

兰晓青, 陈文. 2013. 2011~2012 年冬季欧亚大陆低温严寒事件与平流层北极涛动异常下传的影响 [J]. 大气科学, 37 (4): 863–872, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12061. Lan Xiaoqing, Chen Wen. 2013. Strong cold weather event over Eurasia during the winter of 2011/2012 and a downward Arctic Oscillation signal from the stratosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 863–872.

2011~2012 年冬季欧亚大陆低温严寒事件与平流层 北极涛动异常下传的影响

兰晓青^{1,2} 陈文¹

¹ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用 NCEP-NCAR 再分析资料分析了 2011~2012 年冬季发生在欧亚大陆的一次异常低温严寒事件的大气环流演变过程以及可能的成因。这次低温事件, 主要出现在 2012 年 1 月下旬至 2 月上旬, 持续大约 3 周左右, 非常强的低温异常覆盖了几乎整个欧洲以及东亚的西伯利亚、蒙古国和我国东北、华北等地。这次低温事件的演变与对流层北极涛动(AO)由正位相转变为负位相的时间相匹配, 意味着 AO 可能发挥重要作用。进一步分析表明, 前期行星波的异常上传导致平流层发生爆发性增温现象, 极夜急流减弱, AO 位相首先在平流层由正变负; 在 2~3 周左右的时间内, 平流层 AO 异常信号逐渐下传, 使得对流层 AO 也转为负位相; 随后, 乌拉尔山阻塞高压异常发展, 极区的冷空气不断向南爆发, 先后在东亚和欧洲造成剧烈的降温, 导致低温严寒事件。因此, 考虑平流层环流的异常可能有助于提高欧亚大陆冬季低温严寒事件的预测能力。

关键词 冬季低温严寒事件 北极涛动 平流层环流 行星波

文章编号 1006-9895(2013)04-0863-10

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12061

Strong Cold Weather Event over Eurasia during the Winter of 2011/2012 and a Downward Arctic Oscillation Signal from the Stratosphere

LAN Xiaoqing^{1,2} and CHEN Wen¹

¹ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The circulation evolution and possible causes of a severe cold event over the Eurasian continent during the winter of 2011/2012 were investigated with the NCEP-NCAR reanalysis data. Strong cold anomalies covering most of Europe, Mongolia, and northeastern China began in late January 2012 and lasted for about 3 weeks. Analysis results indicate that this cold event coincided with the phase of the Arctic Oscillation (AO) changing from positive to negative, which implied a possible impact of the AO. Before this AO phase change, a minor warming occurred in the stratosphere caused by an anomalous upward propagation of planetary waves. The polar night jet then decelerated and the AO changed its sign in the stratosphere. Within 2–3 weeks, the stratospheric AO signal gradually propagated downward and accordingly the tropospheric AO evolved into the negative phase. Thus, a strong Ural blocking high developed, and cold air invaded Europe and East Asia from the polar region, which induced the decreasing temperature there. Our results

收稿日期 2012-04-14, 2012-09-07 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428603, 国家自然科学基金资助项目 41025017

作者简介 兰晓青, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要从事气候动力学及平流层和对流层相互作用方面的研究。E-mail: lanxq@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈文, E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

suggest that improvements can be made in predicting severe winter cold events over Eurasia by taking into account the stratospheric circulation anomaly.

Keywords Severe cold event during winter, Arctic Oscillation, Stratospheric circulation, Planetary wave

1 引言

长期以来,平流层一直被认为只是被动地接受对流层上传的波动和能量,但近些年这个观点逐渐被平流层—对流层耦合相互作用的观点所替代。而北极涛动(Arctic Oscillation,简称AO)正是平流层—对流层耦合相互作用研究中的一个核心概念:它是通过采用经验正交函数展开而定义的一个在北半球极区和中高纬呈现反相变化的环形模态(Thompson and Wallace, 1998)。一般认为在AO的正位相,极涡较冷,极夜急流偏强且位置偏北,对流层阻塞不易发展(Wallace and Thompson, 2002);而AO处于负位相时则相反。AO在冬季表现为深厚的正压结构,自地面可延伸至平流层,也称为北半球环状模(Northern Annular Mode,简称NAM)。AO的异常通常会在平流层出现,而后逐渐下传(Baldwin and Dunkerton, 1999; Thompson et al., 2003)。当AO的异常较强时,可以显著地改变对流层的大气环流状况,影响对流层的天气过程(Thompson and Wallace, 2000; Baldwin et al., 2003; 胡永云, 2006)。许多研究表明AO对北半球中、高纬地区的冬季环流以及东亚气候异常有显著影响(据建华等, 2004; Chen et al., 2005; 陈文和康丽华, 2006; 谭本馗等, 2007; 所玲玲等, 2008)。陈文等的研究(Chen et al., 2003; 陈文和魏科, 2009)指出,准定常行星波的变化与AO以及平流层极涡的低频变化密切相关,通过波流相互作用,可以自上而下地影响对流层的短期气候异常。

2012年1月下旬至2月上旬,欧洲和亚洲部分地区经历了异常寒冷的天气过程:整个欧洲都笼罩在低温异常的控制之下,一些地区的温度突破三十年来的历史记录,部分河流和海港出现封冻,造成大量的财产损失,因寒冷天气导致的死亡超过了600人(WMO, 2012)。值得注意的是,这次低温天气过程发生的时间与北极涛动指数从正值转变为负值相匹配,而这种转变与平流层环流是否有关值得进一步加以研究。最近几年来,冬季低温严寒事件发生的频率似乎有所升高,这与全球变暖给大众带来的印象有着明显差别。英国每日邮报刊登的文

章提出地球即将进入“小冰期”的观点(<http://www.dailymail.co.uk> [2012-02-15])在科学界和社会上均引起不少争论。因此,非常有必要对这些低温严寒事件的发生发展过程及原因做深入的研究。本文将首先对这次低温严寒事件发生的天气过程进行细致的分析,之后进一步探讨其与平流层环流异常之间的关系。

2 资料和方法

本文使用的数据是由美国环境预报中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)和国家大气研究中心(NCAR, National Center for Atmospheric Research)发布的全球逐日再分析数据(Kalnay et al., 1996)。其水平网格距为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度),垂直方向上自1000 hPa到10 hPa共有17层。文中所得到的异常使用的气候平均态均为1981~2010年。逐日AO指数是由美国国家海洋和大气管理局网站提供(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)。文中为分析行星波的活动使用了E-P通量(Andrews et al., 1987)作为诊断工具,并用1~3波之和来代表行星尺度波动。

3 2011~2012 冬季低温严寒事件及大气环流演变过程

图1给出了自2011年12月中旬开始,逐旬平均的850 hPa温度异常,可以看到,2012年年初的这一次欧亚大陆的强低温事件开始于1月的下旬。在此之前,对于欧洲大多数地区来说,气温一直是与历史同期持平甚至略偏暖。东亚虽然一直处于温度的负距平控制之下,但是异常程度较弱。同期的赤道中东太平洋海表温度一直偏低,呈现类似拉尼娜型的海温异常。一般认为在拉尼娜事件时东亚冬季风会略偏强(Chen et al., 2000; Wang et al., 2000; 穆明权和李崇银, 1999; 陈文, 2002; 梁巧倩等, 2004),这可能是我国入冬以来一直处于冷异常的原因。从1月中旬开始,位于北非的冷异常开始向北扩展,覆盖了英国和法国之外的欧洲中西部,在亚洲,蒙古国和

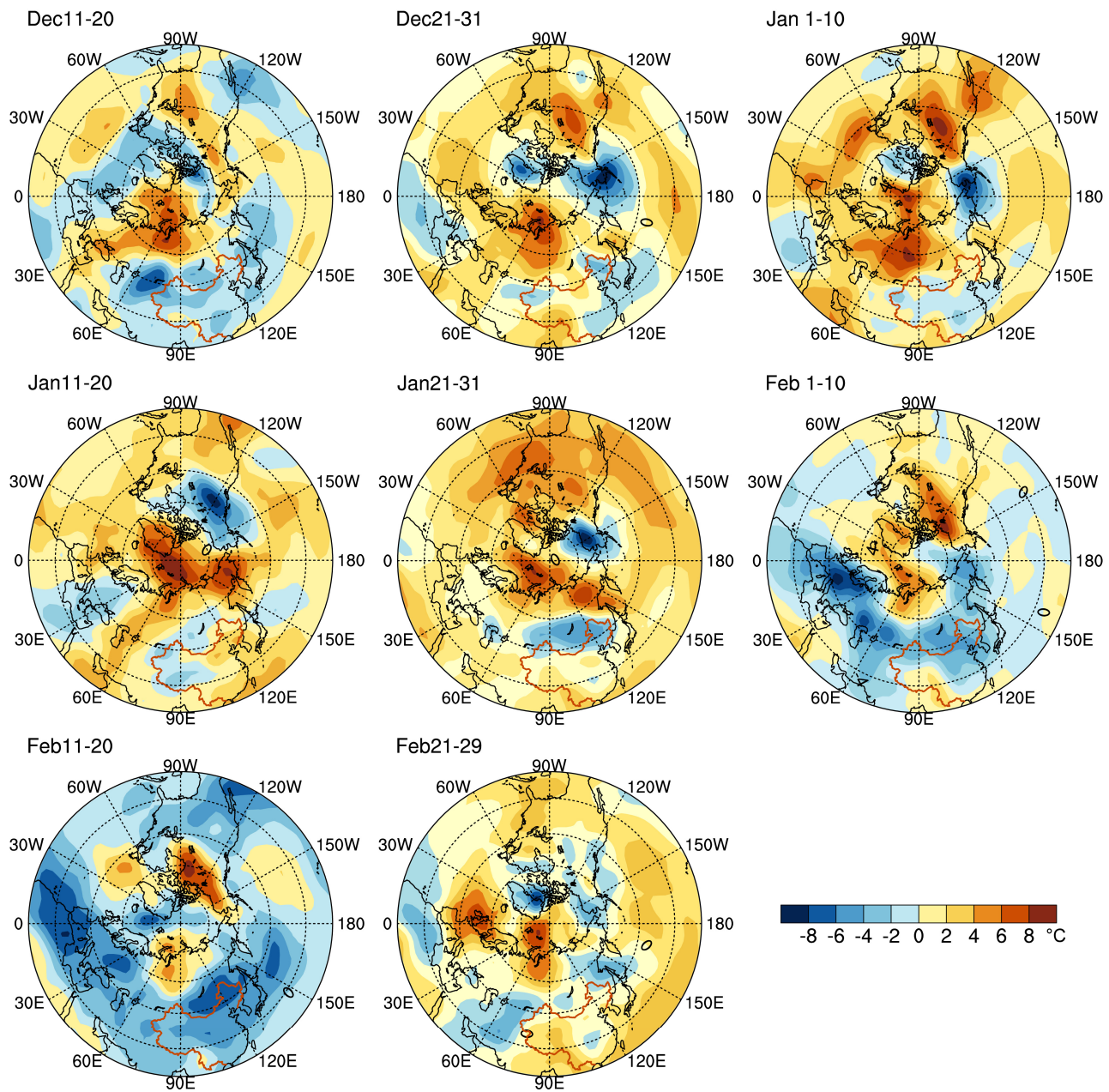


图1 2011 年 12 月 11 日~2012 年 2 月 29 日北半球 850 hPa 逐旬气温异常分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 1 Evolution of ten-day mean 850-hPa temperature anomalies from Dec 11, 2011 to Feb 29, 2012 in the Northern Hemisphere (units: $^{\circ}\text{C}$)

中亚等地区的低温异常得到维持。然后在 1 月 20~31 日期间, 欧亚大陆除了北部边缘毗邻北冰洋的区域之外, 均呈现出温度的负距平, 其中以贝加尔湖为中心, 覆盖我国东北、蒙古国等地区的最强低温异常超过了一 8°C 。进入 2 月之后, 低温异常继续发展并加强, 但此时低温异常的中心已经从亚洲逐渐移动到了欧洲, 超过一 10°C 的低温异常从波罗的海南部一直延伸到意大利北部, 在逐日的结果中可以看到, 低温异常

最强的一些地区甚至可以达到一 20°C (图略); 里海北部的中亚地区是另一个低温异常的强中心, 亚洲也依然维持着较强的负温度距平, 从贝加尔湖南延至我国华北的广大地区温度负距平超过一 6°C 。2 月 10 日之后, 低温异常逐渐减弱, 10~20 日的 850 hPa 温度距平显示欧亚大陆中部的正温度距平面积开始扩大, 不断向南扩展, 低温异常最强也不超过一 6°C 。到了 2 月下旬, 西欧大部已经转变为正温度距平, 低温异常的区域进一步

较小, 程度也在不断减弱, 基本已经恢复到这次异常强低温事件发生前的状况了。因此, 2012 年 1~2 月的这次低温严寒事件表现为欧亚大陆的极端低温, 持续时间从 1 月下旬到 2 月上旬, 大致为 3 周。这三周平均的温度异常显示 (图 2), 欧亚大陆中纬度地区全部偏冷, 欧洲中东部、里海北部和西伯利亚地区温度异常超过 -6°C , 中心位置甚至超过 -8°C , 处于极端偏冷的状态。

从 500 hPa 位势高度和 850 hPa 风场异常来看 (图 3)。从 12 月中旬到 1 月上旬, 北大西洋在气压场上一直维持着南正北负的北大西洋涛动 (NAO) 正位相, 欧洲盛行异常偏西风, 来自海洋的暖湿气流维持着欧洲温暖的天气。西北太平洋的气旋型环流异常也印证了拉尼娜造成的偏北风增强了东亚冬季风的推测。从 1 月中旬开始, 北大西洋基本转变为正位势高度异常, 欧洲中部出现异常的气旋型环流, 乌拉尔山 (以下简称乌山) 地区有异常高压不断发展, 东亚大槽得到增强, 更加有利于冷空气在东亚地区的向南发展。1 月下旬, 乌拉尔山的高压异常进一步增强, 整个欧亚大陆都表现为东风异常, 欧洲由于来自海洋的暖湿气流被削弱, 进入了异常偏冷的阶段, 并且东亚的北风得到增强, 也出现了极端低温。2 月上旬时, 位势高度的正异常逐渐西撤, 从东经 90°E 向西延伸到大西洋, 地中海

也出现了异常的气旋性环流, 来自北方的冷空气和南方的暖空气在东经 30°E 和零度经线之间的区域相遇, 给东欧和南欧带来了极强的低温和大雪, 东亚由于受高压东侧偏北风的影响, 寒冷天气仍在继续。进入 2 月中旬之后, 乌拉尔山地区的高压异常分裂为两个中心, 并且强度迅速减小, 纬向的异常东风仅仅出现在中亚。到 2 月下旬, 乌山东侧的高压异常已经很弱, 纬向气流恢复了平直。总的来说, 这次异常强低温事件的发生, 与乌拉尔山地区高压偏强和西伸有着紧密的联系。冷事件之前在格陵兰、北美北部和阿拉斯加均为位势高度负距平, 而北大西洋、乌拉尔山和北美西海岸均为位势高度正均平。冷事件之后, 乌拉尔山的正位势高度异常增强了, 北大西洋和格陵兰均为正位势高度异常, 阿拉斯加的位势高度负距平明显被削弱, 欧洲南部和东亚中纬度地区都转变为负位势高度异常。由此可以推测, 极区和中纬度的位势高度对比发生了变化, 这也就是我们常说的北极涛动。因此有必要对这次低温异常事件的发生与北极涛动的关系以及是否与平流层异常信号下传有关做进一步的分析研究。

4 与平流层异常环流的关系

图 4 a 给出了由海平面气压定义的 2011~2012 年冬季逐日 AO 指数, 不难看出, 这次低温严寒事件的发生与 AO 的位相转变匹配得很好。AO 指数在 1 月 21 日转变为负, 又在 2 月 12 日再次转为正值。

在 1 月下旬 AO 转变为负位相后, 海平面气压场上 (图 5a) 在西伯利亚和乌拉尔山以东的广阔地区出现正距平, 而在北太平洋上有负距平出现, 陆地和海洋之间的气压梯度进一步加大。200 hPa 的纬向西风在东亚中高纬度明显减弱, 而在中低纬度增强, 我国上空东亚急流异常偏强最大超过 35 m/s , 图 3 中 1 月下旬东亚大槽也异常偏强。这与以往研究中 (Chen et al., 2005; 陈文和康丽华, 2006) 提出的 AO 负位相时, 通过行星波的异常活动, 使得西伯利亚高压和阿留申低压同时增强, 东亚大槽和急流均偏强, 从而出现强冬季风是一致的。而在 2 月上旬, 海平面气压异常向西伸展, 中高纬度纬向西风减弱的最大值出现在欧洲一直到乌拉尔山地区, 欧洲盛行异常偏西北风, 来自北大西洋的暖湿气流不能输送到欧洲,

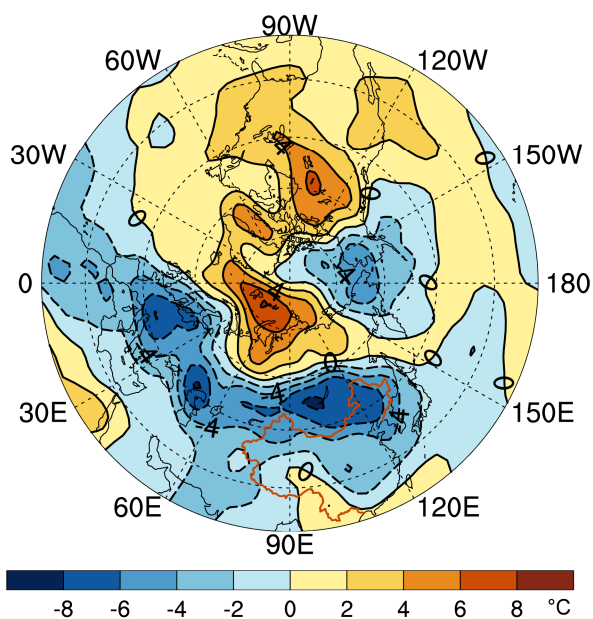


图 2 2012 年 1 月 21 日至 2 月 10 日北半球 850 hPa 气温异常分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Anomalous temperature distribution averaged for the period from 21 Jan to 10 Feb, 2012 in the Northern Hemisphere (units: $^{\circ}\text{C}$)

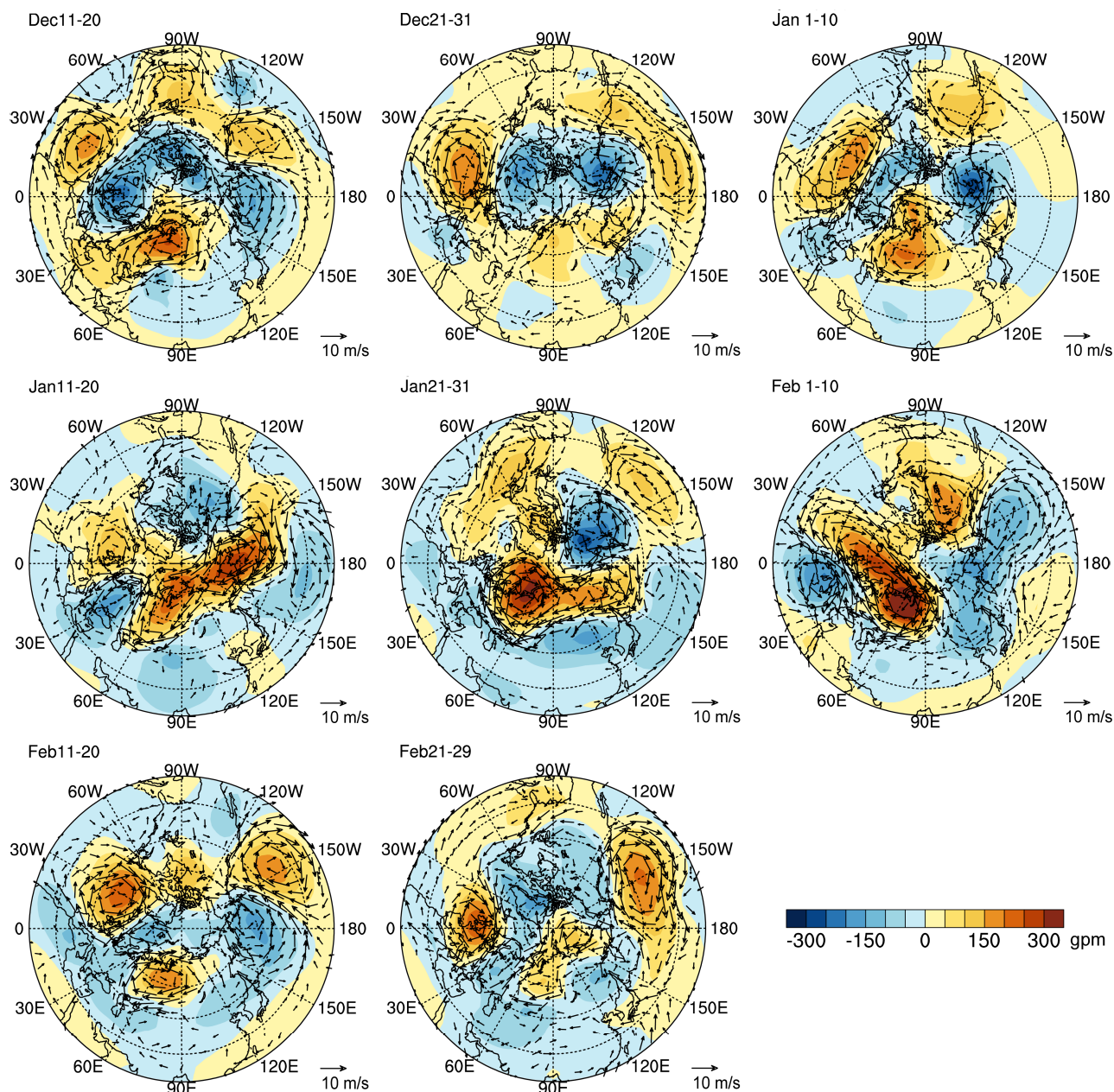


图3 2011年12月11日~2012年2月29日北半球逐旬500 hPa位势高度异常(单位: gpm)和850 hPa风场异常分布(单位: m/s; 小于2 m/s的风场异常未显示)

Fig. 3 Evolution of ten-day mean 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm) and 850-hPa wind anomalies (m/s, less than 2 m/s not shown) from Dec 11, 2011 to Feb 29, 2012 in the Northern Hemisphere

气温异常偏低, 这与 AO 和欧洲冬季气候的相关研究相符 (Baldwin and Dunkerton, 1999)。整个过程中, 乌拉尔山异常高压的发展都与负 AO 导致的西风偏弱有着紧密的联系, 而乌拉尔山高压异常发展和维持是欧亚大陆寒冷天气的重要条件。图 1 给出的温度异常也说明, 1 月下旬异常低温最强出现在东亚, 而 2 月异常低温最强出现在欧洲, 强低温异常出现的位置可能与纬向西风减弱的位置关系密切。

那么 AO 为什么会在这段时间由正转负? 对北纬 60°N 的 10 hPa 纬向风的变化分析可以发现 (图 4b), 自 11 月以来, 平流层的极夜急流强于气候平均态, 从 12 月 17 日开始, 出现了明显的减弱, 到月底时一直在气候平均态附近小幅波动, 直到 1 月 5 日再次开始大幅度的减弱, 从 35 m/s 一直减小到约 8 m/s (1 月 23 日), 在这段时间内极区平流层的温度也大幅攀升 (图 4c)。根据平流层爆发性增温事件的标准, 虽然北纬 60°N 、10 hPa 上的纬向西风

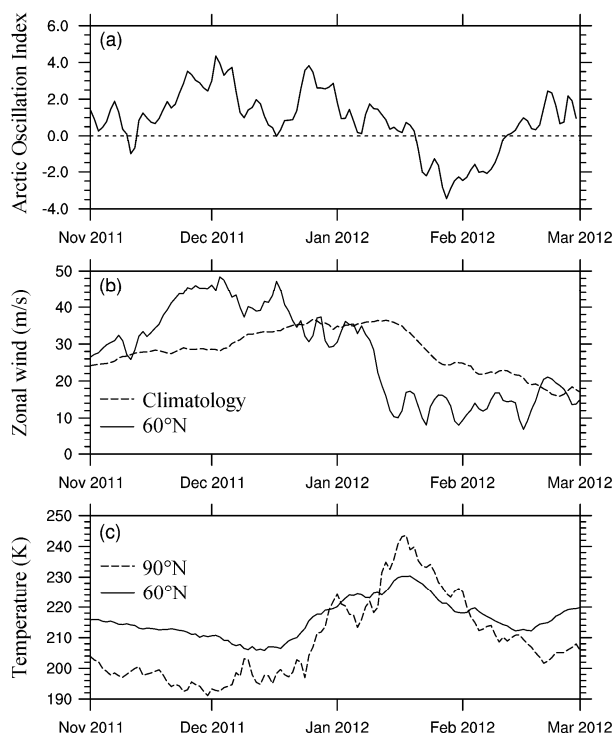


图4 2011~2012年冬季(a)北极涛动AO指数,(b)北纬60°N的10 hPa层纬向平均风场及其30年气候平均态(单位:m/s)和(c)60°N与90°N的10 hPa纬向平均温度(单位:K)的演变

Fig. 4 Evolution of (a) Arctic Oscillation index, (b) zonal mean zonal wind (units: m/s) at 60°N on 10 hPa and its climatology for 30 years, (c) zonal mean temperature (units: K) at 60°N and 90°N on 10 hPa during 2011/2012 winter

很弱,但并未反向变为东风,因此达不到主增温(Major Warming)的标准(Charlton and Polvani, 2007)。由于10 hPa上北纬60°N和90°N的温度梯度出现了反转,极区平流层比中纬度平流层更暖,因此可以认为发生了弱增温事件(Minor Warming)。综合以上的分析不难发现,平流层纬向西风的减弱和温度的升高在发生的时间上早于地表AO的变化,领先10天到两周左右。由此可以推测,地表AO位相的转变很可能是来源于平流层环流异常变化的向下传播。

从北纬65°~90°N平均的纬向平均位势高度异常随时间的演变(图6a)可以看到,从11月开始,极区的位势高度异常一直为负。在1月9日,极区平流层的位势高度急剧变大,由负距平变为正距平,也就是极涡由强极涡变为弱极涡,并且表现出了明显的随时间下传的特征。北纬50°~80°N平均的纬向西风随时间的演变(图6b)也可以看到,在1月8日,10 hPa纬向西风从异常偏强转为

偏弱,异常值超过了一20 m/s。温度的异常则出现得更早,在11年的12月26日,10 hPa上就出现了温度的正距平,不过这个温度的正距平一直维持在30 hPa以上,直到过1月初之后,才出现明显的下传。根据Matsuno关于平流层爆发性增温的理论(Matsuno, 1971),平流层的迅速增暖一般和由对流层上传的波动有着十分密切的联系。北纬50°~80°N平均的行星波振幅(1~3波之和)异常随时间的演变显示(图7),在2011年12月的后半段,在平流层已经出现了行星波振幅的异常增大,振幅异常增大的最大值出现在12月25日,在10 hPa达到873 gpm,之后在1月中旬行星波振幅再次增大,异常偏强的振幅在1月13日再一次超过了800 gpm。

E-P通量异常的分析也证实了行星波的重要作用,这里为了对冷事件前后波动的变化有更直观的认识,只给出了1月21日之前和之后各21天这两个时间段平均的E-P通量及其散度异常(图8)。在低温发生前的21天内,E-P通量在平流层表现为极强的异常上传,并且逐渐折向极地和中低纬;在对流层,向热带传播的低纬波导较气候平均偏弱,从而有异常向北传播的分量,而在中高纬对流层和平流层下层则有E-P通量的异常向南传播,因此E-P通量在这一区域辐合。1月21日之后的21天,北纬60°N以北的平流层E-P通量表现为异常的向下向极地方向传播,而60°N以南的平流层仍有较弱的E-P通量上传并折向低纬;对流层向热带对流层顶传播的低纬波导较之前明显增强,中高纬对流层向低纬传播的分量也向南扩展,接近北纬40°N。这意味着行星波沿低纬波导的传播增强,而沿极地波导的传播减弱。这种行星波传播的异常变化往往对应着AO异常的下传(如Wang and Chen, 2010)。

5 结论和讨论

本文利用再分析资料对2011~2012年冬季发生在欧亚大陆的一次异常低温严寒事件做了分析。这次低温事件,开始于2012年1月下旬,持续了三周左右,先后在东亚部分地区和几乎整个欧洲造成了剧烈的降温,带来了巨大的人员和财产损失。值得关注的是,这次低温过程与北极涛动的位相转变在时间上非常匹配。行星波在12月下旬和1月中旬前后两次出现强烈的异常上传,在平流层通

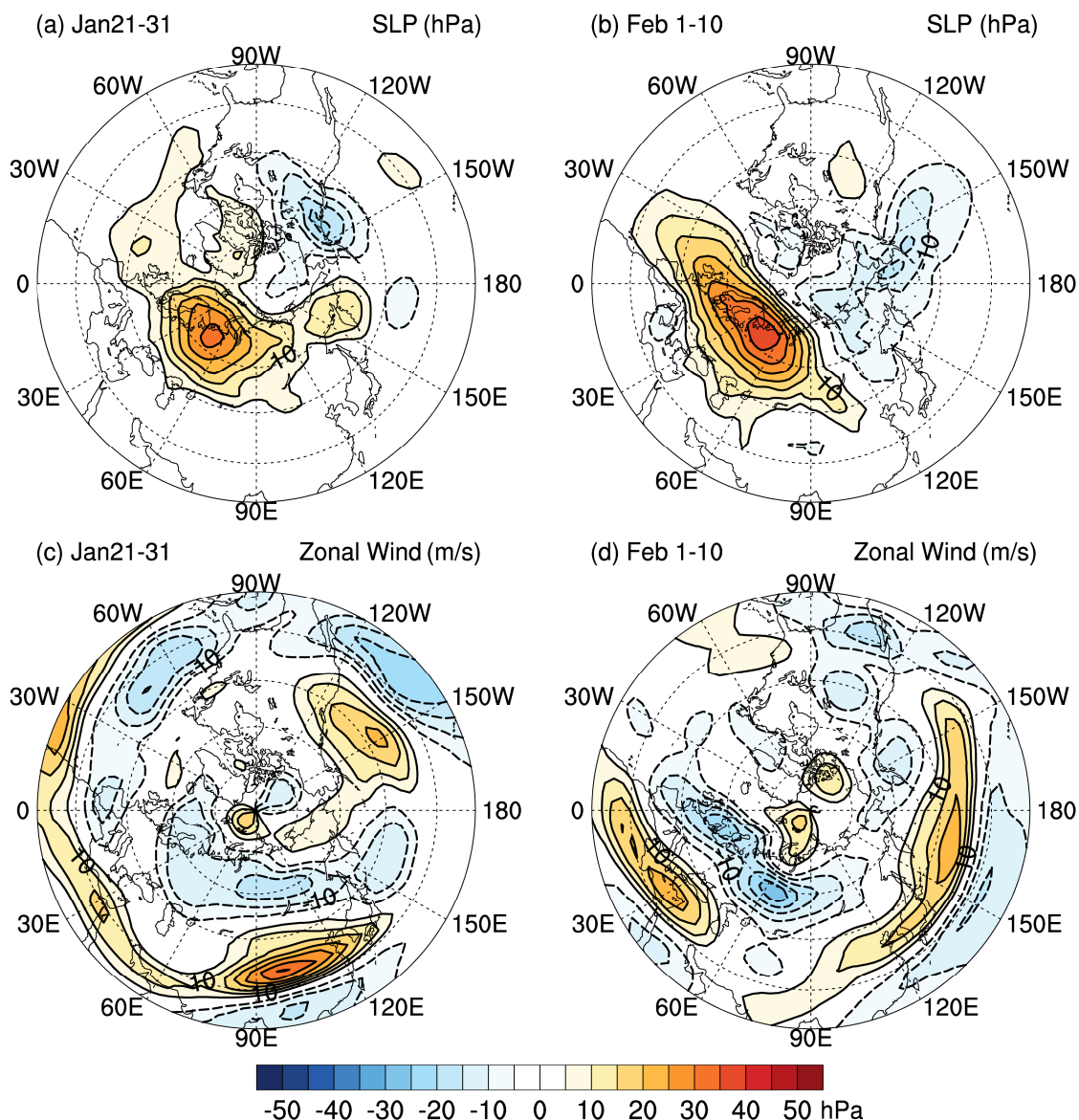


图5 北半球 (a, b) 海平面气压异常 (单位: hPa, 等值线间隔: 5 hPa) 和 (c, d) 200 hPa 纬向风异常 (单位: m/s, 等值线间隔 5 m/s): (a, c) 1 月 21~31 日; (b, d) 2 月 1~10 日。负值用虚线表示, 零线未显示

Fig. 5 Distribution of (a, b) SLP anomalies (units: hPa, contour interval: 5 hPa) and (c, d) 200-hPa zonal wind anomalies (units: m/s, contour interval: 5 m/s) for the periods 21~31 Jan and 1~10 Feb in the Northern Hemisphere, respectively. The negative values are dashed and the zero lines are suppressed

过波流相互作用, 减弱了纬向西风, 导致平流层温度升高, 首先在高层出现了环状模的负位相, 之后在两周左右的时间内下传到低层, 对流层 AO 转变为负位相, 乌拉尔山阻高异常发展, 极区的冷空气不断向南爆发, 从而在东亚和欧洲造成了剧烈的降温。

与 2009 年 12 月中纬度的寒冷天气相比 (Wang and Chen, 2010), 二者都与平流层环流异常信号下传有关。但不同的是, 本次低温事件持续时间相对

较短, 其影响主要集中在欧洲和东亚部分地区, 同期北美中纬度地区是异常偏暖, AO 指数也只是在三周左右的时间内为负位相, 平流层的增暖并未达到主增温事件的标准, 而是发生了弱增温事件。而 2009~2010 年冬季几乎整个中纬度人口稠密地带都受到了显著影响, 负 AO 极强, 是数十年来的极值, 然而平流层的增暖甚至连 Minor Warming 事件都达不到。因此, 平流层环流异常与对流层极端天气气候异常之间到底有怎样的联系, 还需要更加深

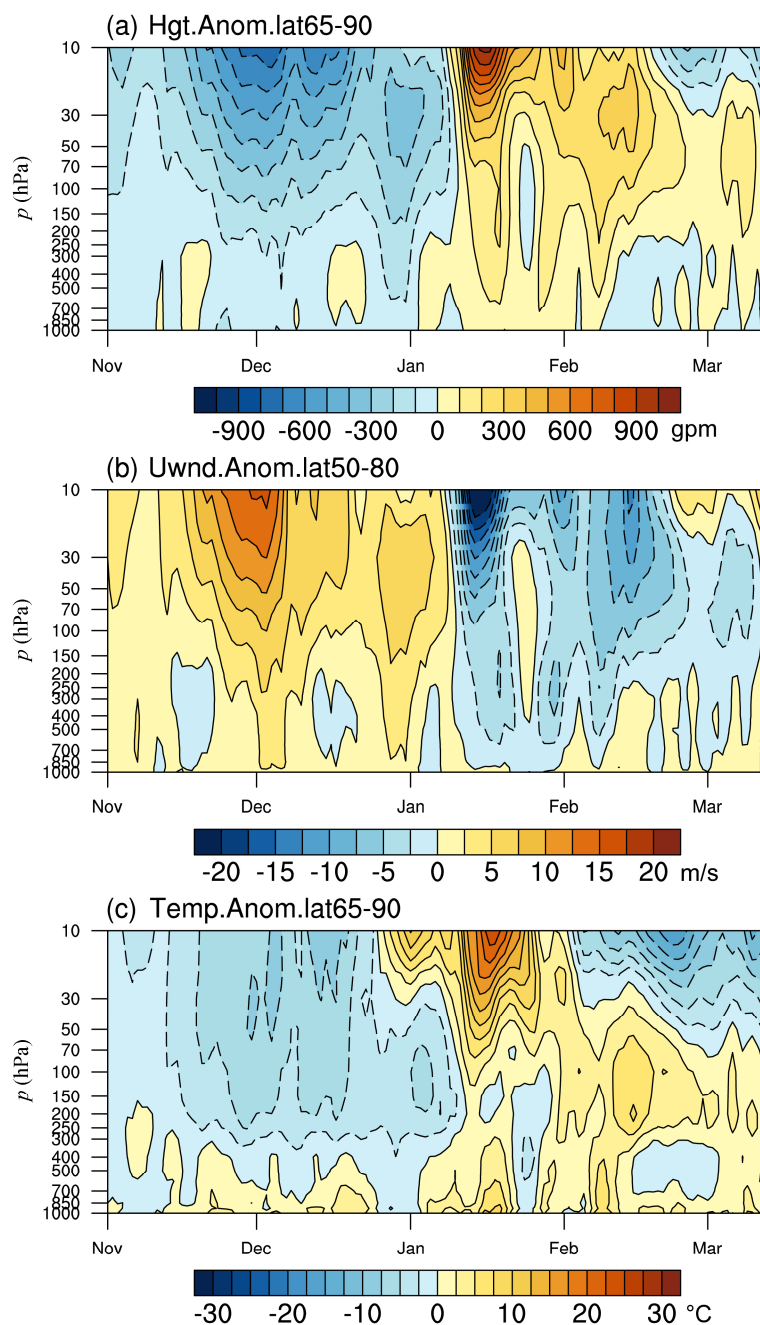


图6 2011~2012年冬季 (a) 北纬 65°~90°N 区域平均的纬向平均高度场 (单位: gpm), (b) 50°~80°N 区域平均的纬向平均风场 (单位: m/s) 和 (c) 北纬 65°~90°N 区域平均的纬向平均温度场 (单位: °C) 的异常随时间的演变

Fig. 6 The daily evolution of (a) zonal mean geopotential height anomaly for region 65°~90°N (units: gpm), (b) zonal mean zonal wind anomaly for region 50°~80°N (units: m/s), (c) zonal mean temperature anomaly for region 65°~90°N (units: °C) during 2011/2012 winter

入的研究。

此外, 关于平流层环流异常的来源, 有研究认为平流层爆发性增温之前对流层一般都会有阻塞高压发生 (Martius et al., 2009)。就本文的个例来看, 12月中旬的确能够看到乌拉尔山东侧有异常高

压的发展。因此有必要对阻塞高压在平流层与对流层相互影响中的作用加以研究。需要特别注意的是, 目前的研究中多数集中在年际尺度上, 事实上 2011~2012 年冬季 12 月到 2 月平均的 AO 指数为正值, 达到 0.655, 但其中大约持续三周的 AO 负

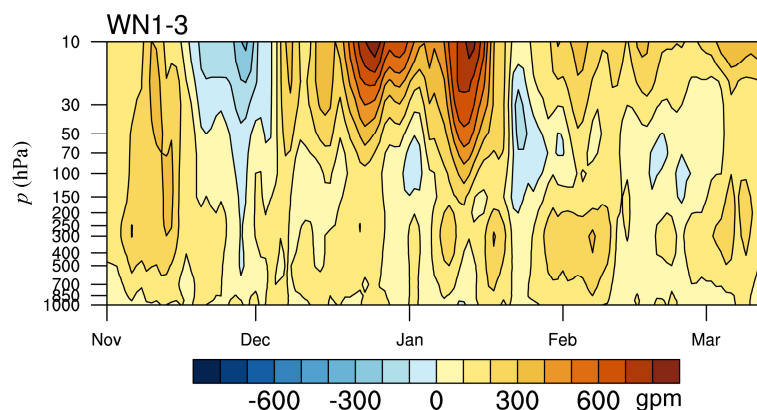
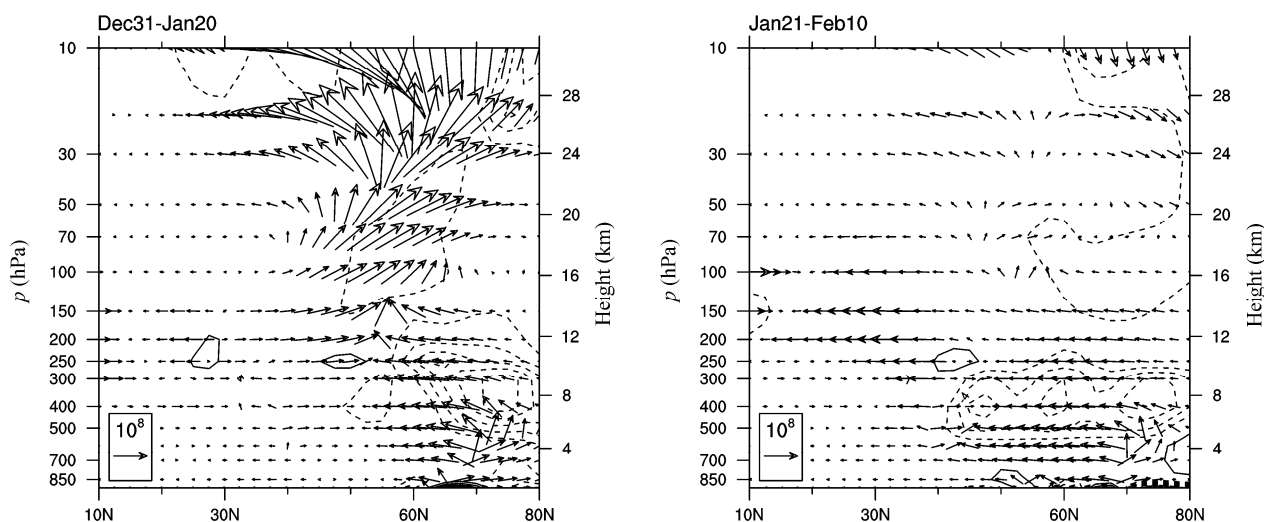


图 7 2011~2012 年冬季行星波振幅的异常 (单位: gpm) 随时间的演变

Fig. 7 The daily evolution of stationary planetary wave amplitude anomalies (units: gpm) during 2011/2012 winter

图 8 (a) 12 月 31 日至 1 月 20 日和 (b) 1 月 21 日至 2 月 10 日北半球 E-P 通量 (单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 及其散度异常 (单位: $\text{m s}^{-1} \text{d}^{-1}$) 的分布。E-P 通量散度的等值线间隔: $2 \text{ m s}^{-1} \text{d}^{-1}$, 负值用虚线表示, 零线未显示Fig. 8 Distribution of anomalous E-P flux ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) and its divergence (units: $\text{m s}^{-1} \text{d}^{-1}$, contour interval: $2 \text{ m s}^{-1} \text{d}^{-1}$): (a) From 31 Dec to 20 Jan; (b) from 21 Jan to 10 Feb. The negative values are dashed and the zero lines are suppressed

位相, 却带来了极强的低温严寒天气并造成了严重的损失。这种季节内尺度上的变化, 可能我们需要给予更多的关注。

参考文献 (References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics [M]. New York: Academic Press.
- Baldwin M P, Dunkerton T J. 1999. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere [J]. J. Geophys. Res., 104 (D24): 30937–30946.
- Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. 2003. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts [J]. Science, 301 (5633): 636–640.
- Charlton A J, Polvani L M. 2007. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks [J]. J. Climate, 20 (3): 449–469.

- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. 大气科学, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 595–610.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. 大气科学, 30 (5): 863–870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 863–870.
- 陈文, 魏科. 2009. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用 [J]. 地球科学进展, 24 (3): 272–285. Chen Wen, Wei Ke. 2009. Anomalous propagation of the quasi-stationary planetary waves in the atmosphere and its roles in the impact of the stratosphere on the East Asian winter climate [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (3): 272–285.

- 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.
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4797–5811.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D14110, doi: 10.1029/2004JD005669.
- 胡永云. 2006. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 21 (7): 713–720. Hu Yongyun. 2006. On the influence of stratospheric anomalies on tropospheric weather systems [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 21 (7): 713–720.
- 据建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响 [J]. *高原气象*, 23 (4): 429–434. Ju Jianhua, Ren Juzhang, Lü Junmei. 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 429–434.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- 梁巧倩, 简茂球, 罗会邦. 2004. 东亚冬季风与海温在年际尺度上的耦合关系分析 [J]. *热带海洋学报*, 23 (2): 19–27. Liang Qiaoqian, Jian Maoqiu, Luo Huibang. 2004. Analysis of coupling relationship between East Asian winter monsoon and SST in inter-annual scale [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 23 (2): 19–27.
- Martius O, Polvani L M, Davies H C. 2009. Blocking precursors to stratospheric sudden warming events [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L14806.
- Matsuno T. 1971. A dynamical model of the stratospheric sudden warming [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28: 1479–1494.
- 穆明权, 李崇银. 1999. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息: I. 观测资料分析. *大气科学*, 23 (3): 276–285. Mu Mingquan, Li Chongyin. 1999. ENSO signals in the interannual variability of East-Asian winter monsoon. Part I: Observed data analyses [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 23 (3): 276–285.
- 所玲玲, 黄嘉佑, 谭本旭. 2008. 北极涛动对我国冬季同期极端气温的影响研究 [J]. *热带气象学报*, 24 (2): 163–168. Suo Lingling, Huang Jiayou, Tan Benkui. 2008. The influence of winter Arctic oscillation on maximum and minimum air temperature over China in winter [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24 (2): 163–168.
- 谭本旭, 所玲玲, 黄嘉佑. 2007. 各层北半球环行模态异常与地面气温度的关系研究 [J]. *气象学报*, 26 (5): 718–724. Tan Benkui, Suo Lingling, Huang Jiayou. 2007. Variability of coupling between surface air temperatures and northern annular modes at various levels [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 26 (5): 718–724.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (9): 1297–1300.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J. Climate*, 13 (5): 1000–1016.
- Thompson D W J, Lee S, Baldwin M P. 2003. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation [J]. *Geophysical Monograph Series*, 134: 81–112.
- Wallace J M, Thompson D W J. 2002. Annular modes and climate prediction [J]. *Physics Today*, 55 (2): 28–34.
- 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.
- Wang L, Chen W. 2010. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (9): L09707.
- WMO. 2012. Cold spell in Europe and Asia in late winter 2011/2012 [R]. https://www.wmo.int/pages/mediacentre/news/documents/dwd_2012_report.pdf (last access: 10 January 2013)