

京津冀冬季冷空气过程的低频特征及西伯利亚高压低频变化的影响

马 宁,何丽烨,梁苏洁,郭 军

(天津市气候中心,天津 300074)

摘要: 本文使用1981—2015年京津冀地区逐日气温和NCEP/NCAR再分析资料,分析了京津冀地区冬季冷空气过程的低频环流特征,以及西伯利亚高压(SH)的低频变化特征及其对京津冀冷空气过程的影响。分析表明,冬季京津冀气温和SH都存在10~30 d显著低频周期,且二者的低频分量之间存在显著的超前滞后相关。京津冀冷空气过程主要发生在低频气温从零位相到谷值的下降阶段,以及低频SH从峰值到零位相的下降阶段。随着京津冀气温和SH的10~30 d低频变化,亚洲近地面层和中层大气环流均表现出一个从西北向东南传播的低频变化周期。影响京津冀地区的低温异常最早出现在喀拉海附近并在亚洲高纬地区维持和积累,产生持续冷却作用;同时中层相应区域维持的强气旋性环流异常表明有持续的大气辐合,中层辐合下沉与近地面持续冷却作用配合形成近地面异常高压。异常高压伴随异常低温南下过程中与中层加强的东亚大槽配合,使京津冀地区处于整层北风异常中,易形成冷空气过程。

关键词: 京津冀冷空气;西伯利亚高压;低频变化;大气辐合

DOI: 10.11821/dlxb202003004

1 引言

冷空气过程是京津冀地区冬季天气气候异常的一个重要方面,即使在气候变暖的年代际背景下,冷空气过程及与之相伴随的阶段性的低温仍多有发生,如2010—2011年频发的低温事件^[1]和2016年1月的强寒潮^[2],都给能源、交通和生活等带来严重影响。另外,冷空气过程往往伴随大风,对于改善冬季京津冀地区空气污染气象条件有着显著作用^[3]。可见,冷空气过程始终是天气气候预测中不可忽视的一个方面。随着京津冀协同发展和蓝天保卫战等国家战略的实施,该地区还面临着冬季供暖和节能减排的矛盾,迫切需要根据冷空气活动科学调控供暖能耗。这些都对冬季气温预报尤其延伸期(10~30 d)冷空气活动的预报服务提出了很高的需求,探索京津冀冷空气过程延伸期预测的理论依据和技术方法无疑具有重要的实际意义。

大气低频振荡(Low-Frequency Oscillation, LFO)首先在20世纪70年代发现于热带地区^[4],研究表明,除热带地区外,LFO在副热带乃至中高纬地区都普遍存在^[5-7],是一种全球的大气变化现象^[8]。对LFO的研究在热带地区最为丰富,对其结构特征^[9-10]和基本活动规律^[11-12]都有比较清楚的揭示,同时,热带LFO能够影响许多地区的天气气候异常,

收稿日期:2018-11-09;修订日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41805061);国家重点研发计划(2018YFC1505604);天津市气象局博士基金项目(201628bsjj01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41805061; National Key R&D Program of China, No.2018YFC1505604; The Doctoral Fund of Tianjin Meteorological Administration, No.201628bsjj01]

作者简介:马宁(1985-),女,河南人,硕士,工程师,主要从事短期气候预测与诊断分析。E-mail: esmaning@gmail.com
485-496 页

如季风活动^[13-14]、气温^[15-16]和降水^[17-18]异常等。此外,关于东亚副热带LFO的活动特征与气候影响也有许多研究成果^[19-21],东亚夏季风活动也有明显的低频特征^[22-23]并且与季风推进及降水异常都有密切关系^[24-25]。相较而言,LFO在中高纬地区的研究还比较有限。中高纬具有与热带地区相当的低频振荡动能^[8],且LFO中心往往与大气活动中心配合^[26]。研究发现,中高纬LFO对冬季气候有重要影响,如东亚冬季风和东亚槽的活动都存在显著的低频变化特征^[27-29],太平洋阻高的建立也与中高纬LFO密切相关^[30]。丁一汇指出准双周振荡是冬季中高纬的一种重要低频模态并且与东亚寒潮有密切的关系^[31],一些个例研究也表明了中高纬LFO对寒潮爆发和传播的重要影响^[32-33]。中高纬LFO还对中国异常低温事件起到触发和维持作用^[34-35]。此外,研究也指出了北半球和欧亚地区冬季地面气温存在显著的向东南传播的低频模态^[36-37],其影响能够直达中国华南地区。可见,大气低频信号与气候预测因子有很好的关联性且对长期天气和短期气候变化影响显著,可以作为延伸期可预报信号。因此,探索京津冀地区冬季低频活动和低频影响因子,对于提高延伸期过程和短期气候异常的预测能力意义重大。但是,当前京津冀所在地区对LFO的研究工作仍比较欠缺,利用低频信号预测京津冀冷空气活动的研究还很少,而已有研究所揭示的欧亚地区的整体气温低频模态对该地区的指示作用也不够明确。

本文将重点分析历年冬季京津冀地区冷空气过程的发生与气温低频变化以及东亚中高纬环流LFO的关系,探索影响京津冀冷空气过程的低频信号和影响途径,为推进冷空气过程延伸期预报提供参考。考虑到东亚地区冬季气温及其主要影响环流在20世纪70年代末到80年代中期都经历了气候突变^[38-39],因此,本文仅使用1981年以后的数据资料对最近气候背景下的冷空气过程进行分析。

2 数据与方法

2.1 数据

使用1981—2015年京津冀地区有完整记录的174站逐日气温数据及NCEP/NCAR再分析资料^[40],再分析资料包括逐日海平面气压(SLP)、近地面气温($\sigma = 0.995$ 层的温度,T995)和850 hPa、500 hPa风场(V850、V500),水平分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。气象上自然季中的冬季通常为上年12月到当年2月,考虑到11月和3月也是冷空气过程多发的时段,本文将上年11月至当年3月作为冷空气过程研究时段(以下冬季均指上年11月至当年3月)。

2.2 方法

使用功率谱分析确定逐日变量的主要低频周期,为了突出变量的季节内部分,功率谱分析前先对逐日数据进行预处理:首先将逐日数据减去气候态年循环的平均值及其傅里叶分解的前三个谐波,去除季节循环;然后使用5 d滑动平均去除天气尺度变化。低频分量的提取使用一阶Butterworth带通滤波器。京津冀冷空气过程的定义使用中国气象局预报司《冷空气过程监测业务规定》中的监测标准:

单站冷空气即某站一定时间内日最低气温降温幅度达到一定程度:48 h最低气温变温幅度(ΔT_{48})符合 $-6^\circ\text{C} \geq \Delta T_{48} > -8^\circ\text{C}$ 时定义为中等强度冷空气, $\Delta T_{48} \leq -8^\circ\text{C}$ 时定义为强冷空气;24 h变温(ΔT_{24})达 $\Delta T_{24} \leq -8^\circ\text{C}$ 或48 h变温达 $\Delta T_{48} \leq -10^\circ\text{C}$ 或72 h变温(ΔT_{72})达 $\Delta T_{72} \leq -12^\circ\text{C}$,且日最低气温 $\leq 4^\circ\text{C}$ 时定义为寒潮(其中48 h、72 h内的气温必须是连续下降的)。区域冷空气过程为至少连续2 d且每天监测区域内 $\geq 20\%$ 的监测站点出现中等及以上强度的单站冷空气。

3 京津冀地区冬季冷空气过程的低频特征

3.1 京津冀地区冬季冷空气过程的分布特征

根据冷空气过程监测标准,京津冀地区1981—2015年冬季共出现220次区域冷空气过程(图1),其中约半数中等强度冷空气过程(106次),强冷空气(52次)和寒潮(62次)发生频次相当。冬季各月中,11月冷空气过程最多(61次),2月最少(35次);其中,11月的寒潮在冷空气过程中的占比(38%)高于其他各月,与中等强度冷空气过程(41%)相当;2月寒潮占比为各月最小(17%),以中等强度过程为主(60%)。逐年变化方面(图2),除1981—1983年京津冀冷空气过程明显偏多(10~11次)外,1984年以来冷空气过程频次和年平均强度均以年际变化为主,并未表现出明显的趋势和年代际特征。在气候明显变暖的背景下,影响京津冀地区的冷空气频次和强度都没有减小趋势。

3.2 京津冀冬季气温的主要低频周期

对1981—2015年冬季京津冀地区平均逐日气温进行功率谱分析,从1981—2015年的平均功率谱(图3)可以看出,10~30 d波段存在功率谱峰值且超过95%信度。另外,逐年的气温功率谱也表现出显著的10~30 d周期。可见,冬季京津冀气温存在10~30 d的低频周期,这与已有研究确定的欧亚中高纬地区存在的主要低频周期一致^[30, 37],且与延伸期的时间尺度相符,因此,分析中高纬大气和京津冀气温10~30 d低频振荡及其与冷空气活动的关系,对于冷空气过程的延伸期预测具有实际的指导意义。

3.3 京津冀冬季低频气温与冷空气过程的关系

使用Butterworth带通滤波器对

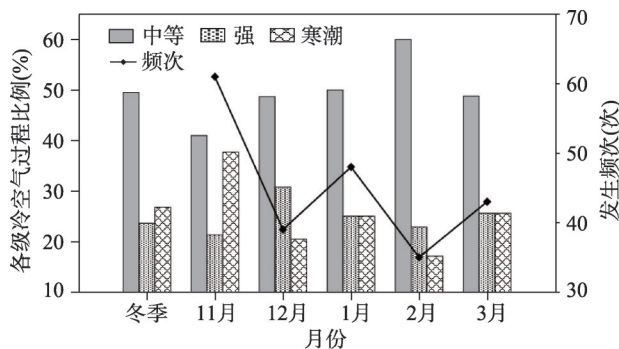


图1 1981—2015年京津冀各月冷空气过程发生频次及各级冷空气过程发生比例

Fig. 1 Cold air activity frequency and proportion of different cold air intensities in the BTH region in the winter of 1981-2015

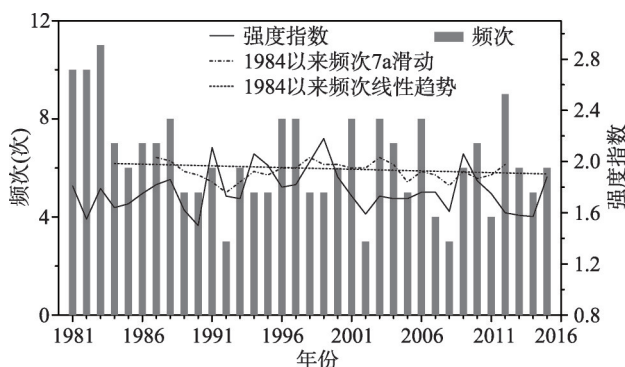


图2 1981—2015年京津冀冬季冷空气过程频次及强度的历年变化

Fig. 2 Interannual frequency and intensity of cold air activity in the BTH region in the winter of 1981-2015

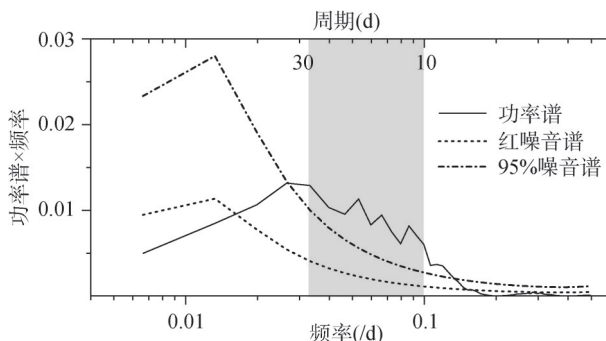


图3 1981—2015年京津冀冬季逐日气温平均功率谱

Fig. 3 Average power spectrum of the daily temperature in the BTH region for the winter of 1981-2015

1981—2015年冬季京津冀逐日气温进行10~30 d带通滤波,得到逐年冬季的10~30 d低频气温。为了分析京津冀冬季低频气温与冷空气过程的关系及中高纬大气低频环流背景,将气温低频变化的每个完整周期划分为8个位相(图4a),3、7位相分别为波峰和波谷,8-1-2和4-6位相分别为上升和下降位相。图4b给出各低频位相下出现冷空气过程的日数,5-7位相为冷空气过程高发位相,第6位相出现约1/3的冷空气过程日。可见,京津冀冷空气过程并非集中发生在低频气温的谷值阶段,而是主要发生在从零位相到谷值的下降阶段。

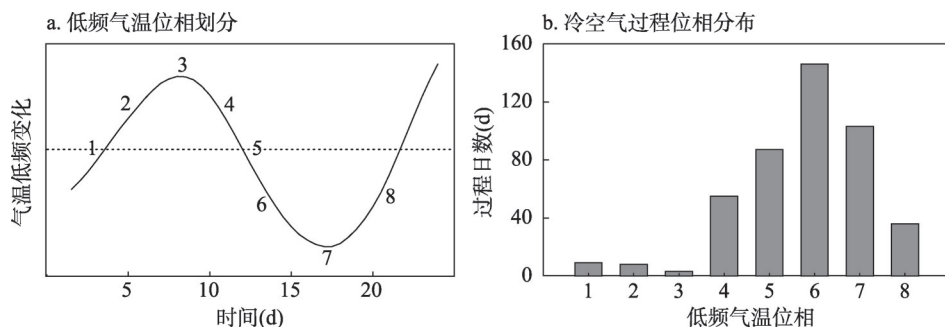


图4 京津冀冬季低频气温位相划分示意图及冷空气过程位相分布

Fig. 4 Schematic diagram of 8 phases in a period of low-frequency temperature oscillation in winter and distribution of cold air activity for the 8 phases in the BTH region

3.4 京津冀冬季气温低频变化的中高纬异常环流背景

为了揭示中高纬环流异常随京津冀气温低频位相的演变特征,将逐日 SLP、T995 和 V850距平场在8个低频位相下分别进行合成(图5)。图5中虚线箭头(点线箭头)标出低温(高温)异常的传播过程,可以看到近地面气温异常随着低频位相变化呈现出从西北向东南方向传播的波列。第1位相时,亚洲中高纬同时受广阔的异常低压和850 hPa异常气旋控制,高温异常分布在低压区的南半部,同时低压区北部喀拉海附近有小范围低温异常。这种环流异常配置在第2位相时明显加强并向东南传播,中国大部分地区被高温异常覆盖,同时整个亚洲高纬地区受迅速发展加强的低温异常控制。在第3位相,亚洲地区的异常气旋及相伴随的高温异常已明显减弱缩小,同时亚洲高纬的低温异常继续发展并向东南移动至西伯利亚北部。第4位相为过渡位相,此时东亚地区的异常气旋明显减弱且中心消失,同时西伯利亚附近的异常低温区维持扩大并且伴随有异常高压中心形成。

第5位相呈现出与第1位相基本相反的分布形势,此时西伯利亚地区的异常高压迅速发展增强并向南扩展,与之相伴随的低温异常也明显加强且主要分布在异常高压区南半部;同时,850 hPa亚洲中高纬有异常反气旋形成,其中心位置与异常高压基本吻合,低温和偏北风异常开始影响到京津冀地区。第6位相时,位于西伯利亚地区的异常高压和中高纬异常反气旋进一步扩大加强并南伸覆盖东亚大部分地区;反气旋南侧增强的异常东北气流及随其向南扩展的低温异常对京津冀地区的影响达到最强。第7位相时高压和低温异常明显减弱并缩小南移,异常反气旋和影响京津冀的东北异常气流也明显减弱。第8位相的分布形势与第4位相基本相反,东亚地区的异常反气旋基本消失,同时亚洲高纬地区有新的异常低压形成。

从上述分析可以看出,随着京津冀冬季气温10~30 d低频变化,亚洲中低层大气环流异常也表现出一个完整的低频变化周期。影响京津冀的低温异常最早出现在喀拉海附

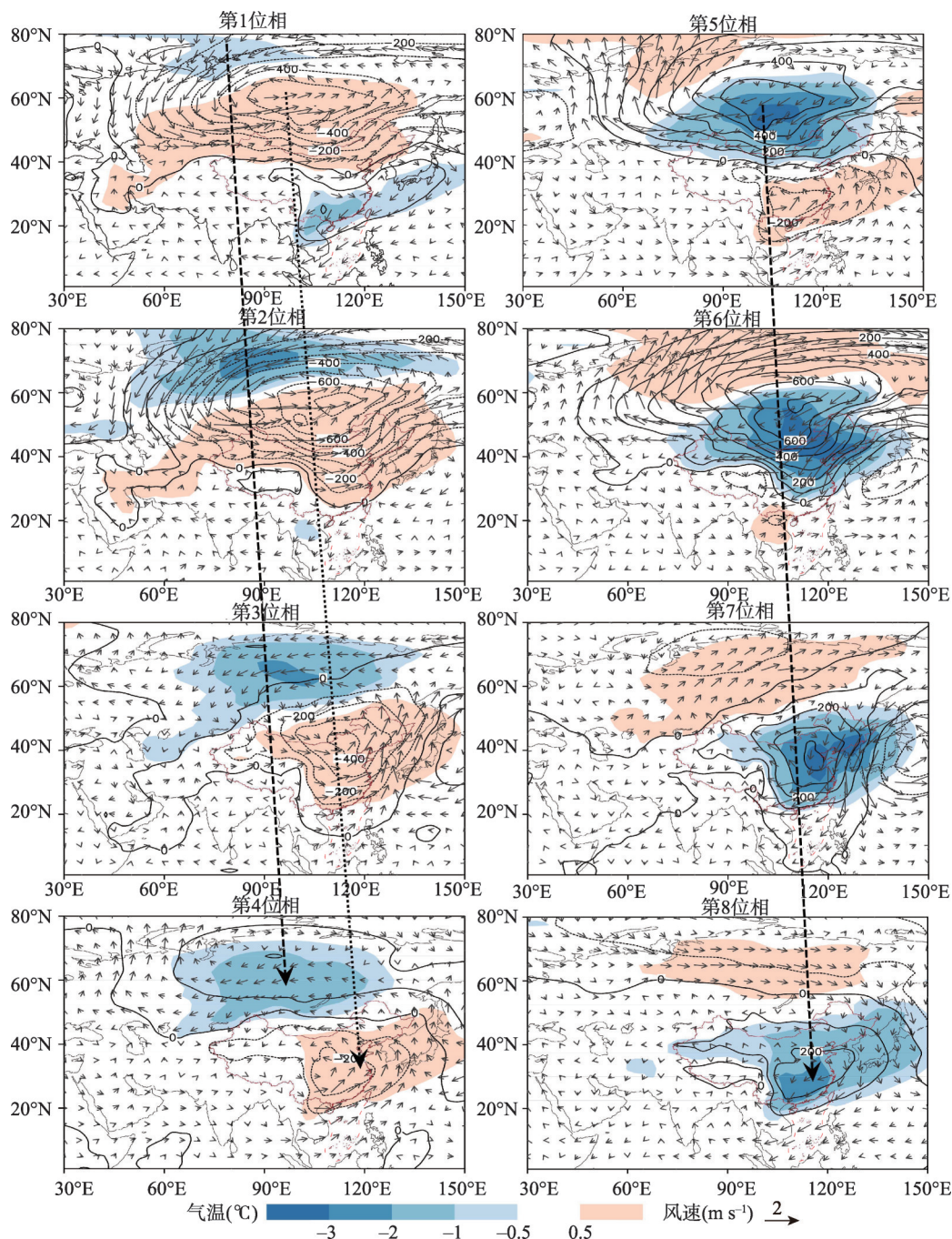


图5 SLP(等值线)、T995(阴影)、V850(矢量)冬季逐日距平场随低频气温各位相的演变

Fig. 5 Composite distributions of inter-time daily anomalies of SLP (contours), T995 (shaded) and V850 (vector) for the 8 phases of low-frequency temperature oscillation

近地区,随后逐步发展并向东南方向传播。该低温异常经过第3-4位相时在亚洲高纬地区的维持和积累,由于持续冷却作用在第4位相亚洲高纬地区形成异常冷高压,该异常高压在随后的第5-7位相发展增强并向南扩展,推动其前锋区域的低温异常向南移动影响京津冀进而影响中国大部。

4 冬季西伯利亚高压的低频活动特征及对京津冀冷空气的影响

从上一节的分析可以看出, 西伯利亚地区异常高压的发展加强对于异常低温南下影响京津冀地区有关键作用。西伯利亚地区是冷空气南下影响中国的关键区, 而西伯利亚高压 (SH) 又是冬季影响中国尤其是北方地区最主要的环流系统之一, 本节将讨论冬季 SH 的低频活动特征及其对京津冀低频气温和冷空气的影响。

4.1 冬季 SH 的主要低频周期

根据国家气候中心监测标准, 以 SH 多年平均位置 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 的区域平均海平面气压值作为表征 SH 活动的强度指数。分析冬季 SH 的低频活动前, 首先对冬季逐日 SH 指数去除季节和天气尺度变化后做功率谱以分析其主要周期。1981—2015 年冬季 SH 平均功率谱在 10~30 d 周期有明显的峰值且超过 95% 信度 (图 6), 其逐年功率谱也都存在显著的 10~30 d 周期。表明冬季 SH 与京津冀气温一样都存在 10~30 d 的低频周期。

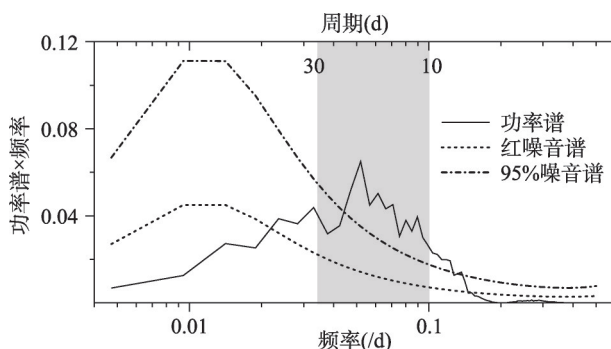


图 6 1981—2015 年冬季逐日 SH 指数平均功率谱

Fig. 6 Average power spectrum of daily SH index for the winter of 1981-2015

4.2 冬季 SH 的低频变化与京津冀低频气温及冷空气的关系

使用 Butterworth 滤波器对 1981—2015 年冬季逐日 SH 指数进行 10~30 d 带通滤波, 根据京津冀低频气温的位相划分法将 SH 的低频变化划分出 8 个位相 (图 4a)。低频 SH 各位相下冷空气过程的频数分布可以看出 (图 7), 第 2~5 位相易发生冷空气过程, 其中第 4 位相为最高发位相 (约 1/3 冷空气过程), 并且寒潮在第 4 位相出现频次尤其突出。可见, 京津冀冷空气过程主要发生在低频 SH 从峰值到零位相的下降阶段。低频 SH 与京津冀低频气温之间也表现出显著的超前滞后相关 (图 8a), SH 超前京津冀气温 2 d 时二者相关最强 (-0.72); SH 超前 10 d 时二者正相关达到最大 (0.46)。图 8b 为二者 16 d 低频周期变化示意图, 第 -4 d 时低频西伯利亚高压达到峰值, 2 d 后第 -2 d 时京津冀低频气温达到谷值; 图中加粗部分标出了京津冀冷空气过程多发阶段, 低频 SH 从峰值到零位相与低频气温从零位相到谷值的两个下降阶段是基本对应的, 都是京津冀冷空气过程的主要发生阶段。可见, 冬季 SH 的低频变化对京津冀气温的低频变化和冷空气过程都有很好的指示作用。

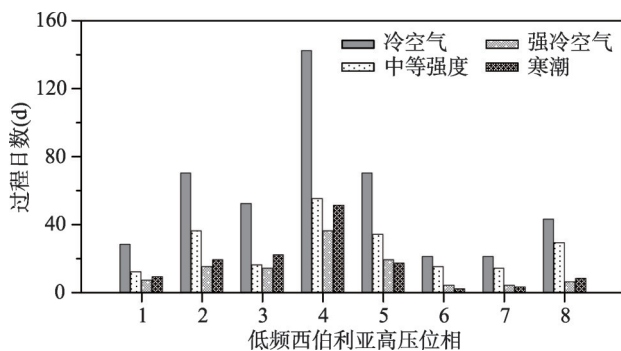
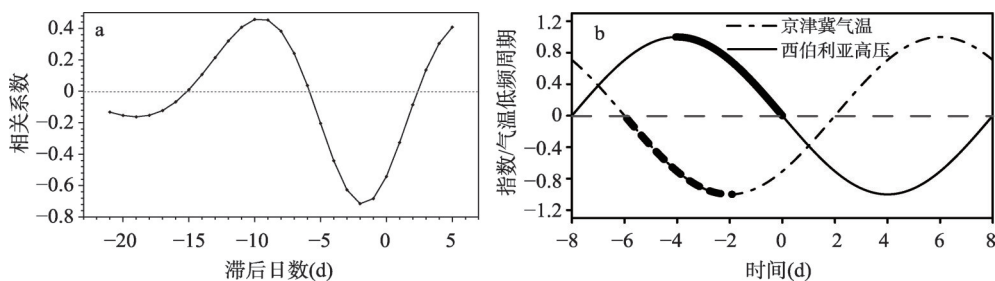


图 7 冷空气过程在低频 SH 各位相下的频次分布

Fig. 7 Cold air activity frequency for the 8 phases of the low frequency oscillation of the SH

4.3 冬季 SH 低频变化的中高纬异常环流背景

为了进一步探讨 SH 对京津冀低频气温和冷空气过程的影响途径, 将冬季逐日



注: a中滞后日数 <0 表示SH超前京津冀气温; b中加粗部分表示京津冀冷空气过程多发阶段。

图8 低频SH与京津冀气温低频周期的超前滞后相关及二者随时间变化示意图

Fig. 8 Lag correlation between the low-frequency oscillation of the SH and the BTH-region temperature

(a: lag <0 indicates that SH leads temperature); Daily variations of the low-frequency oscillations of the SH and the BTH-region temperature (b: based on the 16d period)

T995、SLP、V500的距平场分别在SH低频变化的各位相上进行合成(图9)。由于第2-5位相为京津冀冷空气过程的主要发生位相,为了了解中高纬大气环流异常逐步发展影响京津冀气温变化的整个过程,合成结果的分析将从第6位相开始,顺序为6-8→1-5。图9中虚线箭头标出低温异常的发展移动方向,实线椭圆标出500 hPa异常气旋的位置。在第6位相,广阔的异常低压和500 hPa上强大的异常气旋控制整个亚洲中高纬地区;气旋南部分布着大范围的异常高温区,而气旋北部的高纬地区有异常低温覆盖喀拉海及其以东地区。这种环流异常配置在第7-8-1位相下逐渐向东南传播,其中异常低压和气旋在第7位相增强而第8-1位相时迅速减弱缩小,高纬低温异常在此过程中持续增强增大。第1位相时环流异常明显转变,表现为异常低温区域有异常高压生成,此时中国大部地区仍处于异常低压和高温范围内。

第2位相时亚洲高纬的异常低温及生成于第1位相的异常高压迅速发展增强并向东南传播,控制整个亚洲中高纬地区,低温边缘开始影响京津冀北部;同时异常高压北部形成了新的异常高温和反气旋。此时中高纬减弱的异常气旋进一步向东南移动至蒙古到中国东北一带,该气旋在第3-5位相逐步东移到日本海上空,显示出东亚大槽的逐步加强。第3位相时亚洲中高纬的异常高压和反气旋大幅增强,异常高压伴随近地面低温异常在第3-5位相下持续向东南传播逐渐影响中国东部大部地区。在此过程中,异常高压东侧易受近地面层异常偏北气流影响而加速冷空气对京津冀的影响。第4位相时,京津冀地区位于异常高压中心东侧和500 hPa异常反气旋西侧,同时受近地面层和对流层中层异常北风控制,冷空气影响达到最强。第5位相与第1位相一样存在环流异常的明显转变,表现为亚洲中高纬异常高温的发展南移和异常低压的建立。

从各位相的环流异常演变可以看出,与京津冀气温低频变化的环流演变类似,随着SH的10-30 d低频变化,亚洲地区近地面层和中层大气环流异常都表现出自西北向东南方向的传播,且中高纬低温异常最早也出现在喀拉海附近地区。从SH的发展角度来看,第7-8位相为前期积累阶段,这期间亚洲高纬地区有500 hPa强气旋性环流异常维持,表明中层有持续的大气辐合,有利于该地区大气下沉形成地面高压;同时在亚洲高纬地区近地面有冷异常维持,持续冷却作用也有利于高压的形成。第1-2位相为异常高压形成和发展阶段,这期间亚洲中高纬出现异常高压中心并迅速发展加强,中层环流异常也随之迅速调整,形成异常反气旋。第3-5位相为异常高压南下影响京津冀的阶段,这期间异常高压中心与近地面异常低温快速南下,近地面层异常高压与中层加强的东亚大槽配

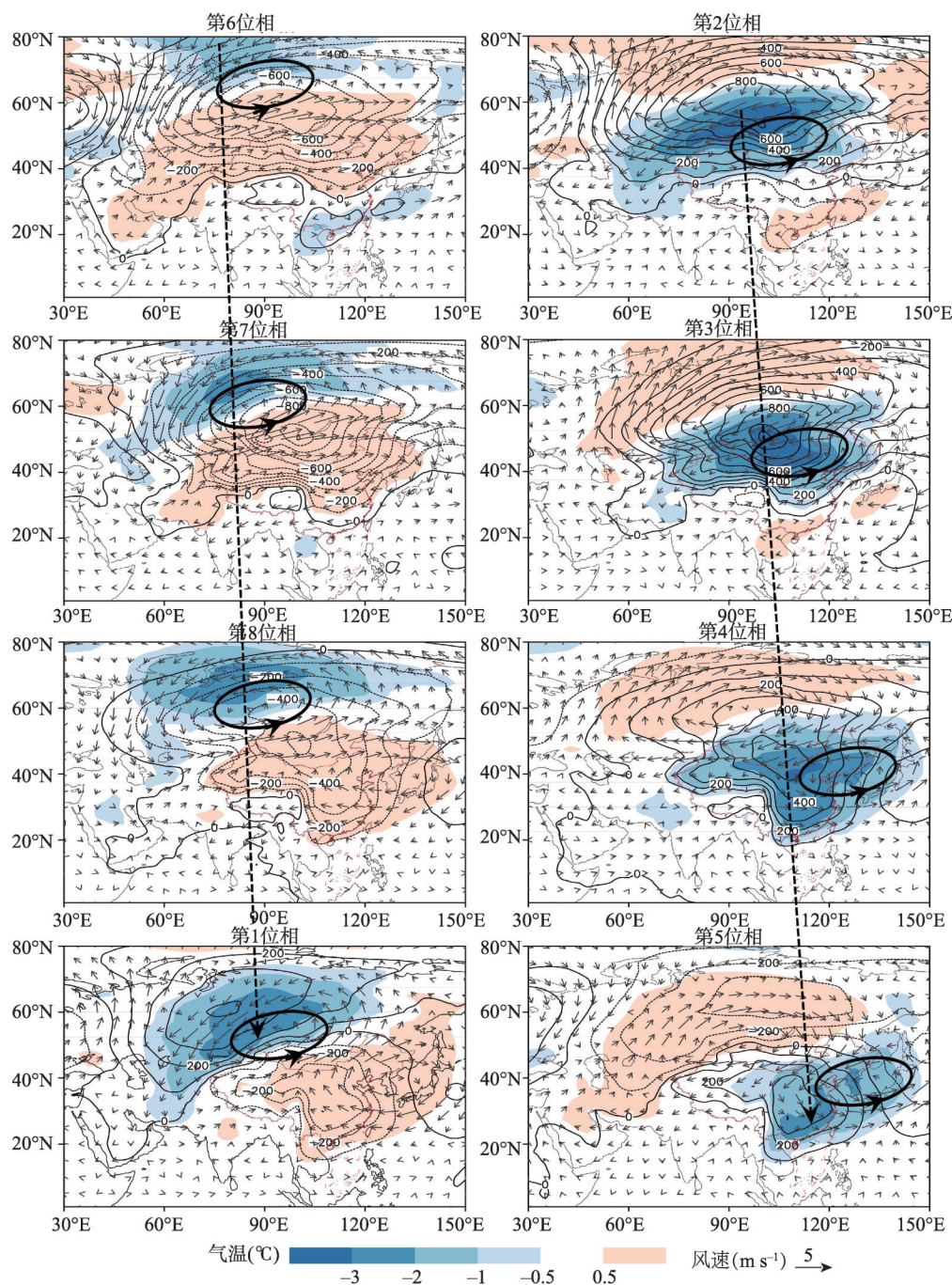


图9 逐日 SLP(等值线)、T995(阴影)和 V500(矢量)距平场随低频 SH 各位相的演变

Fig. 9 Composite distributions of winter-time daily anomalies of SLP (contour), T995 (shaded) and V500 (vector) for the 8 phases of low-frequency oscillation of the SH

合,使京津冀地区处于整层北风异常中,易形成冷空气过程。此外还可以看到,在近地面异常高压形成、发展和移动的过程中,中层异常反气旋始终位于高压东南侧,即传播的前进方向,可见,中层大气辐合区可能对异常高压的发展和移动存在引导作用。

5 结论与讨论

本文使用京津冀地区逐日气温和NCEP/NCAR再分析资料,分析了京津冀地区冬季冷空气过程的环流低频演变特征,讨论了SH的低频变化特征及其对京津冀冷空气过程的影响。得到如下主要结论:

(1) 京津冀冷空气过程在11月发生频次最高、强度最强,且1981—2015年京津冀地区的冷空气频次和强度都未表现出明显的降低。

(2) 冬季京津冀气温和SH都存在10~30 d显著低频周期,且低频SH超前京津冀低频气温2 d(10 d)时二者负(正)相关达到最强。京津冀冷空气过程主要发生在低频气温从零位相到谷值的下降阶段,以及低频SH从峰值到零位相的下降阶段。

(3) 随着京津冀气温和SH的10~30 d低频变化,亚洲近地面到中层大气环流异常均表现出一个从西北向东南传播的低频变化周期。影响京津冀地区的低温异常最早出现在喀拉海附近并在亚洲高纬地区维持和积累,产生持续冷却作用;同时中层相应区域维持的强气旋性环流异常表明有持续的大气辐合,中层辐合下沉与近地面持续冷却作用配合形成近地面异常高压。异常高压伴随异常低温南下过程中与中层加强的东亚大槽配合,使京津冀地区处于整层北风异常中,易形成冷空气过程。

本文着重探讨了亚洲中高纬环流低频变化对京津冀地区气温和冷空气活动的影响,然而由于中高纬低频环流本身的复杂性,其动力机制仍然是低频振荡研究中的难点问题,与热带大气低频振荡机制的研究相比还十分欠缺。研究认为,中高纬低频振荡的主要动力机制是大气非线性相互作用、外源强迫和基本气流的不稳定^[41-43],但具体的物理过程以及它们在激发中高纬低频振荡中的贡献大小仍然需要进一步深入研究。Takaya等^[44]针对SH季节内变化的动力机制分析表明,高空定常Rossby波列中的位涡分量以及地面冷异常对SH的季节内增强至关重要,与本文的结论有较好的一致性。另外,本文发现影响京津冀并对SH加强有重要影响的低温异常最早出现在北极地区的喀拉海附近,与北极地区的大气异常必然联系紧密,而北极涛动作为北极乃至北半球中高纬大气变率的重要模态,其低频变化及对京津冀所在地区的延伸期天气气候异常也值得继续研究讨论。

参考文献(References)

- [1] Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Shen Baizhu, et al. A comparative study of the climatic characteristics of the periods of frequent occurrence of the regional extreme low temperature events in China in the recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(6): 1061-1073. [王晓娟, 龚志强, 沈柏竹, 等. 近50年中国区域性极端低温事件频发期的气候特征对比分析研究. *气象学报*, 2013, 71(6): 1061-1073.]
- [2] Jiang Qi, Ma Xuekuan, Wang Fei. Analysis of the January 2016 atmospheric circulation and weather. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(4): 514-520. [江琪, 马学款, 王飞. 2016年1月大气环流和天气分析. *气象*, 2016, 42(4): 514-520.]
- [3] Wang Zhaosheng, Liu Xiaodong. Influences of East Asian cold surge on air quality in China in winter time//Chinese Society for Environmental Sciences. Annual Symposium of Chinese Society for Environmental Sciences, 2015. 2015: 3047-3054. [王昭生, 刘晓东. 冬半年东亚寒潮对中国区域空气质量的影响//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集2015. 2015: 3047-3054.]
- [4] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(5): 702-708.
- [5] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40-50 day variations in atmospheric angular momentum. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(6): 1584-1591.
- [6] Yang J, Wang B, Wang B, et al. Biweekly and 21-30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the lower reach of the Yangtze River basin. *Journal of Climate*, 2010, 23(5): 1146-1159.
- [7] Wang L, Li T, Zhou T J, et al. Origin of the intraseasonal variability over the North Pacific in boreal summer. *Journal of*

- Climate, 2013, 26(4): 1211-1229.
- [8] Li Chongyin. Global characteristics of 30-60 day atmospheric oscillation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1991, 15(3): 66-76. [李崇银. 30-60天大气振荡的全球特征. 大气科学, 1991, 15(3): 66-76.]
- [9] Chatterjee P, Goswami B N. Structure, genesis and scale selection of the tropical quasi-biweekly mode. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(599): 1171-1194.
- [10] Li T, Zhou C H. Planetary scale selection of the Madden-Julian oscillation. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(8): 2429-2443.
- [11] Yang Hui, Li Chongyin. A study of propagation of tropical intraseasonal oscillation and its influence mechanism. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(2): 145-156. [杨辉, 李崇银. 热带大气季节内振荡的传播及影响因子研究. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 145-156.]
- [12] Li T. Recent advance in understanding the dynamics of the Madden-Julian oscillation. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(1): 1-33.
- [13] Tong H W, Chan J C L, Zhou W. The role of MJO and mid-latitude fronts in the South China Sea summer monsoon onset. Climate Dynamics, 2009, 33(6): 827-841.
- [14] Singh M, Bhatla R, Pattanaik D R. An apparent relationship between Madden-Julian Oscillation and the advance of Indian summer monsoon. International Journal of Climatology, 2017, 37(4): 1951-1960.
- [15] Jee H J, Chang H H, Baek M K, et al. Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D11): D11104.
- [16] Matsueda S, Takaya Y. The global influence of the Madden-Julian oscillation on extreme temperature events. Journal of Climate, 2015, 28(10): 4141-4151.
- [17] Dahlqvist A. Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. Geophysical Research Letters, 2006, 33(9): 72-88.
- [18] Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in Southeast China. Journal of Climate, 2009, 22(2): 201-216.
- [19] Han Rongqing, Li Weijing, Dong Min. A diagnostic study of the temporal and spatial characteristics of the intraseasonal oscillation over the subtropical northern Pacific. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(4): 520-528. [韩荣青, 李维京, 董敏. 副热带北太平洋大气季节内振荡时空特征的诊断研究. 气象学报, 2010, 68(4): 520-528.]
- [20] Han R Q, Li W J, Dong M. Impacts of 30-60-day oscillations over the subtropical Pacific on the East Asian summer rainfall. Journal of Meteorological Research, 2006, 20(4): 459-474.
- [21] Chen J P, Wen Z P, Wu R G, et al. Influences of northward propagating 25-90-day and quasi-biweekly oscillations on eastern China summer rainfall. Climate Dynamics, 2015, 45(1/2): 105-124.
- [22] Ju Jianhua, Qian Cheng, Cao Jie. The intraseasonal oscillation of East Asian summer monsoon. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 187-194. [据建华, 钱诚, 曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究. 大气科学, 2005, 29(2): 187-194.]
- [23] Lau W K M, Waliser D E. Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 63-90.
- [24] Su Tonghua, Xue Feng, Chen Minyan, et al. A Mechanism study for the intraseasonal oscillation impact on the two northward jumps of the Western Pacific subtropical high. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(3): 437-460. [苏同华, 薛峰, 陈敏艳, 等. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制. 大气科学, 2017, 41(3): 437-460.]
- [25] Ju Jianhua, Sun Dan, Lv Junmei. The influence of the East Asian monsoon stream on the large-scale precipitation course in eastern China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1129-1139. [据建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析. 大气科学, 2007, 31(6): 1129-1139.]
- [26] Xu Jianjun, Lin Chunyu. The teleconnection structure and the evolution feature of 30-50 day oscillation of 500hPa height field during Northern Hemisphere winter. Journal of the Meteorological Sciences, 1991, 11(1): 11-20. [徐建军, 林春育. 冬季500百帕高度场的30~50天振荡的遥相关结构及其演变特征. 气象科学, 1991, 11(1): 11-20.]
- [27] Murakami T. Winter Monsoonal surges over East and Southeast Asia. Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II, 1979, 57(2): 133-158.
- [28] Jin Zuhui, Sun Shuqing. The characteristics of low frequency oscillations in winter monsoon over the Eastern Asia. Scientia Atmospherica Sinica, 1996, 20(1): 101-111. [金祖辉, 孙淑清. 东亚大陆冬季风的低频振荡特征. 大气科学, 1996, 20(1): 101-111.]
- [29] Qi Dongmei, Li Yaoqing, Chen Yongren, et al. Submonthly timescales oscillation characteristics of the East Asian

- winter monsoon and its effect on the temperature in Southwest China: A case study in 2010. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 32(1): 19-30. [齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 2010年东亚冬季风月内尺度振荡特征及其与西南地区冬季气温的关系. *热带气象学报*, 2016, 32(1): 19-30.]
- [30] Yang S Y, Li T. The role of intraseasonal variability at mid-high latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(Suppl.1): 1248-1256.
- [31] Ding Yihui. The Propagation of the winter monsoon during cold air outbreaks in East Asia and the associated planetary-scale effect. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1991, 2(2): 124-132. [丁一汇. 东亚寒潮冷空气的传播和行星尺度作用. *应用气象学报*, 1991, 2(2): 124-132.]
- [32] Ma Xiaoping, Ding Yihui, Xu Haiming, et al. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 380-394. [马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2004/2005年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究. *大气科学*, 2008, 32(2): 380-394.]
- [33] Miao Qing, Gong Yuanfa, Bai Zibin. Characteristics of low-frequency oscillations during cold waves in winter 2011/2012 and its coupling with the low-frequency system at 500 hPa. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(5): 609-619. [苗青, 巩远发, 白自斌. 2011/2012年冬季寒潮低频特征及其与500 hPa低频系统的耦合关系. *大气科学学报*, 2016, 39(5): 609-619.]
- [34] Miao Qing, Gong Yuanfa, Deng Ruijie, et al. Impacts of the low-frequency oscillation over the extra-tropics of the Northern Hemisphere on the extreme low temperature event in Northeast China in the winter of 2012/2013. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(4): 817-830. [苗青, 巩远发, 邓锐捷, 等. 北半球中高纬度低频振荡对2012/2013年冬季中国东北极端低温事件的影响. *大气科学*, 2016, 40(4): 817-830.]
- [35] Zhu Yuying, Jiang Jing. The intraseasonal characteristics of winter time persistent cold anomaly in China and the role of low frequency oscillation in the low latitude and midlatitude. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013, 29(4): 649-655. [朱毓颖, 江静. 中国冬季持续性低温事件的低频特征以及中低纬大气低频振荡对其的影响. *热带气象学报*, 2013, 29(4): 649-655.]
- [36] Yang S Y, Li T. Intraseasonal variability of air temperature over the mid-high latitude Eurasia in boreal winter. *Climate Dynamics*, 2016, 47(7/8): 2155-2175.
- [37] Yao S X, Sun Q F, Huang Q, et al. The 10-30-day intraseasonal variation of the East Asian winter monsoon: The temperature mode. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2016, 75: 91-101.
- [38] Wang L, Chen W, Zhou W, et al. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(1): 153-158.
- [39] Li Weijing, Li Yi, Chen Lijuan, et al. Inter-decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(4): 385-396. [李维京, 李怡, 陈丽娟, 等. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 385-396.]
- [40] Kalnay E, Kanamitus M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-471.
- [41] Luo D H, Li C Y. *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 111-122.
- [42] Li Chongyin, Long Zhenxia, Mu Mingquan. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 518-535. [李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用. *大气科学*, 2003, 27(4): 518-535.]
- [43] Zhang Kesu. The 40-50 day low-frequency oscillation of the zonal mean flow and its destabilizing effect. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 11(3): 227-236. [张可苏. 40~50天的纬向基流低频振荡及其失稳效应. *大气科学*, 1987, 11(3): 227-236.]
- [44] Takaya K, Nakamura H. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian High. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(12): 4423-4440.

Low-frequency characteristics of winter-time cold air activity in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the impacts of low-frequency variation of the Siberian High

MA Ning, HE Liye, LIANG Sujie, GUO Jun

(Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The characteristics of low-frequency oscillation of the cold air activity in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in boreal winter and the impacts of the low-frequency characteristics of the Siberian High (SH) on them are investigated, using daily temperature observational data and NCEP/NCAR reanalysis data with a time span covering 1981-2015, based on power spectrum and composite analysis methods. The results show that both the daily temperature in the BTH region and the SH have a dominant period of 10-30 days in both daily temperature in the BTH region and the SH, and there exist significant lead-lag correlations between the low frequency oscillations of them. The cold surges in the BTH region mainly occur during the descending phase from the zero position to the trough of the low-frequency oscillation of temperature and the descending phase from the peak to the zero position of the low-frequency oscillation of the SH. A low-frequency cycle of abnormal atmospheric circulation propagating from Northwest Asia to Southeast Asia appears near the surface and in the middle layer, along with the low-frequency oscillations of the temperature in the BTH region and the SH. The abnormally low temperature, which affects the BTH region, originates near the Kara Sea and accumulates at the high latitudes of Asia, where a cooling effect is produced continuously. Meanwhile, marked convergent subsidence occurs in the middle layer, owing to the atmospheric convergence caused by the abnormal cyclone at the high latitudes of Asia. The combined effect of the convergent subsidence in the middle layer and the persistent cooling near surface results in an abnormal high, which later enhances and moves southward with the abnormally low temperature near surface. The East Asian Trough in the middle layer intensifies as this abnormal high moves southward, which brings deep-layer northerly wind to the BTH region. As a result, the cold air activity in the BTH region is intensified.

Keywords: cold air in the Beijing-Tianjin-Hebei region; Siberian High; low-frequency oscillation; atmospheric convergence