寒潮的爆发都与其上游的环流形势调整有关,由于上游形势的变化,引导冷空气向南推进(陶诗言等,1957),横槽转竖是常见的一类过程。形成共识的是:横槽上游(比如乌拉尔地区)阻塞高压的崩溃,或者它的不连续后退,是推动大槽横转竖的主因(朱乾根等,1992)。但是由后面的分析可知,在本次过程中,横槽的上游并没有发生阻高崩溃的现象。相反,自2020年12月中旬至次年的一月上旬,极强的高压系统一直维持在60°E及其以东地区。那么,其下游的大槽是怎么得到发展的?冷空气向南推进的过程是怎么形成的?另外,不论是崩溃的阻高,或是持续维持的高压脊,它是如何影响下游,并造成大槽加深的,它的物理过程可能是什么?本文在描述分析本次寒潮过程中乌拉尔阻高特点的基础上,着重分析以上两个方面的问题,试图对它有初步的了解。

### 2资料及计算方法

本文采用的资料包括:1)美国 NCEP/NCAR 再分析资料中 1981 - 2021 年每年 12 月和 1 月逐日的位势 高度场、温度场和风场,垂直分辨率为 17 层(Kalnay 等, 1996)。2)美国 NCEP/NCAR 再分析资料中同期 海平面气压场(Sea Level Pressure,以下简称 SLP)及日最低气温。3)美国气候预测中心提供的 2020 年 12 月至 2021 年 1 月逐日北极涛动(Antarctic Oscillation,以下简称 AO)指数<sup>1</sup>。4)国家气象信息中心提供的 2020 年 12 月至 2021 年 1 月中国地面气候资料日值数据集 V3.0 中的日最低气温资料<sup>2</sup>,全国共 699 个台站。 气候平均为 1981 - 2010 年。

为了研究寒潮过程中高频扰动和低频天气系统之间的关系,采用 Lanczos 滤波对变量进行 8 天滤波 (Duchon, 1979)。

### 3 两次寒潮过程的特点

2020 至 2021 年岁末年初的寒潮过程共分为两段,一次是 2020 年的 12 月 28 - 31 日,后继的是 2021 年 1 月 6 - 8 日。图 1a - c 给出了第一次寒潮过程中地面降温的实况。图中红线是-8℃的等温线,蓝线是同期 气候平均的-8℃等温线,蓝色阴影区为 24 小时变温的负值区。可以看到,在 2020 年 12 月 28 日,冷空气开 始影响中国,华北北部和西北地区东部出现超过 8℃的降温区(图 1a)。29 日,冷空气南下,超过 8℃的降 温区面积加大,西北地区东部、华北南部和华南西部出现 12℃以上的降温(图 1b);-8℃等温线较气候平均 偏南 2~6 个纬度。30 日,8℃以上的降温区面积缩小,寒潮过程趋于结束(图 1c)。图 1d - f 给出了第二次 寒潮过程的 24 小时变温演变。2021 年 1 月 6 日,主要降温区位于东北、华北和西北地区东部(图 1d)。7 日,负变温中心位于黄河以南的中东部地区(图 1e);8 日,负变温范围缩小,寒潮过程趋于结束(图 1f)。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks/norm.daily.ao.index.b500101.current.ascii

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF\_CLI\_CHN\_MUL\_DAY\_V3.0.html

两次过程降温区都推进到长江流域以南。据中国气象局的监测,第一次过程中,降温幅度在 12℃以上 的中国面积达到 175 万平方公里(迟茜元等,2021)。特别是第二次过程,虽然降温幅度略小于前一次,但 由于基础气温较低,以致多地区的低温超过了历史的极值。低温极值区几乎遍布了 100°E 以东的中国地区 (Peng 等,2021)。选取北方降温幅度最大的地区[102.5-122°E,28°-45°N]作为北方降温关键区(图 1b 中 紫色方框所示地区),这个范围包括了 12 月 28 日华北北部和西北东部的降温区(图 1a),也与 Bueh 等(2021) 确定的降温关键区基本一致。逐日计算降温关键区内 331 个台站观测的日最低气温达到-19.6℃,接近历史的 最低值。而华南地区的广州站最低气温也到达 0℃左右。这样强烈的前后相隔较近的寒潮过程是比较少见的。 图 2 是 1000 hPa 两次寒潮过程的平均风场及其距平值。可以看出,两次过程中,强烈的偏北风向南推 进,距平北风从高纬度一直贯通至低纬度南海地区,形成一次极为强烈的冬季风南侵的过程。

3



图 1 (a) 2020 年 12 月 28 日, (b) 12 月 29 日, (c) 12 月 30 日, (d) 2021 年 1 月 6 日, (e) 1 月 7 日和 (f) 1 月 8 日日最低气温的 24 小时变温, 单位: ℃。(g) 2020 年 12 月 20 日至 2021 年 1 月 13 日西伯利亚高压关键区[40°~60°N, 80°~120°E]平均 SLP 距平(红线,单位:hPa)和北方降温 关键区中 331 个台站平均的日最低气温(蓝线,单位: ℃)的时间序列。其中图(a)-(f)中的红线和蓝线分别表示 2020/2021 年-8℃等温线及其气

候平均。图(b)中紫色方框表示北方降温关键区。图(g)中灰色阴影分别表示 2020年12月28-31日和 2021年1月6-8日的寒潮过程。

Figure 1 The 24-hour change of daily minimum temperature at (a) 28, (b) 29 and (c) 30 December 2020, (d) 6, (e) 7 and (f) 8 January 2021 (units:  $^{\circ}$ C) and (g) the time series of areal-mean SLP in the key area of Siberian High [ $40^{\circ}$ ~ $60^{\circ}$ N,  $80^{\circ}$ ~ $120^{\circ}$ E; red line, units: hPa] and minimum temperature at 331 observational stations in the temperature-drop key area in North China (units:  $^{\circ}$ C). Red and blue lines in (a) – (f) refer to the contour of -8°C during the winter of 2020/2021 and its climatology, respectively. The purple square in (b) refers to the temperature-drop key area in North China. Grey shading in (g) represents 28-31 December 2020 and 6-8 January 2021 cold waves.



图 2 2020 年 12 月 28 日至 31 日平均的 1000 hPa (a) 风及其 (b) 距平。图 (c) - (d) 同 (a) - (b), 只是针对 2021 年 1 月 6 日至 8 日的情况。单位: m s<sup>-1</sup>。

Figure 2 The distributions of (a) wind at 1000 hPa and (b) its anomalies averaged from 28 to 31 December, 2020. (c)–(d) as in (a)–(b), but from 6 to 8 January, 2021. Units:  $m s^{-1}$ .

4 乌拉尔地区阻塞高压维持与两次冷空气南侵

4.1 乌拉尔地区阻塞高压的活动

考察这两次强寒潮过程平均的 500 hPa 位势高度场及其距平分布的演变(图 3)。强高压脊从 2020 年 12 月中旬就开始控制乌拉尔地区(图略),但是从 12 月下旬开始它略有东移。12 月 26 - 27 日,脊线维持 在 60°E。以后在其上游出现较强的正高度距平(图 3b - c)。至 28 日,阻高变得比较宽广。从上游的约 40°E 扩展至下游的 90°E(45°N 以北,图 3d)。以后阻高的主要脊线一直维持在 60°E 附近。同时,乌拉尔山高 压脊向极地伸展。另外在北美西岸,也有一高压脊向极地发展。极涡中心偏到东北亚至北太平洋中部,形 成倒 Ω 环流型(图 3a-f)。乌拉尔山高压脊脊前形成横槽(图 3b - c),脊前偏北风引导极地冷空气南下堆 积,提供了极地冷空气向南爆发的条件。28 - 30 日,横槽转竖,第一次寒潮爆发(图 3c - e)。2021 年 1 月3日开始,下游的正高度距平再次加强,高压脊线开始东移(图 3g)。1月6-8日,高压脊稳定在乌拉 尔山地区,只是位置较第一次过程略为偏东(图 3j-1)。这迫使原本平直的横槽转成极强的竖槽(图 3i-k), 造成冷空气大举入侵中国。

为了更清晰地说明问题,我们做了阻塞高压相关区域的高度场时间-纬度演变图。图 4a为45-75°E 经 度带平均的500 hPa高度场随时间-纬度的变化。12月25日前后,高压脊线主要维持在高纬。在第一次寒 潮结束前,70°N以北高压强度略有减弱,而在70°N以南的中纬度地带,高压由强转弱再加强的过程十分 清楚。至2021年1月初,形成从南到北极强的高压脊。图 4b则为中纬度45-65°N纬带平均的高度场时间 -经度演变图。上述的高压脊强弱更迭及向东扩展的过程更是十分清晰的。

从上面的分析看出,这两次寒潮过程的共同特点是,在中高纬,大致从 30°-105°E 是宽广的脊区,脊 前是强劲的偏北气流。在贝加尔湖东南,却是东北-西南向的横槽。因此,乌拉尔阻塞高压的长时间维持 是这两次强寒潮天气中的关键环流系统。它的稳定存在促使脊前偏北风将极地的冷空气源源不断的带到亚 洲中纬度地区。

一般来说,东亚地区寒潮的爆发往往与其上游的阻塞高压崩溃有关,它造成横槽转竖槽,使下层的西 伯利亚高压南移。可是这次过程却有所不同。在两次强冷空气侵入中国东部的整个时段,从 2020 年的 12 月中旬一直持续到 2021 年 1 月上旬末,乌拉尔地区一直维持着阻塞高压的形势(中间虽然有加强、减弱、 再加强和向东扩展)。阻高前沿的强烈北风区有很强的冷平流,冷气团不断南移。因此,研究这次乌拉尔阻 塞高压的特征及维持机理就变得十分重要。4.2 乌拉尔阻塞高压的维持及其影响

4.2.1 与下游槽斜压性发展的关系

前面已经提到,乌拉尔高压脊从 2020 年 12 月中旬就开始维持在该地区,一直持续到第二次强寒潮过 程结束。它的维持和发展给下游槽的发展带来很大的影响。给出该时段 500hPa 的风场及温度场的演变图(图 5)。在第一次寒潮中(图 5a-d),脊前强烈的北风给下游斜压性的增强及低层冷高压的发展带来极为有力的 条件。强烈的北风和伴随的冷空气南下,使阻塞高压下游的槽底等高线逐日趋于密集,温度场的南北梯度 也日趋加强。选取 30°-45°N,120°-145°E(图 5d 中的红色方框)为 2020 年 12 月 30 日槽底位置。在 槽底平均经度 132.5°E上,计算槽底南北边界上的位势高度等物理量差值,12 月 27 日的位势高度差为 467.75 gpm,风速差为 3.59 m s<sup>-1</sup>,槽底区域平均经向温度梯度为-1.28×10<sup>-5</sup> K m<sup>-1</sup>。而到寒潮盛期(12 月 30 日,图 5d),位势高度差值达到 639.00 gpm,风速增加至 39.14 m s<sup>-1</sup>,平均经向温度梯度为-1.77×10<sup>-5</sup> K m<sup>-1</sup>。这些 结果说明,大槽的斜压性大大增强了。

第二次过程(图 5e-h)的情况也是一样的。与1月4日寒潮开始前相比(图 5e),寒潮开始日(6日) 槽底的高度(温度)梯度都要密集得多(图 5f)。选取 32.5 - 42.5°N,112.5 - 127.5°E(图 5f 中的红色方框) 为 2021年1月6日槽底位置。计算槽底平均经度 120°E上,槽底南北边界上的物理量差值。位势高度差 从1月5日的 399.50 gpm 增加至6日的 508.75 gpm,风速从 12.52 m s<sup>-1</sup>增加至 24.99 m s<sup>-1</sup>,平均经向温度梯 度从-2.08×10<sup>-5</sup> K m<sup>-1</sup>变为-2.36×10<sup>-5</sup> K m<sup>-1</sup>。

高空斜压性发展的同时,各层的冷平流也相应增强。用 Hovmüller 图来说明冷空气的向南推进及它与高空斜压性的关系。图 6 给出了 1000 hPa 温度平流的时间剖面图 (所取平均值的经度区间如图中所示)。可以看出,在两次寒潮过程中自北至南都有极强的温度冷平流。对比图 4a,发现,冷平流正位于阻塞高压的前沿。紧随高压强度的迅速增强,出现纵贯南北的强冷平流。地面冷平流 0 线也快速南扩至 15°N 以南 (图略)。

高压前沿及大槽底部斜压的强烈发展引起低层西伯利亚高压的发展和南扩。从两个寒潮时期海平面气 压场可见(图 7)冷高压强烈南扩。1030 hPa 等高线较常年平均要南伸 10 - 15 个纬距,高压范围一直伸展 至中国的华南地区。武炳义等(2011)采用冬季(12~2 月)平均 SLP 中心位置作为西伯利亚高压的关键区。 我们计算这个关键区[40°~60°N, 80°~120°E]内 2020 年末至 2021 年初 SLP 异常随时间的变化(图 1e 中的红 线),可以发现,西伯利亚高压在这两个寒潮时期有明显的增强。

4.2.2 极涡分裂与乌拉尔山阻塞的维持

乌拉尔阻塞高压从 12 月中至 1 月中旬能长时间维持,是与极涡的分裂以及暖脊控制极地有关的,我们 用美国气候预测中心提供的 AO 指数以及极圈(60°N以北)平均位势高度及温度随高度-时间的变化来说 明这一点。图 8 是相关时段的 AO 指数变化曲线,可以看到,从 12 月中旬以来,AO 值始终处于较低的负 值。这说明在低层,已经清楚地显示出极地高度场升高的事实。事实上,从图 3 的 500 hPa 图上也可以看 到高压脊从太平洋地区,西欧及乌拉尔伸至极地。极圈内存在很强的正高度距平中心。我们做了这段时期 从地面至平流层的 60-90°N 的平均位势高度及温度随高度-时间演变(图 9),从高度场看,从 12 月下旬开 始对流层极圈就处于正高度距平状态。至下旬,这个正高度距平迅速扩展至平流层。2021 年 1 月开始,平 流层的正高度距平变得尤其强烈。而与图 9b 上的温度值相比,可以清楚看到平流层发生了爆发性增温。它 与高度场的强烈增高是非常对应的。

平流层的极地爆发性增温及相应的极涡分裂,使中高纬度环流的经向度大大加强,有利于阻塞高压的维持与发展。因此,可以认为,乌拉尔地区长时期的维持阻塞的状态,是与极地强烈增温增高,极涡断裂南移分不开的。它是与整个极圈环流发生大调整相联系的。

4.2.3 乌拉尔阻塞维持与能量东传

前面已经对本次过程的乌拉尔阻塞高压进行了描述,特别是图 3 和图 4 所展示的高压的维持和演变都显示出了它准定常波动的特征。为了更好探究这种准定常波及其影响。我们对 500 hPa 位势高度场进行了低 通滤波,绘制出它的高度距平(以下简称**Φ'**)随时间 - 经度变化。所取的为 40 - 60°N 纬带的平均。经过低 通滤波,保留周期大于 8 天的波动(图 10a)。图中黑点区表明两寒潮的时段。可以看出,在 2020 年 12 月 10 日至 2021 年 1 月 15 日,35 天的时段中,30 - 60°E 保持正距平,而 90°E 以东到 150°E 则为负距平区, 波列的位相基本不改变,也即呈准静止波的形式。位相虽然少变,但其强度都经历由小到大,由大到小的 几次变化。若以**Φ'**的最大值(正或负中心)的东移,也即**Φ'**<sup>2</sup> 最大值的东移,表征能量向东频散的速度。

则从图 10a 可以估算, **Φ**'东移的速度平均约为 15 个经度/日。波能的向东传播表明了下游槽(或脊)发展的一个能量来源。但却无法给出具体是在哪个经度会有利于槽,抑或脊的发展。实际上,如能确定准静止 波的波长 $L_s$ ,则当某个经度 $\lambda_0$ 处有强烈的低槽发展,并激发向东传播的准静止波列时,在 $\lambda_0 + L_s$ 处将有波列的槽区,因而有利于槽的发展(Yeh, 1999; Enomoto et al., 2003)。在正压无辐散的情况下,

$$L_s = 2\pi \sqrt{\frac{\overline{u}}{\beta}}$$

当取**ū**为冬季1月0-120°E,45-55°N,500 hPa的平均地转西风,β取50°N处的值,则L<sub>s</sub>=140°E。这意味着若在0°E有强烈的低压发展时,则140°E处也将有槽的发展。当然这只是一个较为简单的物理解释。 实际上,即使是**ū**的取值也是个复杂的问题。

此外,对比中高纬度环流的低频分量(图 10a)和原始场(图 6b),可以发现二者基本一致。这说明这 段时间内,中高纬度环流的低频分量占了主导地位,准静止波能量的东传,有利于乌拉尔山地区高压脊(阻 高)维持或加强,及其下游低槽的发展,从而有助于冷空气的向南爆发。这与已有的研究结果一致(Takaya et al., 2005; Luo et al., 2016; Shi et al., 2020)。高频瞬变涡动的反馈强迫作用(Luo et al. 2016; Shi et al. 2020) 和能量学诊断(Shi et al. 2022)的研究结果指出高频波对乌拉尔山阻高的形成作用并不明显。这是对两次寒 潮共同的环流特点的一个物理解释。对预报方法而言,若从准静止波能量东传的角度来考察,则可以在空 间上、时间上向前延拓。 图 10b 是高频波(即周期小于 8 天)活动的时间剖面图。很明显,这些高频波一次次快速东移,而在 某个固定经度范围(例如 105°E 以东)呈现为逐日正负交替的中心。第一次寒潮时,负中心出现在 110°E 以东,也即槽发展的位置。这表明高频波的活动与前述低频波活动所产生的能量的向东频散两者是相互配 合、共同作用的。



图 3500 hPa 位势高度(等值线)及其距平(阴影)的演变。(a) 2020 年 12 月 23 日,(b) 26 日,(c) 27 日,(d) 28 日,(e) 30 日,(f) 31 日,(g) 2021 年 1 月 3 日,(h) 4 日,(i) 5 日,(j) 6 日,(k) 7 日,(1) 8 日。单位: gpm。

Figure 3 Daily 500 hPa geopotential height (contour) and its anomalies (shaded) on (a) 23 December, (b) 26 December, (c) 27 December, (d) 28 December, (e) 30 December, (f) 31 December 2020, (g) 3 January, (h) 4 January, (i) 5 January, (j) 6 January, (k) 7 January and (l) 8 January 2021. Units: gpm.



图 4 2020 年 12 月 22 日至 2021 年 1 月 10 日 (a) 45 - 75°E 平均的 500 hPa 位势高度(等值线)及其距平(阴影)随时间 - 纬度的变化,(b) 45 - 65°N 平均的 500 hPa 位势高度(等值线)及其距平(阴影)随时间 - 经度的变化。单位:gpm。其中灰色阴影分别表示 2020 年 12 月 28 - 31 日和 2021 年 1 月 6 - 8 日的寒潮过程。

Figure 4 (a)Time-latitude cross sections of 45-75°E and (b) time-longitude cross sections of 45-65°N mean 500 hPa geopotential height (contour) and its anomalies from 22 December 2020 to 10 January 2021. Units: gpm. Grey shading represents 28-31 December 2020 and 6-8 January 2021 cold waves.





和 500 hPa 温度场(蓝色虚线,单位: ℃)。图 (d) 和 (f) 中红色方框分别表示 2020 年 12 月 30 日和 2021 年 1 月 6 日中纬度低压槽底部的位置。 Figure 5 Daily wind (vectors, units: m s<sup>-1</sup>) and temperature (blue dash lines, units: ℃) at 500 hPa on (a) 27 December, (b) 28 December, (c) 29 December, (d) 30 December, (e) 5 January, (f) 6 January, (g) 7 January and (h) 8 January 2021. The red squares in (d) and (f) refer to the positions of the bottom of trough in mid-latitude in 30 December 2020 and 6 January 2021, respectively.



图 6 2020 年 12 月 22 日至 2021 年 1 月 10 日 105 - 120°E 平均的 1000 hPa 温度平流 (单位: K 天<sup>-1</sup>)随时间 - 纬度的变化其中灰色阴影分别表示 2020 年 12 月 28 - 31 日和 2021 年 1 月 6 - 8 日的寒潮过程。

Figure 6 Time-latitude cross sections of 105-120°E mean temperature advection at 1000 hPa (units: °C day-1) from 22 December 2020 to 10 January 2021. Units:



gpm. Grey shading represents 28-31 December 2020 and 6-8 January 2021 cold waves.

图 7 (a) 2020年12月28至31日和(b) 2021年1月6至8日平均海平面气压(等值线)及其距平(阴影)的分布。单位:hPa。其中红线表示寒潮过程中平均的1030hPa线, 蓝线同期气候平均的1030hPa线。

Figure 7 The distributions of sea level pressure (contour) and its anomalies averaged (a) from 28 to 31 December, 2020 and (b) from 6 to 8 January, 2021. Units: hPa. The red and blue lines stand for the positions of 1030 hPa during the cold wave period and the climatology.

5





图 8 2020 年 12 月 1 日至 2021 年 1 月 16 日 AO 指数逐日演变。

Figure 8 The time series of AO index from 1 December 2020 to 16 January 2021.



图 9 2020 年 12 月 20 日至 2021 年 1 月 10 日 60°N 至 90°N 平均的 (a) 位势高度(单位: gpm)和 (b) 温度(单位: K) 随时间-高度的剖面。 Figure 9 The time-pressure cross sections (averaged over 60°-90°N) of (a) geopotential height anomalies (units: gpm) and (b) temperature anomalies (K) from 20 December 2020 to 10 January 2021.



图 10 2020年12月10日至2021年1月10日40-60°N平均的8天以上低通滤波(a)和8天以下高通滤波的500hPa位势高度距平随经度-时间的 演变。单位:gpm。其中灰色阴影分别表示2020年12月28-31日和2021年1月6-8日的寒潮过程。

Figure 10 Time-longitude cross sections of 40-60°N mean 8-day (a) low- and (b) high-pass filtering 500 hPa geopotential anomalies from 10 December 2020 to 10 January 2021. Units: gpm. Grey shading represents 28-31 December 2020 and 6-8 January 2021 cold waves.

#### 5 结论

2020 岁末至 2021 年初,中国东部地区经历了前后两次的寒潮过程,自北至南许多台站发生了超过历史 极值的强烈降温。本文对这两次寒潮概况,相应的环流特点特别是乌拉尔阻塞高压特征及其影响进行了分 析研究,主要结论是:

 两次寒潮给中国大陆东部带来的降温,其影响的深度和广度都是前所少有的。100°E 以东从南至北, 多个台站降温幅度都达到或超过该地的历史极值。在两次寒潮过程中,强变温区一直南延到 20°N 以南,日 降温值都在 6℃以上。最低气温的零线南伸至中国华南地区。

2) 从环流形势看,前后相隔不远的两次寒潮的发展过程,都是属于"横槽转竖"的类型。但是,自2020 年的12月中旬至第二次寒潮结束,乌拉尔地区始终维持着宽广的高压脊(阻高),它联系着极涡分裂和强 烈的整层增温。寒潮过程中并未出现阻塞崩溃或不连续后退的现象,这与多数东亚地区寒潮爆发的环流特 点有差别。从环流调整角度看,需要回答,是什么过程推动了本次横槽转竖的。 3) 乌拉尔阻塞高压及其脊前北风的加强和维持,使其前侧的斜压性大大加强。下游槽底的等高线日 益密集,冷平流也不断发展,增强和向南推进。这些都推动了地面西伯利亚高压的加强和南扩。

4) 准静止波能量的频散是乌拉尔阻塞高压发展维持的一个重要原因,在两次寒潮过程发生之前,源 自 0°E 附近的低频静止波能量向东传播,它促使高压脊一次又一次的加强。同时,也导致高压及下游低压 槽的发展,为冷空气的向南爆发提供有利条件。

本文只是通过 2020 年岁末至 2021 年初两次强寒潮过程中,阻塞形势的作用及其影响机理进行了分析 和探索,虽然它的普遍性尚有待更多实例来检验和充实,但是其结果还是有意思和值得关注的。文中涉及 的准静止波能量频散的过程和作用需要后期的进一步分析,和数值实验的证明。

此外,前后两次乌拉尔阻塞高压的活动存在有差异。本文的主旨是研究阻塞高压在该地区的稳定性以 及高压前方冷空气的活动,而并未涉及两次阻塞高压的异同。比较两次阻高的异同也是我们未来要研究的 问题之一。

**致谢**:作者要特别感谢纪立人先生在本文中所作的贡献。他的意见和建议对本研究的深入起了重要的作用。 参考文献

- Bueh C, Peng J B, Lin D W, and Chen B M. 2021. On the two successive supercold waves straddling the end of 2020 and the beginning of 2021 [J]. Adv. Atmos. Sci, https://doi.org/10.1007/s00376-021-1107-x.
- [2] Bueh C, Xie Z W. 2015. An objective technique for detecting large-scale tilted ridges and troughs and its application to an East Asian Cold Event [J]. Mon. Wea. Rev., 143 (12) :4765-4783, doi:10.1175/MWR-D-14-00238.1.
- [3] Dai G K, Li C X, Han Z, Luo D H, and Yao Y. 2021. The nature and predictability of the east Asian extreme cold events of 2020/21 [J]. Adv. Atmos. Sci., https://doi.org/10.1007/s00376-021-1057-3.
- [4] Ding Y H. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relation to cold surge in East Asia. Meteor. Atom s.Phys, 44: 281 - 292, Doi: 10.1007/BF01026822.
- [5] Duchon C. 1979. Lanczos Filtering in One and Two Dimensions [J]. Applied Meteorology, 18(8): 1016-1022, https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2.
- [6] Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 129(587):157–178. Doi: 10.1256/qj.01.211.
- [7] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(3):
  437–470, DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- [8] Luo, D., Y. Xiao, Y. Diao, et al., 2016: Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. part II: the link to the North Atlantic Oscillation. J. Climate, 29, 3949-3971, doi: 10.1175/jcli-d-15-0612.1.
- [9] Park T W, Ho C H, Yang S. 2011. Relationship between the Arctic oscillation and cold surges over East Asia[J]. J. Climate, 24 (1) :68-83, doi:10.1175/2010JCLI3529.1.
- [10] Peng J. B., Sun S. Q., Chen B. M. Maintenance and development of the Ural high and its contribution to severe cold wave activities in winter 2020/21. https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100130.
- [11] Qian W H, Lin X. 2004. Regional trends in recent temperature indices in China. Climate Research., 27 (2): 119~134, <u>https://doi.org/10.3354/cr</u> 027119.
- [12] Shi, N., SuolangTajie, P. Tian, and Y. Wang, 2020: Contrasting relationship between wintertime blocking highs over Europe-Siberia and temper ature anomalies in the Yangtze River basin. Monthly Weather Review, 148, 2953–2970, doi:10.1175/MWR-D-19-0152.1.
- [13] Shi, N., Y. C. Wang, Suolangtajie, 2022: Energetics of boreal wintertime blocking highs around Ural Mountains. J. Meteor. Res., 36, doi: 10. 1007/s13351-022-1069-7.
- [14] Takaya K, and Nakamura H. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian High. Journal of the Atmosphere Sciences 62, 4423–4440, https://doi.org/10.1175/jas3629.1.
- [15] Wang, C, Yao Y L, Wang H L, Sun X B, and Zheng J Y. 2021. The 2020 summer floods and 2020/21 winter extreme cold surges in China and the 2020

typhoon season in the western North Pacific [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(6), 896-904, https://doi.org/10.1007/s00376-021-1094-y.

- [16] Yao Y, Zhang W. Q., Lou D. H., Zhong L. H., and Pei L. 2021. Seasonal cumulative effect of Ural blocking episodes on the frequent cold events in China during the early winter of 2020/21. Adv. Atmos. Sci., doi: 10.1007/s00376-021-1100-4.
  - [17] Yeh, T.C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere. J. Mer., 6, 1-16, https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0001:oedita>2.0.co;2.
  - [18] Zheng, F., and Coauthors, 2021: The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic [J]. Adv. Atmos. Sci, https://doi.org/10.1007/s00376-021-1033-y
  - [19] 迟茜元,马学款,江琪,尤媛,关良. 2020 年 12 月大气环流和天气分析[J].气象,2021, 47(3): 381-388. Chi Xiyuan, Ma Xuekuan, Jiang Qi, et al.. 2021.
    Analysis of the December 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 47 (3): 381-388 (in Chinese), DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.011.
  - [20] 仇永炎, 王为德.寒潮中期预报研究进展.气象科技, 1983, 3:9~15. Qiu Yongyan, Wang Weide. Advances on the project for medium range forec ast of cold wave. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 1983, 3:9~15, DOI: CNKI:SUN:QXKJ.0.1983-03-001.
  - [21] 仇永炎,赵其庚. 1978年10月份寒潮前后的正压能量转换与季节过渡.气象学报, 1983, 41 (2):159~166. Qiu Yongyan, Zhao Qigeng. Barotropi c energy conversion before and after the cold wave in October 1978 and seasonal transition. Acta Meteorology Sinica (in Chinese), 1983, 41 (2):159~166, DOI: 10.11676/qxxb1983.018.
  - [22] 仇永炎.1985.中期天气预报[M].北京:科学出版社, 1-420. Qiu Yongyan. 1985. Medium-range Weather Forecast [M]. Beijing: China Science Pres s, 1-420.
  - [23] 陶诗言. 1959. 十年来我国对东亚寒潮的研究[J].气象学报, 30(3): 226-230. Tao Shiyan. 1959. Study on East Asian cold waves in China durin g recent 10 years (1949 1959) [J]. Acta Meterologica Sinica (in Chinese), 30(3): 226-230, doi: 10.11676/qxxb1959.031.
  - [24] 陶诗言. 1957. 阻塞形势破坏时期的东亚一次寒潮过程[J].气象学报, 28 (1): 63-74. Tao Shiyan. 1957. A synoptic and aerological study on a c old wave in the Far East during the period of the break down of the blocking situation over Eurasia and Atlantic [J]. Acta Meterologica Sini ca (in Chinese), 28 (1): 63-74, doi: 10.11676/qxxb1957.005.
  - [25] 王林,陈文. 2014. 21世纪初东亚冬季风的年代际增强及其成因[J].科学通报, 59(19): 1905. Wang Lin, Chen Wen. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 59 (19): 1905, DOI: 10.1360/csb2014-59-19-1905.
  - [26] 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 30(6): 1068-1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 30(6): 1068-1076, DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.02.
  - [27] 武炳义,苏京志,张人禾. 2011. 秋-冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响[J].科学通报, 56(27): 2335-2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of Autumn–Winter Arctic sea ice on winter Siberian High [J]. Chinese Sci. Bull., 56(30): 3220–3228. doi:10.1007/s1143 4-011-4696-4
  - [28] 谢安, 卢莹, 陈受钧. 1992. 冬季风爆发前西伯利亚高压的发展.大气科学, 16(6): 677-685. Xie An, Lu Ying, Chen Shoujun. 1992. The evolutio n of Siberian high prior to the out break of cold air. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1 6(6): 677-685, DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.06.05.
  - [29] 徐冉, 江琪, 桂海林, 尤媛, 关良. 2021. 2021 年 1 月大气环流和天气分析[J].气象, 47(4): 510-516. Xu Ran, Jiang Qi, Gui Hailin, et al. 2021. Analysis of the January 2021 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor Mon (in Chinese), 47(4): 510-516, DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.04.012.
  - [30] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992. 377-418. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. Principle and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 377-418

