

周星妍, 朱伟军, 顾聪. 2015. 冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响 [J]. 大气科学, 39 (5): 978–990. Zhou Xingyan, Zhu Weijun, Gu Cong. 2015. Possible influence of the variation of the northern Atlantic storm track on the activity of cold waves in China during winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 978–990, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14259.

冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响

周星妍 朱伟军 顾聪

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 基于 1961~2011 年国家气象信息中心整编的 566 站逐日平均温度资料以及 NCEP/NCAR (美国环境预报中心和国家大气研究中心) 的逐日再分析资料等, 利用奇异值分解 (SVD) 等方法, 首先分析了年际尺度上冬季北大西洋风暴轴与同期我国寒潮频次的联系。发现, 北大西洋风暴轴位置异常与我国寒潮频次变化存在显著的相关关系, 即当在 40°W 以西风暴轴较气候平均位置偏北 (偏南) 和在 40°W 以东风暴轴较气候平均位置偏东北 (偏西南) 时, 同期我国大部分地区的寒潮频次异常偏少 (偏多), 而其强度异常与我国寒潮频次变化的年际关系并不显著。进一步的分析结果表明, 风暴轴位置的改变会引起天气尺度瞬变涡动的传播出现异常, 而这种传播异常既可以直接影响我国寒潮活动, 也可以通过其反馈作用影响大气环流来间接影响我国的寒潮活动。具体的可能影响过程如下: 当风暴轴偏东北 (偏西南) 时, 其离亚洲西风急流的位置较远 (较近), 不利 (有利) 于将北大西洋上强的瞬变涡动通过亚洲西风急流波导直接传播到我国地区; 此时, 北大西洋西风急流偏北 (偏南), 相应地北大西洋涛动 (NAO) 出现正 (负) 位相异常, 而传播到下游的瞬变涡动通过动力反馈作用, 可使得高纬西风加速 (减速), 极涡加深收缩 (减弱扩张), 冷空气禁锢在极地不易 (容易) 南下, 而中纬西风则减速 (加速), 经向环流加强 (减弱), 从而引起西伯利亚低层冷堆温度增高 (降低); 最后, 所有上述环流异常形势以及瞬变波的异常传播可最终导致我国的寒潮活动频次减少 (增多)。

关键词 北大西洋风暴轴异常 我国寒潮频次 相关关系 影响机制

文章编号 1006-9895(2015)05-0978-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14259

Possible Influence of the Variation of the Northern Atlantic Storm Track on the Activity of Cold Waves in China during Winter

ZHOU Xingyan, ZHU Weijun, and GU Cong

Key Laboratory of Meteorological Disaster (Nanjing University of Information Science & Technology), Ministry of Education, Nanjing 210044

Abstract On the basis of daily mean temperature data from 566 National Meteorological Information Center stations and National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data during 1961–2011, an investigation was conducted into the relationship between the variation of the winter North Atlantic Storm Track (NAST) and the frequency of cold waves in China on the annual timescale. The results from singular value decomposition analysis show that, on the annual timescale, the position of the NAST is closely linked to the cold wave frequency in winter: When the NAST moves northeastward (southwestward), the cold wave frequency at most stations decreases (increases) significantly, but the correlation between the intensity of the NAST and the cold wave frequency is low. Further analysis indicates that change in the NAST position may lead to anomalous propagation of the

收稿日期 2014-09-06; **网络预出版日期** 2015-02-03

资助项目 国家自然科学基金项目41575070、41075070, 公益性行业 (气象) 科研专项GYHY201306028, 江苏高校优势学科建设工程资助项目PAPD

作者简介 周星妍, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气环流异常及短期气候预测研究。E-mail: zhouxingyanfang@163.com

通讯作者 朱伟军, E-mail: weijun@nuist.edu.cn

Synoptic-Scale Transient Eddy Activity (STEa). This could not only affect the cold air activity of China directly, but, after first having an impact on the general circulation via feedback, it could also have an indirect influence. The possible mechanism of influence is as follows: As the NAST shifts more northeastward (southwestward), it is far from (close to) the Asian westerly jet, which is unfavorable (favorable) for the direct propagation of strong STEa over the North Atlantic region via this westerly waveguide all the way to China. Meanwhile, the North American westerly jet shifts more northward (southward) and the index of the North Atlantic Oscillation is in its positive (negative) phase. Via propagation, the downstream STEa could cause the divergence (convergence) of horizontal Eliassen-Palm fluxes over high latitudes and the convergence (divergence) over mid-latitudes, which in turn will cause acceleration (deceleration) of the westerly over high latitudes and deceleration (acceleration) of the westerly over mid-latitudes. As a result, the polar vortex will (will not) be confined to the polar region so that the cold air will uneasily (easily) move southward, and then the temperature of the low-level cold mass over the Siberian high will increase (decrease). All of the above anomalies occurring in the circulation and propagation of STEa may ultimately contribute to the reduction (enhancement) of the cold wave frequency at most stations in China.

Keywords North Atlantic storm track anomaly, Cold wave frequency in China, Correlation, Influence mechanism

1 引言

寒潮作为冬半年影响我国的主要极端天气事件一直受到学者的高度关注,从天气学意义上讲,冬季我国的寒潮活动是由欧亚大陆的天气尺度涡动直接影响的,但是北半球冬季天气尺度涡动最强烈的区域并不在欧亚大陆,而是分别位于中纬度的北太平洋和北大西洋上,又被称为北大西洋风暴轴和北太平洋风暴轴(Blackmon, 1976; Blackmon et al., 1977; Lau, 1978, 1979)。显然,其异常,特别是上游北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的影响也不可忽视。

已有研究表明,冬季北大西洋风暴轴存在显著的月际变化、年际变化以及年代际变化(如 Lau, 1988; Rogers, 1997; 张颖娴等, 2012),并在 1970 年代初期,经历了由弱到强的位相转换(Chang and Fu, 2002, 2003; Harnik and Chang, 2003; Lee et al., 2011)。而北大西洋风暴轴的这种异常变化与北大西洋急流和北大西洋涛动(NAO)等大气环流异常有密切的联系,进而可以对北半球的天气气候产生重要影响(如 Rivière and Orlanski, 2007; Wettstein and Wallace, 2010)。目前,关于天气尺度瞬变涡动活动对东亚大气环流及我国天气气候的影响,主要集中在欧亚大陆上的天气尺度涡动异常和北太平洋风暴轴异常的影响方面(伊兰和陶诗言, 1997; 董丽娜等, 2006; 吴伟杰等, 2007; 任雪娟和张耀存, 2007, 任雪娟等, 2007, 2010; 梅士龙和管兆勇, 2008, 2009; 李湘等, 2010; Liao and Zhang, 2013; 顾沛澍等, 2013),而考虑上游北大西洋风暴轴异常对此影响的研究还比较少(陈海山等,

2012)。

我国寒潮活动变化及其成因是学者们关注的另一个热点问题。已有研究表明东亚急流、欧亚大陆积雪、西伯利亚高压、东亚冬季风、低频波动、西伯利亚上空低层冷堆温度、极涡、阻塞高压以及北极涛动(AO)等的异常变化,都有可能影响到我国的寒潮活动(如:仇永康等, 1992; 郭其蕴, 1994; 龚道溢和王绍武, 1999; 张培忠和陈光明, 1999; 陈文和康丽华, 2006; 李峰等, 2006; 王遵娅和丁一汇, 2006; 钱维宏和张玮玮, 2007; 施晓晖等, 2007; 魏凤英, 2008; 马晓青等, 2008; 康志明等, 2010; 武炳义等, 2011; 叶丹和张耀存, 2014; 王林和陈文, 2014)。

以上分析表明,目前还几乎没有直接关于风暴轴异常与我国寒潮活动之间联系方面的研究。因此,本文将在已有研究的基础上,主要考察 1961~2011 年期间年际尺度上北大西洋风暴轴异常与我国冬季寒潮活动的联系及其可能的影响机制,这对深入理解我国寒潮活动的机理及提高其预测水平,具有重要的科学意义和应用价值。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所用台站资料来源于国家气象信息中心整编的 756 站 1961~2011 年逐日平均温度数据。在分析中为了保证资料的连续性和准确性,只保留了不缺测且海拔低于 2500 m 的 566 个站点。格点资料取自美国环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR),其中包括逐月的海平面气压场(p)、温度场(T),逐月和逐日的高度场(z)、风

场 (u, v), 垂直层数有 17 层, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 覆盖时间为 1961 年 1 月~2011 年 12 月。冬季 NAO 指数来源于美国气候预报中心 (CPC), 冬季极涡面积指数来源于国家气候中心。

本文研究时段为 1961~2010 年冬季, 如无特殊说明, 文中冬季定义为从当年 12 月到下一年 2 月的平均。

2.2 方法

本文采用 31 点数字滤波器 (孙照渤, 1992), 从逐日原始资料直接滤出 2.5~6 d 的瞬变涡动, 然后每个月为一段, 对每一段各自计算其方差, 得到每月的月平均天气尺度滤波方差 (以下简称滤波方差)。已有研究表明, 月风暴轴的位置和强度可以用 500 hPa 位势高度场的这种滤波方差来表示 (Blackmon et al., 1977; Lau, 1978), 因而后文有关风暴轴的分析就主要针对 500 hPa 位势高度场的滤波方差来进行。

文中采用的是中央气象台的单站寒潮标准, 即以过程降温 ($\geq 10^\circ\text{C}$) 与温度负距平 ($\leq -5^\circ\text{C}$) 相结合来定义寒潮活动。其中, 过程降温是指单站冷空气影响过程中, 日平均气温最高值与最低值之差; 温度距平指冷空气影响过程中单站最低日平均气温与该日所在旬多年旬平均气温之差。每个单站每年冬季寒潮频次为该站当年冬季 3 个月份寒潮频次的和。

此外, 本文还应用了奇异值分解 (SVD)、合成分析以及显著性检验等常见的气象统计方法 (Storch and Zwiers, 1999), 在此不再赘述。

3 冬季北大西洋风暴轴异常与我国寒潮频次的相关关系

3.1 冬季北大西洋风暴轴的气候平均及时间变化特征

图 1a 为 1961~2010 年 50 个冬季平均的 500 hPa 位势高度滤波方差场。从中可以看到, 位势高度滤波方差的极大值分布在中纬度的北大西洋上, 略呈东北至西南走向, 这正是冬季北大西洋风暴轴的气候平均状况。参照李莹等 (2010) 对北太平洋风暴轴特征指数的定义方法, 本文取北大西洋及其周边区域 ($30^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{W} \sim 40^\circ\text{E}$) 冬季 500 hPa 位势高度滤波方差大于 16 dagpm^2 的所有格点滤波方差的平均值以及满足上述条件所有格点的经度平均和纬度平均分别定义为冬季北大西洋风暴轴

的强度指数 (NASTI)、经度指数 (NASTX) 和纬度指数 (NASTY)。图 1b、c、d 为 3 个指数的时间演变曲线, 由图可知, 冬季北大西洋风暴轴气候主体区的平均强度、经度以及纬度位置具有明显的年际变化和年代际变化, 其中, 风暴轴气候主体区平均强度最高可达 34.1 dagpm^2 , 最低只有 20.5 dagpm^2 , 平均纬度变化范围在 $36^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 之间, 平均经度变化范围在 $60^\circ\text{W} \sim 25^\circ\text{W}$ 之间。此外, NASTY 与 NASTX 之间的相关系数高达 0.66, 远远超过 99% 信度检验, 表明冬季北大西洋风暴轴的经向变化和纬向变化同步性较强, 而 NASTI 与 NASTY、NASTX 的相关系数分别为 -0.03、0.22, 都没有通过 90% 信度检验, 说明冬季北大西洋风暴轴主体强度变化与位置变化的相关性较差。

3.2 SVD 分析结果

为了直接找到冬季北大西洋风暴轴和我国寒潮频次的耦合相关型, 在此将冬季北大西洋区域 ($30^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{W} \sim 40^\circ\text{E}$) 500 hPa 位势高度滤波方差作为左场, 同期我国 566 站寒潮频次作为右场, 进行 SVD 分析。考虑到风暴轴和寒潮活动都存在年际和年代际两种不同时间尺度的变化, 而本文主要是分析两者年际时间尺度上的联系, 因此在做 SVD 分析之前, 首先利用 11 点高斯滤波提取出这些样本的年代际变化分量, 再将原始场减去年际变化分量从而得到所需的年际变化分量。

首先, 图 2a、c、e 给出的是年际尺度上冬季 500 hPa 位势高度滤波方差场与同期我国寒潮频次场 SVD 分解第一模态时空分布 (SVD1), 它解释了总协方差的 46.54%。从图 2a 的滤波方差场空间分布特征来看, 在 45°N 左右以北和以南, 北大西洋风暴轴区域分别为显著的正相关和负相关, 进一步结合略呈东北—西南走向的风暴轴的气候平均位置来看, 在 40°W 以西, 风暴轴气候平均位置以北和以南出现正、负反相关, 而在 40°W 以东, 则是风暴轴气候平均位置偏东北和偏西南出现正、负反相关; 而与之对应的寒潮频次场上 (图 2c), 大部分区域都为显著的负相关, 尤其是我国东部以及新疆部分地区。

进一步分析可见, SVD1 模态左右场时间系数 (图 2e) 间的相关系数达 0.64, 其中左场的时间系数与 NASTY 和 NASTX 的年际变化分量的相关系数分别达 0.78 和 0.61, 都远远超过 99% 信度检验, 而与 NASTI 的相关系数很弱, 只有 0.01。若将

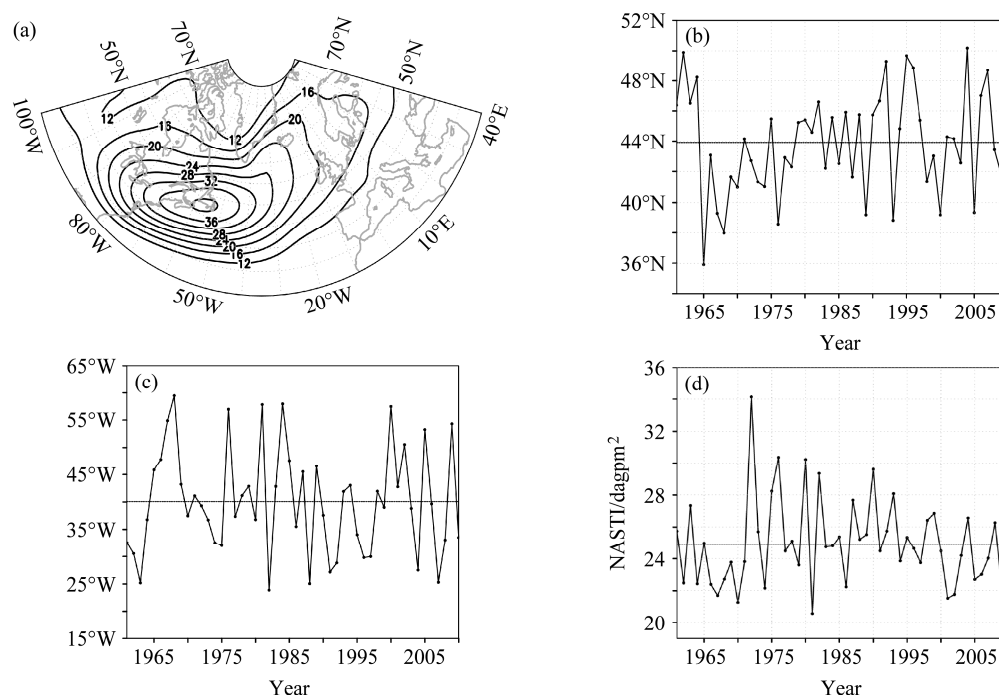


图1 冬季北大西洋风暴轴的(a)气候平均分布(等值线间隔为4.0 dagpm²)以及其气候主体区(>16 dagpm²)、(b)纬度指数、(c)经度指数、(d)强度指数的时间演变曲线。(b-d)图中水平线代表平均值

Fig. 1 (a) The spatial distribution of the climatological mean of winter storm track in the North Atlantic (contour interval: 4.0 dagpm²) and the time series of the indexes of (b) NASTY (North Atlantic Storm Track Y), (c) NASTX (North Atlantic Storm Track X), and (d) NASTI (North Atlantic Storm Track Intensity) in winter. The horizontal lines in Figs. b-d are the average values

NASTY 与 NASTX 的年际变化分量与寒潮频次的年际变化场分别求相关的话, 都可以得到与 SVD1 右场相似的分布(图略), 其中纬度指数通过显著性检验的区域范围要比经度指数的范围大, 但都比 SVD1 右场的显著范围小。

以上结果表明, SVD1 模态主要揭示的是冬季北大西洋风暴轴的位置异常(而不是强度异常)与我国寒潮频次异常的耦合变化关系, 具体反映的是在 40°W 以西风暴轴较气候平均位置偏北(偏南)和在 40°W 以东风暴轴较气候平均位置偏东北(偏西南)与同期我国大部分地区、尤其是我国东部以及新疆部分地区的寒潮频次异常偏少(偏多)的反位相变化关系。

其次, 图 2b、d、f 给出的是年际尺度上冬季 500 hPa 位势高度滤波方差场与同期我国寒潮频次场 SVD 分解第二模态时空分布(SVD2), 它解释了总协方差的 9.39%。从滤波方差场(图 2b)的分布特征来看, 在 60°W 左右以东, 风暴轴的气候平均位置处及以南分别存在一个明显的正、负异常中心, 而在 60°W 左右以西, 风暴轴的气候平均位置

附近为一弱的负相关中心, 平均位置以南和以北则为明显的正相关中心。而与之对应的寒潮频次场(图 2d)上, 除东北北部以及新疆小部分地区为明显的负相关外, 其余地区都为较弱的正相关。

进一步分析可知, SVD2 模态左右场时间系数(图 2f)间的相关系数为 0.61, 其中左场的时间系数与 NASTI 和 NASTX 的年际变化分量的相关系数分别达 0.72 和 0.49, 都通过了 99% 的信度检验, 而与 NASTY 的相关系数相对较弱, 不过也有 0.27, 可以通过 95% 的信度检验。若将 NASTI 的年际变化分量与寒潮频次的年际变化场求相关的话, 可以发现其分布与 SVD2 右场非常类似(图略), 不过东北北部以及新疆小部分地区区域的负相关系数没通过信度检验。

因此, SVD2 模态主要揭示的是冬季北大西洋风暴轴的强度异常与我国寒潮频次异常的耦合变化关系, 但两者的相关关系并不显著, 而且较大程度上还受到风暴轴位置异常的影响, 其协方差贡献率也较小, 远小于 SVD1 模态的贡献率, 因而在年际变化尺度上, 冬季北大西洋风暴轴异常与我国寒

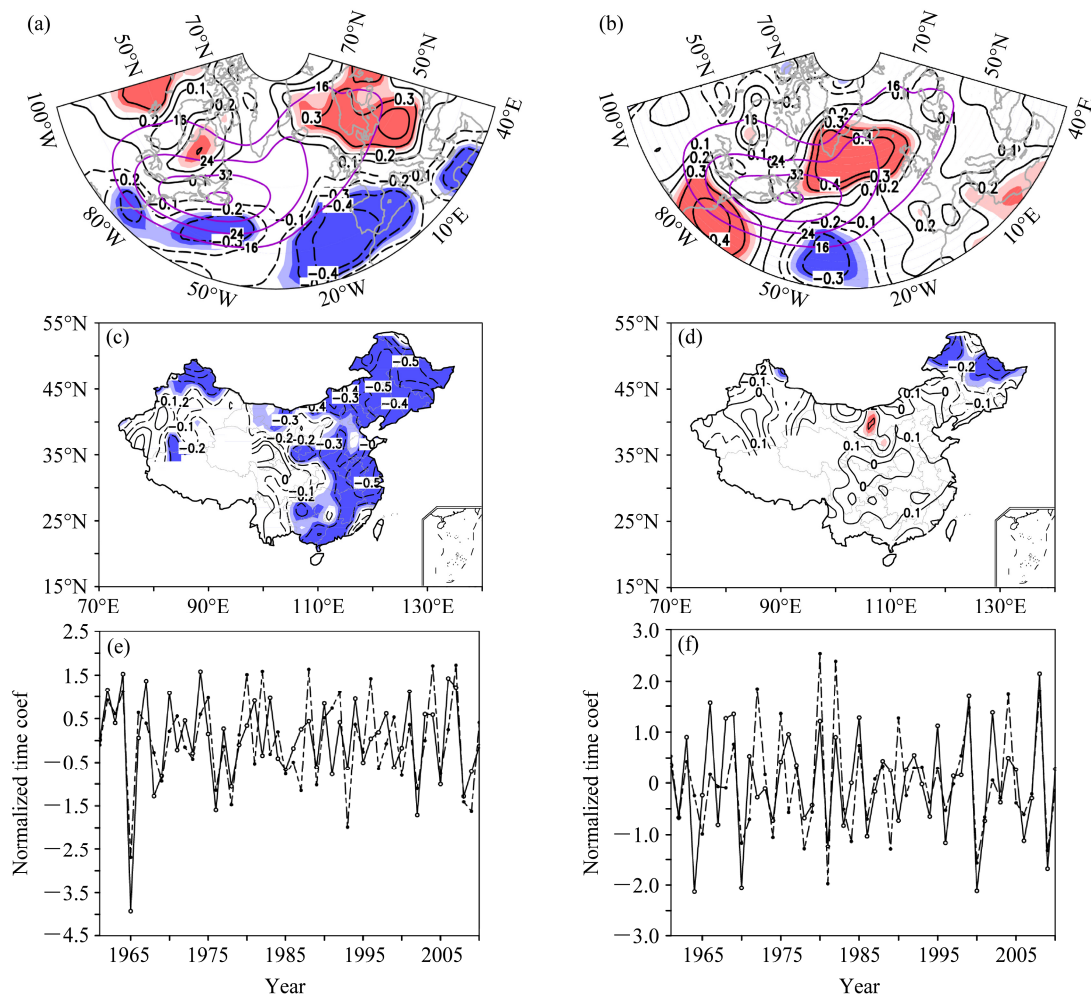


图2 1961~2010 年年际尺度上冬季北大西洋风暴轴区域 500 hPa 天气尺度的位势高度滤波方差与同期我国 566 站寒潮频次 SVD 分解的 (a、c、e) 第一对、(b、d、f) 第二对的 (a、b、c、d) 异类空间分布型及其 (e、f) 对应的时间系数。其中, 图 a、b、c、d 中的红、蓝色深(浅)阴影表示通过 95%(90%) 的信度检验, 实(虚)线代表正(负)值; 图 a、b 中紫色实线代表气候平均冬季北大西洋风暴轴的分布; 图 e、f 中的虚、实线分别表示滤波方差场和寒潮频次场的标准化时间系数

Fig. 2 (a–d) Spatial patterns and (e, f) the corresponding normalized time coefficients for (a, c, e) the first and (b, d, f) second SVD modes of (a, b) 500-hPa filtered potential height variance in the North Atlantic region and (c, d) cold wave frequency at 566 stations in winter during 1961–2010. In (a–d), the dark (light) shaded areas represent above 95% (90%) confidence level, the solid (dashed) lines denote positive (negative) values; the purple lines in (a, b) represent the spatial distribution of the climatological mean winter storm track in the North Atlantic; the dashed (solid) lines in (e, f) denote the normalized time coefficients of the filtered variance (cold wave frequency) field

潮频次的耦合关系以 SVD1 模态为主, 而 SVD2 模态可以忽略。

最后, 值得指出的是, 本文取自中央气象台的单站寒潮标准可能会对南方的寒潮过程频次产生一定的扭曲, 但就上述 SVD1 模态所显示的结果来看, 应该对本文相关关系结果的定性结论影响不大。此外, 为了检验此处及后文使用 NCEP/NCAR 资料所得结果是否稳定, 还利用欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 的 ERA-Interim 资料进行了同样

的分析, 对比后发现结果是一致的。

4 冬季北大西洋风暴轴异常影响我国寒潮活动的可能机制

下面将上节 SVD1 模态所揭示的风暴轴位置异常作为影响我国寒潮频次的因子, 利用合成分析等方法来探讨一下其可能的影响机制。首先将 SVD1 模态左场时间系数进行标准化, 然后挑选出值大于 1.0 的年份简称为风暴轴偏东北年, 而小于

-1.0 的年份简称为风暴轴偏西南年, 从而得到以下北大西洋风暴轴偏东北年 8 年: 1964、1980、1982、1988、1992、1996、2004、2007 年; 偏西南年 8 年: 1965、1976、1978、1987、1993、2002、2008、2009 年。

4.1 风暴轴异常所对应的大气环流异常

图 3a 为冬季北大西洋风暴轴偏东北年减去偏西南年 500 hPa 位势高度差值场。由图可见, 在中纬度地区, 东西向法国以西、乌拉尔山地区和贝加尔湖上空分别有正—负—正的异常值分布, 这三个异常区域正好分别对应着冬季西风带上的西欧沿岸脊、欧洲东部槽以及贝加尔湖脊, 这有利于气候态平均槽脊的加深加强, 同时也有利于欧亚大陆中纬度上空经向环流的加强。而在高纬地区, 都为负的异常值分布, 这意味着极涡的加强, 进一步计算 SVD1 模态左场时间系数与冬季北半球极涡面积指数年际变化分量的相关系数后可知, 相关系数达 -0.47, 可通过 99% 的信度检验, 这表明冬季北大西洋风暴轴偏东北时, 有利于极涡收缩, 面积减小, 因而冷空气禁锢在高纬地区不易南下。

此外, 值得注意的是, 在北大西洋区域南北向有一对明显的正负异常中心, 正异常中心位于中纬度北大西洋中东部, 负异常中心位于格陵兰岛附近, 这与 NAO 正位相非常类似, 事实上 SVD1 模态左场时间系数与冬季 NAO 指数年际变化分量的相关系数可达 0.38, 通过了 99% 的信度检验, 因此北大西洋风暴轴偏东北时可能有助于 NAO 正位相产生或者加强。以往的研究 (武炳义和黄荣辉, 1999; Watanabe, 2004; 顾思南和杨修群, 2006 等) 表明, 冬季 NAO 正位相和极涡收缩时, 东亚地区将会异常增暖, 影响我国的冷空气活动较为不活跃, 我国寒潮频次会有所减少。

图 3b、c 分别为冬季北大西洋风暴轴偏东北年与偏西南年 500 hPa 纬向风差值场和 300 hPa 纬向风差值场, 由图可以看到, 当北大西洋风暴轴偏东北时, 北大西洋地区南北向存在明显的正负正异常中心, 其中一条零线正好位于两层北大西洋急流所在的气候平均位置, 并对应着位势高度场上 NAO 的正位相异常 (图 3a), 这有利于北大西洋对流层中高层急流向北移动 (Rivière and Orlanski, 2007; Luo et al., 2008)。此外, 在欧亚大陆北部存在一对强度稍弱且北正南负的异常中心, 从而形成一个反气旋式切变环流, 这种分布形式与东亚温带急流的

第一模态非常相似, 其形成主要受中高纬大气环流以及东亚上游大气环流的共同影响 (任雪娟等, 2010)。

进一步从冬季 850 hPa 温度差值场 (图 3d) 和海平面气压差值场 (图 3e) 上可以看到, 欧亚大陆总体呈现北正南负的温度异常分布形式, 西伯利亚存在一个明显的正温度异常区, 中心位于贝加尔湖北侧; 而此时, 海平面气压场则总体呈现北负南正的异常分布型态, 这有利于西伯利亚高压南移。因此, 冬季北大西洋风暴轴偏东北时, 高纬西风加速, 冷空气禁锢在极地不易南下, 中纬西风减速, 经向环流加强, 有利于将南部的暖湿空气输送到欧亚大陆北部, 导致西伯利亚低层冷堆温度升高。王遵亲 and 丁一汇 (2006) 研究指出, 冬季西伯利亚上空低层冷堆温度是影响我国寒潮活动的重要因子之一, 并且当冷堆温度偏高时, 我国冬季寒潮频次往往会偏少。

因此, 当冬季北大西洋风暴轴偏东北 (偏西南) 异常时, 所对应的大气环流异常形势都有利于我国寒潮频次的减少 (增加)。

4.2 风暴轴异常影响的可能机制

4.2.1 瞬变波的传播及反馈作用

虽然北大西洋风暴轴位于远离我国的上游地区, 但其异常可以通过瞬变波列向下游传播的形式来直接影响我国天气及气候。因此, 下面将重点对比分析北大西洋风暴轴偏东北年、偏西南年瞬变波的传播情况。

图 4a 为北大西洋风暴轴偏东北年 300 hPa 天气尺度瞬变经向风 v' 的分布。由图可见, 瞬变涡动主要集中在大西洋上, 在欧亚大陆地区, 偏南波列强度很弱, 几乎可以忽略不计, 高纬地区的偏北波列则较为完整, 途经东欧平原、西西伯利亚、东西伯利亚、俄罗斯东南部, 随后东移入海, 到达我国的瞬变涡动很少。而在北大西洋风暴轴偏西南年 (图 4b、c), 冬季欧亚大陆上空的瞬变涡动活动较为活跃, 来源于大西洋强的瞬变波, 主要分为南北两列向下游传播, 偏南的波列较为完整稳定, 途经黑海、里海、巴基斯坦、青藏高原等地区, 然后传播至我国东部上空, 随后入海; 偏北的波列路径较短, 途经东欧平原、西西伯利亚地区。陈海山等 (2012) 在分析我国极端低温频发年瞬变波的分布时也发现在亚洲大陆上空有一支活跃且稳定的南支波列 ($25^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$), 并将该区域瞬变波强

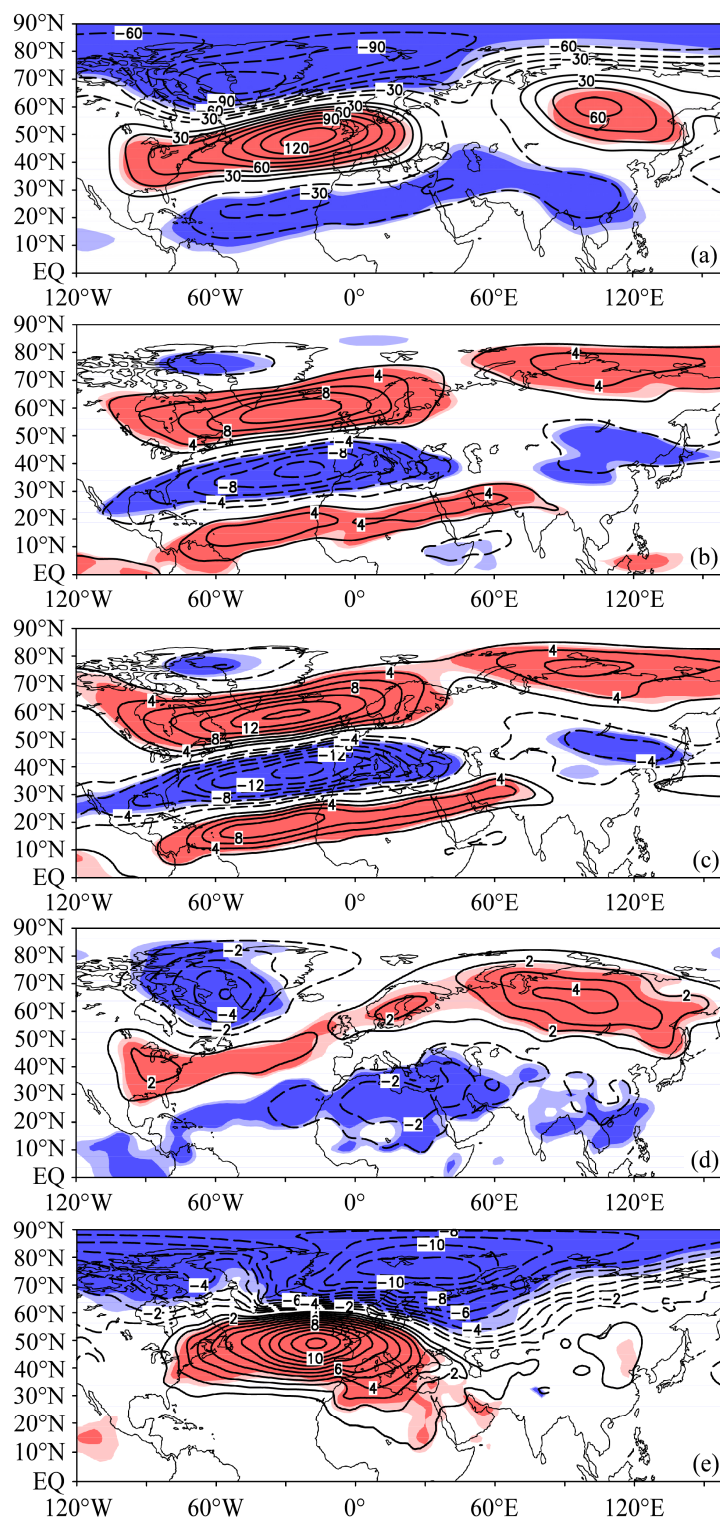


图3 冬季北大西洋风暴轴偏东北年减偏西南年的 (a) 500 hPa 位势高度差值场 (等值线间隔 15 gpm)、(b) 500 hPa 纬向风差值场 (等值线间隔 2 m s⁻¹)、(c) 300 hPa 纬向风差值场 (等值线间隔 2 m s⁻¹)、(d) 850 hPa 温度差值场 (等值线间隔 1°C)、(e) 海平面气压差值场 (等值线间隔 1 hPa)。其中, 实 (虚) 线代表正 (负) 值; 深 (浅) 阴影表示通过 95% (90%) 的信度检验

Fig. 3 The differences between the years of NAST shifting northeastward and the years of NAST shifting southwestward for (a) 500-hPa geopotential height (contour interval: 15 gpm), (b) 500-hPa zonal wind (contour interval: 2 m s⁻¹), (c) 300-hPa zonal wind (contour interval: 2 m s⁻¹), (d) 850-hPa temperature (contour interval: 1°C), and (e) sea level pressure (contour interval: 1 hPa). The solid (dashed) lines denote positive (negative) values; the dark (light) shaded areas represent above 95% (90%) confidence level

度与我国极端低温频次求相关发现两者有良好的正相关关系, 即该区域瞬变涡动偏强时, 极端低温事件较易发生。为了验证该波列强度是否与中国寒潮频次有类似的关系, 将该区域 300 hPa 的 v' 的年际变化时间序列与中国寒潮频次年际变化场求相关 (图略), 发现在大部分区域都为正值, 其中我国华东、华北南部、陕西、湖北、新疆南部以及东北南部地区还通过了 95% 的信度检验, 从而进一步证实了亚洲南部这一东传的瞬变波列与中国寒潮事件的发生可能存在紧密的联系。

天气尺度瞬变涡动除了可以直接影响我国的寒潮活动, 也可以通过动力反馈作用引起大气环流异常从而间接地影响我国寒潮活动。已有研究表明 Eliassen-Palm (EP) 通量的水平分量 ($\overline{v'^2} - \overline{u'^2}/2, -\overline{u'v'}$) 可以很好地反映瞬变波对基本气流的正压强迫作用 (Hoskins et al., 1983; Trenberth, 1986), 式子上方的

“—”表示时间平均 (月、季), u' 、 v' 分别为经过 2.5~6 d 滤波的天气尺度扰动纬向风和经向风; 该分量的散度分布可以直观地看出波对纬向平均气流的影响, 散度大于 0 的地方, 表示该处西风加速, 散度小于 0 的地方, 则表示该处西风减速。图 5a、b 分别为北大西洋风暴轴偏东北年、偏西南年 EP 水平通量及其散度的合成场。从中可以看出, 风暴轴偏西南年时, 欧亚大陆上空在 35°N 和 55°N 附近存在瞬变波与基本气流相互作用的活跃区域, 正好对应图 4b 上的偏北偏南波列; 而在风暴轴偏东北年, 欧亚大陆上空波流相互作用的活跃区要比偏西南年少, 而且都主要位于 40°N 以北, 这与偏东北年欧亚大陆上的瞬变活动主要集中在高纬地区相对应。图 5c 是两者的差值场, 再结合 300 hPa 纬向风差值场 (图 3c) 可以看出, EP 通量水平散度为正 (负) 值的区域基本上对应着西风加速 (减速)

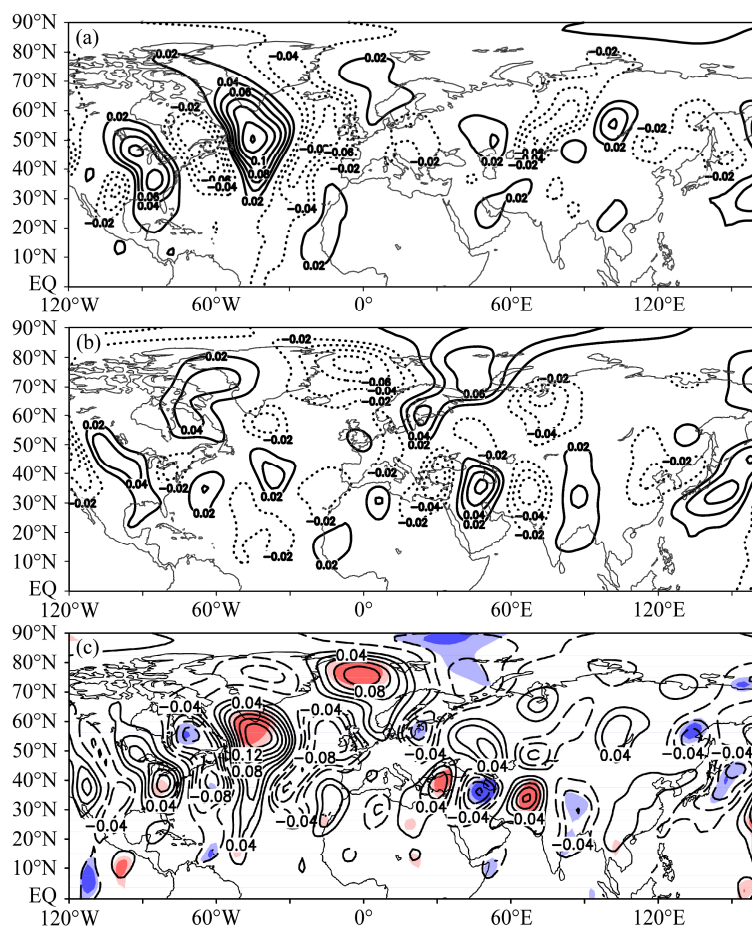


图 4 冬季北大西洋风暴轴 300 hPa 瞬变经向风 v' 的合成场 (等值线间隔 0.02 m s^{-1}): (a) 偏东北年; (b) 偏西南年; (c) 偏东北减偏西南年。其中, 实 (虚) 线代表正 (负) 值; 深 (浅) 阴影表示通过 95% (90%) 的信度检验

Fig. 4 Composites of 300-hPa transient meridional wind (contours interval: 0.02 m s^{-1}) in the years of NAST shifting (a) southwestward, (b) northeastward, and (c) the difference between (a) and (b) [(a) minus (b)]. The solid (dashed) lines denote positive (negative) values; the dark (light) shaded areas represent above 95% (90%) confidence level

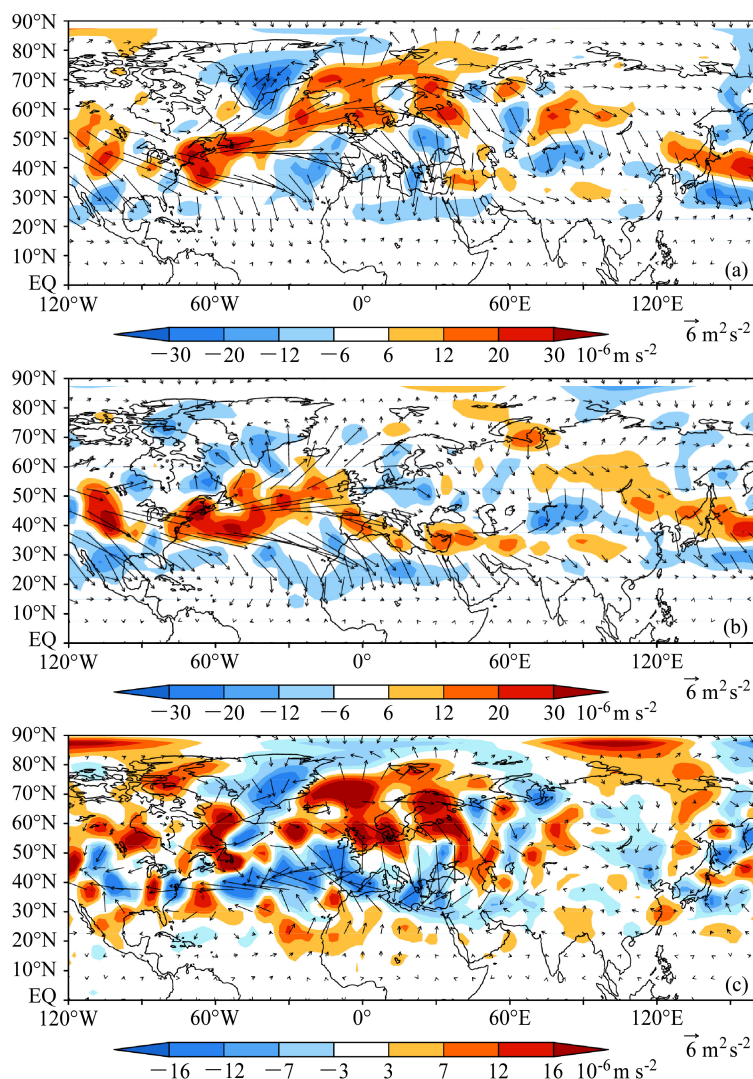


图5 冬季北大西洋风暴轴 300 hPa 的 EP 水平通量(箭头, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) 及其散度(阴影, 单位: 10^{-6}m s^{-2}) 合成场: (a) 偏东北年; (b) 偏西南年; (c) 偏东北减偏西南年。深(浅)阴影表示通过 95%(90%) 的信度检验

Fig. 5 Composites of 300-hPa horizontal Eliassen-Palm fluxes (vectors, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) and their divergence (shading, units: 10^{-6}m s^{-2}) in the years of NAST shifting (a) southwestward, (b) northeastward, and (c) the difference between (a) and (b). The dark (light) shaded areas represent above 95% (90%) confidence level

区, 这样就从瞬变波对基本气流反馈作用的角度很好地解释了纬向风场的异常分布特征。

4.2.2 西风波导的作用

那么为什么风暴轴偏西南年与偏东北年瞬变波的传播有这些差异呢? Hoskins et al. (1983) 研究发现, 中纬度西风急流是瞬变波传播的良好通道, 较强的西风急流为波列的传播起波导作用, 有利于瞬变波向下游传播。

无论从 300 hPa (图 6a、b) 还是 500 hPa (图 6c、d) 上都可以看到, 冬季北大西洋急流随着北大西洋风暴轴一致偏东北或偏西南异常, 而此时亚洲西风急流强度虽然在风暴轴偏东北年有所增强,

但其位置却变化不大。因此, 冬季北大西洋风暴轴偏西南年(图 6b、d), 天气尺度瞬变涡动主体区更接近于亚洲西风急流, 有利于将北大西洋上的强瞬变涡动活动通过亚洲西风急流波导直接传播到下游乃至我国地区, 而这种传播过程根据陈海山等(2012)的分析可以为下游提供源源不断的冷空气。反之, 风暴轴偏东北年(图 6a、c)时, 天气尺度瞬变涡动更远于亚洲西风急流, 不利于瞬变波通过亚洲西风急流波导直接向我国传播, 此时欧亚大陆上的瞬变活动更集中在高纬地区, 直接到达我国上空的瞬变涡动很少, 相应地, 我国的冷空气活动也就偏少。

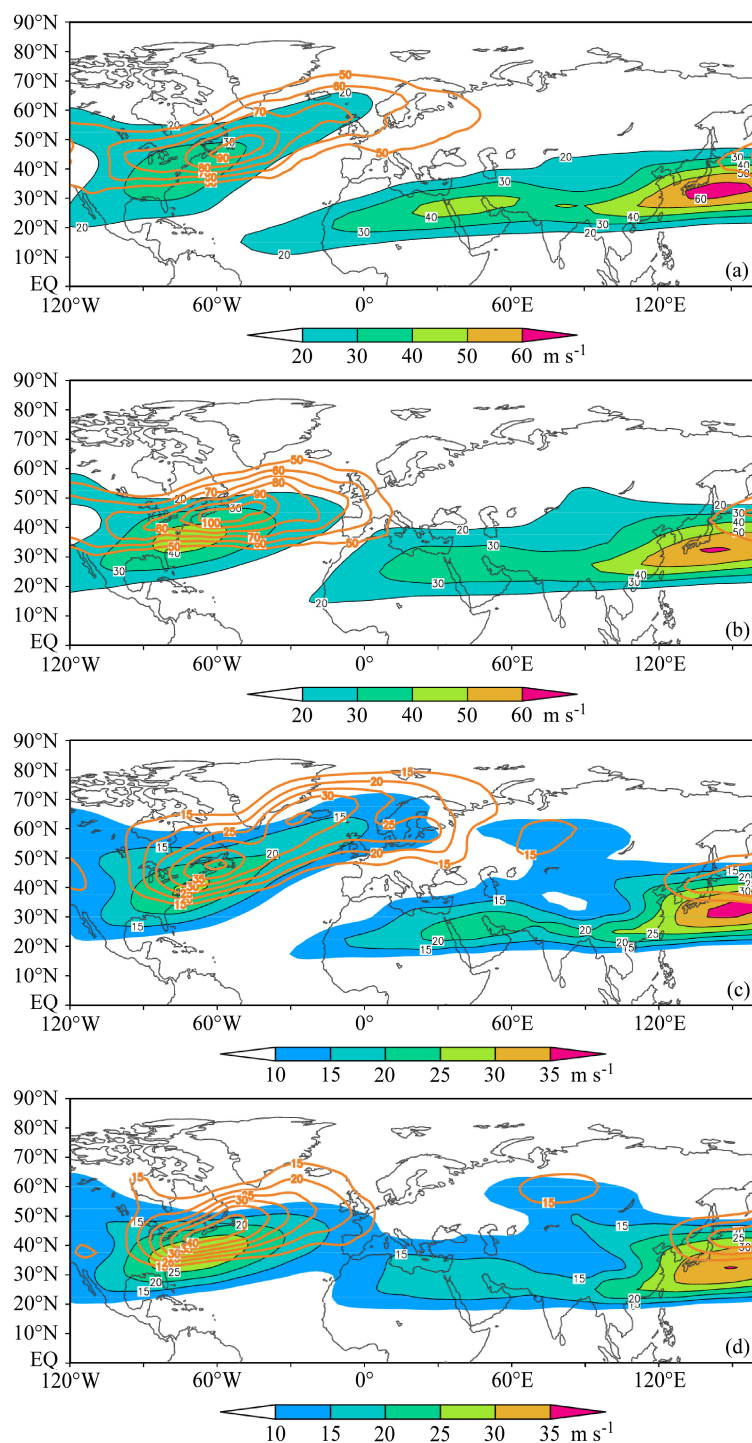


图6 冬季北大西洋风暴轴 (a、c) 偏东北年、(b、d) 偏西南年的 (a、b) 300 hPa 瞬变涡动能 (黄色等值线; 等值线间隔 $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) 和 300 hPa 纬向风的合成场 (阴影; 阴影区域的等值线间隔 10 m s^{-1}) 以及 (c、d) 500 hPa 位势高度滤波方差 (黄色等值线; 等值线间隔 5 dagpm^2) 和 500 hPa 纬向风 (阴影; 阴影区域的等值线间隔 5 m s^{-1}) 合成场

Fig. 6 Composites of (a, b) transient disturbance kinetic energy (yellow contours; contours interval: $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) and zonal wind (shaded; contours interval in shaded area: 10 m s^{-1}) at 300 hPa and (c, d) filtered potential height variance (yellow contours; contours interval: 5 dagpm^2) and zonal wind (shaded; contours interval in shaded area: 5 m s^{-1}) at 500 hPa in the years of NAST shifting (a, c) northeastward and (b, d) southwestward

综上所述,在冬季,当北大西洋风暴轴偏东北时,其离亚洲西风急流的位置较远,不利于将北大西洋上的强瞬变涡动通过此西风急流波导直接传播至我国地区,欧亚大陆上的瞬变活动更集中在高纬地区,到达我国上空的瞬变涡动较少;此时,北大西洋西风急流偏北,相应地北大西洋涛动(NAO)出现正位相异常,而传播到下游的瞬变涡动通过动力反馈作用,可使得高纬西风加速,极涡加深收缩,冷空气禁锢在极地不易南下,而中纬西风减速,经向环流加强,有利于将南部的暖湿空气输送到欧亚大陆北部,导致西伯利亚低层冷堆温度升高;瞬变波以及大气环流的这些异常变化都不利于我国的寒潮活动。反之,当风暴轴偏西南时,其更接近于亚洲西风急流,有利于将北大西洋上的强瞬变涡动活动通过此西风急流波导直接传播至我国地区,而其他环流场的异常分布形式则与偏东北年刚好相反,此时我国寒潮活动相对偏多。

5 结论

基于 1961~2011 年国家气象信息中心整编的 566 站逐日平均温度资料以及美国 NCEP/NCAR 的逐日再分析资料等,研究了年际尺度上冬季北大西洋风暴轴异常与我国寒潮频次的联系,并对前者影响后者的可能机制进行了探讨。主要结论概括如下:

(1) 冬季北大西洋风暴轴气候主体区的平均强度、经度以及纬度位置具有明显的年际变化和年代际变化。并且风暴轴的经向和纬向变化同步性较强,而风暴轴主体强度变化与位置变化的相关性相对较差。

(2) 年际尺度上冬季 500 hPa 位势高度滤波方差场与同期我国寒潮频次场 SVD 分析结果表明,冬季北大西洋风暴轴位置异常与我国寒潮频次密切相关,而强度异常与寒潮频次的关系并不显著。主要反映的是在 40°W 以西风暴轴较气候平均位置偏北(偏南)和在 40°W 以东风暴轴较气候平均位置偏东北(偏西南)与同期我国大部分地区、尤其是我国东部以及新疆部分地区的寒潮频次异常偏少(偏多)的反位相变化关系。

(3) 冬季北大西洋风暴轴异常影响同期我国寒潮活动的可能途径:一方面,风暴轴位置的改变会引起瞬变波向下游的传播出现异常,而这种异常的瞬变涡动传播可以直接影响我国寒潮活动;另一方

面,瞬变涡动异常又可以通过动力反馈作用影响大气环流来间接影响我国寒潮活动。具体来讲,当冬季北大西洋风暴轴偏东北时,其离亚洲西风急流的位置较远,不利于将北大西洋上的强瞬变涡动通过此西风急流波导直接传播至我国地区,欧亚大陆上的瞬变活动更集中在高纬地区,到达我国上空的瞬变涡动较少;此时,北大西洋西风急流偏北,相应地北大西洋涛动(NAO)出现正位相异常,而传播到下游的瞬变涡动通过动力反馈作用,使得高纬西风加速,极涡加深收缩,冷空气禁锢在极地不易南下,而中纬西风减速,经向环流加强,有利于将南部的暖湿空气输送到欧亚大陆北部,导致西伯利亚低层冷堆温度升高;瞬变波以及大气环流的这些异常变化都不利于我国的寒潮活动。反之,当风暴轴偏西南时,其更接近于亚洲西风急流,有利于将北大西洋上的强瞬变涡动活动通过此西风急流波导传播至我国地区,而其他环流场的异常分布形式则与偏东北年刚好相反,此时我国寒潮活动相对偏多。

需要指出的是,本文仅从大气内部天气尺度瞬变涡动反馈作用的角度出发,就冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响作了初步探讨,但其中更深层次的影响因素和过程还很复杂,有待于进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (8): 1607–1623.
- Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 34 (7): 1040–1053.
- Chang E K M, Fu Y F. 2002. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. *J. Climate*, 15 (6): 642–658.
- Chang E K M, Fu Y. 2003. Using mean flow change as a proxy to infer interdecadal storm track variability [J]. *J. Climate*, 16 (13): 2178–2196.
- 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 42 (12): 1951–1965.
- Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56 (7): 1266–1280.
- 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.
- 董丽娜, 郭品文, 李晓峰. 2006. 瞬变波活动与江淮地区夏季旱涝的关系 [J]. 南京气象学院学报, 29 (4): 470–476. Dong Lina, Guo Pingwen, Li Xiaofeng. 2006. Relationship between activity of transient waves and excessive/deficit summer rain in Changjiang–Huaihe River basin [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (4): 470–476.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究 [J]. 地理学报, 54 (2): 125–133. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Long term variability of the Siberian high and the possible connection to global warming [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 54 (2): 125–133.
- 顾沛澍, 朱伟军, 刘鸣彦, 等. 2013. 冬季北太平洋风暴轴异常及其与东亚大气环流的关系 [J]. 气象科学, 33 (6): 610–618. Gu Peishu, Zhu Weijun, Liu Mingyan, et al. 2013. Storm track anomaly over the North Pacific in winter and its relation with atmospheric circulation over East Asia [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33 (6): 610–618.
- 顾思南, 杨修群. 2006. 北半球绕极涡的变异及其与我国气候异常的关系 [J]. 气象科学, 26 (2): 135–142. Gu Sinan, Yang Xiuqun. 2006. Variability of the northern circumpolar vortex and its association with climate anomaly in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (2): 135–142.
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系 [J]. 应用气象学报, 5 (2): 218–225. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (2): 218–225.
- Harnik N, Chang E K M. 2003. Storm track variations as seen in radiosonde observations and reanalysis data [J]. J. Climate, 16 (3): 480–495.
- Hoskins B J, James I N, White G H. 1983. The shape, propagation, and mean-flow interaction of large-scale weather systems [J]. J. Atmos. Sci., 40 (7): 1595–1612.
- 康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 2010. 1951–2006 年期间我国寒潮活动特征分析 [J]. 高原气象, 29 (2): 420–428. Kang Zhiming, Jin Ronghua, Bao Yuanyuan. 2010. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951–2006 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (2): 420–428.
- Lee S S, Lee J Y, Wang B, et al. 2011. Interdecadal changes in the storm track activity over the North Pacific and North Atlantic [J]. Climate Dyn., 39 (1–2): 313–327.
- Lau N C. 1978. On the three-dimensional structure of the observed transient eddy statistics of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 35 (10): 1900–1923.
- Lau N C. 1979. The observed structure of tropospheric stationary waves and the local balances of vorticity and heat [J]. J. Atmos. Sci., 36 (6): 996–1016.
- Lau N C. 1988. Variability of the observed mid-latitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern [J]. J. Atmos. Sci., 45 (19): 2718–2743.
- 李峰, 矫梅燕, 丁一汇, 等. 2006. 北地区近 30 年环流的变化及对中国强冷事件的影响 [J]. 高原气象, 25 (2): 209–219. Li Feng, Jiao Meiyun, Ding Yihui, et al. 2006. Climate change of arctic atmospheric circulation in last 30 years and its effect on strong cold events in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (2): 209–219.
- 李湘, 肖天贵, 金荣花. 2010. 1998 年副热带高压活动与波包传播特征的研究 [J]. 热带气象学报, 26 (5): 571–576. Li Xiang, Xiao Tianguai, Jin Ronghua. 2010. On the relationship between subtropical high activity and wave-packets propagation characteristics [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (5): 571–576.
- 李莹, 朱伟军, 魏建苏. 2010. 冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进 [J]. 大气科学, 34 (5): 1001–1010. Li Ying, Zhu Weijun, Wei Jiansu. 2010. Reappraisal and improvement of winter storm track indices in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 1001–1010.
- Liao Zhijie, Zhang Yaocun. 2013. Concurrent variation between the East Asian subtropical jet and polar front jet during persistent snowstorm period in 2008 winter over southern China [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118 (12): 6360–6373.
- Luo D H, Gong T T, Diao Y N. 2008. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part IV: Planetary and synoptic wave-breaking processes during the NAO life cycle [J]. J. Atmos. Sci., 65 (3): 737–765.
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 380–394. Ma Xiaqing, Ding Yihui, Xu Haiming, et al. 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 380–394.
- 梅士龙, 管兆勇. 2008. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流域梅雨的关系 [J]. 大气科学, 32 (6): 1333–1340. Mei Shilong, Guan Zhaoyong. 2008. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River–Huaihe River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1333–1340.
- 梅士龙, 管兆勇. 2009. 1998 年长江中下游梅雨期间对流层上层斜压波包的传播 [J]. 热带气象学报, 25 (3): 300–306. Mei Shilong, Guan Zhaoyong. 2009. Propagation of baroclinic wave packets in upper troposphere during the Meiyu period of 1998 over middle and lower reaches of Yangtze River valley [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (3): 300–306.
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖 [J]. 大气科学, 31 (6): 1266–1278. Qian Weihong, Zhang Weiwei. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1266–1278.
- 仇永康, 李晓东, 仇永炎. 1992. 我国冷空气活动的特征及其与欧亚大陆积雪的关系 [J]. 应用气象学报, 3 (2): 235–241. Qiu Yongkang, Li Xiaodong, Qiu Yongyan. 1992. Statistical features of the cold waves invaded China and their relation to the snow cover area over the Eurasian Continent [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 3 (2): 235–241.
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨 [J]. 气象学报, 65 (4): 550–560. Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western Pacific jet

- stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (4): 550–560.
- 任雪娟, 杨修群, 韩博. 2007. 北太平洋冬季海—气耦合的主模态及其与瞬变扰动异常的联系 [J]. *气象学报*, 65 (1): 52–62. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Han Bo. 2007. Leading coupled modes between the atmosphere and ocean in the North Pacific in winter and their association with the transient eddy anomalies [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (1): 52–62.
- 任雪娟, 杨修群, 周天军, 等. 2010. 冬季东亚副热带急流与温带急流的比较分析: 大尺度特征和瞬变扰动活动 [J]. *气象学报*, 68 (1): 1–11. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Zhou Tianjun, et al. 2010. Diagnostic comparison of the East Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristics and transient eddy activities [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68 (1): 1–11.
- Rivière G, Orlandi I. 2007. Characteristics of the Atlantic storm-track eddy activity and its relation with the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (2): 241–266.
- Rogers J C. 1997. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe [J]. *J. Climate*, 10 (7): 1635–1647.
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2007. 近 40 年来东亚冬季风的年代际时空变化趋势 [J]. *大气科学*, 31 (4): 747–756. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Xie Li'an. 2007. Interdecadal spatial-temporal change trend of East Asian winter monsoon in the last 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (4): 747–756.
- 孙照渤. 1992. 热带外地区大气中 40~60 天振荡的统计特征 [C]// 章嘉基. 长期天气预报论文集. 北京: 海洋出版社, 29–35. Sun Zhaobo. 1992. The statistical features of the 40–60 days fluctuations [C]// Zhang Jijia. *The Paper Reels of Long-term Weather Forecast* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 29–35.
- Trenberth K E. 1986. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43 (19): 2070–2087.
- Storch H V, Zwiers F W. 1999. *Statistical analysis in climate research* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 484pp.
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 17 (24): 4674–4691.
- Wettstein J J, Wallace J M. 2010. Observed patterns of month-to-month storm-track variability and their relationship to the background flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (5): 1420–1437.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. *大气科学*, 23 (6): 641–651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (6): 641–651.
- 武炳义, 苏京志, 张人禾. 2011. 秋—冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响 [J]. *科学通报*, 56 (27): 2335–2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian high [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56 (30): 3220–3228.
- 吴伟杰, 何金海, Chung H S, et al. 2006. 夏季东亚高空急流与天气尺度波动的气候特征之间的联系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (4): 525–534. Wu Weijie, He Jinhai, Chung H S, et al. 2006. The relationship between the East Asian up-tropospheric jet stream in summer and climatic characteristics of synoptic-scale disturbance [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (4): 525–534.
- 王林, 陈文. 2014. 21 世纪初东亚冬季风的年代际增强及其成因 [J]. *科学通报*, 59 (19): 1905–1905. Wang Lin, Chen Wen. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59 (4): 430–436.
- 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1068–1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 1068–1076.
- 魏凤英. 2008. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征 [J]. *自然科学进展*, 18 (3): 289–295. Wei Fengying. 2008. Change of the cold wave frequency of China in global warming [J]. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 18 (3): 289–295.
- 叶丹, 张耀存. 2014. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系 [J]. *大气科学*, 38 (1): 146–158. Ye Dan, Zhang Yaocun. 2014. Association of concurrent variation between the East Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (1): 146–158.
- 伊兰, 陶诗言. 1997. 定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用 [J]. *气象学报*, 55 (5): 532–544. Yi Lan, Tao Shiyan. 1997. Role of the standing and the transient eddies in atmospheric water cycle in the Asian monsoon region [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55 (5): 532–544.
- 张培忠, 陈光明. 1999. 影响中国寒潮冷高压的统计研究 [J]. *气象学报*, 57 (4): 493–501. Zhang Peizhong, Chen Guangming. 1999. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (4): 493–501.
- 张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化 [J]. *大气科学*, 36 (5): 912–928. Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. 2012. Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (5): 912–918.