

车少静,王冀,李晓帆,等,2022. 京津冀后冬极端低温与北极涛动相关性年代际减弱[J]. 气象,48(4):418-427. Che S J, Wang J, Li X F, et al, 2022. Interdecadal weakening in the relationship between extreme low temperature and Arctic Oscillation in Beijing-Tianjin-Hebei Region in late winter[J]. Meteor Mon, 48(4):418-427(in Chinese).

京津冀后冬极端低温与北极涛动相关性年代际减弱^{*}

车少静^{1,2} 王 冀³ 李晓帆^{1,2} 韩世茹^{1,2}

1 河北省气候中心, 石家庄 050021

2 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

3 北京市气候中心, 北京 100081

提 要: 基于京津冀冬季逐日平均气温资料, 分析了冬季及各月京津冀极端低温日数与北极涛动(AO)的关系, 以及后冬二者相关性年代际变化的大气环流异常。结果表明: 20 世纪 80 年代后期开始京津冀冬季极端低温日数呈减少的趋势。冬季极端低温日数与同期 AO 指数相关性存在显著年代际变化, 20 世纪 80 年代后期开始迅速减弱, 21 世纪 00 年代初开始前冬增强, 后冬持续偏弱。AO 所对应的大气环流异常是导致后冬极端低温日数与 AO 相关性年代际变化的重要原因。在相关性显著时段, AO 正位相时, 西伯利亚高压和阿留申低压偏弱, 乌拉尔山阻塞高压和东亚槽偏弱, 温带急流减弱, 极端低温日数偏少, 负位相反之。相关性不显著时段, 大气环流纬向对称性特征明显, 与极地相互作用减弱。

关键词: 极端低温, 北极涛动, 年代际减弱, 相关分析

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122101

Interdecadal Weakening in the Relationship Between Extreme Low Temperature and Arctic Oscillation in Beijing-Tianjin-Hebei Region in Late Winter

CHE Shaojing^{1,2} WANG Ji³ LI Xiaofan^{1,2} HAN Shiru^{1,2}

1 Hebei Climate Centre, Shijiazhuang 050021

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

3 Beijing Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on daily temperature data in winter, the relationship between number of extreme low temperature (NELT) and Arctic Oscillation (AO) in Beijing-Tianjin-Hebei Region in winter is analyzed, the AO-related interdecadal atmospheric circulation anomalies in late winter (February) is explored. The results show that NELT in winter in Beijing-Tianjin-Hebei Region has been decreasing since 1961. The correlation is weakening between NELT and AO after the middle 1980s compared to that before the middle 1980s, but strengthening in early winter, and that remains weak in late winter after early 2000s. Furthermore, the interdecadal variation in the relationship between NELT and AO in late winter in Beijing-Tianjin-Hebei Region is largely attributed to the AO-related atmospheric circulation anomalies under different interdecadal backgrounds. When significant correlation exists between NELT and AO, through impacting the Siberian high, Aleutian low, Ural blocking high and East Asian trough, a positive AO phase is associated

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1505604)和中国气象局气象预报业务关键技术发展专项[(YBGJXM(2020)4A)]共同资助

2021 年 9 月 27 日收稿; 2021 年 12 月 21 日收修定稿

第一作者: 车少静, 主要从事气候预测研究. E-mail: checlimate@sina.com

通讯作者: 王冀, 主要从事气候预测研究. E-mail: wangji_zl@163.com

with less frequency of extreme low temperature, and vice versa. In contrast, AO displays a more zonal symmetry structure, and the climate circulation system in mid-high latitudes is weak, which confines the influence of winter AO on NELT and leads to an insignificant late winter AO-NELT relationship.

Key words: extreme low temperature, Arctic Oscillation (AO), interdecadal weakening, correlation analysis

引言

极端气候事件对人类社会、经济和自然生态系统有着显著的影响,极端低温是京津冀冬季主要的气象灾害之一,对供电采暖等能源供给、人民健康及出行等带来很大影响。2022年北京冬奥会的3个赛区(朝阳、延庆和崇礼)均位于京津冀地区,有关研究表明,显著影响冬奥赛事的6种天气型中4种与极端冷事件密切相关(Wang and Yu, 2019)。相关统计表明,在全球变暖的背景下,近20年来,东亚冬季风总体以偏强为主,欧亚大陆出现冷冬和极端低温事件的概率增加(王晓娟等, 2013; Trenberth et al, 2014; 梁苏洁等, 2014; Johnson et al, 2018; 谢星昤等, 2018; 支蓉和高辉, 2019; Ding et al, 2020; 2021),同时一些严重的极端低温事件也表明了这一变化特征,如2008年的低温雨雪冰冻事件和2016年的“霸王级”寒潮(高辉等, 2008; 司东等, 2016; Ma et al, 2018; 于波等, 2019),2021年1月4—7日北京、河北、山东、山西、陕西等省(直辖市)共计60个气象观测站的最低气温突破或达到建站以来历史极值(徐冉等, 2021)。

近年来,冬季气温季节内变率及其变化成因引起了较为广泛的关注(申红艳等, 2021)。相关研究指出,中国前冬和后冬的气温变化存在明显的年际、年代际和地区性差异,在1980年以前,北方冬季气温呈下降趋势,后冬气温逐年下降速度较前冬慢,在1980年以后,北方冬季气温呈上升趋势,后冬气温逐年上升速度较前冬快(黄嘉佑和胡永云, 2006);在年际变化时间尺度上我国前、后冬气温异常出现类似变化和反相变化的概率约各占50%,中高纬地区大气遥相关型的持续或者转换是造成我国前、后冬气温不同演变的重要原因(韦玮等, 2014; 2020)。中国冬季气温变化呈现前后相反和冷暖交替特征的年份中大部分位于1980年以后,这表明在全球变暖的背景下,中国冬季气温变化呈现出了新的异常特征,即月际变化差异加大(孙健等, 2019)。前、后冬极端低温与影响因子间的相关关系也存在显著差异,如韩方红等(2018)研究表明,北大西洋涛动

(North Atlantic Oscillation, NAO)对东北冷日(夜)的影响主要体现在后冬,在前冬影响不显著。

北极涛动(Arctic Oscillation, AO)是北半球热带外地区大气环流年际变率的主导模态,表现为极地和中纬度地区海平面气压反位相振荡的现象,AO较NAO具有更好的纬向对称性,与欧亚冬季气温关系更密切(Thompson and Wallace, 1998; 2000)。梁苏洁等(2019)认为AO在多种时间尺度上对天气气候都有着重要影响,这主要是由于AO存在从周到年代际尺度变率。对我国和东亚天气气候影响的研究表明,AO正(负)位相时,我国冬季气温容易偏高(低),影响最显著区域位于东北地区(龚道溢和王绍武, 2003; 何春和何金海, 2003; 琚建华等, 2004; Chen et al, 2013; 谭晶等, 2016)。西伯利亚高压可能是AO与东亚地区寒潮相互作用的桥梁,平流层AO事件向下传播至对流层,也可能引起东亚极端冷天气(He et al, 2017)。AO对东亚气候系统的影响具有年代际差异,如庞子琴和郭品文(2010)指出AO与东北冬季气温的关系在20世纪60年代中后期显著加强,80年代中后期减弱。Li et al(2014)发现冬季AO对东亚冬季风的影响约在20世纪80年代早期出现明显的年代际变化。Chen and Song(2019)指出20世纪90年代后期之后,AO对东南亚冬季气温有了更显著的影响。Gong et al(2019)也发现20世纪80年代中期之后,AO对东亚冬季气温影响增强,影响范围南压。以往的研究主要针对整个冬季开展分析研究,气温在前冬和后冬变化经常存在反相特征,那么,AO与前冬和后冬气温或者极端低温的年代际关系是否存在差异呢?本文在对冬季各月AO指数与极端低温日数(number of extreme low temperature, NELT)相关性分析的基础上,重点分析后冬AO指数与极端低温日数年代际关系减弱的可能原因,为进一步认识AO对京津冀地区极端低温的影响提供参考依据。

1 资料与方法

本文所用气温资料为京津冀地区86个气象站逐日平均气温资料,大气环流资料是美国国家环境

预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的全球逐月再分析数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,AO指数数据来自美国国家海洋和大气管理局网站(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov>),前一年12月至当年2月为当年冬季,资料年代为1961—2020年。有关极端低温日的阈值,本文参考Luo and Wang(2017)提出的采用第10%分位值来确定,分别计算得出前一年12月至当年2月各站的极端低温阈值,进而得出历年冬季每个月的极端低温日数,将3个月的极端低温日数求和得到冬季极端低温日数。

本文的主要分析方法有:相关分析、回归分析和经验正交函数分解等。

2 京津冀冬季极端低温日数的变化特征及与AO相关性的变化特征

2.1 极端低温日数的变化特征

对京津冀冬季及12月至当年2月的极端低温日数进行经验正交函数展开(EOF)分析,发现第一模态为全区一致型,解释方差分别为92.4%、90.3%、85.3%和90.4%,包含了绝大部分的信息,对比京津冀冬季各站极端低温日数平均值和第一模态时间系数变化趋势基本一致,因此本文中用所有气象站点的平均值代表京津冀地区的极端低温日数。

由图1a可见,1961—2020年京津冀冬季平均气温呈显著升高的趋势,20世纪80年代后期以来以正距平为主。极端低温日数与平均气温呈显著的负相关关系,二者相关系数为-0.88,与郭志梅等(2005)和韩方红等(2018)得到的极端温度的变化与平均气温变化关系密切的结论一致,进一步计算冬季、12月、1月和2月各站极端低温日数与平均气温的相关系数,发现各站、各时间段二者均呈显著反相关,表明冬季偏冷年,极端低温日数偏多,而冬季偏暖年,极端低温日数则偏少。

1961—2020年京津冀冬季极端低温日数平均为8.8 d,总体呈减少趋势,平均减少 $1.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,在20世纪80年代后期呈现出显著减少的趋势,经M-K检验,于1987年开始发生了突变(图1b),突变前平均为 $13.3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,突变后平均为 $5.3 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,这与京津冀地区气温在80年代发生了变暖的突变时间是一致的(孔凡超,2007;郭军等,2011)。突变之后,极端低温日数并不是保持持续偏

少的趋势,而是在80年代末到90年代持续偏少之后,21世纪00年代初以来又有所增加,1991—2020年平均增加 $0.7 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。许多文献也指出近20年来出现冷冬概率增加,极端低温日数呈增多的态势(韩方红等,2018;Ma et al,2018)。

分析冬季各月极端低温日数的变化趋势,发现虽然3个月极端低温日数均呈减少趋势,但各月的变化趋势并不完全一致(图略),12月平均减少 $0.6 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,于20世纪80年代后期出现了由多到少的突变,1988—2002年期间的15年极端低温日数均偏少,2003年以后偏多概率增加,共出现6年偏多的年份。1月平均减少 $0.4 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,在3个月中减少趋势最弱,具有明显的阶段性变化特征,即60年代到80年代中期为偏多阶段,80年代后期到90年代中期为偏少阶段,90年代后期到21世纪00年代前期又转为偏多阶段。2月平均减少 $0.9 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,在3个月中减少趋势最明显,这与2月变暖趋势最显著是相对应的,80年代后期出现了由多到少的突变,在突变后有5年极端低温日数偏多,但偏多幅度均很小,没有在突变后出现较明显转多的特征。

2.2 极端低温日数与AO相关性时空分布特征

计算1961—2020年极端低温日数与同期AO指数去除线性趋势后的相关系数,冬季、12月、1月和2月分别为-0.46、-0.27、-0.41、-0.30,均通过了0.05的显著性水平检验,其中冬季的相关性最好,12月最弱,表明AO正位相时,极地冷空气不易南下影响京津冀,极端低温日数偏少,AO负位相时,京津冀极端低温日数偏多。

由各站冬季极端低温日数与同期AO指数去除线性趋势后的相关系数空间分布(图2)可见,各站极端低温日数与AO指数均呈负相关,大部分地区均通过了0.05的显著性水平检验,东北部地区相关性最好。由于京津冀东北部地区紧邻我国东北地区,这与前人研究结果AO对我国东北地区冬季气温以及极端低温影响显著是一致的(庞子琴和郭品文,2010;Chen et al,2013)。

2.3 极端低温日数与AO相关性的年代际变化

研究表明,我国冬季气温异常与影响因子的关系发生了显著的年代际变化(李维京等,2013)。图3为冬季和各月的极端低温日数标准化值与同期AO指数的21年滑动相关系数,可见冬季及各月

极端低温日数与 AO 指数的相关性具有显著的年代际变化,其中冬季在整个时段都为负相关,20 世纪 80 年代后期之前相关系数为 $-0.71 \sim -0.43$,通过了 0.05 显著性水平检验,80 年代后期开始相关性减弱,90 年代末期达到最弱之后又开始加强,21 世纪 00 年代中后期负相关再次通过 0.05 显著性水平

检验,这种相关性的年代际变化转折与极端低温日数的年代际转折是一致的。二者在冬季各月的相关性年代际变化趋势与冬季相似,也都表现为在 80 年代后期开始相关性显著减弱,但 21 世纪 00 年代初开始,前冬(12 月、1 月)相关性再次增强,而后冬(2 月)则没有出现显著增强,保持着弱相关的特征。

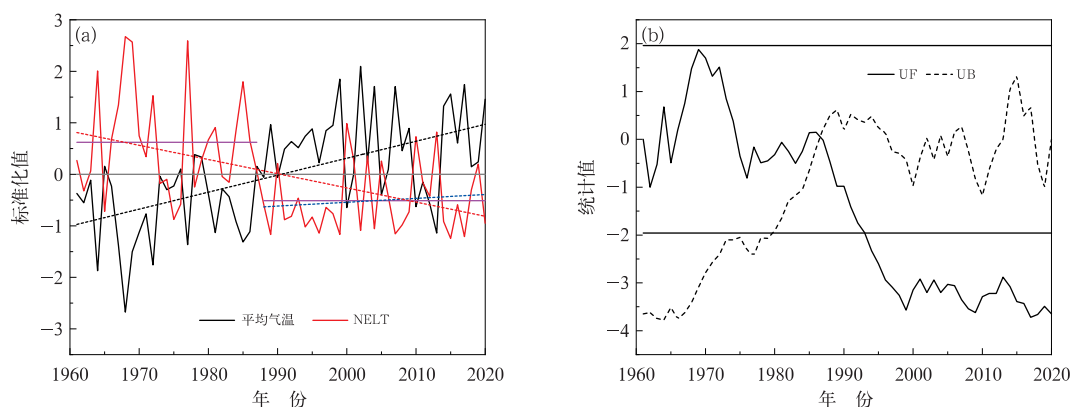


图 1 1961—2020 年京津冀(a)冬季极端低温日数和平均气温标准化值,(b)冬季极端低温日数 M-K 检验统计值曲线

(图 1a 中,红、黑色点线分别为 1961—2020 年极端低温日数、平均气温的线性倾向率,蓝色点线为 1987—2020 年极端低温日数线性倾向率,紫色实线分别为 1961—1986 年和 1987—2020 年时段极端低温日数标准化值的平均;图 1b 中,直线为 0.05 显著性水平临界值)

Fig. 1 (a) Normalized NELT and the mean temperature, (b) M-K analysis curves of NELT

in winter in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1961—2020

(In Fig. 1a, the red and black dashed lines represent the linear trends of

NELT and the mean temperature during 1961—2020, respectively; the blue dashed line represents linear trend of NELT

during 1987—2020; the purple solid lines represent normalized NELT averaged during 1961—1986 and 1987—2020,

respectively; in Fig. 1b, straight line indicates the significance level of 0.05 bounds)

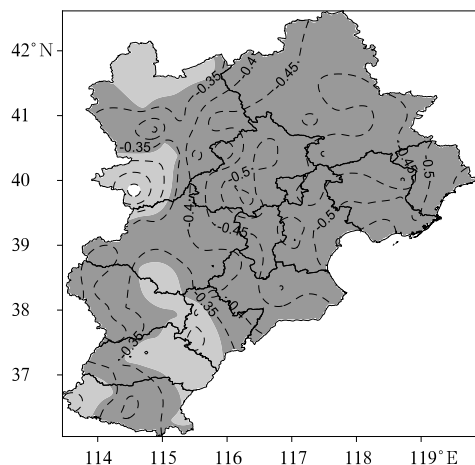


图 2 1961—2020 年京津冀冬季极端低温日数与同期 AO 指数相关系数空间分布

(浅灰和深灰区域分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验)

Fig. 2 Spatial distribution of correlation coefficients

between NELT and AO index in winter in

Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1961—2020

(Light and dark grey areas represent having passed the significance test at levels of 0.05 and 0.01, respectively)

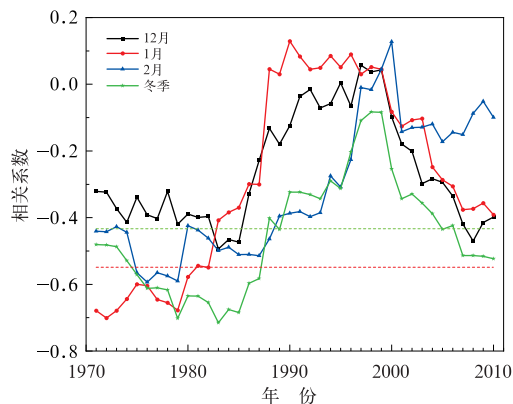


图 3 1970—2010 年极端低温日数与 AO 指数 21 年滑动相关

(绿色和红色点线分别为通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验的界限值)

Fig. 3 Sliding correlations in a 21-year window between NELT and AO index during 1970—2010

(Green and red dashed lines indicate having passed the significance test at levels of 0.05 and 0.01, respectively)

由于前冬和后冬极端低温日数与 AO 相关性变化的差异性,本文主要分析后冬年代际变化的特征及其成因。选取 2 月相关性最好的 1966—1986 年时段和相关性最弱的 1990—2010 年时段,来代表两个典型时段进行分析。由图 4 可见,1966—1986 年这一阶段,京津冀大部分地区极端低温日数与 AO 呈显著负相关,相关最好区域位于东北部地区,相关

系数可达 -0.68 ,而 1990—2010 年阶段,京津冀地区全区极端低温日数与 AO 相关性均不显著,虽然北部地区表现为弱负相关,中南部地区为弱正相关,但所有站点的相关性均明显低于 1966—1986 年时段,也进一步表明前面的滑动相关所得年代际相关减弱的变化是京津冀整个区域的一致变化特征。

由图 5a 可见,2 月平均气温、极端低温日数和

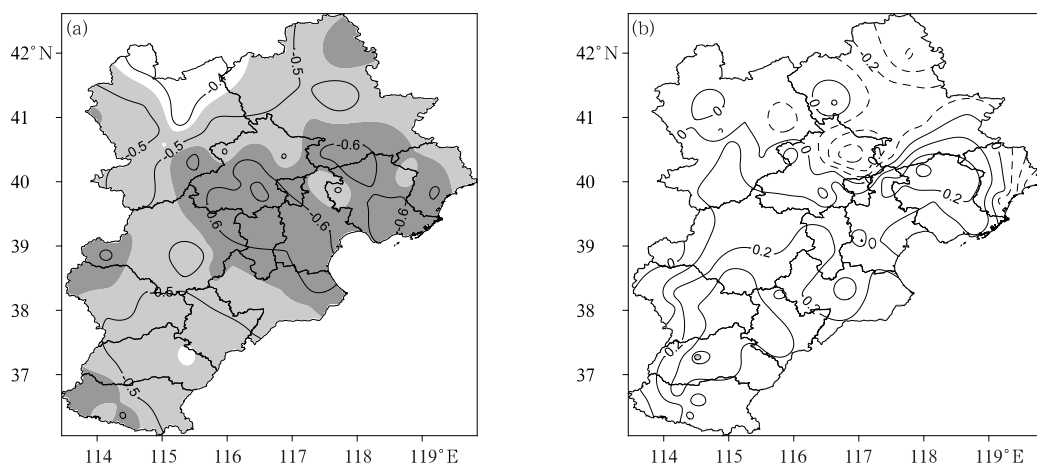


图 4 (a)1966—1986 年,(b)1990—2010 年京津冀 2 月

极端低温日数与 2 月 AO 指数相关系数空间分布

(图 4a 中,浅灰和深灰区域分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性水平检验)

Fig. 4 Spatial distributions of correlation coefficients between NELT and AO

index in February (a) 1966—1986, (b) 1990—2010

(In Fig. 4a, light and dark grey areas indicate having passed the significance test at levels of 0.05 and 0.01, respectively)

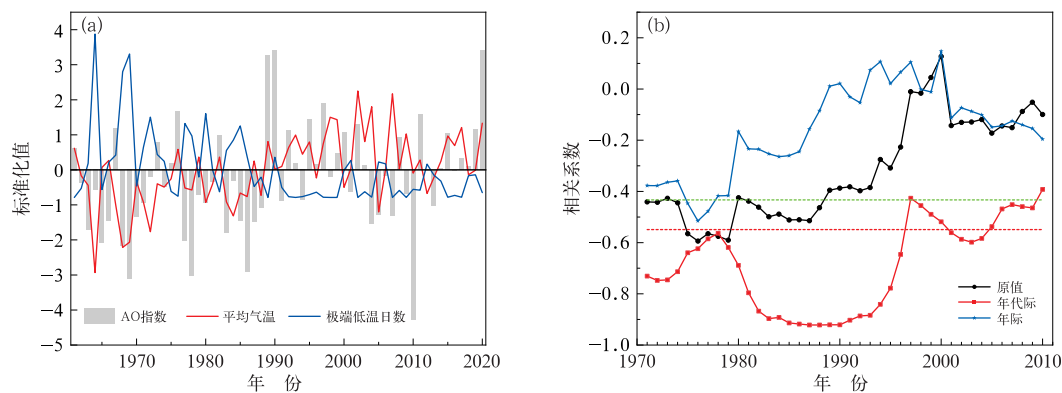


图 5 (a)1961—2020 年 2 月平均气温、极端低温日数和 AO 指数标准化值,

(b)1970—2010 年 2 月极端低温日数与 AO 指数 21 年滑动相关系数

(图 5b 中,绿色和红色点线分别为通过了 0.05 和 0.01 显著性水平检验界限值)

Fig. 5 (a) Normalized NELT, mean temperature and AO index in February in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1961—2020, (b) sliding correlation coefficients

in a 21-year window between NELT and AO index during 1970—2010

(In Fig. 5b, green and red dashed lines indicate having passed the significance test at levels of 0.05 and 0.01, respectively)

AO 指数都表现出显著的年代际变化趋势,平均气温和 AO 指数呈升高的趋势,二者均在 20 世纪 80 年代后期由负距平为主转为正距平为主。极端低温日数则呈减少的趋势,80 年代后期由正距平为主转为负距平为主,而且 80 年代后期以来波动幅度很小,其年际变化显著小于 AO 的年际变化。进一步分析年代际和年际两种时间尺度上极端低温日数和 AO 的对应关系,对原始序列滤波提取各自的 7 年以上年代际分量和以下的年际分量,分别计算 21 年滑动相关系数(图 5b),可见年代际分量 AO 对极端低温日数的影响更大,虽然 90 年代后期相关性有所减弱,但大部分时段仍通过了 0.05 显著性水平检验。年际分量与原始值的变化趋势更为相似,但大部分时段相关不显著,仅在 1966—1986 年时段和 1967—1987 年时段通过了 0.05 显著性水平检验,这一时段与利用原始序列所选的 1966—1986 年这一时段相吻合,表明这一时段无论年际还是年代际尺度上极端低温日数与 AO 都呈显著负相关,利用原始序列所选的 1990—2010 年时段是年际分量相关最弱的时段,年代际分量也处于相关相对偏弱的阶段。

3 不同年代际背景下与 AO 相关的大气环流特征

为了揭示京津冀冬季极端低温日数与 AO 相关性年代际变化的大气环流成因,分别对 1966—1986

年和 1990—2010 年两个时段的 2 月大气环流场进行分析。图 6 是 2 月 AO 指数与海平面气压场和 1000 hPa 风场的回归系数,通过对比可以看出,两个各时段无论海平面气压场还是风场在亚洲大陆中低纬和北太平洋地区都存在显著差异。1966—1986 年时段亚洲大陆地区为海平面气压负异常,在贝加尔湖到巴尔喀什湖地区通过了 0.05 显著性水平检验,在北太平洋上,阿留申群岛及其以南很大区域的正异常;风场上,我国黄海向北到雅布洛塔夫山脉为一致的东南风异常,表明 AO 正(负)位相时,西伯利亚高压偏弱(强),阿留申低压偏弱(强),海陆气压差减小(增大),东亚冬季风偏弱(强),京津冀地区东南风(西北风)增强,极端低温日数偏少(多)。而在 1990—2010 年时段,欧亚地区对海平面气压回归系数纬向对称性好,总体表现为北负南正的分布,40°~60°N 均未通过显著性水平检验,即此时段西伯利亚高压和阿留申低压与 AO 的关系均减弱,亚洲大陆通过显著性水平检验的区域较 1966—1986 年时段显著偏南,主要位于 40°N 以南。风场上,此时段 AO 正位相时京津冀地区为极弱的西北到偏西风异常,可见对流层低层 AO 与影响我国北方地区的大气环流关系显著减弱。

图 7 是 2 月 AO 指数与 500 hPa 位势高度场回归系数,可见,两个时段都对应着欧亚地区极地负位势高度距平,说明 AO 正位相时,极涡偏强,而且 1990—2010 年时段极地通过显著性水平检验的范围明显扩大,而在中高纬度地区,虽然两个时段也都

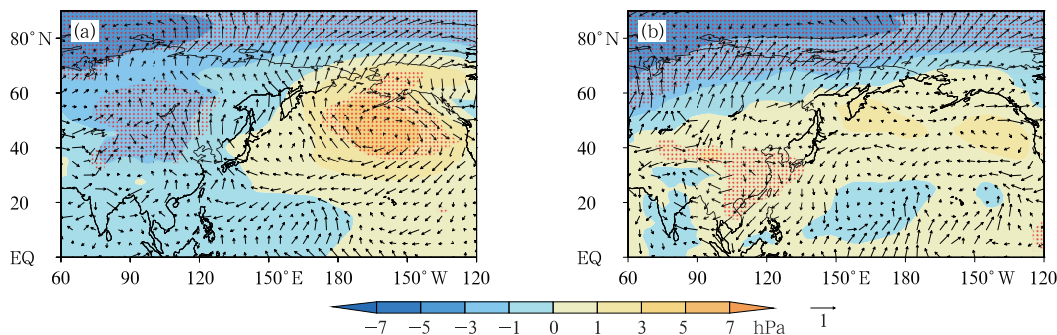


图 6 (a)1966—1986 年,(b)1990—2010 年 2 月 AO 指数与海平面气压场(阴影)、1000 hPa 风场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)回归系数
(红色打点区域为通过 0.05 显著性水平检验区域,下同)

Fig. 6 Sea level pressure (shaded) and 1000 hPa wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) regressed on AO index in February (a) 1966—1986 and (b) 1990—2010
(Red dots indicate having passed the significance test at 0.05 level, same as below)

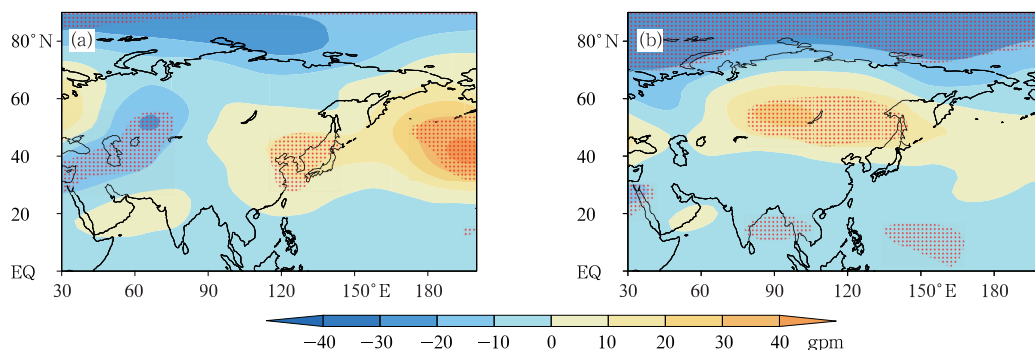


图 7 同图 6, 但为 AO 指数与 500 hPa 位势高度场回归系数

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the 500 hPa geopotential height regressed on AO index

表现为以正回归系数为主, 但差异显著, 1966—1986 年时段乌拉尔山附近的负相关更显著, 北太平洋地区为一显著正距平区, 我国东部到朝鲜半岛和日本海地区也为一显著正距平区, 表明 AO 正(负)位相时, 乌拉尔山高压脊偏弱(强), 东亚槽偏弱(强), 欧亚上空盛行纬(经)向环流, 京津冀地区上空受正(负)位势高度距平控制, 冷空气活动偏弱(强), 极端低温日数偏少(多); 1990—2010 年时段, AO 指数与 500 hPa 高度场回归系数纬向对称性显著好于 1966—1986 年时段, $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 主要表现为正高度异常, 通过显著性水平检验区域位于贝加尔湖为中心的 $80^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 区域内, 位置显著偏北, 此时段内, 京津冀地区受高纬度地区的扰动明显减弱, 因此, 该时段内 AO 对京津冀地区的影响减弱。

北半球冬季亚洲地区存在南北两支偏西风急流(朱乾根等, 2000)。急流的强度、位置和形态的变化

对不同地区的天气、气候具有重要的影响。由 AO 指数与 200 hPa 纬向风回归系数(图 8)可见, 1966—1986 年时段, 副热带西风急流为负异常, 温带西风急流为正异常, 急流呈“北强南弱”分布, 表明 AO 正位相时, 副热带急流偏弱, 温带急流偏强, 东亚冬季风偏弱, 京津冀冬季极端低温日数偏少, AO 负位相时, 东亚冬季风偏强, 极端低温日数偏多, 姚慧茹和李栋梁(2013a; 2013b)也指出, 副热带急流强, 温带急流弱时, 东亚大槽加深, 东亚冬季风较强, 中国中、东部大范围地区气温偏低, 与本文结论相符。1990—2010 年时段与 1966—1986 年时段差异显著, 虽然副热带急流仍为弱负异常, 但温带急流由显著正异常转为显著负异常, 即 AO 正位相时, 东亚急流总体偏弱, 特别是温带急流显著偏弱, 东亚冬季风相对偏强, 导致 AO 与京津冀冬季极端低温日数相关不显著。

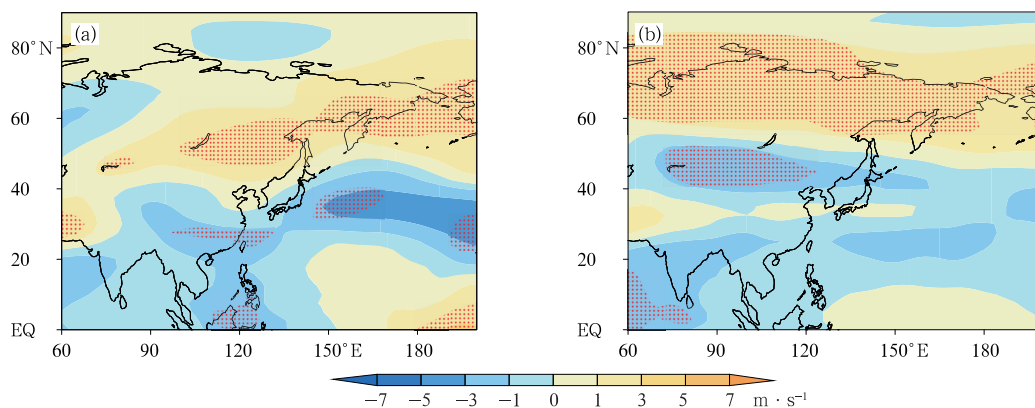


图 8 同图 6, 但为 AO 指数与 200 hPa 纬向风回归系数

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the 200 hPa zonal wind velocity regressed on AO index

4 结论与讨论

基于京津冀地区 1961—2020 年冬季逐日平均气温、AO 指数和 NCEP/NCAR 大气环流再分析数据,分析了京津冀地区冬季极端低温日数与同期 AO 指数相关性的时空分布特征,并对后冬(2 月)极端低温日数与 AO 相关性的年代际变化及其可能成因进行了初步探讨。得出了以下主要结论:

(1)1961 年以来京津冀地区冬季极端低温日数总体呈减少的趋势,1987 年开始发生了由偏多到偏少的突变,与冬季气候变暖突变时间一致,在经历了 20 世纪 80 年代末到 90 年代持续偏少阶段后,21 世纪 00 年代初开始又呈弱的增加趋势。冬季各月之中,2 月减少趋势最显著,而且在 2000 年以后没有出现增加的趋势。

(2)京津冀冬季极端低温日数与 AO 指数总体呈负相关,其中冬季相关性好于各月,北部地区相关性好于南部地区;21 世纪 00 年代初开始相关关系在前冬和后冬存在显著差异,前冬有所增强,后冬持续偏弱。

(3)选取后冬(2 月)极端低温日数与 AO 指数相关性最显著的 1966—1986 年时段和最不显著的 1990—2010 年时段,对 AO 指数回归的大气环流场进行对比分析,发现 1966—1986 年时段,AO 正位相时,对流层低层西伯利亚高压和阿留申低压偏弱,京津冀受东南风异常影响,对流层中层的乌拉尔山阻塞高压和东亚槽偏弱,对流层高层副热带急流减弱而温带急流增强,这些大气环流特征均不利于冷空气影响京津冀地区,导致极端低温日数偏少,AO 负位相时表现为相反的大气环流特征。1990—2010 年时段,中高纬大气纬向对称特征明显,中高纬与极地相互作用减弱,西伯利亚高压、阿留申低压、乌拉尔山阻塞高压、东亚槽和温带急流对 AO 响应均不明显,所以此时段 AO 与极端低温日数的相关性减弱。

气候变化是人类活动导致的全球变暖和气候系统内部变率共同作用的结果(丁一汇和王会军,2016),京津冀冬季及各月极端低温日数总体表现为减少的趋势也是二者共同作用的结果,而且人类活动对后冬的贡献可能大于前冬。除 AO 外,影响冬季极端低温的因子还有很多,如北极海冰、高原积雪、热带海温等,研究表明,北极增暖放大效应可能

是导致近年来欧亚大陆冬季低温频繁发生的主要原因之一(Liu et al,2012;Ma et al,2018;李思和武炳义,2019;武炳义,2019;李言蹊和陈海山,2021)。大气环流异常的协同作用是气候异常的直接原因,如李崇银等(2008)指出 2008 年我国南方的低温雨雪冰冻的直接原因是大气环流系统的组合异常,Chen et al(2013)研究表明 ENSO 和 AO 对东亚冬季气候异常的影响呈现出非线性的相互叠加。本文选取 1961—2020 年冬季 Niño3.4 指数、IOBW 指数、IOD 指数和黑潮区海温指数分别代表热带太平洋、热带印度洋和西北太平洋海表温度状况,与 2 月极端低温日数分别去除线性趋势后,计算相关系数和偏相关系数,发现与 4 个海温指数的相关系数和偏相关系数绝对值均在 0.13 以下,而 2 月极端低温日数与 AO 指数的相关系数和偏相关系数分别为 -0.30 和 -0.31,均通过了 0.05 的显著性水平检验,表明 AO 所对应的大气环流异常是导致后冬极端低温日数与 AO 相关性年代际变化的重要原因。另外,本文仅从统计结果来分析了后冬 AO 对极端低温日数的年代际影响,还需从数值模拟方法等对这种变化的物理机制进行诊断分析。

参考文献

- 丁一汇,王会军,2016. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报,61(10):1029-1041. Ding Y H, Wang H J, 2016. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China[J]. Chin Sci Bull, 61(10):1029-1041(in Chinese).
- 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 H, Chen L J, Jia X L, 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]. Meteor Mon, 34(4):101-106(in Chinese).
- 龚道溢,王绍武,2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响[J]. 地理学报,58(4):559-568. Gong D Y, Wang S W, 2003. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China[J]. Acta Geogra Sin, 58(4):559-568(in Chinese).
- 郭军,任国玉,任雨,2011. 近 100 年天津平均气温与极端气温变化[J]. 高原气象,30(5):1399-1405. Guo J, Ren G Y, Ren Y, 2011. Changes of mean and extreme temperatures in Tianjin in recent 100 years[J]. Plateau Meteor, 30(5):1399-1405(in Chinese).
- 郭志梅,缪启龙,李雄,2005. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学,25(4):448-454. Guo Z M, Miao Q L, Li X, 2005. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years[J]. Sci Geogra Sin, 25(4):448-454(in Chinese).

- 韩方红,陈海山,马鹤翟,2018. 冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化[J]. 大气科学,42(2):239-250. Han F H, Chen H S, Ma H D, 2018. Interdecadal variation in the relationship between North Atlantic Oscillation and extreme low temperature over northern China in winter[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):239-250(in Chinese).
- 何春,何金海,2003. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究[J]. 南京气象学院学报,26(1):1-7. He C, He J H, 2003. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter[J]. J Nanjing Inst Meteor, 26(1):1-7(in Chinese).
- 黄嘉佑,胡永云,2006. 中国冬季气温变化的趋向性研究[J]. 气象学报,64(5):614-621. Huang J Y, Hu Y Y, 2006. Trends of winter temperatures in China[J]. Acta Meteor Sin, 64(5):614-621(in Chinese).
- 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 J H, Ren J Z, Lü J M, 2004. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter[J]. Plateau Meteor, 23(4):429-434(in Chinese).
- 孔凡超,史印山,尤凤春,等,2007. 华北冬季气温变化及背景场分析[J]. 气象科技,35(2):198-203. Kong F C, Shi Y S, You F C, et al, 2007. Variation of winter air temperature in North China and physical background[J]. Meteor Sci Technol, 35(2):198-203(in Chinese).
- 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 C Y, Yang H, Gu W, 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(2):113-122(in Chinese).
- 李思,武炳义,2019. 冬季欧亚大陆盛行天气型与北极增暖异常的可能联系[J]. 气象,45(3):345-361. Li S, Wu B Y, 2019. Possible connection between Arctic warming and Eurasia winter prevailing weather patterns[J]. Meteor Mon, 45(3):345-361(in Chinese).
- 李维京,李怡,陈丽娟,等,2013. 我国冬季气温与影响因子关系的年代际变化[J]. 应用气象学报,24(4):385-396. Li W J, Li Y, Chen L J, et al, 2013. Inter-decadal variability of the relationship between winter temperature in China and its impact factors[J]. J Appl Meteor Sci, 24(4):385-396(in Chinese).
- 李言蹊,陈海山,2021. 冬季亚洲中纬度极端低温事件与巴伦支-喀拉海异常增暖的关系及联系机制[J]. 大气科学,45(4):889-900. Li Y X, Chen H S, 2021. The relationship between winter extremely low temperature events in mid-latitude asia and abnormal warming over Barents-Kara Seas and associated mechanism[J]. Chin J Atmos Sci, 45(4):889-900(in Chinese).
- 梁苏洁,丁一汇,赵南,等,2014. 近50年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学,38(5):974-992. Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al, 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960-2013[J]. Chin J Atmos Sci, 38(5):974-992(in Chinese).
- 梁苏洁,赵南,丁一汇,2019. 北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究[J]. 地球物理学报,62(1):19-31. Liang S J, Zhao N, Ding Y H, 2019. Dominant trajectories and influenced regions of the near-surface cold air in the Arctic during positive and negative AO/NAM events[J]. Chin J Geophys, 62(1):19-31(in Chinese).
- 庞子琴,郭品文,2010. 不同年代际背景下AO与冬季中国东北气温的关系[J]. 大气科学学报,33(4):469-476. Pang Z Q, Guo P W, 2010. Interdecadal variation of relationship between AO and winter temperature interannual variability in Northeast China[J]. Trans Atmos Sci, 33(4):469-476(in Chinese).
- 申红艳,温婷婷,封国林,等,2021. 中国冬季气温季节内变率特征及环流分析[J]. 气象,47(3):327-336. Shen H Y, Wen T T, Feng G L, et al, 2021. Characteristics and circulation analysis of intraseasonal variability of winter temperature in China[J]. Meteor Mon, 47(3):327-336(in Chinese).
- 司东,马丽娟,王朋岭,等,2016. 2015/2016年冬季北极涛动异常活动及其对我国气温的影响[J]. 气象,42(7):892-897. Si D, Ma L J, Wang P L, et al, 2016. Anomalous activity of Arctic Oscillation in winter 2015/2016 and its impact on temperature in China[J]. Meteor Mon, 42(7):892-897(in Chinese).
- 孙健,李栋梁,邵鹏程,等,2019. 中国冬季气温月际变化特征及其对大气环流异常的响应[J]. 气象学报,77(5):885-897. Sun J, Li D L, Shao P C, et al, 2019. Inter-monthly variation of winter air temperature in China and its relation with atmospheric circulation anomalies[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):885-897(in Chinese).
- 谭晶,蔡怡,张海东,等,2016. 2012/2013年冬季中国气温异常成因分析[J]. 大气科学学报,39(3):361-369. Tan J, Cai Y, Zhang H D, et al, 2016. Analysis of the cause of the 2012/2013 winter temperature anomaly in China[J]. Trans Atmos Sci, 39(3):361-369(in Chinese).
- 王晓娟,龚志强,沈柏竹,等,2013. 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[J]. 气象学报,71(6):1061-1073. Wang X J, Gong Z Q, Shen B Z, et al, 2013. 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[J]. Acta Meteor Sin, 71(6):1061-1073(in Chinese).
- 韦玮,王林,陈权亮,等,2014. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系[J]. 大气科学,38(3):524-536. Wei W, Wang L, Chen Q L, et al, 2014. Interannual variations of early and late winter temperatures in China and their linkage[J]. Chin J Atmos Sci, 38(3):524-536(in Chinese).
- 韦玮,王林,陈权亮,等,2020. 我国前冬和后冬的划分及其气温的年际变异[J]. 大气科学,44(1):122-137. Wei W, Wang L, Chen Q L, et al, 2020. Definition of early and late winter and associated interannual variations of surface air temperature in China[J]. Chin J Atmos Sci, 44(1):122-137(in Chinese).
- 武炳义,2019. 2012年1月、2016年1月东亚两次极端严寒事件及其与北极增暖的可能联系[J]. 大气科学学报,42(1):14-27. Wu B

- Y, 2019. Two extremely cold events in East Asia in January of 2012 and 2016 and their possible associations with Arctic warming[J]. *Trans Atmos Sci*, 42(1): 14-27 (in Chinese).
- 谢星昉, 游庆龙, 王雨泉, 2018. 1961~2014年中国冬季极端低温变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 23(4): 429-441. Xie X Y, You Q L, Wang Y X, 2018. Changes in extreme low temperature in China in the winters from 1961 to 2014[J]. *Climatic Environ Res*, 23(4): 429-441 (in Chinese).
- 徐冉, 江琪, 桂海林, 等, 2021. 2021年1月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 47(4): 510-516. Xu R, Jiang Q, Gui H L, et al, 2021. Analysis of the January 2021 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteor Mon*, 47(4): 510-516 (in Chinese).
- 姚慧茹, 李栋梁, 2013a. 亚洲急流与冬季风的关系及其对中国气候的影响[J]. *气象学报*, 71(3): 429-439. Yao H R, Li D L, 2013a. The relationship between Asian jets and the winter monsoon and their impact on climate in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(3): 429-439 (in Chinese).
- 姚慧茹, 李栋梁, 2013b. 东亚副热带急流的空间结构及其与中国冬季气温的关系[J]. *大气科学*, 37(4): 881-890. Yao H R, Li D L, 2013b. Spatial structure of East Asia subtropical jet stream and its relation with winter air temperature in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(4): 881-890 (in Chinese).
- 于波, 李桑, 黄富祥, 等, 2019. 2016年1月京津冀地区连续性寒潮事件对比分析[J]. *干旱气象*, 37(6): 954-963. Yu B, Li S, Huang F X, et al, 2019. Comparative analysis of continuous cold wave events in Beijing-Tianjin-Hebei Region in January 2016[J]. *J Arid Meteor*, 37(6): 954-963 (in Chinese).
- 支蓉, 高辉, 2019. 2018/2019年冬季北半球大气环流特征及对我国冬季气温异常的影响[J]. *气象*, 45(7): 1019-1027. Zhi R, Gao H, 2019. Northern Hemisphere atmospheric circulation characteristics in winter 2018/2019 and its impact on temperature anomalies in China[J]. *Meteor Mon*, 45(7): 1019-1027 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理和方法: 第4版[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. Principles and Methods of Meteorology[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Chen S F, Chen W, Wei K, 2013. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO[J]. *Adv Atmos Sci*, 30(6): 1712-1724.
- Chen S F, Song L Y, 2019. Recent strengthened impact of the winter Arctic Oscillation on the Southeast Asian surface air temperature variation[J]. *Atmos*, 10(4): 164.
- Chen W, Lan X Q, Wang L, et al, 2013. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia[J]. *Chin Sci Bull*, 58(12): 1355-1362.
- Ding T, Gao H, Li X, 2021. Increasing occurrence of extreme cold surges in North China during the recent global warming slowdown and the possible linkage to the extreme pressure rises over Siberia[J]. *Atmos Res*, 248: 105198.
- Ding T, Gao H, Yuan Y, 2020. Pre-signal and influencing sources of the extreme cold surges at the Beijing 2022 winter olympic competition zones[J]. *Atmos*, 11(5): 436.
- Gong H N, Wang L, Chen W, 2019. Multidecadal changes in the influence of the Arctic Oscillation on the East Asian surface air temperature in boreal winter[J]. *Atmos*, 10(12): 757.
- He S P, Gao Y Q, Li F, et al, 2017. Impact of arctic oscillation on the East Asian climate: a review[J]. *Earth-Sci Rev*, 164: 48-62.
- Johnson N C, Xie S P, Kosaka Y, et al, 2018. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown[J]. *Nat Commun*, 9(1): 1724.
- Li F, Wang H J, Gao Y Q, 2014. On the strengthened relationship between the East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation: a comparison of 1950-70 and 1983-2012[J]. *J Climate*, 27(13): 5075-5091.
- Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al, 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109(11): 4074-4079.
- Luo X, Wang B, 2017. How predictable is the winter extremely cold days over temperate East Asia? [J]. *Climate Dyn*, 48(7/8): 2557-2568.
- Ma S M, Zhu C W, Liu B Q, et al, 2018. Polarized response of East Asian winter temperature extremes in the era of arctic warming [J]. *J Climate*, 31(14): 5543-5557.
- 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.
- Trenberth K E, Fasullo J T, Branstator G, et al, 2014. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming[J]. *Nat Climate Change*, 4(10): 911-916.
- Wang J, Yu C W, 2019. Beijing 2022 Weather Report[M]. Beijing: China Meteorological Press.

(本文责编:王蕾)