

不同次季节尺度热量和动量输送对冬季乌拉尔山 超长阻塞高压事件的影响

徐彬羽^{1,2}, 姚素香^{3*}

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省气象服务中心, 河南 郑州 450003;

3. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要 冬季, 长持续时间的阻塞高压往往造成更大强度的冷空气堆积, 从而导致大范围强寒潮事件的发生, 研究阻塞高压的建立和长时间维持机理具有重要的科学意义。本文基于欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的 1979/1980-2019/2020 年 ERA5 逐日再分析数据, 从近 41 年冬季 114 次乌拉尔山阻塞高压 (以下简称乌山阻高) 事件中筛选出 6 次超长阻高事件 (生命周期 ≥ 10 天), 对比超长阻高事件与其他阻高事件的异同点, 着重探究超长阻高事件发展和维持过程中不同次季节尺度的热、动量输送特征。结果表明: (1) 乌山地区位势高度具有显著季节内振荡特征, 超长阻高事件的建立和维持均以位势高度异常的季节内尺度分量 (20~80 天) 为主, 其他阻高事件的建立和维持则分别取决于位势高度异常的准双周尺度分量 (10~20 天) 和季节内尺度分量。(2) 在超长阻高事件发展阶段, 定常热量通量梯度的准双周尺度分量和季节内尺度分量均有利于位势高度增加, 并且准双周尺度热量输送贡献更大, 而在阻高维持阶段贡献最大的是季节内尺度热量输送。相较而言, 其他阻高事件中仅季节内尺度分量的热量输送有利于其建立, 数值逐渐减小, 不利于其维持。(3) 动量输送对阻高事件的影响同样不可忽视。阻高事件的发展是准双周尺度和季节内尺度动量输送共同作用的结果, 不同的是超长阻高事件中准双周尺度动量输送集中在发展阶段前期, 季节内尺度动量输送贯穿整个发展阶段, 而其他阻高事件中动量输送相对较小。维持阶段超长阻高事件以定常动量通量的季节内尺度分量为主, 其他阻高事件则以定常动量通量的准双周尺度分量为主。

关键词 乌山阻高 尺度分离 定常热量通量 定常动量通量

文章编号 2023165C

中图分类号 P434

文献标识码 A

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2408.23165

1 引言

阻塞高压 (以下简称阻高) 是在高空高压脊逐渐北伸的过程中其南部与暖空气的联系被冷空气切断, 从而在高压脊北部形成的闭合环流。作为一种中高纬大气环流异常经向发展并稳定的形势, 阻高会引起大范围气团质量与热量交换, 从而导致天气气候异常 (Charney and Devore, 1979)。早在 20 世纪 50 年代就有学者指出东亚阻塞形势对中国气候, 特别是大旱大涝等反常气候具有一定影响 (汤懋苍, 1957)。之后众多研究发现阻塞高压是极端天气气候事件出现的重要影响系统, 如 2008 年初我国南方低温雨雪冰冻事件发生在稳定的阻高环流形势背景下 (陶诗言和卫捷, 2008; 李崇银和顾薇, 2010); 2020 年超强梅雨同样与欧

收稿日期 2023-12-20; 网络预出版日期

作者简介 徐彬羽, 女, 1998 年出生, 主要从事大气季节内振荡研究。E-mail: 1054528724@qq.com

通讯作者 姚素香, 女, 1978 年出生, 教授, 主要从事大气季节内振荡研究。E-mail: yaosx@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41930969-3

Funded by National Natural Science Foundation of China (Key Program) 41930969-3

亚地区阻塞高压位置及频次异常有关(刘芸芸和丁一汇, 2020)。因此, 阻高与极端天气气候事件之间具有密切联系, 针对阻高的研究具有重要意义。

经典的阻高天气学定义于 1950 年提出 (Rex, 1950), 随后扩展出多种阻高识别方法 (金荣花等, 2009)。前人基于阻高识别方法对其空间分布特征进行了大量研究, 目前认为欧亚地区阻塞高压主要分布在乌拉尔山地区、贝加尔湖地区以及鄂霍茨克海地区 (李春和孙照渤, 2003; 刘刚等, 2012), 其中乌拉尔山地区位于我国上游, 冬季乌山阻高的发生频次高、强度大、范围广, 其生成、维持和崩溃过程会直接影响我国冬季寒潮天气过程的发生 (叶笃正, 1962), 从而对我国造成重要影响。阻塞高压的演变过程可以从动力和热力两方面进行解释。前人研究表明大气内部动力过程是影响乌山阻高建立和维持的主要原因 (李双林和纪立人, 2001), 王亚非和宋永加 (1998) 研究指出定常罗斯贝波的传播与天气尺度扰动共同作用为阻高维持创造有利条件。王东海等 (2008) 分析 2008 年 1 月我国南方低温雨雪冰冻天气发生期间乌山阻高稳定维持的原因, 发现阻塞上游强负涡度平流输送有利于阻高维持, 彭京备等 (2023) 则在分析 2020 年冬季我国东部地区两次寒潮过程中发现准静止波能量东传有利于乌山阻高发展增强。此外, 瞬变涡动能的不断输送同样有利于阻高维持更长时间 (徐辉和金荣花, 2011)。热力方面, 热源 (汇) 强度的变化会影响阻塞形势的演变 (朱正心, 1983)。除此之外, 北半球近地面层温度升高会使得副热带地区的阻塞高压维持更长时间 (Mokhov et al., 2013)。作为一个暖性高压系统, 阻高强度同样受到热量输送的影响 (庞雪琪等, 2017), 定常热量通量的输送在冬季乌山阻高的整个生命史中均具有一定作用 (Li et al., 2020)。

大气季节内振荡是大气中最显著的一种振荡现象, 阻高活动会受到季节内尺度环流的影响。Takaya and Nakamura (2005) 利用合成分析方法对冬季西伯利亚地区上空 20 个反气旋异常事件进行分析, 发现高空阻塞形势具有两种形成方式, 并且这两种方式均与地面西伯利亚高压的季节内振荡有关。Schneidereit et al. (2012) 针对与 2010 年夏季俄罗斯异常高温热浪事件有关的阻塞高压, 分析了不同时间尺度环流场结构对欧洲东部阻高事件的影响, 结果表明中高纬大气季节内波列有利于俄罗斯上空的阻高维持更长时间。此外, 夏季鄂霍茨克海阻高与大气季节内振荡具有良好耦合关系 (杨双艳和李天明, 2020)。冬季北半球位势高度具有季节内振荡特征 (姚素香等, 2016), 冬半年太平洋北部上空位势高度表现出明显的 10~40 天周期变化 (辛欣等, 2017), 也有学者认为太平洋阻塞高压具有 10~35 天的季节内变化特征 (Yang and Li, 2017)。Ma and Liang (2017) 则从能量学角度出发, 利用多尺度子空间变换的方法将位势高度分为大于 64 天的背景尺度窗口、8~64 天的阻塞尺度窗口以及小于 8 天的天气尺度窗口, 研究发现 8~64 天的阻塞尺度窗口对冬季大西洋阻塞的贡献最大。

纵观前人研究, 阻塞高压与大气季节内振荡关系密切, 但是大气季节内振荡如何影响阻高的建立和维持? 阻高建立与维持过程中不同时间尺度的热、动量输送有何特征? 由于乌山地区异常过程持续时间更长的可能性较大 (Dole and Gordon, 1983), 并且 Luo et al. (2016a, 2016b) 研究指出 21 世纪以来冬季乌山阻高的持续时间增长, 长时间维持的阻高会造成冷空

气堆积，持续时间越久越容易导致大范围寒潮天气的发生（路瑶等，2022）。因此本文聚焦冬季乌拉尔山地区超长阻高事件，探究其与不同时间尺度大气环流的联系，并通过分析阻高发生发展与维持过程中不同次季节尺度热、动量输送的贡献情况，进一步探究超长阻高事件的形成原因，以期为我国延伸期天气预报及短期气候预测提供参考因子。

2 资料和方法

2.1 资料

本文所使用的资料为欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）提供的 ERA5 逐日再分析数据（Hoffmann et al., 2019），物理量包括位势高度、温度、纬向风和经向风，水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直方向选取 13 层（1000、925、850、750、700、600、500、450、300、200、150、100 和 50 hPa）进行分析。研究时段为 1979-2019 年冬季（共 41 年），其中冬季定义为当年 12 月至次年 2 月。

2.2 超长阻高事件的定义和筛选

以往研究中已有学者根据阻高生命期长短对其进行分类，但是不同学者的划分标准有所不同。Dunn-Sigouin and Son（2013）定义生命期小于 9 天为短期阻高事件，Li et al.（2017）则认为维持 4-6 天为短期阻塞高压，维持时间 ≥ 7 天为长期阻塞高压。此外，路瑶等（2022）将 1979-2018 年冬季乌山阻高事件分为短中期阻高（生命期为 5-7 天）和长生命期阻高（生命期 ≥ 8 天）。在最新研究中，徐彬羽等（2023）通过高度场方法（Tibaldi and Molteni, 1990），结合天气图检验，筛选得到 1979/1980-2019/2020 年冬季乌山阻高事件共 114 次。本文进一步根据阻高不同维持天数占有阻高事件的比例，以 10 天为阈值对近 41 年冬季乌山阻高事件进行分类。定义超长阻高事件的选取标准为生命期 ≥ 10 天的阻高事件，此时超长阻高事件占有阻高事件的 5%，最终挑选出 1979/1980-2019/2020 年冬季乌拉尔山地区超长阻高事件共 6 次（表 1），其中生命期最长达 16 天。

表 1 1979/1980-2019/2020 年冬季乌拉尔山地区超长阻高事件

Table 1 The long-duration Ural blocking high events in winter from 1979/1980 to 2019/2020

年份	开始时间(月-日)	持续时间/d	年份	开始时间(月-日)	持续时间/d
1984	1-24	12	2005	1-22	15
1984	12-15	14	2012	1-15	12
2004	1-25	11	2018	1-16	16

2.3 尺度分离

冬季乌山地区位势高度具有显著的准双周振荡和季节内振荡特征，其显著周期分别为 10~20 天和 20~80 天（徐彬羽等，2023），因此对 500 hPa 位势高度（Z）进行尺度分离。利用 Lanczos 滤波器（姚菊香等，2005）对近 41 年 10 月至次年 4 月逐日数据进行处理，取

其中冬季数据滤波结果，将一个物理量分解为四个分量：

$$Z = \bar{Z} + Z' + Z'' + Z'''$$

式中： \bar{Z} 为低频背景场（>80天）， Z' 为准双周部分（10~20天）， Z'' 为季节内尺度部分（20~80天）， Z''' 为天气尺度分量（<10天），从而分析乌山阻高发生发展与维持过程中各分量变化情况。

在不考虑非绝热加热的情况下，通过诊断准地转位势倾向方程（朱乾根等，1981；Song et al., 2016）分析乌山阻高在不同生命期的热、动力特征（路瑶等，2022）。准地转位势倾向方程如下：

$$\left[\frac{g}{f} \nabla^2 + fg \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \frac{\partial Z}{\partial t} = f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\nabla \cdot \overline{V\theta}}{\bar{S}} \right) + (-\nabla \cdot \overline{V\xi})$$

式中： Z 为位势高度， f 、 g 分别为科氏参数和重力加速度， σ 、 p 分别为静力稳定性和气压。上式右端第一项代表涡流热量通量，其中 V 为风速， θ 为位势温度， $\overline{V\theta}$ 表示热量通量的时间平均值， \bar{S} 表示 $(-\partial\bar{\theta}/\partial p)$ 的半球平均；第二项代表涡流动量通量，其中 ξ 为涡度， $\overline{V\xi}$ 表示动量通量的时间平均值。若只考虑经向通量和区域效应的影响，上式可改写为：

$$\left[\frac{g}{f} \nabla^2 + fg \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \frac{\partial Z}{\partial t} = f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\bar{S}} \right) \frac{\partial}{\partial y} (vT) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (uv)$$

上式表明位势高度的变化与热、动量输送有关，因此当只考虑位势高度和热量通量的关系时，上式可简化为：

$$\frac{\partial Z}{\partial t} \propto - \frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial}{\partial y} (vT)$$

同理，当只考虑位势高度和动量通量的关系时，上式可简化为： $\partial Z/\partial t \propto (uv)$ 。

此外，阻塞高压具有准定常特征（朱乾根等，1981），准定常波在阻高物理机制的研究中也常有应用（Hansen and Chen, 1982；Smith and Kushner, 2012），因此本文引入定常物理量（路瑶等，2022）。对于物理量 A ，定常物理量 A^* 的计算方法如下：

$$A^* = A - [A]$$

式中： $[A]$ 表示物理量 A 的纬向平均，则 A^* 表示物理量 A 偏离纬向平均值的部分。由于经向定常通量可表示为 v^*A^* ，那么将物理量 A 分别替换成温度 T 和纬向风 u ，则 v^*T^* 和 u^*v^* 分别表示定常热量通量和定常动量通量（Wiin-Nielsen et al., 1963）。根据准地转位势倾向方程，位势倾向与定常热、动量通量有关，因此利用尺度分离的方法对定常热、动量通量进行分解，从而分析冬季乌山阻高发生发展与维持过程中不同次季节尺度的热、动力输送特征。

3 结果分析

3.1 超长阻高事件与不同时间尺度大气环流的联系

图 1a、b 分别为超长阻高事件和其他阻高事件 500 hPa 位势高度场及异常场，相较于其他阻高事件，超长阻高事件的阻塞形势更强，位势高度大值区范围更大。两类阻高事件的异常中心均位于 55°N~70°N 之间，并且在此范围内存在较大差异，因此选定研究关键区为

55°N~70°N、45°E~80°E。从两类阻高事件位势高度差值场（图 1c）中能够明显看到超长阻高事件中阻塞高压向北伸展，异常中心在北部更强，同时位置偏西。

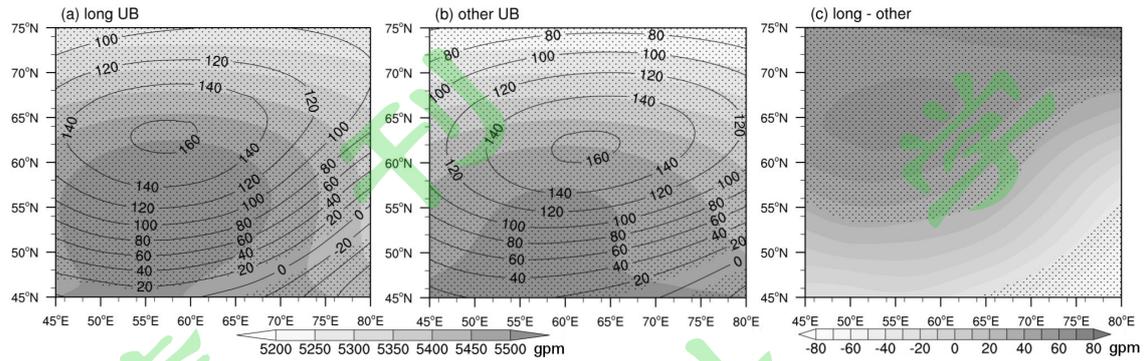


图 1 超长 (a) 和其他 (b) 阻高事件 500 hPa 位势高度场 (阴影) 及距平场 (黑色实线, 间隔 20 gpm) ; (c) 超长阻高事件与其他阻高事件 500 hPa 位势高度差值场

单位: gpm, 打点表示通过 99% 显著性检验

Fig 1 The 500 hPa geopotential height (shading) and its anomaly (black solid lines with interval of 20 gpm) of long-duration (a) and other (b) blocking high events; (c) the difference field of 500 hPa geopotential height between long-duration and other blocking high events.

Unit: gpm, dots have passed the significance test of 99%.

定义阻高出现为第 0 天, 分析超长阻高事件和其他阻高事件超前 15 天至滞后 15 天 500 hPa 位势高度各分量变化情况 (图 2a、b)。超长阻高事件中-15 天至-12 天 500 hPa 位势高度异常的准双周尺度分量贡献较大,-9 天时该分量减小, 随后 20~80 天季节内尺度分量和 >80 天背景分量的贡献逐渐增加, 并占据主导地位。相较而言, 其他阻高事件中背景分量变化较小, -6 天时准双周尺度分量较大, 随后季节内尺度分量逐渐增加, 在+3 天达到峰值。对滤波结果进行合成分析, 定量诊断阻高维持期间 (第 0 天至阻高事件结束) 不同时间尺度分量的贡献情况 (图 2e、f), 结果显示 20~80 天的季节内尺度位势高度异常贡献最大, 说明两类阻高事件的维持均以季节内尺度位势高度异常为主。为更清晰看到各分量超前 15 天至滞后 15 天的变化情况, 进一步分析 500 hPa 位势高度倾向 (图 2c、d)。从图 2c、d 中能够看到超长阻高事件中-3 天至 0 天季节内尺度分量数值较大, 但是在其他阻高事件中相同时段内准双周尺度分量数值较大。定义位势高度 >0 时为阻高建立阶段, 即-4 天至 0 天, 由此计算两类阻高事件建立期间 500 hPa 位势高度倾向之和 (图 2g、h), 发现位势高度倾向的 20~80 天低频分量对超长阻高事件的建立贡献最大, 10~20 天准双周分量对其他阻高事件的建立贡献最大。综上, 超长阻高事件的建立和维持均决定于位势高度异常的 20~80 天振荡, 而其他阻高事件的建立取决于准双周尺度分量, 维持则取决于季节内尺度分量。接下来将通过分析阻高不同阶段的热、动力特征, 探究准双周尺度和季节内尺度热、动量输送对两类阻高事件的影响。

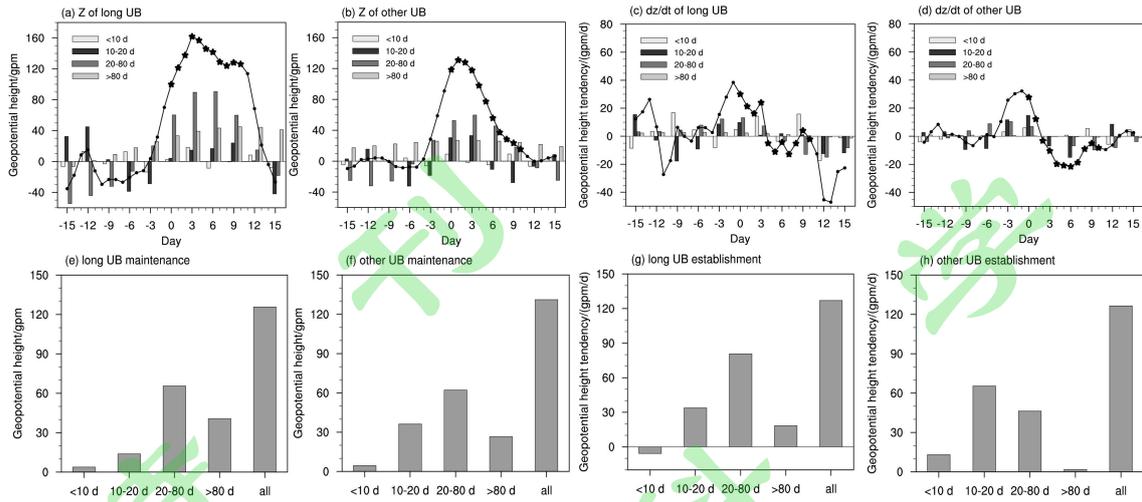


图2 超长 (a) 和其他 (b) 阻高事件-15 天至+15 天 500 hPa 位势高度距平 (黑色实线) 及各分量变化情况 (柱状图), 单位: gpm; 超长 (c) 和其他 (d) 阻高事件-15 天至+15 天 500 hPa 位势高度倾向 (黑色实线) 及各分量变化情况 (柱状图), 单位: gpm/d; 超长 (e) 和其他 (f) 阻高事件维持期间 (第 0 天至阻高事件结束) 500 hPa 位势高度各分量平均, 单位: gpm; 超长 (g) 和其他 (h) 阻高事件建立期间 (-4 天至 0 天) 500 hPa 位势高度倾向之和, 单位: gpm/d

星号表示阻高维持过程

Fig 2 The 500 hPa geopotential height anomaly (black solid line) and the variation of each component (bar charts) of long-duration (a) and other (b) blocking high events from -15 day to +15 day, unit: gpm; the 500 hPa geopotential height tendency (black solid line) and the variation of each component (bar charts) of long-duration (c) and other (d) blocking high events from -15 day to +15 day, unit: gpm/d; each component average of 500 hPa geopotential height during maintenance process of long-duration (e) and other (f) blocking high events (0 day to the end of blockings), unit: gpm; the sum of 500 hPa geopotential height tendency of long-duration (g) and other (h) blocking high events in the establishment process (-4 day to 0 day), unit: gpm/d.

Pentagrams indicate the maintenance process of blocking highs.

3.2 阻高发展与维持阶段热力特征分析

作为一个暖性高压系统, 阻高会受到热量输送的影响, 因此接下来将通过计算定常热量通量 (v^*T^*) 及其梯度分析不同类型阻高事件发生发展与维持阶段的热量输送特征。 $v^*T^*>0$ 表示热量向极输送, $v^*T^*<0$ 表示热量向赤输送 (王林等, 2007)。对流层自由大气中温度平流总是随高度减弱, 诊断准地转位势倾向方程可知 $\partial(v^*T^*)/\partial y < 0$ 时位势高度增加, 有利于阻高建立, 而热量辐合有利于阻高维持。

首先分析不同时间尺度定常热量输送对阻高事件发展阶段的影响, 定义 500 hPa 位势高度倾向 >0 时为阻高发展阶段, 即超长阻高事件的发展阶段为超前 6 天至滞后 3 天, 共 10 天, 其他阻高事件的发展阶段为超前 4 天至滞后 1 天, 共 6 天。图 3 为超长阻高事件和其他阻高事件发展阶段不同时间尺度定常热量通量梯度的平均值, 从图中能够清晰看到 10~20 天分量和 20~80 天分量对超长阻高事件的发展为正贡献, 其中 10~20 天分量贡献最大, 而小于 10

天分量不利于超长阻高事件的发展。相较而言,其他阻高事件中季节内尺度分量的贡献最大。因此接下来将主要针对准双周尺度热量输送和季节内尺度热量输送,对比分析两类阻高事件发展阶段的热力特征。

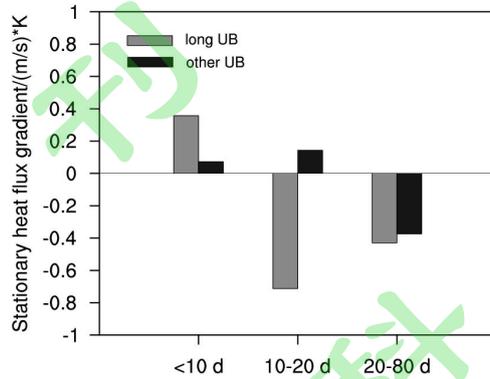


图3 两类阻高事件发展阶段500 hPa定常热量通量梯度各项平均值,单位:(m/s)·K

Fig 3 The average of each component of the 500 hPa stationary heat flux gradient during the development stage of the two types blocking high events, unit: (m/s)·K.

对两类阻高事件发展阶段500 hPa位势高度倾向及定常热量通量梯度的准双周分量和季节内低频分量进行合成(图4),发现热量输送对超长阻高事件的发展更为重要。从图4a、b中能够看到超长阻高事件中准双周尺度和季节内尺度热量输送均有较大贡献,不同的是准双周尺度热量通量梯度具有波动变化,在-4天至+2天为负值,说明热量通量梯度的10~20天分量对阻高发展的贡献主要集中在发展阶段后期,而季节内尺度热量通量梯度从-6天开始始终为负值,并且逐渐增加,其贡献贯穿整个发展阶段,为阻高发展提供有利条件。因此,超长阻高事件的发展是定常热量通量梯度的10~20天分量和20~80天分量共同作用的结果,准双周尺度分量主要作用于发展阶段后期。对于其他阻高事件,准双周尺度热量输送较小,季节内尺度热量输送对阻高建立起主要作用,但该分量贡献逐渐减小,有利于阻高建立,却不利于阻高维持更长时间。

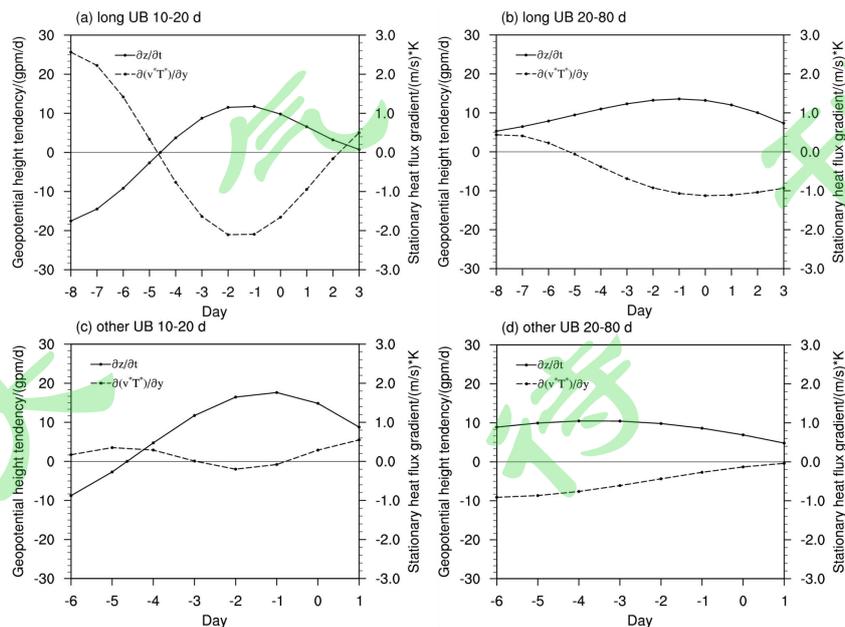


图4 超长 (a、b) 和其他阻高事件 (c、d) 发展阶段 500 hPa 位势高度倾向 (单位: gpm/d, 左侧坐标轴) 及定常热量通量梯度 (单位: (m/s)·K, 右侧坐标轴) 不同时间尺度分量 (a、c 为 10-20 天尺度, b、d 为 20-80 天尺度) 随时间变化图

Fig 4 The variation of different time scale component (10-20 days scale for a and c, 20-80 days scale for b and d) of 500 hPa geopotential height tendency (unit: gpm/d, left axis) and stationary heat flux gradient (unit: (m/s)·K, right axis) during the development stage of long-duration (a, b) and other (c, d) blocking high events.

接下来分析阻高维持阶段的热力特征, 其中维持阶段是指阻高第 0 天至阻高事件结束。计算乌山关键区经度范围 45°E-80°E 内定常温度、定常热量通量的平均, 得到纬度-高度剖面图 (图 5)。从超长阻高事件和其他阻高事件维持期间定常温度的纬度-高度分布图 (图 5a、b) 中能够看到中纬度地区整体呈“上冷下暖”的分布特征, 对流层中层及以下的暖中心主要位于 60°N 以北, 与阻高暖心结构相符, 并且超长阻高事件的暖中心更强。两类事件中中纬度地区高空均由冷空气控制, 冷空气沿阻高南部向下扩散, 输送至 30°N~40°N 之间。二者差值场 (图 5c) 表明超长阻高事件中冷空气比其他阻高事件中更强, 能够贯穿整个对流层, 并且具有多个冷中心, 其中对流层低层冷中心位于 45°N 附近, 而 60°N 以北地区则较其他阻高事件偏暖。进一步分析定常热量通量的纬度-高度分布情况 (图 5d、e) 发现中纬度地区对流层低层以热量向极输送为主, 其中 60°N 以南热量向极输送更强。但是在超长阻高事件维持期间 60°N 附近有热量向南输送, 负值区域位于两个正中心之间, 使得热量在 60°N 附近堆积, 为阻高长时间维持创造有利条件。在其他阻高事件中乌拉尔山地区对流层低层定常热量通量均为正值, 说明热量持续向极地输送, 无热量堆积, 不利于阻高维持。从两类阻高事件定常热量通量差值场 (图 5f) 中能够更加明显看到超长阻高事件中热量在 60°N 附近辐合, 为阻高维持提供有利条件。

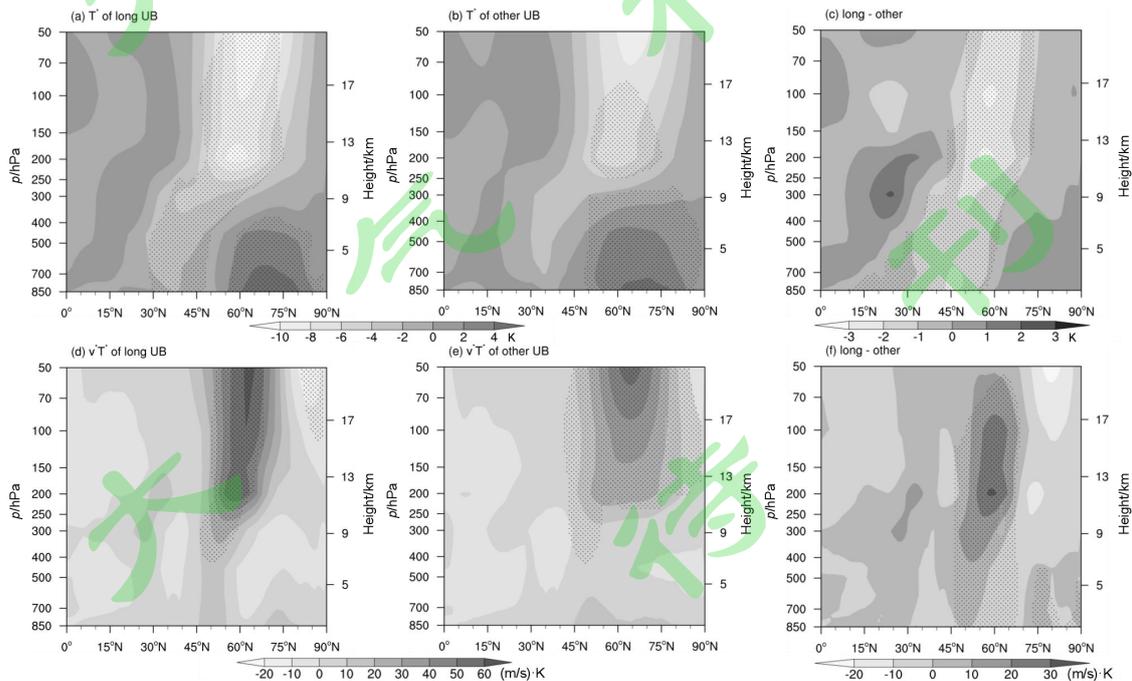


图5 超长 (a) 和其他 (b) 阻高事件维持期间定常温度的纬度-高度分布图, 单位: K; (c) 两类阻高事

件定常温度差值场的纬度-高度分布图，单位：K；超长（d）和其他（e）阻高事件维持期间定常热量通量的纬度-高度分布图，单位：(m/s)·K；（f）两类阻高事件定常热量通量差值场的纬度-高度分布图，单位：(m/s)·K

打点表示通过 90%显著性检验

Fig 5 Pressure-latitude distribution of the maintenance process of long-duration (a) and other (b) blocking high events for stationary temperature, unit: K; (c) pressure-latitude distribution of the difference field of stationary temperature between long-duration and other blocking high events, unit: K; pressure-latitude distribution of the maintenance process of long-duration (d) and other (e) blocking high events for stationary heat flux, unit: (m/s)·K; (f) pressure-latitude distribution of the difference field of stationary heat flux between long-duration and other blocking high events, unit: (m/s)·K.

Dots have passed the significance test of 90%.

进一步分析两类阻高事件维持期间准双周尺度（10~20 天）和季节内尺度（20~80 天）定常热量通量的纬度-高度分布情况（图 6）。对于超长阻高事件而言，中纬度地区以负热量通量为主，有利于阻高维持（图 6a、b）。不同的是季节内尺度上 60°N 以北负热量通量的范围更大，一直向下伸展至对流层低层，同时低层 75°N 附近热量辐合，为阻高维持创造有利条件。相较而言，在其他阻高事件中无论是准双周尺度还是季节内尺度，对流层低层均以热量向极输送为主，不利于阻高维持。由此可见，从热力角度分析，超长阻高事件中热量输送更强，阻高长时间维持主要是由于季节内尺度热量输送，形成热量堆积，创造出利于阻高维持的条件。

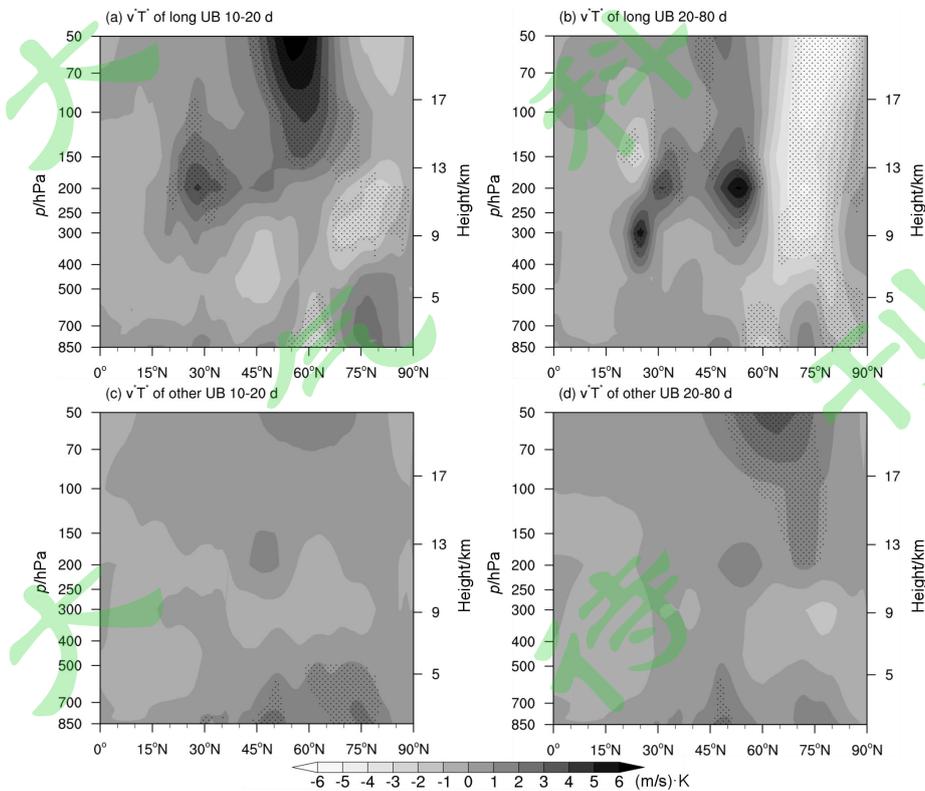


图 6 超长（a、b）和其他（c、d）阻高事件维持期间不同时间尺度定常热量通量纬度-高度分布图

单位: (m/s)·K, 打点表示通过 90%显著性检验

Fig 6 Pressure-latitude distribution of different time scales of stationary heat flux during the maintenance of long-duration (a, b) and other (c, d) blocking high events.

Unit: (m/s)·K, dots have passed the significance test of 90%.

3.3 阻高发展与维持阶段动力特征分析

除了热力因素, 动力因素对于阻高的发展和维持同样具有重要作用, 定常动量通量 $u^*v^* > 0$ 时动量向北输送, 有利于阻高发展和维持 (王林等, 2007; 路瑶等, 2022)。因此接下来将通过诊断定常纬向风和定常动量通量, 对比分析超长阻高事件和其他阻高事件在不同生命期的动力特征。

图 7 为准双周尺度和季节内尺度 500 hPa 定常动量通量在两类阻高事件发展阶段随时间演变情况。从图 7a、b 中能够看到定常动量通量在超长阻高事件中数值更大, 其中 10~20 天分量在 -8 天至 -3 天为正值, 随后转为负值, 说明准双周尺度动量输送的贡献主要集中在发展阶段前期。相较而言, 季节内尺度动量通量始终为正值, 并在 -3 天达到峰值, 有利于超长阻高事件的发展。在其他阻高事件中动量通量的 10~20 天分量和 20~80 天分量均为正值, 共同作用促进阻高发展。综上, 动量输送对超长阻高事件的发展更为重要, 其发展阶段以定常动量通量的季节内尺度分量为主, 季节内尺度分量的贡献贯穿整个发展阶段, 而准双周尺度分量的贡献集中在发展阶段前期。接下来将进一步分析阻高维持阶段的动力特征。

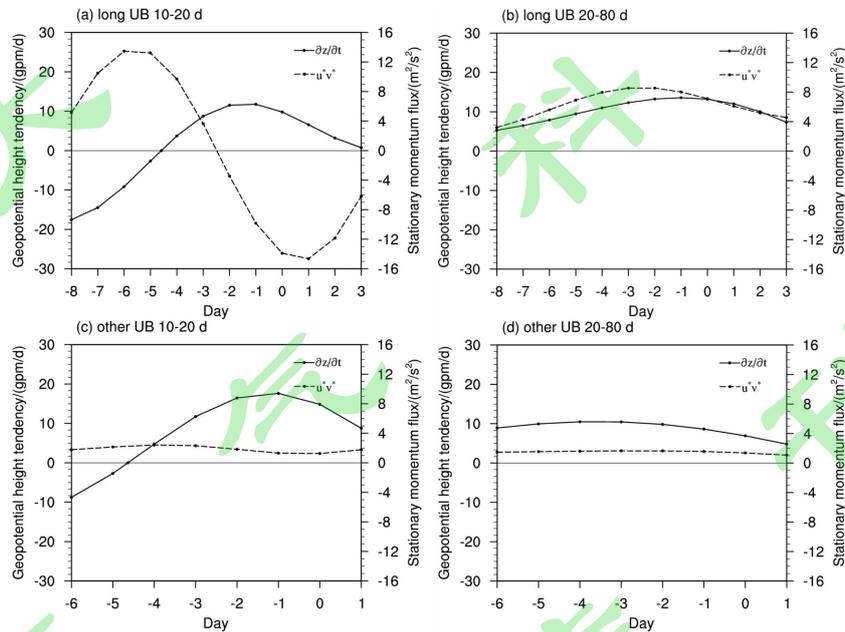


图 7 超长 (a、b) 和其他阻高事件 (c、d) 发展阶段 500 hPa 位势高度倾向 (单位: gpm/d, 左侧坐标轴) 及定常动量通量 (单位: m^2/s^2 , 右侧坐标轴) 不同时间尺度分量 (a、c 为 10-20 天尺度, b、d 为 20-80 天尺度) 随时间变化图

Fig 7 The variation of different time scale component (10-20 days scale for a and c, 20-80 days scale for b and d) of 500 hPa geopotential height tendency (unit: gpm/d, left axis) and stationary momentum flux (unit: m^2/s^2 , right

axis) during the development stage of long duration (a, b) and other (c, d) blocking high events.

超长阻高事件和其他阻高事件的定常纬向风纬度-高度分布图（45°E-80°E 平均）（图 8a、b）表明北半球地区定常纬向风呈“-”“+”“-”“+”分布，其中南侧正中心位于 25°N~30°N 之间，代表副热带急流，北侧正中心位于 60°N~65°N 之间，代表极锋急流。从位置来看两个急流相互远离，并且副热带急流强度明显大于极锋急流强度，而中纬度地区纬向西风弱，有利于阻高维持。二者差值场（图 8c）表明超长阻高事件中纬向西风更弱，为阻高维持提供有利条件。从定常动量通量的纬度-高度分布图（图 8d、e）中能够看到两类阻高事件的动量输送特征相似，以 60°N 为界，动量输送方向相反，以北为动量向赤输送，以南则为动量向极输送。二者差值场（图 8f）表明超长阻高事件中 60°N 以南的定常动量通量正中心数值更大，为阻高长时间维持创造有利条件。

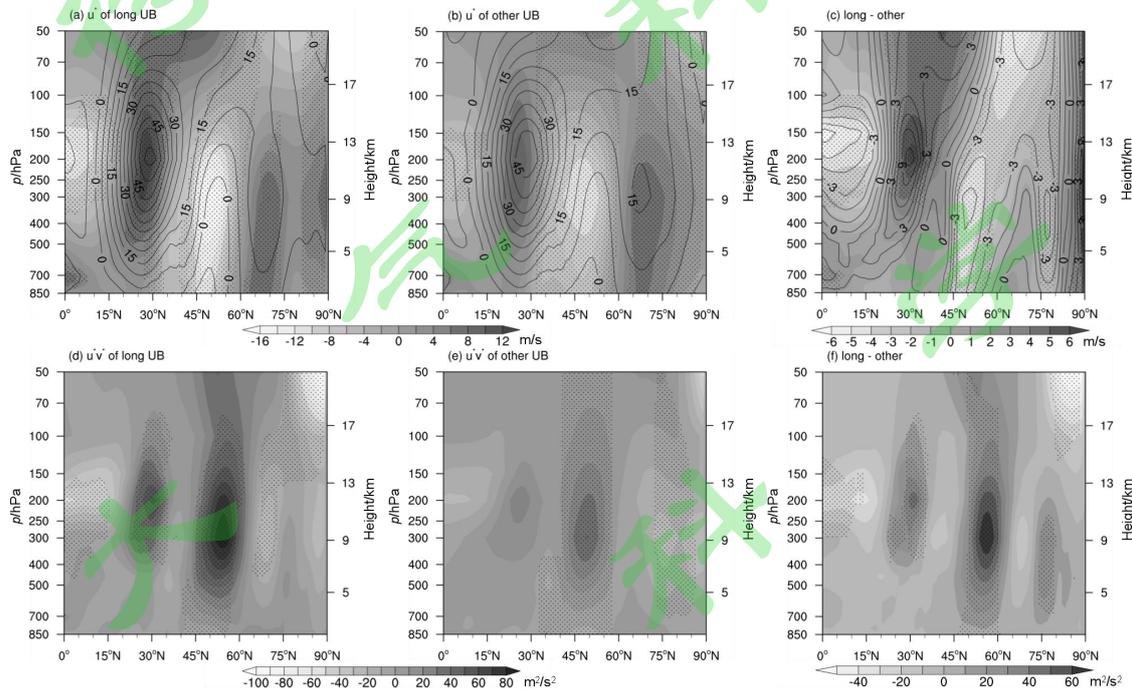


图 8 超长 (a) 和其他 (b) 阻高事件维持期间纬向风 (黑色实线, 间隔 5 m/s) 及定常纬向风 (阴影) 的纬度-高度分布图, 单位: m/s; (c) 两类阻高事件纬向风 (黑色实线, 间隔 1 m/s) 及定常纬向风 (阴影) 差值场的纬度-高度分布图, 单位: m/s; 超长 (d) 和其他 (e) 阻高事件维持期间定常动量通量纬度-高度分布图, 单位: m^2/s^2 ; (f) 两类阻高事件定常动量通量差值场的纬度-高度分布图, 单位: m^2/s^2

打点表示通过 90%显著性检验

Fig 8 Pressure-latitude distribution of the maintenance process of long-duration (a) and other (b) blocking high events for zonal wind (black solid lines with interval of 5 m/s) and stationary zonal wind (shading), unit: m/s; (c) pressure-latitude distribution of the difference field of zonal wind (black solid lines with interval of 1 m/s) and stationary zonal wind (shading) between long-duration and other blocking high events, unit: m/s; pressure-latitude distribution of the maintenance process of long-duration (d) and other (e) blocking high events for stationary momentum flux, unit: m^2/s^2 ; (f) pressure-latitude distribution of the difference field of stationary momentum flux between long-duration and other blocking high events, unit: m^2/s^2 .

Dots have passed the significance test of 90%.

进一步探究阻高维持期间不同时间尺度定常动量通量的作用。图 9 为两类阻高事件不同时间尺度定常动量通量的纬度-高度分布情况，从图 9a 中能够看到超长阻高事件中准双周尺度动量通量在中纬度地区以向赤道输送为主，对流层负中心位于 60°N 两侧，高度大约位于 300 hPa。在季节内尺度上（图 9b）中纬度地区整层均为定常动量通量的正值区域，说明季节内尺度分量的动量输送对阻高维持的贡献更大。相较而言，其他阻高事件中准双周尺度以正动量通量为主，但是动量输送较弱（图 9c），而季节内尺度上 60°N 附近以负动量通量为主（图 9d），不利于阻高维持。综上，动量输送对超长阻高事件的影响更大，20~80 天低频动量输送有利于阻高维持更长时间。

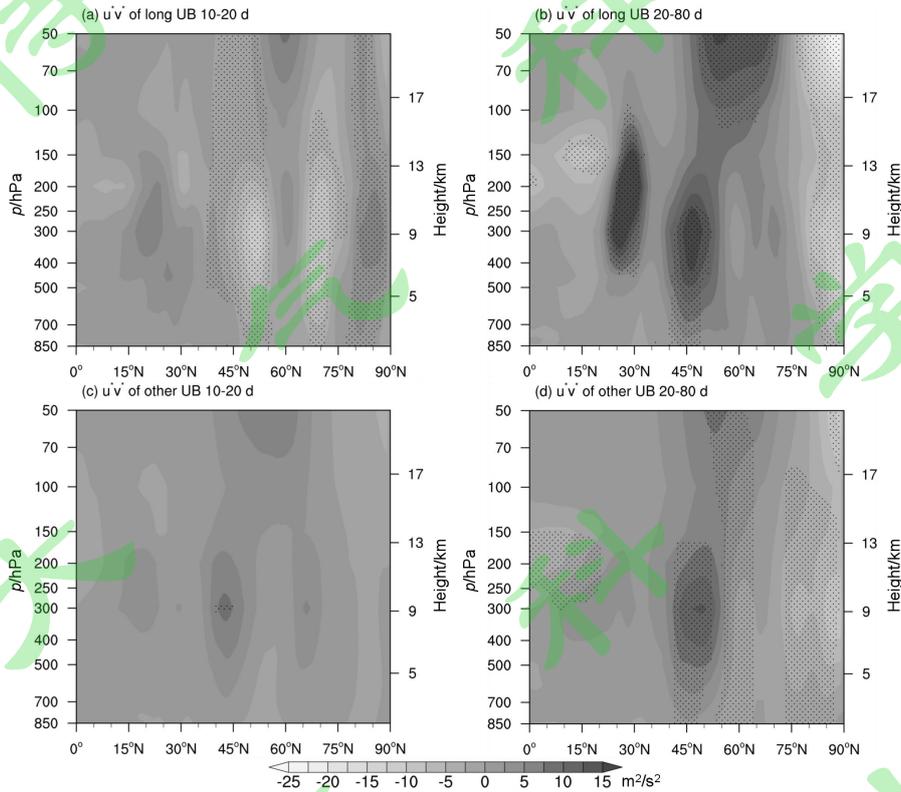


图 9 超长 (a、b) 和其他 (c、d) 阻高事件维持期间不同时间尺度定常动量通量纬度-高度分布图

单位: m^2/s^2 , 打点表示通过 90%显著性检验

Fig 9 Pressure-latitude distribution of different time scales of stationary momentum flux during the maintenance process of long-duration (a, b) and other (c, d) blocking high events.

Unit: m^2/s^2 , dots have passed the significance test of 90%.

4 结论和讨论

本文基于 1979-2019 年冬季 ERA5 逐日再分析数据，将近 41 年冬季乌山地区阻高事件分为超长阻高事件和其他阻高事件，探究两类阻高事件与不同时间尺度大气环流的联系，并进一步计算定常热、动量通量，对比分析不同类型阻高事件发生发展和维持过程中的热、动力特征，得出如下结论：

(1) 从阻高生命期长短的角度将冬季乌山阻高事件分为超长阻高事件和其他阻高事件两类, 其中位势高度异常的季节内尺度分量对超长阻高事件的建立和维持贡献最大, 而其他阻高事件建立与维持过程中的主要周期有所不同, 建立以 10~20 天准双周尺度分量为主, 维持则主要取决于位势高度异常的季节内尺度分量。

(2) 热力分析表明热量输送在超长阻高事件中更为重要, 超长阻高事件的发展是热量通量的 10~20 天分量和 20~80 天分量共同作用的结果, 不同的是 10~20 天热量输送的贡献集中在发展阶段后期, 而 20~80 天热量输送的贡献几乎贯穿整个发展阶段。在超长阻高事件维持阶段中纬度地区呈“上冷下暖”分布特征, 对流层中低层暖中心与阻高暖心结构相符, 季节内尺度热量输送造成热量堆积, 有利于阻高维持更长时间。

(3) 在阻高发展与维持过程中动量输送同样具有重要作用。发展阶段中不同时间尺度动量通量对超长阻高事件的贡献不同, 准双周尺度动量输送的贡献主要集中在发展阶段前期, 而季节内尺度分量的贡献贯穿整个发展阶段。维持阶段中副热带急流和极锋急流相互远离, 中纬度地区弱西风有利于阻高维持。相较于其他阻高事件, 超长阻高事件中 60°N 以南的动量向极输送更强, 并且以季节内尺度动量输送为主, 为阻高维持创造有利条件。

最后需要指出的是本文主要侧重于阻高事件的发展、建立和维持, 并未涉及到阻高崩溃, 但实际应用中阻高的崩溃常导致寒潮天气过程的发生, 对天气预报具有指示作用, 因此阻高崩溃过程中不同时间尺度的热、动量输送特征需要进一步深入研究。

参考文献

- Charney J G, Devore J G. 1979. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36(7): 1205-1216. doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<1205:MFEITA>2.0.CO;2
- Dole R M, Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical Northern hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111(8): 1567-1586. doi: 10.1175/1520-0493(1983)111<1567:PAOTEN>2.0.CO;2
- Dunn-Sigouin E, Son S-W. 2013. Northern hemisphere blocking frequency and duration in the CMIP5 models [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(3): 1179-1188. doi: 10.1002/jgrd.50143
- Hansen A R, Chen T C. 1982. A spectral energetics analysis of atmospheric blocking [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(9): 1146-1165. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<1146:ASEAOA>2.0.CO;2
- Hoffmann L, Günther G, Li D, et al. 2019. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 19(5): 3097-3124. doi: 10.5194/acp-19-3097-2019
- 金荣花, 李艳, 王式功. 2009. 四种客观定量表征阻塞高压方法的对比分析 [J]. *高原气象*, 28(5): 1121-1128.
- Jin Rong-hua, Li Yan, Wang Shigong. 2009. Comparison and analysis among four objective and quantificational blocking indexes [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28(5): 1121-1128. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2009-05-020
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. *大气科学*, 34(5): 865-874. Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural mountains in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(5): 865-874. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.02
- 李春, 孙照渤. 2003. 中纬度阻塞高压指数与华北夏季降水的联系 [J]. *大气科学学报*, 26(4): 458-464. Li Chun, Sun Zhaobo. 2003. Association of mid-latitude blocking high index with summer precipitation in North China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26(4): 458-464. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2003.04.003
- 李双林, 纪立人. 2001. 夏季乌拉尔山地区环流持续异常及其背景流特征 [J]. *气象学报*, 59(3): 280-293. Li

- Shuanglin, Ji Liren. 2001. Persistent anomaly in Ural area in summer and its background circulation characteristics [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59(3): 280-293. doi: 10.11676/qxxb2001.030
- 刘刚, 沈柏竹, 廉毅, 等. 2012. 亚洲阻塞高压分类及其与东北冷涡活动和东北夏季低温的联系 [J]. *地理科学*, 32(10): 1269-1274. Liu Gang, Shen Bai-zhu, Lian Yi, et al. 2012. The sorts of 500 hPa blocking high in Asia and it's relations to cold vortex and aestival low temperature in Northeast of China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 32(10): 1269-1274. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2012.010.1269
- 刘芸芸, 丁一汇. 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析 [J]. *气象*, 46(11): 1393-1404. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020 [J]. *Meteorological monthly (in Chinese)*, 46(11): 1393-1404. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001
- 路瑶, 李旭, 李艳, 等. 2022. 冬季乌拉尔山地区不同生命期阻塞高压的热动量输送特征 [J]. *高原气象*, 41(3): 671-683. Lu Yao, Li Xu, Li Yan, et al. 2022. The characteristics of thermal and momentum transport during the different lifetimes of Ural blocking highs in winter [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 41(3): 671-683. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00003.
- Li Y, Ye P L, Pu Z X, et al. 2017. Historical statistics and future changes in long-duration blocking highs in key regions of Eurasia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 130: 1195-1207. doi: 10.1007/s00704-017-2079-8
- Li Y, Lu Y, Wang C H. 2020. Characteristics of thermal and momentum transport during the lifetime of Ural blocking highs [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(1): 1-17. doi: 10.1002/joc.6195
- Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al. 2016a. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part I: Blocking-induced amplification [J]. *J. Climate*, 29(11): 3925-3947. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0611.1
- Luo D H, Xiao Y Q, Diao Y N, et al. 2016b. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic-cold Eurasian anomalies. Part II: The link to the North Atlantic oscillation [J]. *J. Climate*, 29(11): 3949-3971. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0612.1
- Ma J W, Liang X S. 2017. Multiscale dynamical processes underlying the wintertime Atlantic blockings [J]. *J. Atmos. Sci.*, 74(11): 3815-3831. doi: 10.1175/JAS-D-16-0295.1
- Mokhov I I, Akperov M G, Prokofyeva M A, et al. 2013. Blockings in the Northern hemisphere and Euro-Atlantic region: Estimates of changes from reanalysis data and model simulations [J]. *Dokl. Earth. Sci.*, 449(2): 430-433. doi: 10.1134/S1028334X13040144
- 庞雪琪, 李栋梁, 姚慧茹. 2017. 欧亚中高纬冬季地表感热异常与中国西北东部夏季降水的可能联系 [J]. *高原气象*, 36(3): 675-684. Pang Xueqi, Li Dongliang, Yao Huiru. 2017. Possible linkage between winter surface sensible heat flux anomalies over the mid-high latitudes of the Eurasian continent and summer precipitation in the Eastern part of Northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 36(3): 675-684. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00054
- 彭京备, 孙淑清, 陈伯民. 2023. 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 [J]. *大气科学*, 47(5): 1421-1433. Peng Jingbei, Sun Shuqing, Chen Bomin. 2023. Maintenance and development of Ural blocking high and its relationship with severe cold wave activities in 2020/2021 winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(5): 1421-1433. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21166
- Rex D F. 1950. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action [J]. *Tellus*, 2(3): 196-211. doi: 10.1111/j.2153-3490.1950.tb00331.x
- Schneiderreit A, Schubert S, Vargin P, et al. 2012. Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: summer 2010 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140(9): 2967-2981. doi: 10.1175/MWR-D-11-00249.1
- Smith K L, Kushner P J. 2012. Linear interference and the initiation of extratropical stratosphere-troposphere interactions [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, D13107. doi: 10.1029/2012JD017587
- Song L, Wang L, Chen W, et al. 2016. Intraseasonal variation of the strength of the East Asian trough and its climatic impacts in boreal winter [J]. *J. Climate*, 29(7): 2557-2577. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00834.1
- 汤懋苍. 1957. 亚洲东部的阻塞形势及其对天气气候的影响 [J]. *气象学报*, 33(4): 282-293. Tang Maocang. 1957. On the blocking situation of the Eastern Asia and it's climatic effects [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 33(4): 282-293. doi: 10.11676/qxxb1957.024
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 54(4): 337-350. Tao Shiyang, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the Southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 54(4): 337-350. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01
- Takaya K, Nakamura H. 2005. Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(12): 4441-4449. doi: 10.1175/

JAS3628.1

- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. *Tellus A*, 42(3): 343-365. doi: 10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x
- 王东海, 柳崇建, 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 Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, 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 (in Chinese)*, 66(3): 405-422. doi: 10.11676/qxxb2008.038
- 王林, 陈文, 黄荣辉, 等. 2007. 北半球定常波输送西风动量的气候态及其年变化 [J]. *大气科学*, 31(3): 377-388. Wang Lin, Chen Wen, Huang Rong-hui, et al. 2007. The climatology and annual cycle of meridional transport of westerly momentum by stationary waves in the Northern hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31(3): 377-388. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.03.01
- 王亚非, 宋永加. 1998. 1991年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析 [J]. *气象学报*, 56(2): 212-224. Wang Yafei, Song Yongjia. 1998. A diagnostic analysis on the growth mechanism of the East Asia blocking high in 1991 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56(2): 212-224. doi: 10.11676/qxxb1998.020
- Wiin-Nielsen A, Brown J A, Drake M. 1963. On atmospheric energy conversions between the zonal flow and the eddies [J]. *Tellus*, 15(3): 261-279. doi: 10.3402/tellusa.v15i3.8845
- 辛欣, 曾胜兰, 姚素香, 等. 2017. 北太平洋冬半年位势高度季节内振荡及其诊断分析 [J]. *大气科学学报*, 40(2): 280-287. Xin Xin, Zeng Shenglan, Yao Suxiang, et al. 2017. The intraseasonal oscillations of the winter geopotential height over the North Pacific and its diagnosis [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(2): 280-287. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150911001
- 徐彬羽, 姚素香, 孙庆飞. 2023. 冬季乌拉尔山阻塞高压建立和维持与位势高度季节内振荡的联系 [J]. *高原气象*, 42(6): 1548-1561. Xu Binyu, Yao Suxiang, Sun Qingfei. 2023. The connections between the establishment and maintenance of Ural blockings in winter and intra-seasonal oscillation of geopotential height [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 42(6): 1548-1561. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00006
- 徐辉, 金荣花. 2011. 2008年初瞬变涡在中高纬阻高异常中的作用分析 [J]. *高原气象*, 30(3): 600-606. Xu Hui, Jin Rong-hua. 2011. Analysis on the effect of the transient eddy on Ural blocking high in 2008 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30(3): 600-606.
- 杨双艳, 李天明. 2020. 中高纬大气 ISO 对夏季鄂海阻高形成和维持的调节作用 [J]. *大气科学学报*, 43(1): 104-115. Yang Shuangyan, Li Tim. 2020. The role of intraseasonal oscillation at mid-high latitudes in regulating the formation and maintenance of Okhotsk blocking in boreal summer [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(1): 104-115. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191001010
- 姚菊香, 王盘兴, 李丽平. 2005. 季节内振荡研究中两种数字滤波器的性能对比 [J]. *南京气象学院学报*, 28(2): 248-253. Yao Juxiang, Wang Panxing, Li Liping. 2005. Performance contrast between two filters in Madden-Julian oscillations analysis [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28(2): 248-253. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2005.02.014
- 姚素香, 龚克坚, 赵琛. 2016. 北半球冬季中纬度位势高度场的季节内振荡 [J]. *气象科学*, 36(5): 622-628. Yao Suxiang, Gong Kejian, Zhao Chen. 2016. Intraseasonal oscillation of the winter geopotential height in the middle latitude of the Northern hemisphere [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 36(5): 622-628. doi: 10.3969/2015ims.0063
- 叶笃正. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究 [M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng. 1962. Study of the winter blocking in the Northern hemisphere (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Yang S Y, Li Tim. 2017. The role of intraseasonal variability at mid-high latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter [J]. *Int. J. Climatol.*, 37(S1): 1248-1256. doi: 10.1002/joc.5080
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 1981. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 1981. Principle and methods of synoptic meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 朱正心. 1983. 地形与热力共同作用下超长波的非线性平衡态与阻塞形势 [J]. *大气科学*, 7(1): 13-22. Zhu Zhengxin. 1983. Equilibrium states of ultralong waves forced by perturbation heating and orography and blocking situation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 7(1): 13-22. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1983.01.02

The Influence of Thermal and Momentum Transport at Different Subseasonal Scales on long-duration Ural Blockings in Winter

XU Binyu^{1,2}, YAO Suxiang^{3*}

- (1. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, Henan, China;
2. Henan Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003, Henan, China;
3. School of Atmospheric Sciences NUIST, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract In winter, the long-duration blocking highs often cause the accumulation of cold air with greater intensity, which lead to the occurrence of widespread severe cold waves, and the study of the establishment and long-term maintenance mechanism of blocking highs has great scientific significance. By used the ERA5 daily reanalysis data provided by the European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) from 1979/1980 to 2019/2020, 6 long-duration blocking high events (the lifetime is equal or greater than 10 days) were selected from 114 Ural blockings (UB) during the last 41a winter. The similarities and differences between the long-duration blockings and other blockings were compared, focusing on the thermal and momentum transport characteristics at different subseasonal scales during the development and maintenance of long-duration blocking highs. The results show that: (1) The geopotential height in Ural Mountains exhibits significant intra-seasonal oscillations, and the establishment and maintenance of long-duration blockings mainly depends on intra-seasonal scale component (20~80 days) of the geopotential height anomaly, while the establishment and maintenance of other blockings depends on the quasi-biweekly scale component (10~20 days) and intra-seasonal scale component, respectively. (2) During the development stage of long-duration blockings, both the quasi-biweekly and intra-seasonal scale components of stationary thermal flux are beneficial to the increase of geopotential height, and the quasi-biweekly scale heat transport contributes more, while the intra-seasonal heat transport is the largest contributor in the maintenance stage. In comparison, only intra-seasonal heat transport is beneficial to the establishment of other blockings, with decreasing in values that is not favourable for its maintenance. (3) The influence of momentum transport on blocking high events cannot be ignored. The development of blockings is the result of quasi-biweekly and intra-seasonal scale momentum transport. However, the quasi-biweekly scale momentum transport is concentrated in the early part of development stage, while the intra-seasonal scale momentum transport occurs throughout the development stage in the long-duration blockings. In other blockings, the momentum transport is relatively small. During the maintenance stage, the long-duration blockings is dominated by intra-seasonal scale component of stationary momentum flux, and the other blockings is dominated by quasi-biweekly scale component.

Key words Ural blocking high, Scale separation, Stationary thermal flux, Stationary momentum flux