

秦明月, 李双林. 2020. 2018 年和 2008 年 1~2 月影响我国的持续低温事件及其对比分析 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 601–615. QIN Mingyue, LI Shuanglin. 2020. Comparison of Persistent Cold Events in China during January–February of 2018 and 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 601–615. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19154

2018 年和 2008 年 1~2 月影响我国的持续低温事件及其对比分析

秦明月^{1,2} 李双林^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 2018 年 1 月中下旬至 2 月初我国发生了一次大范围的持续低温异常事件, 给国民经济和人们生活带来了很大的不利影响。这次持续低温事件与众所周知的 2008 年 1 月发生在我国南方的持续雨雪冰冻事件 (简称“0801”事件) 有一个共同点, 二者都是发生在 La Niña 和前秋北极海冰显著减少的背景之下。对比这两次事件发生的大气环流和热力背景, 对认识冬季持续极寒事件的形成有重要意义。本文利用 NCEP/NCAR 大气环流再分析资料和 NOAA 卫星观测 OLR 资料, 对这两次过程进行了比较。结果显示, 与“0801”事件相比, 2018 年 1 月中下旬的低温事件表现出以下明显不同的特征: (1) 过程持续短, 冷空气路径偏东; (2) 乌拉尔阻塞和东亚大槽并存, 呈“西高东低”型, 不同于“0801”高纬阻塞和低纬南支槽并存的“北高南低”型; (3) 异常的环流型与自大西洋经乌拉尔山至东亚传播的波列有关, 西伯利亚高压持续时间短; (4) 热带对流活跃在海洋性大陆和西太平洋, 不同于“0801”主要在印度洋。后者对该年南支槽和西太平洋副热带高压增强有显著贡献。最后, 2018 年过程期间水汽输送也不如“0801”强, 导致降水弱。

关键词 持续低温事件 东亚冬季风 乌拉尔阻塞 西伯利亚高压 热带对流

文章编号 1006-9585(2020)06-0601-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19154

Comparison of Persistent Cold Events in China during January–February of 2018 and 2008

QIN Mingyue^{1,2} and LI Shuanglin^{1,2}

1 *Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract A persistent cold event affected China through late January to early February 2018, causing severe damage to the life and property of the country. The event exhibits a resemblance to the well-known long-lasting snowstorms of January 2008 (“0801” event in brief), because both the events occurred during the La Niña phase along with reduced sea ice in the Arctic during the preceding autumn. In this study, the observational features of the 2018 event and the possible factors for its occurrence are investigated through a comparison with the “0801” event. The 2018 cold event persisted for a relatively shorter period than the “0801” event, with cold air outbreak along with an eastern pathway rather than a

收稿日期 2019-09-27; **网络预出版日期** 2020-09-10

作者简介 秦明月, 女, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事热带外海气相互作用研究。E-mail: qinmingyue@mail.iap.ac.cn

通讯作者 李双林, E-mail: shuanglin.li@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金重大项目 41790473

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41790473)

northwestern or northern pathway, as was seen in “0801”. Large-scale atmospheric circulation exhibited a substantial difference between the two cases. The Ural blocking and the East Asian grand trough, the two key systems consisting of East Asian winter monsoon (EAWM), which formed a “west-high-east-low” pattern, were significantly stronger in the 2018 event. In comparison, the East Asian grand trough in the “0801” event did not deepen as evidently, despite the similarly enhanced Ural blocking. Instead, a substantially deepened southern branch trough, another important composition of EAWM, developed in “0801” and resulted in a “north-high-south-low” pattern. Also, the Siberian high persisted for a shorter period in the 2018 event. Besides, tropical convection activities exhibited difference between the two cases. Enhanced convection occurred in the Maritime Continent and equatorial western Pacific in the 2018 case, but mainly over the equatorial Indian Ocean during the “0801” event. The latter contributed to the strengthening of the southern branch trough and the western Pacific subtropical high leading to intensified water vapor transportation from the Bay of Bengal and the western Pacific, and intensified precipitation. In comparison, the convection in 2018 was substantially weaker and not so favorable for transporting moisture to South China.

Keywords Persistent cold event, East Asian winter monsoon, Ural blocking, Siberian high, tropical convection

1 引言

2018 年 1 月中下旬我国发生了一次大范围的持续低温异常冷事件, 表现为冷空气活动频繁, 先后出现 3 次低温雪灾过程, 尤其以发生在 24~28 日的第三次过程为甚。它影响范围最广、持续时间最长、致灾最为严重 (刘超等, 2018)。这次过程发生时, 东北、华北, 特别是内蒙古等地, 24 h 降温幅度 8~12°C, 部分地区超过 14°C, 多站日平均气温较常年同期偏低 4°C 以上, 有 8 个省市日最低气温跌破历史同期极值。伴随着降温, 黄淮西南部、江淮、江南北部发生暴雪, 累计降雪量 10~25 mm, 其中湖南、湖北、安徽、江苏以及浙江等地部分地区超过 25 mm。从月平均看, 全国 1 月单月平均累计降雪量为 12.2 mm, 为 2000 年以来历史第二 (http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201802/t20180205_461739.html [2019-09-01]), 仅少于 2008 年的 15.2 mm。持续降雪造成安徽、湖北、湖南等省部分地区大棚毁损, 农作物受灾。江西、湖南、贵州部分县市出现电线结冰, 用电负荷大。持续低温冰冻天气造成积雪和道路结冰, 给交通运输带来不利的影响。据民政部统计, 受灾最严重的安徽、湖北两省因低温雨雪冰冻灾害共造成 21 人死亡, 直接经济损失超过 100 亿元 (http://www.gov.cn/xinwen/2018-02/08/content_5264912.html [2019-09-01])。深入分析这次持续低温过程, 对我们认识全球变暖背景下极端冷事件的成因机理, 寻找预测线索有重要的意义。

这次持续低温事件发生在 La Niña 位相和前秋北极海冰减少背景下, 这点与众所周知的“0801”

事件相似 (图 1)。“0801”事件是指 2008 年 1 月至 2 月初, 我国遭受的历史罕见的极端低温雨雪冰冻灾害事件 (王凌等, 2008), 前人已经对它开展了很多研究 (付建建等, 2008; 高辉等, 2008; 李崇银等, 2008; 王东海等, 2008; 王允等, 2008; Gao, 2009; Zhou et al., 2009; Bueh et al., 2011)。“0801”的发生与多个环流系统异常有关, 包括欧亚阻塞高压偏强并稳定维持, 副热带南支槽活跃, 西太平洋副热带高压偏强偏北。正是这种中高纬和副热带的环流系统配合, 使冷暖空气长时间交汇在长江中下游, 造成持续雨雪冰冻。

中高纬度环流异常是冬季冷事件发生的直接原因。冷事件发生期间, 通常会伴随有阻塞活动异常。在阻塞期间, 大气环流稳定, 阻塞高压东面的偏北风把极地和中高纬的冷空气源源不断地向南输送, 并在阻塞高压东面堆积。当阻塞发生崩溃时期, 原先堆积在阻塞东侧的冷空气大举南下, 侵入我国, 引起冷空气的爆发 (陶诗言, 1959)。Takaya and Nakamura (2005) 的研究表明, 乌拉尔山地区的阻塞通常会引起低层的西伯利亚高压的增强, 增强东亚冬季风, 造成东亚地区的冷空气爆发。研究发现, 20 世纪 70 年代之后乌拉尔山阻塞和东亚气候的联系加强, 阻塞活动频率影响着东亚冬季风的强弱 (Wang et al., 2010; Wang and Chen, 2014)。除了来自高纬的影响, 热带环流异常如季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, MJO) 也会影响冷事件的发生。研究发现, 当 MJO 对流中心位于印度洋时东亚地区容易发生冷事件 (Jeong et al., 2005; Abdillah et al., 2018)。MJO 对流在赤道地区的异常上升运动通过经向环流在中纬度产生异常下沉运

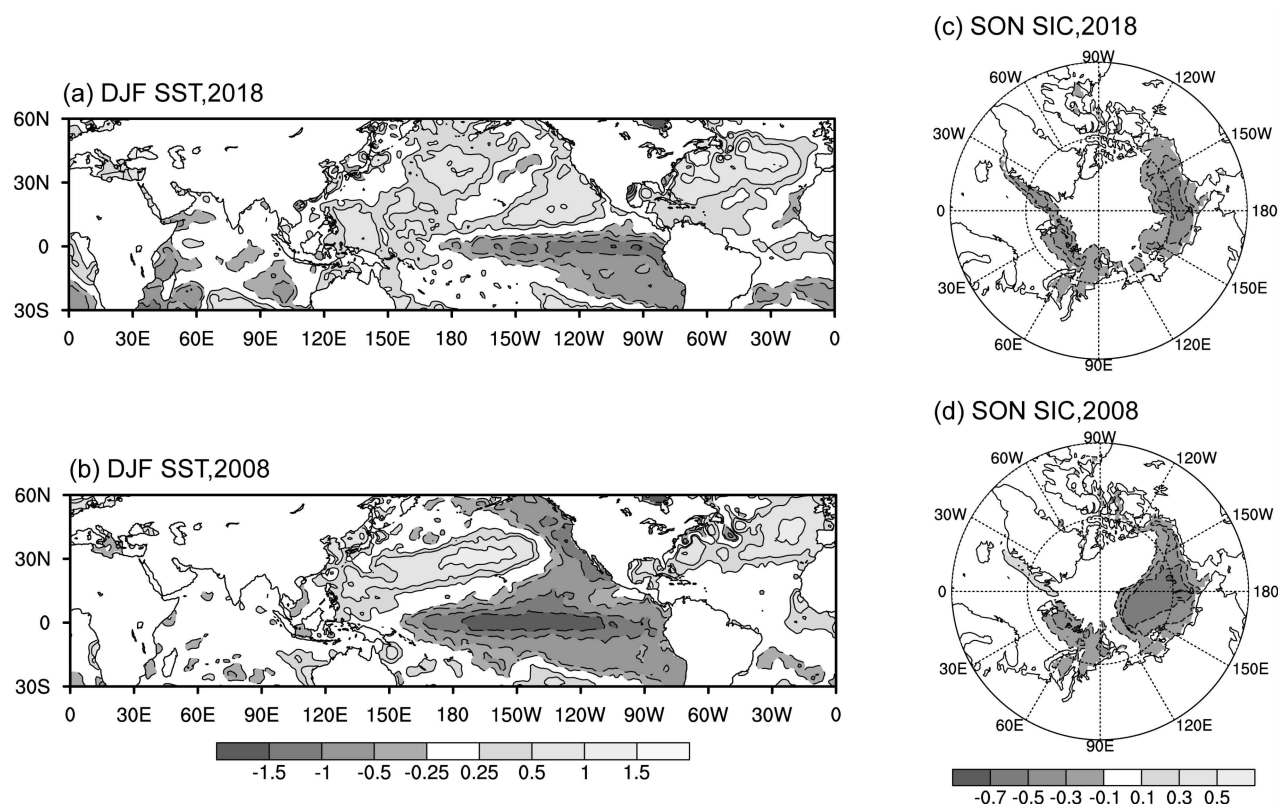


图1 (a、c) 2018 年和 (b、d) 2008 年持续冷事件发生的冬季 (前一年 12 月至当年 2 月) 平均海表温度异常 (SSTA) 及前秋 (前一年 9~11 月) 平均海冰异常的对比: (a、b) SSTA (单位: $^{\circ}\text{C}$); (c、d) 海冰密集度异常

Fig. 1 December–February sea surface temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in (a) 2017/2018 and (b) 2007/2008 winter; September–November sea ice concentration anomalies in (c) 2017 and (d) 2007

动, 增强了地面高压, 有利于东亚地区的冷空气活动的发生 (He et al., 2011; Song and Wu, 2020)。除了大气内部动力过程, 海洋和海冰等下垫面也可以通过影响大气环流来影响中国气温。以往的研究认为, La Niña 事件发生时伴随偏强的东亚冬季风, 有利于东亚地区冬季偏冷; 反之, El Niño 事件有利于冬季偏暖 (Li, 1990; Zhang et al., 1996; 陶诗言和张庆云, 1998; Chen et al., 2000; Lau and Nath, 2006; 何溪澄等, 2008)。Wang et al. (2000) 指出, ENSO 冷暖位相通过激发西北大西洋的异常气旋或反气旋影响东亚冬季风的强弱。研究指出, 强 La Niña 事件是导致 “0801” 事件中冰冻雨雪灾害的原因之一 (付建建等, 2008; Wen et al., 2009)。秋冬季北极海冰异常偏少对近年来冬季欧亚大陆频发的冷事件也有重要的贡献 (Petoukhov and Semenov, 2010; Tang et al., 2013; Cohen et al., 2014; Mori et al., 2014; Gao et al., 2015)。北极海冰减少, 一方面可以使北极和低纬之间经向温度梯度减弱, 中高纬西风减弱, 极地冷空气南下引起欧亚降温; 另一方面,

通过改变局地海气相互作用引起大气环流异常, 并通过欧亚大陆中高纬度 Rossby 波的传播影响东亚气温 (武炳义等, 1999; Honda et al., 2009; Overland and Wang, 2010; Francis and Vavrus, 2012; Wu et al., 2013)。

本文从中高纬环流异常和热带季节内振荡活动两个方面, 对 2018 年的持续低温事件的大气环流特征进行了分析, 并与 “0801” 事件进行对比, 以解释为何这次过程中的气温和降水呈现出与后者不一样的特征, 并对海温、海冰在这次过程中的作用进行了探讨。

2 资料和方法

所使用的资料包括: (1) 中国气象局国家气象信息中心整编的中国地面气候资料日值数据集, 包含了 1951 年 1 月以来中国地区气象站的逐日平均气温, 来自中国气象数据网; (2) 美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再

分析资料 (Kalnay et al., 1996), 包括逐日气温、位势高度场、海平面气压场以及风场, 网格分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度); (3) 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 气候预测中心 (CPC) 提供的全球逐日降水数据集 (CPC GLOBAL PRCP V1.0) (Xie et al., 2007), 网格分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度); (4) NOAA 提供的逐日向长波辐射数据 (Liebmann and Smith, 1996), 网格分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。气候态选取为 1981~2010 共 30 年的平均。

由于站点资料在不同的年份存在缺省, 为了保持数据的一致性, 本文筛选出 1979~2018 年共 39 个冬季具有连续记录的 601 个站点来反映中国地区的气温变化, 站点的分布如图 2a 所示。文中西伯利亚高压指数定义为 ($40^\circ\text{N}\sim 60^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$) 区域平均的海平面气压。此外, 为了认识 Rossby 活动对中高纬环流系统的影响, 计算了波活动通量,

具体参考 Takaya and Nakamura (2001)。

3 过程概况

3.1 过程确定

图 2b 给出了 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 2 月 28 日我国平均逐日气温演变。不难看到, 2017/2018 年冬季表现为前冬偏暖, 但自 1 月下旬开始, 转为冷异常, 并持续到 2 月中旬左右。如果把平均气温异常为负, 且持续 15 d 以上定义为发生一次持续低温事件, 把平均气温转正 (负) 异常定义为事件结束 (开始), 则 2018 年发生了一次自 1 月 23 日开始、并持续至 2 月 13 日, 累计持续了 22 d 的低温事件。相比之下, 与 2007/2008 年冬季有类似之处。2007 年 12 月偏暖, 但自 2008 年元月 13 日开始, 发生冷异常, 并持续至 2 月 20 日, 累计持续了 39 d。即 2018 年的事件持续时间短于

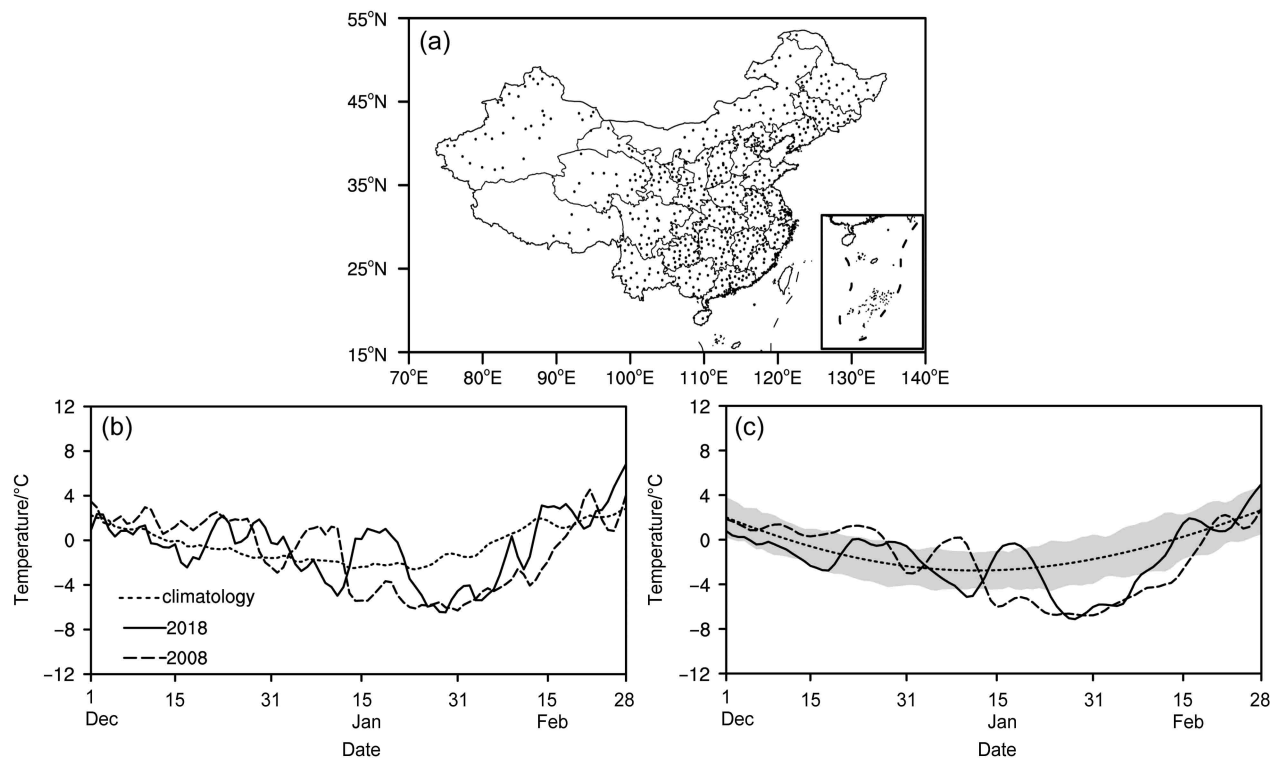


图 2 (a) 全国 601 个观测站点分布; (b) 2017/2018 年 (实线) 和 2007/2008 年 (虚线) 冬季全国平均逐日气温演变, 点线为 1981~2010 年气候态; (c) 同 (b), 但对 2017/2018 及 2007/2008 年冬季全国平均逐日气温进行了 7 d 滑动平均以去除天气尺度分量, 并对气候态取了前 4 个谐波之和, 阴影为 1979~2018 年共 39 个冬季正负 0.8 个标准差所涵盖的范围

Fig. 2 (a) Distribution of 601 observation stations over China (black dots); evolution of the daily mean temperature index during (b) 2017/2018 winter (solid line), 2007/2008 winter (dashed line), and climatological daily temperatures for 1981–2010 (dotted line); (c) evolution of the daily mean temperature index with temperature smoothed as a seven-day running mean for 2017/2018 (solid line) and 2007/2008 (dashed line) winter, and climatology (dotted line) is derived from the first four harmonics by fast Fourier transform, the shading denoted the scope of 0.8 and -0.8 standard deviation of daily temperature in the 1979–2018 period

“0801”。计算过程期间日平均气温和日最低气温距平均值, 2018 年事件为 -3.1 和 -5.2°C , 而“0801”为 -3.4 和 -5.5°C , 说明 2018 年事件的冷异常程度不如 2008 年。

进一步地, 考虑到过去几十年全球快速变暖, 这种快速变暖信号在不同年份中对持续异常过程的影响和贡献是不一样的, 我们采取去掉线性趋势的办法去掉变暖信号的影响, 把区域气温异常低于 -0.8 个标准差作为冷异常的标准, 得到 2018 年发生了自 1 月 24 日至 2 月 8 日持续 16 d 的持续低温过程。它在 1979 年以来排第二位, 次于“0801”。“0801”开始于 1 月 14 日, 结束于 2 月 16 日, 累计持续 33 d (图 2c)。

3.2 气温与降水

图 3a、3b 显示了 2018 年持续低温期间平均的气温和降水距平分布。我国除青藏高原以外的大范围区域, 都为显著的冷异常, 最大冷异常中心位于

新疆及内蒙与蒙古共和国交界的地区, 比常年偏低 6°C 以上。青藏高原地区异常增暖, 最大暖中心比常年偏暖 4°C 以上。相比“0801” (对比图 3c、3d), 2018 年冷异常相对弱一些。“0801”事件中 -6°C 以下最大冷异常从北到南贯穿内蒙到华南的中部广大地区, 然而, 2018 年青藏高原地区的暖异常却明显比“0801”强。此外, 在东北地区, 二者也存在明显差异。2018 低温事件期间东北地区为 -4°C 以下的冷异常, 但“0801”冷异常不明显, 这种对比在外兴安岭地区更为清楚。

从降水来看 (图 3b), 2018 年持续低温期间在长江中下游及江淮明显偏多, 且主要由持续性暴雪引起的 (刘超等, 2018)。在江南南部和华南, 降水偏少。这与“0801”差异比较大 (对比图 3c、3d)。“0801”在西南及长江上游、华南大部以及长江下游明显偏多, 降水主要来自持续性暴雪、冻雨。这也是“0801”过程对交通运输、输电线路造

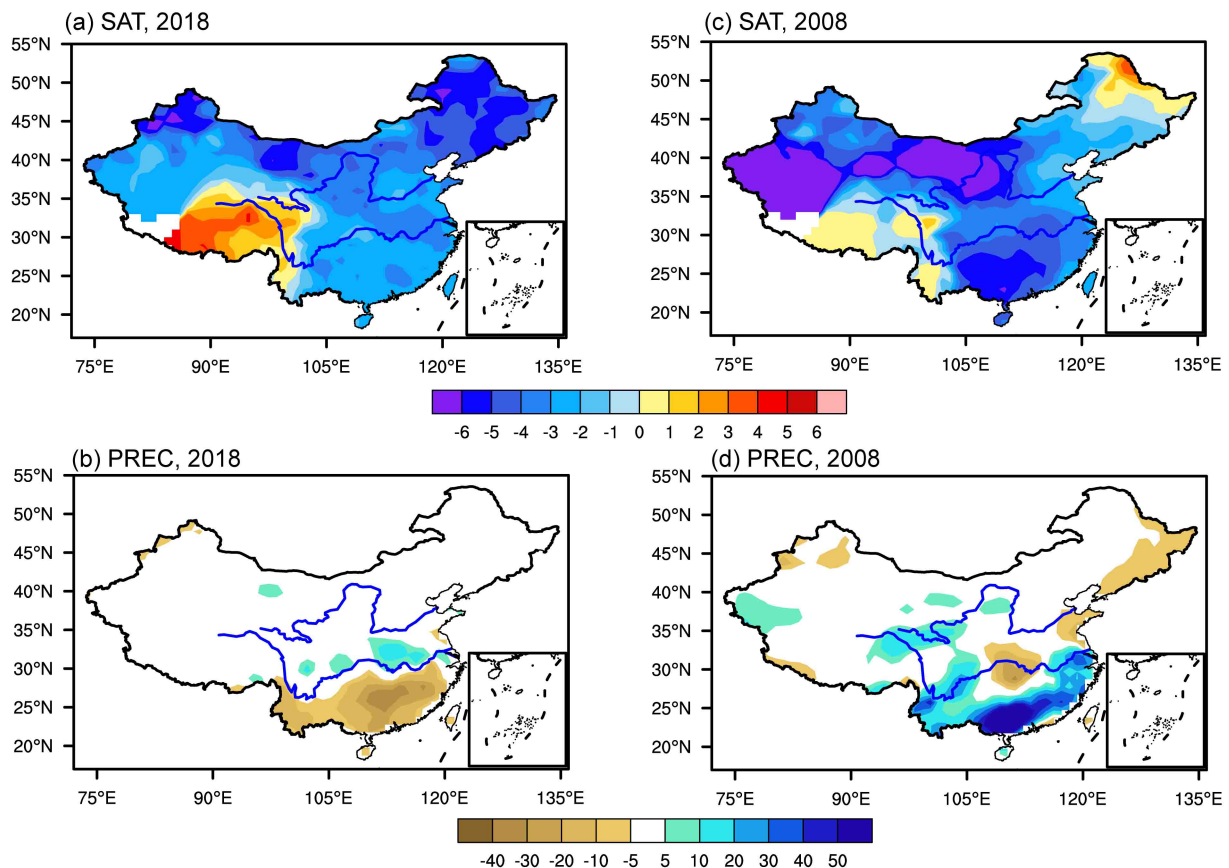


图 3 (a、b) 2018 年 1 月 23 日至 2 月 13 日、(c、d) 2008 年 1 月 13 日至 2 月 20 日持续低温期间 (a、c) 地面日平均气温距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (b、d) 日降水量距平 (单位: mm)

Fig. 3 (a, c) Mean of daily surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) and (b, d) daily precipitation anomalies (mm) averaged (a, b) from 23 January to 13 February 2018 and (b, d) from 13 January to 20 February 2008

成重大损害的一个主要因素。

4 中高纬环流异常和冷空气

中国冬季冷空气活动与东亚冬季风活动异常密切相关。亚洲副热带高空西风急流、欧亚中高纬阻塞高压、东亚大槽、西伯利亚高压是东亚冬季风系统的最主要成员，分别反映了东亚冬季风系统在对流层上层、中层和地面的活动情况。

图4中给出了2018年低温时期平均的200 hPa纬向风、500 hPa位势高度和海平面气压场异常及其与“0801”的对比。在气候平均上，大于40 m/s的西风从北非向中东和东亚伸展，分别在中东和东亚上空存在两个明显的中心（急流核）。但在2018年过程期间，中东急流中心减弱，东亚急流

中心明显增强并北抬（图4a）。这一变化与过程期间东亚冷空气活跃、副热带锋区增强是一致的。相比之下，“0801”期间，不仅东亚的急流增强北抬，中东急流也显著增强北抬（图4b）。东亚急流的增强与2018年过程有一样的成因，而中东急流的增强也反映了该地区锋区的活动。按照Wen et al. (2009)，中东急流的增强有利于来自西亚的水汽输送以及青藏高原南侧的负位势高度的维持，如图4d中所示。

在500 hPa位势高度场上（图4c），从北大西洋到东亚包括欧亚大陆，为明显的“+”“-”“+”“-”波列状异常分布。其中，从斯堪的纳维亚半岛以东至贝加尔湖西北的欧亚大陆，是中心位于乌拉尔山附近的正距平，对应着乌拉尔山阻塞高压的异常活跃。在贝加尔湖东南至日本，为负异常，对

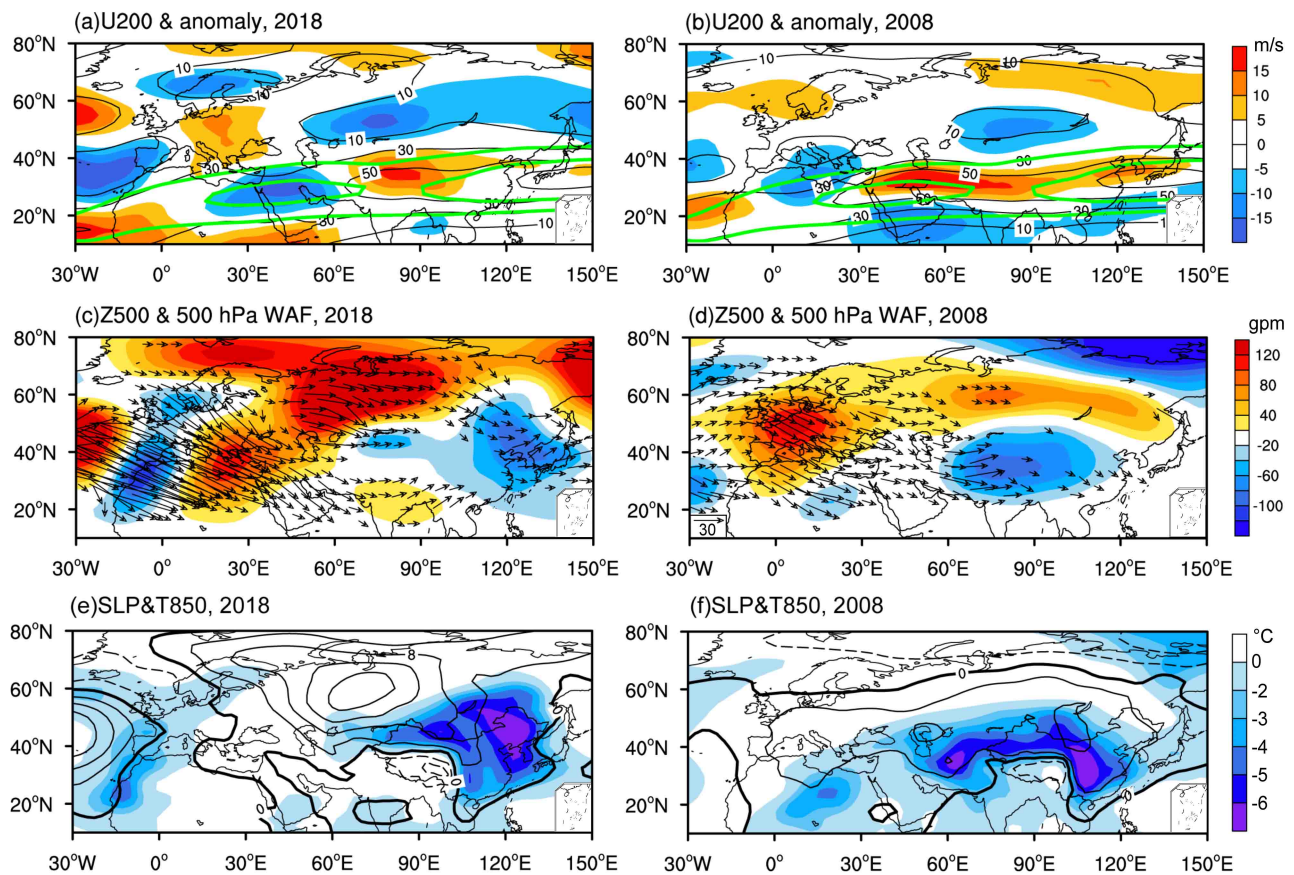


图4 2018年1月23日至2月13日（左列）、2008年1月13日至2月20日（右列）持续低温期间（a、b）200 hPa纬向风（等值线，单位：m/s；绿色等值线对应同期1981~2010年气候平均）及其异常（阴影，单位：m/s）、（c、d）500 hPa位势高度场距平（阴影，单位：gpm）和波作用通量（矢量，单位： m^2/s^2 ）、（e、f）海平面气压距平（等值线，单位：hPa）和850 hPa温度场距平（阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）

Fig. 4 (a, b) Zonal wind (contour, units: m/s; the green contours denotes the 1981–2010 climatological mean) and its anomalies (shaded, units: m/s) at 200 hPa, (c, d) geopotential height anomalies (shaded, units: gpm) and the horizontal wave flux (vector, units: m^2/s^2) at 500 hPa, and (e, f) sea level pressure anomalies (contour, units: hPa) and air temperature anomalies (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$) averaged from 23 January to 13 February 2018 (left column) and from 13 January to 20 February 2008 (right column)

应了东亚大槽的加深。这种大范围的波列状异常分布可能对应着两支波列的活动,这在波活动通量上可以清楚地看到。第一支大致沿着高纬 60°N 左右传播,从东北大西洋,经乌拉尔地区,向东亚传播。这说明东亚地区的负高度异常可能与上游大西洋有关。另一支波列大致位于副热带,起源于中纬度北大西洋中部,经西北非洲和西欧大西洋沿岸,向地中海和中东传播。

相比之下,“0801”欧亚高纬度从西欧、乌拉尔山、贝加尔湖以北地区向东伸向东北亚为一狭长正距平区,最大异常中心分别位于西欧和乌拉尔山附近,反映了欧洲阻塞和乌拉尔阻塞高压的维持(图 4d)。在里海以东至青藏高原为负距平,表明低压槽频繁(特别是南支槽)。在波活动通量上,2008 年基本上为一支波列,而且呈准纬向传播,从大西洋东岸和地中海及欧洲大部,向印度次大陆传播(图 4d 中)。这种波列增强的纬向特征与高空急流的增强(图 4b)是一致的,它有利于青藏高原上空负异常中心的维持。布和朝鲁等(2008)也得到类似的结果。这种对流层中层的异常差异在海平面气压场也有反映(图 4e、4f),2018 年低温过程期间乌拉尔地区及以东,有显著的 SLP 正异常中心,反映了增强的西伯利亚高压。相比之下,

“0801”的 SLP 正异常更为纬向,与 SAT 上强负 SAT 中心更为纬向,以及亚洲西风急流的两个急流核整体增强北移(图 4b)一致。

为了理解低温事件的形成过程,图 5 给出了过程开始前第 12 天到发生时第 3 天的 500 hPa 位势高度场演变及其与“0801”的对比。2018 年事件发生前 12 天,斯堪的纳维亚半岛上空存在一个较大范围的正位势高度异常中心(图 5a),至前 9 天时这个正异常中心发生了东移,并且上下游的波列状结构开始变得清晰,下游的负异常中心开始加强,说明能量开始沿着异常中心向下游频散(图 5b)。至前 6 天时从副热带北大西洋,经欧洲、乌拉尔山、西伯利亚平原至东亚沿岸有一个“+”“-”“+”“-”“+”的波列(图 5c)。随后的 3 天,波列一边发展一边缓慢东移,乌拉尔山地区的正异常中心和东亚地区的负异常中心得到上游能量的补充得以维持,东亚地区的阻塞形势得以形成,有利于冷空气从高纬向东亚地区的输送。低温事件发生当天(图 5e),乌拉尔山上游的能量频散变弱,乌拉尔山地区的高压脊开始变成东北—西南走向,巴尔喀什湖的负异常中心也逐渐开始加深,从巴尔喀什湖至贝加尔湖以南的负异常在位势高度场上对应着横槽的形成,预示着两个地区有冷空气的堆积,冷

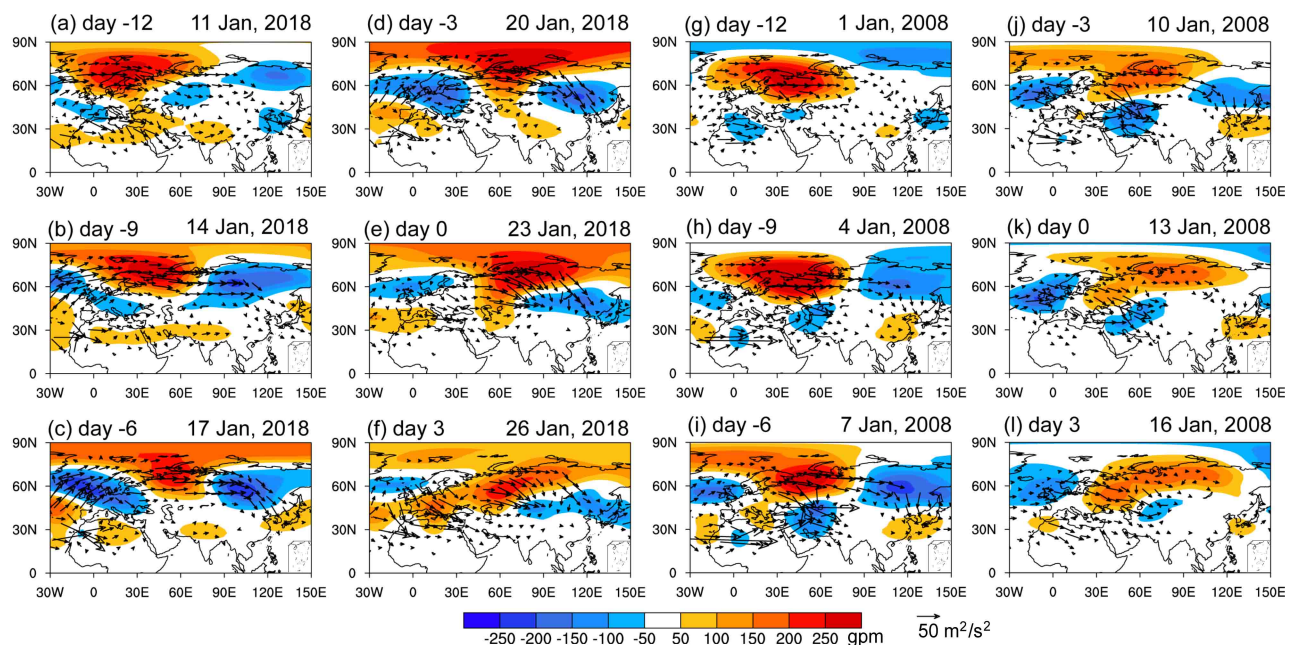


图 5 (a–f) 2018 年、(g–l) 2008 年持续低温发生前第 12 日至发生后第 3 日每隔 3 日 500 hPa 位势高度场距平(填色,单位: gpm)和波作用通量的演变(矢量,单位: m^2/s^2)。2018 年 1 月 23 日低温开始日为第 0 日,2008 年 1 月 13 日低温开始日为第 0 日

Fig. 5 Geopotential height anomalies at 500 hPa (shaded, units: gpm) and horizontal wave flux (vector, units: m^2/s^2) during -12th to +3rd day, relative to the cold event occurrence on (a–f) 23 January 2018 (day 0) and (g–l) 13 January 2008 (day 0)

空气将要南下影响我国。事件发生的第3天(图5f),可以看到乌拉尔山地区的高压异常减弱,代表阻塞发生崩溃,冷空气影响我国。结合海平面气压场以及850 hPa温度场的演变来看(图6),事件前12天,斯堪的纳维亚半岛是与对流层中层一致的气压正异常(图6a)。随后,欧洲的高压中心减弱,高压的主体逐渐向高纬度欧亚大陆北部边缘及西伯利亚地区扩展。至事件前3天时(图6d),高压中心东移至西伯利亚地区,对应西伯利亚高压的增强,同时西伯利亚地区的冷中心加强。这与500 hPa波列的东移和乌拉尔山地区的阻塞的增强是一致的(图5d)。事件发生当日(图6e),西伯利亚高压南压,冷空气沿着高压东南侧侵入我国东北华北地区。第3天(图6f),西伯利亚高压进一步南亚并向西侧伸展,中心强度减弱。冷空气进一步深入我国长江以南地区。

对比2008年的事件,事件发生前12天500 hPa同样可以发现在斯堪的纳维亚半岛上空的大范围的正异常中心,中心较2018年偏南(图5g)。海平面气压场表现为与对流层中层一致的正异常中心(图6g)。至前9天时(图5h),正异常中心略东移,随着能量频散,下游的负异常中心加强。至前6天时(图5i),从北大西洋中纬度经欧洲东北部、西伯利亚至东亚可见一个“-”“+”“-”“+”

的波列,与2018年事件类似。不同的是,除了向波列下游负中心的能量频散,里海地区也是能量频散的关键地区,上游能量的频散使里海维持着一个负异常中心,与此一致地,低层里海一带维持着异常的高压和很强的冷中心(图6i)。同时,贝加尔湖东南部的负异常中心在事件发生日之前开始减弱(图5j、5k),低层高压中心断裂为两个中心,分别位于里海和西伯利亚地区,里海地区和贝加尔湖地区的冷中心的强度都达到 -12.5°C (图6k)。

由此可见,事件发生前期,相同的特征是发生前12天在500 hPa斯堪的纳维亚半岛上空有正的位势高度异常,之后随着波列发展东移,乌拉尔山地区的正异常中心加强,伴随着低层的西伯利亚高压的发展和贝加尔湖地区冷空气的堆积。但不同的是,2018年的事件中乌拉尔山地区向下游频散的能量主要集中在贝加尔湖东侧,有利于我国东北地区上空的负位势高度异常的形成,从而形成了环流场上“西高东低”的高度异常。而2008年,里海地区的负位势高度异常中心非常强,和高纬度的阻塞异常形成了“北高南低”的环流异常。正是这两种环流场配置的差异造成了两次事件中不同的冷空气路径。2018年事件中,最大冷异常中心位于我国东北,冷空气从偏东路径影响我国。而在2008年事件中,东北冷异常偏弱,最大冷异常从里海以

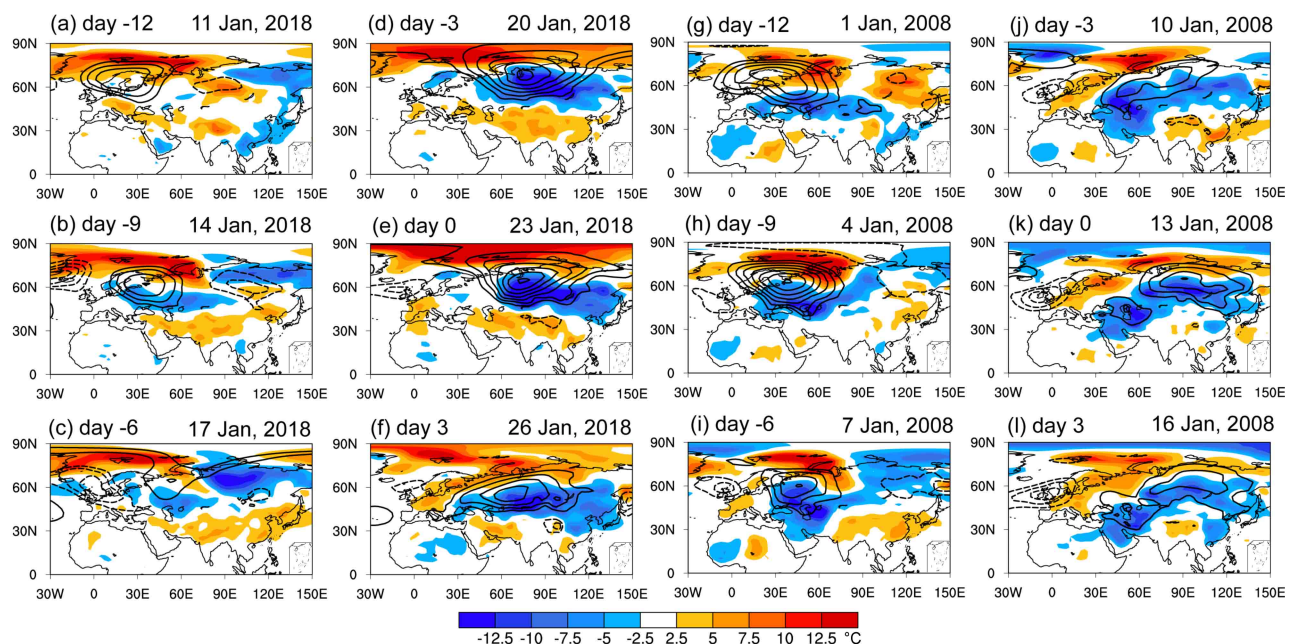


图6 同图5, 但为海平面气压(等值线, 单位: hPa, 等值线每隔5 hPa)和850 hPa温度场(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for sea level pressure anomalies (contour, units: hPa, intervals: 5 hPa) and 850-hPa temperature anomalies (shaded, units: $^{\circ}\text{C}$)

东沿着青藏高原北部边缘深入我国南方地区, 冷空气路径偏西 (图 4e 和 4f)。

与“0801”事件相比, 2018 年的低温事件不仅冷空气路径有差异, 冷异常持续时长也偏短。对比两次事件中西伯利亚高压指数的演变 (图 7a 和 7d), 可以发现在事件期间, 西伯利亚高压一直是异常偏强的。两个冬季西伯利亚高压和气温表现出很好的反相关关系, 并且在超前气温 2 天时和气温的相关关系最大, 2018 年和 2008 年两者的相关关系分别达到 -0.77 和 -0.74 。根据以往的研究, 西伯利亚高压是中上层大气质量堆积和辐射冷却的共同结果, 其向南推进引起冷空气爆发、导致低温事件的发生。当冬季西伯利亚高压偏强时, 东亚冬季风偏强, 高压东侧的偏北风将冷空气输送至我国东部,

使得气温偏低 (Ding and Krishnamurti, 1987; Ding, 1990; Wu and Wang, 2002)。与 2008 年相比, 2018 年西伯利亚高压的偏强持续时间偏短, 这与 2018 年持续较短的低温事件一致。西伯利亚高压的持续对冷空气的维持有重要作用, 对中国东部 $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 地区低层的温度场和经向风做平均, 得到它们的演变如图 7b–7c 和 7e–7f。可以看到, 与西伯利亚高压的增强对应的是低层是较大范围的北风异常和冷空气向南爆发。在 2018 年事件中, 冷异常和北风到达 30°N 后再次得到加强, 继续南推。而值得注意的是, 在此之前, 我国 30°N 以南存在一个较强的南风异常中心 (图 7b)。南风带来的暖湿气流和南下的冷空气在此交汇, 不仅阻止了冷空气快速南下, 使得冷空气可以较长的维持在

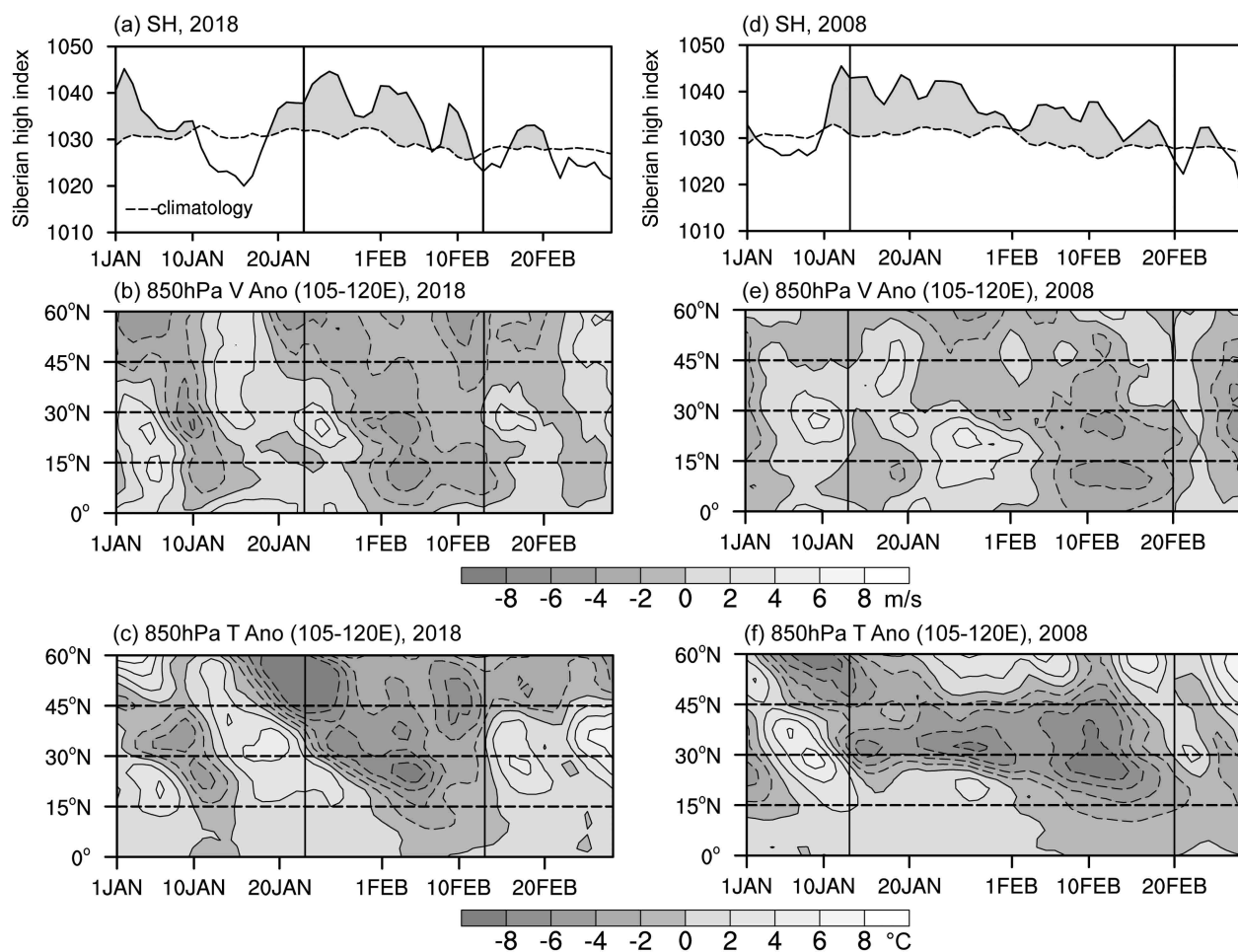


图 7 (a) 2018 年和 (d) 2008 年 1~2 月西伯利亚高压指数的逐日演变 (虚线为 1980~2010 年气候平均, 灰色阴影表示偏强的时间段); (b、c) 2018 年和 (e、f) 2008 年 1~2 月 $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa (b、e) 经向风距平 (c、f) 温度距平的纬度—时间剖面

Fig. 7 (a) Daily evolution of the Siberian High (SH) index during January and February in (a) 2018 and (d) 2008 (the dashed line shows the climatology for SH, and the gray shading indicates values above the climatology of 1980–2010). The latitude–time cross section of (b, e) meridional wind anomalies and (c, f) temperature anomalies at 850 hPa averaged between 105°E and 120°E during January and February in (b, c) 2018 and (e, f) 2008

南方地区,同时也有利于此地的降水产生,这与降水场上长江中下游地区的增强的降水是一致的(图 3b)。对比“0801”事件,冷空气在 30°N 附近维持了较长的时间,与事件期间维持时间更长的南风异常是一致的(图 7e 和 7f)。

5 热带环流系统和暖湿气流

从以上的分析可见,中高纬环流系统的发展演变对冷空气的爆发和维持有重要的作用。要造成持续的低温雨雪灾害,除了来自中高纬度地区的冷空气活动外,还需要来自南方的暖湿气流,冷空气与暖湿气流的交汇才能产生雨雪。

从逐日的降水场演变上可以得到,2018 年低温过程期间降水主要发生在长江中下游地区,降水结束阶段降水移至我国华南地区(图略)。对我国南方地区(20°N~30°N, 105°E~120°E)的降水取平均可以得到降水序列演变如图 8a 所示。低温期间,我国南方降水偏多的时期发生在 1 月 24~28 日。同样地,2008 年降水主要由长江中下游向华南地区移动,且华南降水更多。南方地区平均的

降水偏多时期有两个阶段,分别为 1 月 18~20 日和 1 月 25 日至 2 月 1 日(图 8c)。对两次事件中降水异常演变进行比较,可以发现“0801”事件中降水明显偏强。图 8b 和 8d 显示了我国东部地区(105°E~120°E 平均)低层 850 hPa 的风场及其辐散场的演变。可以发现,在降水偏多的时期,我国东部 20°N~30°N 低层有异常的风场辐合,低层的风场辐合有利于降水的发生,而其他时期低空以辐散为主。同样,2008 年降水异常偏多的时期,我国东部 20°N~30°N 低层有异常的风场辐合。

进一步地,对降水偏多时期平均的整层水汽通量显示(图 9a),2018 年影响我国的水汽主要来源于南海和西太平洋的异常水汽通量输送,异常水汽输送一直到达长江以北,长江中下游和华南有水汽通量辐合。这与逐日降水场上,长江中下游偏多的降水一致。图 9b 显示,异常的水汽输送和 850 hPa 我国南方的偏南风有关。2018 年降水异常偏多时期,华南沿海至长江沿岸为一致的偏南风(图 9b)。2008 年有两支较强的水汽来源,分别来自印度洋孟加拉湾和太平洋,并在我国南方形成很强的水汽辐合(图 9c)。850 hPa 风场上,同样有两支偏南

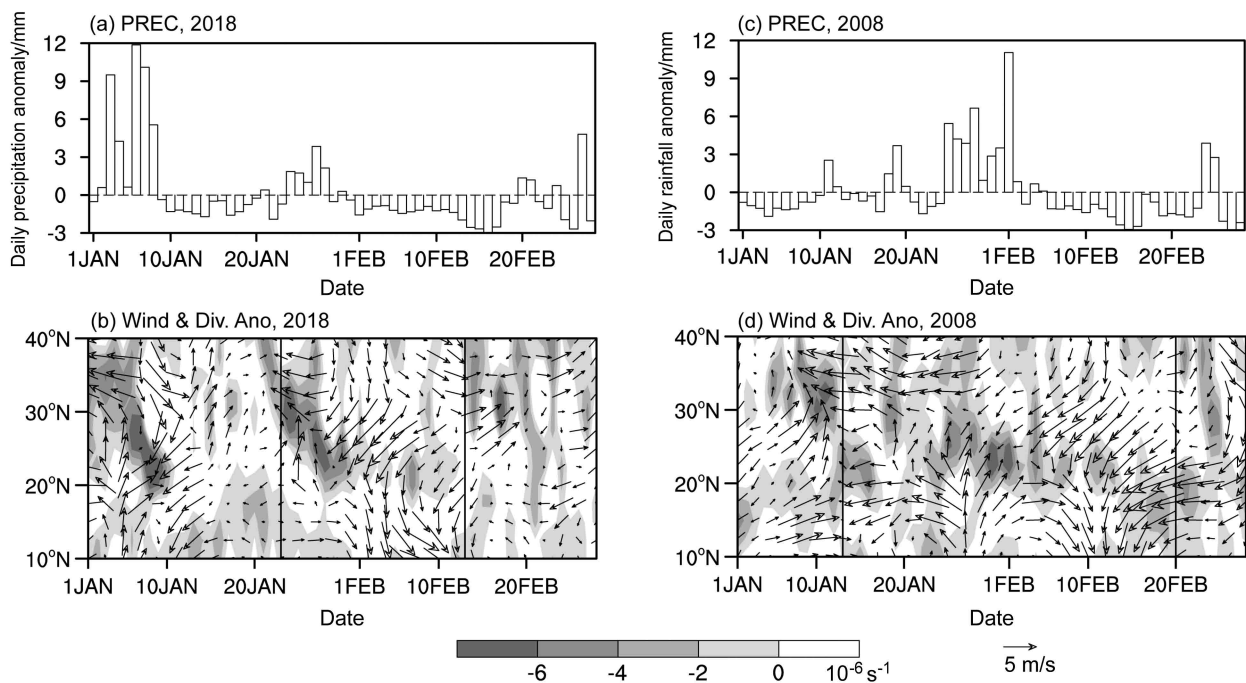


图 8 (a) 2018 年和 (c) 2008 年 1~2 月我国南方地区 (20°N~30°N, 105°E~120°E) 平均降水量距平日演变; (b) 2018 年和 (d) 2008 年 1~2 月 105°E~120°E 平均的 850 hPa 风场 (矢量, 单位: m/s) 及其辐合区 (阴影, 单位: $10^{-6} s^{-1}$) 的纬度—时间剖面

Fig. 8 Time series of the daily rainfall anomalies averaged over South China (20°N–30°N, 105°E–120°E) during January and February in (a) 2018 and (c) 2008. The latitude–time cross section of wind anomalies (vector, units: m/s) and its convergence anomalies (shaded, units: $10^{-6} s^{-1}$) at 850 hPa averaged from 105°E to 120°E in (b) 2018 and (d) 2008

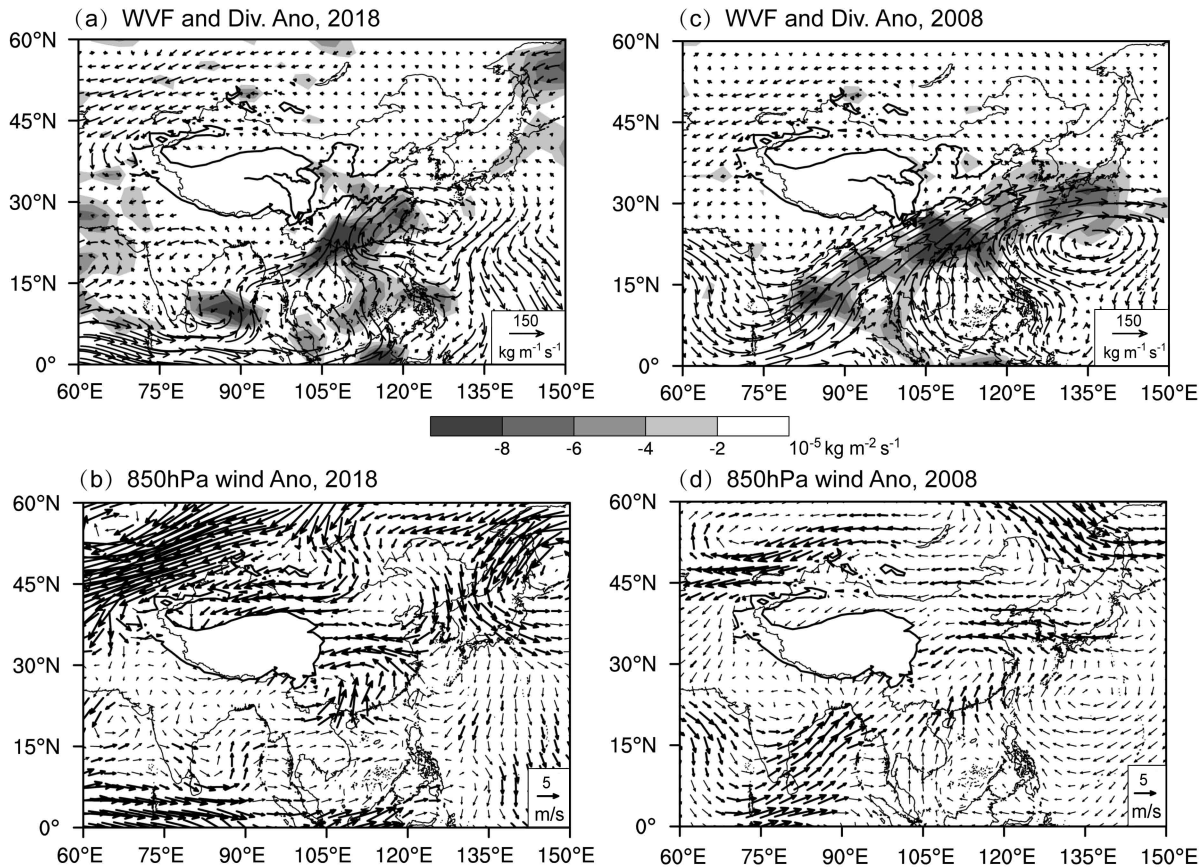


图9 (a、b) 2018 年 1 月 24~28 日降水期平均和 (c、d) 2008 年 1 月 18 日至 20 日以及 1 月 25 日至 2 月 1 日两次降水期平均的 (a、c) 1000~300 hPa 垂直积分的水汽通量异常 (矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及其异常辐合区 (填色, 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 和 (b、d) 850 hPa 风场异常 (矢量, 单位: m/s)。图中黑色地形线表示 2500 m 地形高度等值线

Fig. 9 (a, c) Vertically averaged water vapor flux (surface to 300 hPa, vector, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) with its divergence (shaded, units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and (b, d) wind anomalies (vector, units: m/s) at 850 hPa (a, b) averaged from 24 to 27 January 2018 and (c, d) averaged over two periods from 18 to 20 January 2008 and from 25 January to 1 February 2008. The topographic height contours of 2500 m are represented in black lines

风的气流, 分别是来自孟加拉湾南支槽前侧的异常西南风和来自太平洋副热带高压左侧的异常偏南风 (图 9d)。可见 2008 年水汽来源和偏南风更强, 且有南支槽和副热带高压的配合。相比之下, 2018 年我国南方的偏南风异常则弱得多。

副热带环流的差异可能和热带的对流活动有关。根据以往研究的结果, 当热带对流活动中心从印度洋东移至西太平洋时, 将引起南支槽和西太平洋副热带高压的异常, 进而引起水汽输送异常, 长江中下游和华南的降水从增强变成抑制 (吴俊杰等, 2009; 贾小龙和梁潇云, 2011; Jia et al., 2011)。在本文中, 取 30~60 d 滤波后的向外长波辐射表征季节内的热带对流活动。降水异常偏多时期的热带对流活动及低频 850 hPa 风场显示 (图 10), 2018 年较强的对流活动中心位于海洋性大陆和西太平洋, 对流中心位于赤道以南 (图 10a)。对流中心西侧

低层 850 hPa 的西风和东侧的东风在对流中心辐合, 对流中心的北侧台湾以东是较弱的气旋性环流, 其左侧为偏北风气流, 不利于暖湿气流的输送。而 2008 年, 增强的对流活动位于印度洋中东部, 海洋性大陆的对流活动受到抑制 (图 10b)。增强的对流活动中心北侧有气旋性环流, 减弱的对流活动中心北侧是反气旋性环流。这样的环流有利于孟加拉湾槽加深和西太平洋副热带高压的增强, 槽前的西南气流和反气旋后侧的偏南风将暖湿气流输送至我国南方。对两次事件的比较可以看出, 2018 年热带对流活动活跃在海洋性大陆, 不利于南风的增强。而 2008 年印度洋热带对流活跃, 有利于南支槽和副热带高压的增强, 增强了暖湿气流的输送。这样的差异导致了 2018 年水汽输送和降水弱于 2008 年。

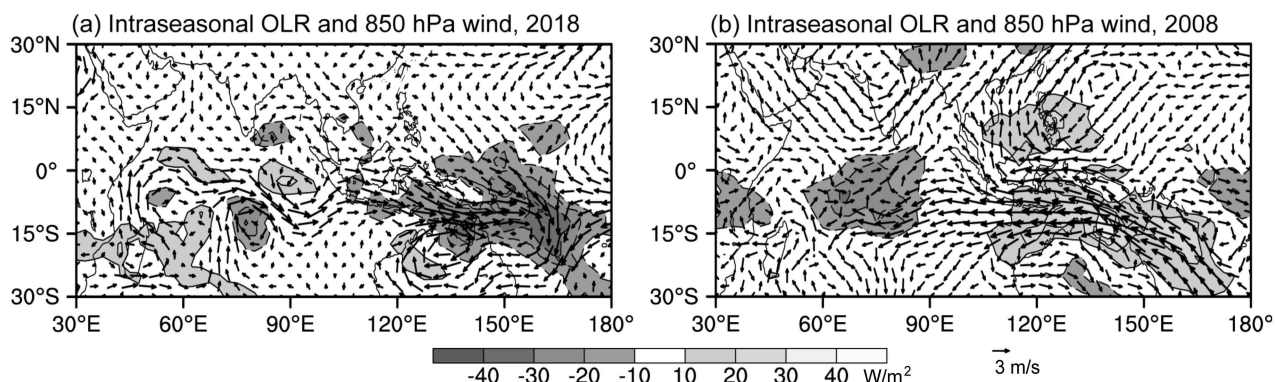


图 10 (a) 2018 年 1 月 24~28 日降水期平均和 (b) 2008 年 1 月 18 日至 20 日以及 1 月 25 日至 2 月 1 日两次降水期平均的 30~60 d 低频向外长波辐射异常 (阴影, 单位: W/m^2) 以及低频 850 hPa 风场异常 (矢量, 单位: m/s)

Fig. 10 (a) 30–60-day filtered anomalous outgoing long wave radiation (shaded, units: W/m^2) and winds at 850 hPa (a) averaged from 24 to 27 January 2018 and (b) averaged over two periods from 18 to 20 January 2008 and from 25 January to 1 February 2008

6 结论与讨论

本文分析了 2018 年冬季一次持续性低温事件的气温、降水以及大气环流的特征, 并与“0801”事件进行了比较, 得到了以下结论:

(1) 2018 年持续低温事件发生在 1 月 23 日至 2 月 13 日, 持续 22 天。气温分布上, 2018 年低温事件除青藏高原外的全国均偏冷, 最大冷中心在中国北部和东北, 而 2008 年持续低温事件开始于 1 月 13 日, 2 月 20 日结束, 持续 39 天。2008 年南方的冷异常更强。相比之下, 2018 年冷空气从偏东的路径影响我国, 持续时间较短。降水分布上, 2018 年降水主要分布在长江中下游地区。2008 年低温期间降水主要集中在我国西南部分地区、长江下游地区以及华南地区。2008 年降水更多。

(2) 2018 年环流呈“西高东低”形势, 乌拉尔山阻塞和东亚大槽异常偏强。2008 年环流呈“北高南低”形势, 乌拉尔阻塞和副热带南支槽并存, 环流偏纬向发展。

(3) 2018 年事件发生之前, 斯堪的纳维亚半岛地区从对流层中层至低层有一个正异常中心, 从北大西洋至东亚地区的波列发展有利于形成“西高东低”的环流型。事件发生期间, 增强的西伯利亚高压有利于低温的维持, 但持续时间偏短。2008 年事件发生之前同样存在一个正异常中心, 从大西洋至欧亚大陆的波列发展有利于形成“北高南低”的环流型, 西伯利亚高压异常增强的维持时间偏长。

(4) 2018 年的事件暖湿气流主要来自南海, 热带对流活动位于海洋性大陆和太平洋, 不利于南

风的增强, 水汽输送和降水较弱。2008 年有两支暖湿气流分别来自孟加拉湾和太平洋, 位于印度洋的热带对流活动有利于南支槽和副热带高压的增强, 有利于南风增强, 暖湿气流的输送较强。

两者的差异和过程可以总结为概念图 (图 11)。2018 年事件发生前 12 天, 斯堪的纳维亚半岛附近有一个正的异常中心, 从北大西洋至东亚有一“+”“-”“+”“-”“+”的波列形成, 随波列的发展, 乌拉尔山地区形成阻塞形势, 乌拉尔山阻塞和东亚大槽增强。伴随低层西伯利亚高压的增强南扩, 高纬冷空气南下从我国东北南下影响我国除青藏高原以外的区域。从南海输送来的暖湿气流和冷空气在我国长江流域交汇, 在长江中下游产生降水。2008 年的低温事件发生前期, 同样在斯堪的纳维亚半岛有正异常中心, 从北大西洋至东亚有“-”“+”“-”“+”的波列。来自正异常中心能量的频散维持着里海地区到青藏高原西侧的负异常中心, 使冷空气从偏西的路径影响我国。印度洋活跃的对流有利于南支槽和西太平洋副热带高压增强, 来自孟加拉湾和太平洋的两支偏南气流带来更多的气水汽输送和降水。

需要指出的是, 本文只是对 2018 年事件期间的气温、降水气候特征以及相关的大气环流异常进行分析, 并与“0801”事件进行对比, 但没有对造成大气环流异常的成因进行深入探讨。分析来看, 可能的原因包括: (1) 北极海冰异常。有研究显示, 前秋和早冬北极海冰的减少可能对元月份极端严寒事件的发生有贡献 (Honda et al., 2009; Tang et al., 2013), 其中一个重要过程是海冰减少导致的

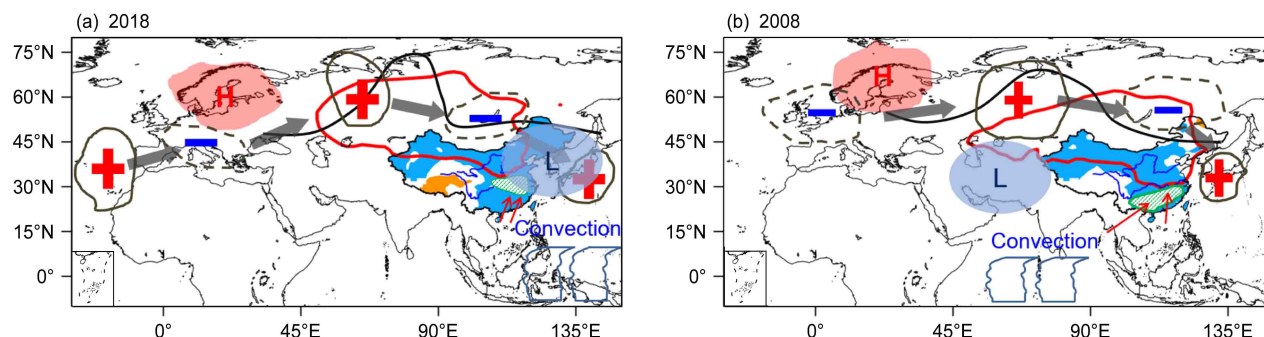


图 11 (a) 2018 年和 (b) 2008 年持续低温事件的概念图。中国地区蓝色区域是温度距平小于 -2°C 的区域, 橙色表示温度距平大于 2°C 的区域。标 H 的红色阴影是事件发生前 12 天斯堪的纳维亚半岛上空的正异常中心, “+” “-” 中心和灰色箭头表示 500 hPa 从北大西洋至东亚地区的波列。标 L 的蓝色阴影是影响低温事件主要的负位势高度中心, 黑色曲线代表阻塞高压。红色闭合曲线表示 1030 hPa 海平面气压等值线, 红色箭头代表输送至我国的南风, 绿色斜线阴影表示降水区域, 海洋上空云系代表对流中心

Fig. 11 The schematic diagram to illustrate the main features of the persistent cold event in (a) 2018 and (b) 2008 winter. The blue and orange shading indicates the region of temperature anomalies below -2°C and above 2°C in China respectively. The red shading marked with H indicates the positive geopotential height anomaly center over Scandinavia before the cold event. The gray contours and the bold-gray arrows indicate the wave train from Atlantic to East Asia. The black curve indicates the blocking pattern over the Ural mountain. The light blue shading marked with L indicates the negative anomaly center. The red curve indicates the contour of 1030-hPa sea level pressure. The thin red arrow indicates the south winds over South China, and the green shading indicates the precipitation region. The cloud structure indicates the tropical convection center

大气环流低频波信号在高空西风背景下上传, 到达平流层, 再通过平流层的反射, 下传而影响后期对流层 (Zhang et al., 2018)。从前期秋季北极海冰密集度的分布来看, 2018 年巴伦支和喀拉海以及北冰洋东部海域、格陵兰岛以东海冰均呈现不同程度的偏少, 2008 年除在巴伦支和喀拉海以及北冰洋东部海域海冰偏少外, 东西伯利亚海以及拉普捷夫海也偏少, 但格陵兰岛附近海冰密集度有所增加。Wu et al. (2011) 的研究显示, 巴伦支和喀拉海以及东西伯利亚以及拉普捷夫海冰的偏少与冬季西伯利亚高压的增强有紧密联系。2018 年秋季东西伯利亚和拉普捷夫海冰异常偏少没有 2008 年明显, 这是否对该年冬季西伯利亚高压异常持续时间偏短有作用, 尚不清楚。(2) 海表温度异常。海温通过影响大气准静止波, 再通过波—波相互作用, 导致低频波异常, 从而影响低频天气事件的发生。2018 年冬季表现为 La Niña 海温分布, 但与 2008 年相比, 虽然都是 La Niña, 但 2018 年明显偏弱, 最大冷海温异常中心偏东, 相应地西太平洋的暖海温异常偏强。2018 年西太平洋的暖海温对海洋性大陆对流活跃有影响 (Hong and Li, 2009)。(3) 北极海冰异常与海温异常的协同作用。在年际尺度上, Han et al. (2016) 通过观测分析和多模式试验, 揭示巴伦支海和喀拉海海冰减少与 La Niña 事件对欧亚中高纬冬季冷异常存在线性协同作用。这说明北

极海冰异常与热带海温异常, 可以通过上面提到的机制, 影响大尺度背景环流, 在季节内尺度上产生协同作用, 影响低频事件的发生。这两年的海气背景差异或许对两个低频事件发生时间、强度及维持发生重要影响, 但这仅限于猜测, 其中的过程尚不完全清楚。

参考文献 (References)

- Abdillah M R, Kanno Y, Iwasaki T. 2018. Tropical–extratropical interactions associated with East Asian cold air outbreaks. Part II: Intraseasonal variation [J]. *J. Climate*, 31(2): 473–490. doi:10.1175/JCLI-D-17-0147.1
- 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.
- Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi Ning. 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 (in Chinese)*, 13(4): 419–433. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.07
- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. *Atmospheric Science Letters*, 12(3): 273–280. doi:10.1002/asl.333
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17(1): 48–60. doi:10.1007/s00376-000-0042-5
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic

- amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nature Geoscience*, 7(9): 627–637. doi:10.1038/ngeo2234
- Ding Y H. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44(1): 281–292. doi:10.1007/BF01026822
- Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115(10): 2428–2449. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<2428:HBOTSH>2.0.CO;2
- Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39(6): L06801. doi:10.1029/2012GL051000
- 付建建, 李双林, 王彦明. 2008. 前期海洋热状况异常影响 2008 年 1 月雪灾形成的初步研究 [J]. *气候与环境研究*, 13(4): 478–490. Fu Jianjian, Li Shuanglin, Wang Yanmin. 2008. Influence of prior thermal state of global oceans on the formation of the disastrous snow storm in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(4): 478–490. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.12
- 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 Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in south China during January 2008: II. Possible climatic causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34(4): 101–106. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.013
- Gao H. 2009. China's snow disaster in 2008, who is the principal player? [J]. *Int. J. Climatol.*, 29(14): 2191–2196. doi:10.1002/joc.1859
- Gao Y Q, Sun J Q, Li F, et al. 2015. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(1): 92–114. doi:10.1007/s00376-014-0009-6
- Han Z, Li S L, Liu J P, et al. 2016. Linear additive impacts of Arctic sea ice reduction and La Niña on the Northern Hemisphere winter climate [J]. *J. Climate*, 29(15): 5513–5532. doi:10.1175/JCLI-D-15-0416.1
- He J H, Lin H, Wu Z W. 2011. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D3): D03109. doi:10.1029/2010JD014787
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. *大气科学*, 32(2): 335–344. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(2): 335–344. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.12
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(8): L08707. doi:10.1029/2008GL037079
- Hong C C, Li T. 2009. The extreme cold anomaly over southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO [J]. *J. Climate*, 22(13): 3786–3801. doi:10.1175/2009JCLI2864.1
- Jeong J H, Ho C H, Kim B M, et al. 2005. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 110(D11): D11104. doi:10.1029/2004JD005408
- 贾小龙, 梁潇云. 2011. 热带 MJO 对 2009 年 11 月我国东部大范围雨雪天气的可能影响 [J]. *热带气象学报*, 27(5): 639–648. Jia Xiaolong, Liang Xiaoyun. 2011. Possible impacts of the MJO on the severe ice-snow weather in November of 2009 in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27(5): 639–648. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.05.004
- Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(3): 521–533. doi:10.1007/s00376-010-9118-z
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Lau N C, Nath M J. 2006. ENSO modulation of the interannual and intraseasonal variability of the East Asian monsoon—A model study [J]. *J. Climate*, 19(18): 4508–4530. doi:10.1175/JCLI3878.1
- Li C Y. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 7(1): 36–46. doi:10.1007/BF02919166
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13(2): 113–122. Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(2): 113–122. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.01
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(6): 1275–1277
- 刘超, 江琪, 桂海林. 2018. 2018 年 1 月大气环流和天气分析 [J]. *气象*, 44(4): 590–596. Liu Chao, Jiang Qi, Gui Hailin. 2018. Analysis of the January 2018 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(4): 590–596. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.013
- Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades [J]. *Nature Geoscience*, 7(12): 869–873. doi:10.1038/ngeo2277
- Overland J E, Wang M Y. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. *Tellus A*, 62(1): 1–9. doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x
- Petoukhov V, Semenov V A. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *J. Geophys. Res.*, 115(D21): D21111. doi:10.1029/2009JD013568
- Song L, Wu R G. 2020. Distinct Eurasian climate anomalies associated with strong and weak MJO events [J]. *Int. J. Climatol.*, . doi:10.1002/joc.6630
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(6): 608–627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- Takaya K, Nakamura H. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(12):

- 4423–4440. doi:10.1175/JAS3629.1
- Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. *Environmental Research Letters*, 8(1): 014036. doi:10.1088/1748-9326/8/1/014036
- 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. Research on East Asian cold surges in China on recent decade [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 30(3): 226–230. doi:10.11676/qxb1959.031
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬季季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22(4): 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 22(4): 399–407. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02
- Wang L, Chen W. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(4): 430–436. doi:10.1007/s11434-013-0029-0
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- 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 Donghai, Li 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 Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66(3): 405–422. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.03.011
- 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估 [J]. *气象*, 34(4): 95–100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: I. Climatic features and its impact [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34(4): 95–100. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.04.012
- 王允, 张庆云, 彭京备. 2008. 东亚冬季环流季节内振荡与 2008 年初南方大雪关系 [J]. *气候与环境研究*, 13(4): 459–467. Wang Yun, Zhang Qingyun, Peng Jingbei. 2008. Relationship between the intraseasonal oscillation of East Asian monsoon circulation and the heavy snow over southern China in boreal winter of 2007/2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(4): 459–467. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.10
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate [J]. *Int. J. Climatol.*, 30(1): 153–158. doi:10.1002/joc.1876
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(3): 1111–1131. doi:10.1175/2008MWR2638.1
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(19): 3-1–3-4. doi:10.1029/2002GL015373
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. *大气科学*, 23(3): 267–275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in the winter on the winter monsoon over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23(3): 267–275. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.03.02
- 吴俊杰, 袁卓建, 钱钰坤, 等. 2009. 热带季节内振荡对 2008 年初南方持续性冰冻雨雪天气的影响 [J]. *热带气象学报*, 25(S1): 103–111. Wu Junjie, Yuan Zhuojian, Qian Yukun, et al. 2009. The role of intraseasonal oscillation in the southern China snowstorms during January 2008 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25(S1): 103–111. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.Z1.012
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian high [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(30): 3220–3228. doi:10.1007/s11434-011-4696-4
- Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, et al. 2013. Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(11): 3786–3800. doi:10.1175/MWR-D-13-00046.1
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8(3): 607–626. doi:10.1175/JHM583.1
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon [J]. *Meteorological Society of Japan*, 74(1): 49–62. doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49
- Zhang P F, Wu Y T, Smith K L. 2018. Prolonged effect of the stratospheric pathway in linking Barents-Kara Sea sea ice variability to the midlatitude circulation in a simplified model [J]. *Climate Dyn.*, 50(1–2): 527–539. doi:10.1007/s00382-017-3624-y
- Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(11): 3978–3991. doi:10.1175/2009MWR2952.1