

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 Fanghong, Chen Haishan, Ma Hedi. 2018. Interdecadal variation in the relationship between North Atlantic Oscillation and extreme low temperature over northern China in winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (2): 239–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17101.

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

韩方红^{1,2} 陈海山^{1,2} 马鹤翟^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 本文基于中国地面气温日值网格数据集 (V2.0), 采用滑动相关和相关分析等方法, 揭示了冬季北大西洋涛动 (NAO) 对中国北方极端低温影响的事实, 进一步证实了东北后冬 (1、2 月) 冷日 (夜) 与同期 NAO 相关性的年代际变化。研究发现: 在 20 世纪 80 年代中期前, 东北后冬冷日 (夜) 频发, 与 NAO 的相关性较好, 而在 80 年代中期后东北后冬冷日 (夜) 少发, 与 NAO 的相关性减弱。其中, 1 月在 1969~1988 阶段, 东北冷日 (夜) 与 NAO 的相关性最好, 相关区域显著, 相关系数可达 -0.68 (-0.66), 而在 1989~2009 阶段二者相关性最弱, 相关区域不显著。进一步分析发现, 在不同年代际背景下, NAO 引起的大气环流异常是导致东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 相关性年代际变化的重要原因。相关性较好的年代, NAO 引起的环流异常有利于冷涡等天气系统维持在贝加尔湖到东北一带, 使东北地区气温偏低, 冷日 (夜) 频发; 相关性较弱的年代, 不利于冷空气南下, 使东北地区气温偏高, 冷日 (夜) 少发。

关键词 极端温度 北大西洋涛动 相关分析 年代际变化

文章编号 1006-9895(2018)02-0239-12

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17101

Interdecadal Variation in the Relationship between North Atlantic Oscillation and Extreme Low Temperature over Northern China in Winter

HAN Fanghong^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}, and MA Hedi^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the gridded daily surface air temperature database (V2.0) of China, the influences of wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on extreme low temperature over northern China are investigated. The interdecadal variation in the relationship between NAO and cold days (nights) during the same period over Northeast China (NEC) in late winter is revealed based on sliding correlation analysis and correlation analysis. The results show that cold days

收稿日期 2017-01-03; 网络预出版日期 2017-06-01

作者简介 韩方红, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事短期气候预测与气候变化研究。E-mail: fangh0919@126.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划重点专项 2016YFA0600702

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600702)

(nights) are more frequent in late winter over NEC and have a better correlation with NAO before the middle 1980s compared to that after the middle 1980s. Additionally, the correlation was most significant over NEC in January during the period of 1969–1988, which could reach -0.68 (-0.66), but became weak during the period of 1989–2009. Furthermore, it is found that the interdecadal variation in the relationship between NAO and cold days (nights) over NEC in January is largely attributed to the NAO-related atmospheric circulation anomalies under different interdecadal backgrounds. The weather systems such as cold vortex caused by the NAO-related atmospheric circulation anomalies can maintain over a large area from Lake Baikal to NEC, leading to lower than normal temperature and more frequent cold days (nights) over NEC in the years when significant correlation exists between NAO and cold days (nights). The opposite is true when there is no significant correlation between NAO and cold days (nights) in NEC.

Keywords Extreme temperature, NAO (North Atlantic Oscillation), Correlation analysis, Interdecadal variation

1 引言

极端温度作为极端天气气候事件的一种,一直受到科学界的高度重视。目前,国际上对气候极值的研究,主要采用某个百分位值作为极端值的阈值(Karl et al., 1999; 翟盘茂和潘晓华, 2003)。研究发现,自上世纪 50 年代开始,全球极端低温在年和季节尺度的发生频率均有减少趋势(Karl et al., 1991)。近 50 年来,尤其是 20 世纪 80 年代中期以来,中国 40°N 附近区域性极端低温事件呈显著减弱趋势(翟盘茂和潘晓华, 2003; 王晓娟等, 2013),但极端低温事件影响严重,例如,2008 年年初,中国多处出现持续低温、雨雪、冰冻灾害过程,对交通、电力、农业等重点行业造成了严重威胁(王凌等, 2008; 赵琳等, 2008)。因此,分析中国极端低温成因及其机理形成过程,为研究低温等极端气象灾害提供科学依据具有重要意义。

北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)是北大西洋地区亚速尔和冰岛附近中心气压的“跷跷板”变化(Walker, 1924),是北半球冬季最显著的低频偶极子模态。研究发现,NAO 与北极涛动(Arctic Oscillation, AO)在时间和空间上有很强的相似性,且二者具有高相关[线性相关系数高达 0.92(Ambaum et al., 2001)];但 AO 更具有显著的纬向对称结构(Thompson and Wallace, 1998)。相关研究表明,NAO 异常对欧洲甚至整个北半球天气和气候具有重要影响(Hurrell and van Loon, 1997; Vicente-Serrano and López-Moreno, 2008; Yuan and Sun, 2009; Li et al., 2013)。NAO 处于负位相时,会引起欧洲地区气温降低,冷事件频发(Hurrell, 1996)。中国处于与 NAO 相关的环流系统下游,随着 NAO 的增强和减弱,气温表现出冷暖异常。但由于 NAO 有很强的区域性,它与中国冬季气候变

率关系尚存在很大的不确定性。范可和刘辉(2013)研究发现,在欧亚型遥相关处于负位相,NAO 遥相关处于正位相,西伯利亚高压减弱的大气环流模态下,蒙古和中国 105°E 以东地区显著增温,但西南和青藏高原地区显著降温,反之亦然。谭桂容等(2010)研究指出,2008 年 1 月中国气温大范围异常偏低与同期北大西洋西风急流及 NAO 遥相关环流异常存在紧密联系。孙诚和李建平(2012)研究发现,2009/2010 年冬季,中国北方异常低温与 NAO 负位相也存在紧密联系。Wu and Wang (2002b)研究指出,冬季 AO 可直接影响东亚 35°N 以北地表气温、海平面气压和 500 hPa 东亚大槽的变化,这种影响独立于西伯利亚高压,但他们并没有给出与该影响机理相关的具体事实。此外,龚道溢和王绍武(2000)研究发现,NAO 位相在 20 世纪 80 年代中期出现年代际转折,并造成气候系统关系出现年代际变化。Sun et al. (2008)研究指出,在 20 世纪 70 年代中期前夏季 NAO 与同期亚洲中东部气温相关性较弱,而在 70 年代中期后二者相关性显著增强。Zuo et al. (2016)通过滑动相关分析发现,在不同年代际背景下,冬季 NAO 与中国中南部气温关系存在不稳定性,且二者相关性的年代际变化与 NAO 相关环流系统的年代际变化有关。

近年来,中国北方极端低温又呈频发态势,如 2009/2010 年冬季新疆北部出现低温和雪灾(陈颖等, 2011)。目前 NAO 对中国气温的影响已受关注,但对冬季 NAO 与中国极端低温关系的变化特征尚不完全清楚。且大多研究是从冬季气候平均的角度分析,对季节内 NAO 与中国极端低温关系的年代际变化特征及其相关机理的研究相对较少。因此,本文从极端温度阈值的角度出发,围绕冬季季节内中国北方冷日(夜)与同期 NAO 相关性差异,

探讨二者之间关系的可能年代际变化及其影响机理, 为进一步认识 NAO 对中国北方极端低温的影响提供参考依据。

2 资料与方法

本文所用的气温资料是中国地面气温日值网格数据集 (V2.0), 资料的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$; 大气环流资料是美国国家环境预报中心和大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析月平均资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直分辨率共 17 层; 北大西洋涛动指数 (NAOI) 是美国气候预报中心 (CPC) 提供的逐月 NAOI, 该指数是对 500 hPa 月平均位势高度场旋转经验正交函数分解 (REOF) 得到, 主模态对应的时间序列作为 NAOI (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml>[2017-5-4])。本文研究阶段为 1961/1962~2011/2012 共 51 年, 当年 12 月至次年 2 月为冬季。

本文参照 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 气候指数的定义方法, 确定极端温度指数 (表 1): 暖日 (TX90P)、冷日 (TX10P)、暖夜 (TN90P) 和冷夜 (TN10P)。如表 1 所示, 在计算阈值过程中, 采用 5 天滑动窗口的方法对气温资料处理, 并选取 1971~2000 年作为基底年。这里把冷日 (夜) 定义为极端低温事件, 暖日 (夜) 定义为极端高温事件。

表 1 极端温度指数定义

Table 1 Definition of extreme temperature indices

指数	名称	定义	单位
TX90P	暖日	日最高温度 > 90% 分位值的天数	d
TX10P	冷日	日最高温度 < 10% 分位值的天数	d
TN90P	暖夜	日最低温度 > 90% 分位值的天数	d
TN10P	冷夜	日最低温度 < 10% 分位值的天数	d

本文的主要分析方法有: 相关分析、经验正交函数分解 (EOF)、滑动相关分析、线性回归等, 显著性均采用 *t*-test 方法检验。本文选取 1971~2000 年的平均值作为气候平均态, 原始场减去平均态得到距平场。同时, 在相关和回归分析前, 对所用资料均去除了线性趋势。

3 近 51 年中国北方冬季温度与 NAO 相关性分析

3.1 极端低温与 NAO 相关性分析

研究发现, 中国冬季气温存在季节进程的差

异, 但差异的时空特征和机制尚不完全清楚。故本文以 1961/1962~2011/2012 共 51 年中国北方冬季季节内冷日 (夜) 为研究对象, 分析中国北方冬季季节内冷日 (夜) 与同期 NAO 的相关性差异。

图 1 是中国北方极端低温与同期 NAOI 相关系数空间分布。其中, 冬季 (12~2 月) 冷日 (夜) 与 NAO 相关系数以负相关为主 (图 1a、e), 相关区域除西北中东部外均表现为显著相关。12 月冷日 (夜) 与 NAO 整体相关系数较小 (图 1b、f), 且未通过显著性检验; 二者相关性主要体现在后冬 (1、2 月), 呈大面积负相关。1 月冷日 (夜) 与 NAO 显著相关区域主要集中在东北 (图 1c、g), 相关系数可达 -0.60 (-0.54), 通过 99% 显著性检验。2 月冷日 (夜) 与 NAO 相关系数 (图 1d、h), 除西北中东部外均表现为显著相关, 大值区位于东北, 相关系数可达 -0.61 (-0.65), 通过 99% 显著性检验。可见, 近 51 年来, 中国北方冬季季节内冷日 (夜) 与 NAO 相关性存在一定差异, 二者相关性在东北后冬尤为显著。

3.2 平均气温与 NAO 相关性分析

研究表明, 极端温度的变化与平均气温的变化密切相关 (郭志梅等, 2005; 刘学华等, 2006)。图 2 是中国北方平均气温与同期 NAOI 相关系数空间分布。其中, 冬季 (12~2 月) 平均气温与 NAO 相关系数以正相关为主 (图 2a), 在新疆东北部和东北等地表现为显著相关; 12 月平均气温与 NAO 相关系数整体很小 (图 2b), 且未通过显著性检验; 1 月平均气温与 NAO 相关系数在黑龙江和内蒙古东北部、吉林、辽宁和山东等地表现为显著正相关 (图 2c), 在西北地区不显著; 2 月平均气温与 NAO 显著相关区域主要集中在东北 (图 2d), 以正相关为主。研究发现, NAO/AO 可通过影响东亚大槽、西伯利亚高压、东亚冬季风等系统, 使其变得更加活跃, 进而使中国冬季大部分地区气温偏低, 冬季气温的偏低将有利于极端低温的频发, 反之亦然 (武炳义和黄荣辉, 1999; Wu and Wang, 2002a)。

由于区域性极端高、低温变化存在不对称性特征 (任福民和翟盘茂, 1998), 我们通过计算东北冬季季节内暖日 (夜) 与同期 NAOI 相关系数发现 (图略), 二者相关系数在 12 月以负相关为主, 1、2 月以弱正相关为主, 但相关区域不显著。说明东北冬季季节内暖日 (夜)、冷日 (夜) 与 NAO 相关

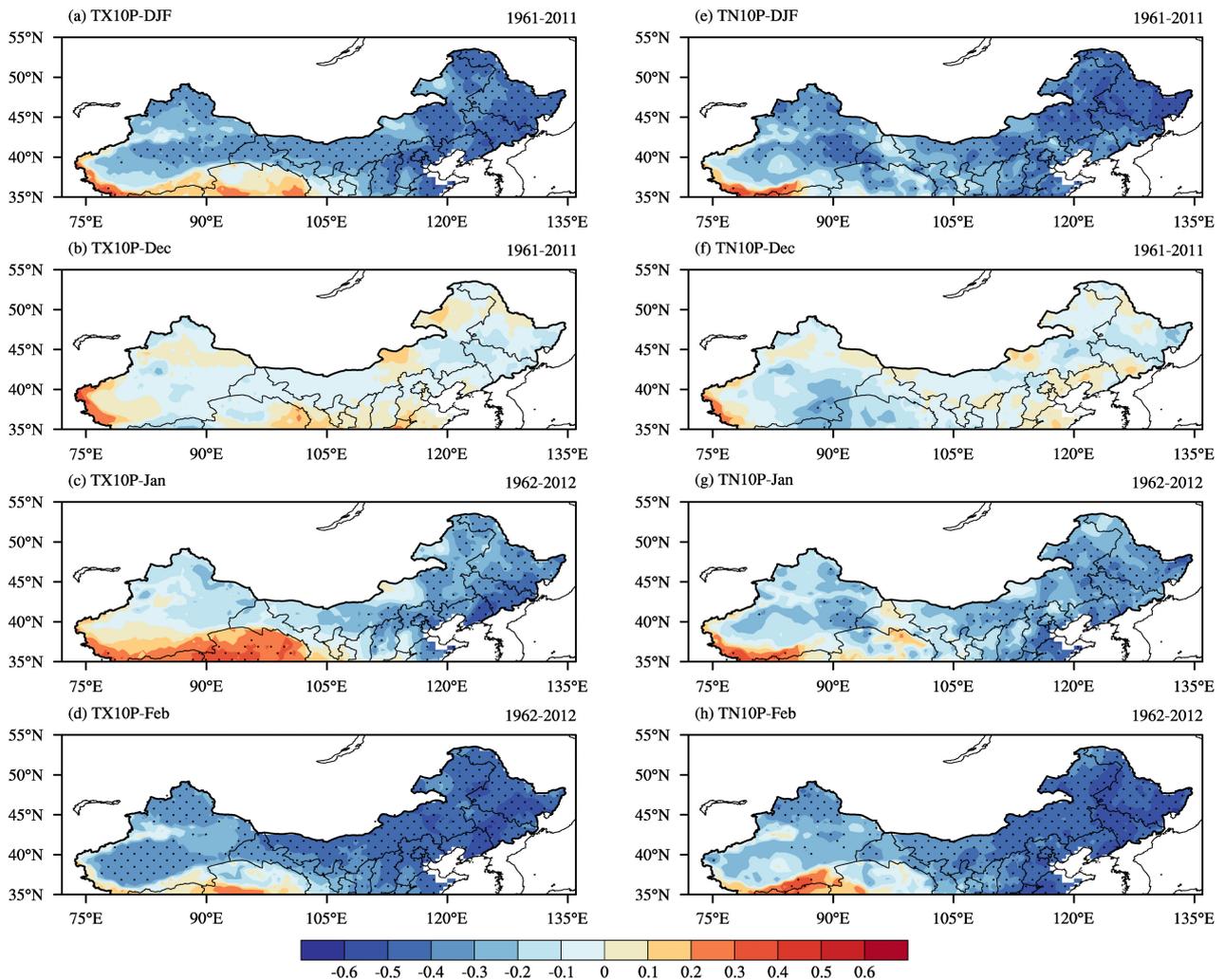


图1 中国北方极端低温指数与北大西洋涛动指数 (NAOI) 相关系数空间分布: (a、e) 12~2月; (b、f) 12月; (c、g) 1月; (d、h) 2月。其中 (a-d) 为冷日; (e-h) 为冷夜。打点区域表示通过 0.05 显著性检验, 下同

Fig. 1 Spatial distributions of correlation coefficients between North Atlantic Oscillation Index (NAOI) and extreme low temperature index TX10P (cold days) over northern China in (a) winter (DJF, December–February), (b) December (Dec), (c) January (Jan), (d) February (Feb). (e–h) are the same as (a–d) but for correlation coefficients between NAOI and TN10P (cold nights). Black dots denote significance at the 95% confidence level, the same below

系数并不是相反的, NAO 对东北冬季季节内极端高、低温的影响同样具有不对称性。对比 NAO 对东北冬季季节内极端高、低温的影响发现, 不对称性对该影响起到一定作用, 使得 NAO 对东北极端低温的影响要高于极端高温。

以上分析可知, NAO 通过东北后冬平均气温的变化对该区域极端低温产生显著影响, 极端高、低温不对称性对该影响起到一定作用, 使 NAO 对东北极端低温的影响更大。由于显著相关区域主要集中在东北, 下面重点分析东北地区 (38°~53.5°N, 113.5°~135.5°E) 冷日 (夜) 与同期 NAO 的相关关系。

4 东北极端低温的时空特征及与 NAO 相关性的年代际变化分析

4.1 东北极端低温的时空特征

对东北冬季季节内冷日 (夜) 标准化场 EOF 分析发现, 12、1 月和 2 月东北冷日 (夜) EOF 第一模态 (EOF1) 空间分布非常相似, 均表现为全区一致型 (图略), 解释方差分别为 62.9% (54.6%)、62.2% (61.3%)、70.6% (69.2%), 通过 North 检验 (North et al., 1982)。其中, 12 月和 2 月空间分布表现为正异常, 1 月空间分布表现为负异常。冷日 (夜) EOF1 时间序列在 12 月 (图 3a、d)、1 月 (图

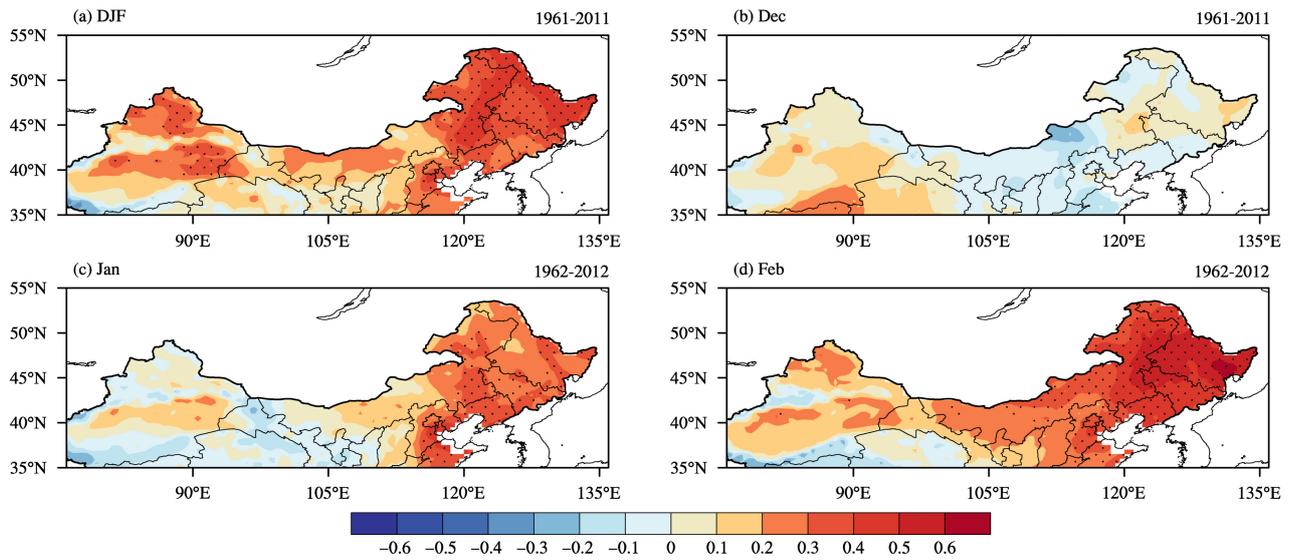


图2 中国北方平均气温与NAOI相关系数空间分布：(a) 12~2月；(b) 12月；(c) 1月；(d) 2月

Fig. 2 Spatial distributions of correlation coefficients between NAOI and mean temperature over northern China in (a) DJF, (b) December, (c) January, (d) February

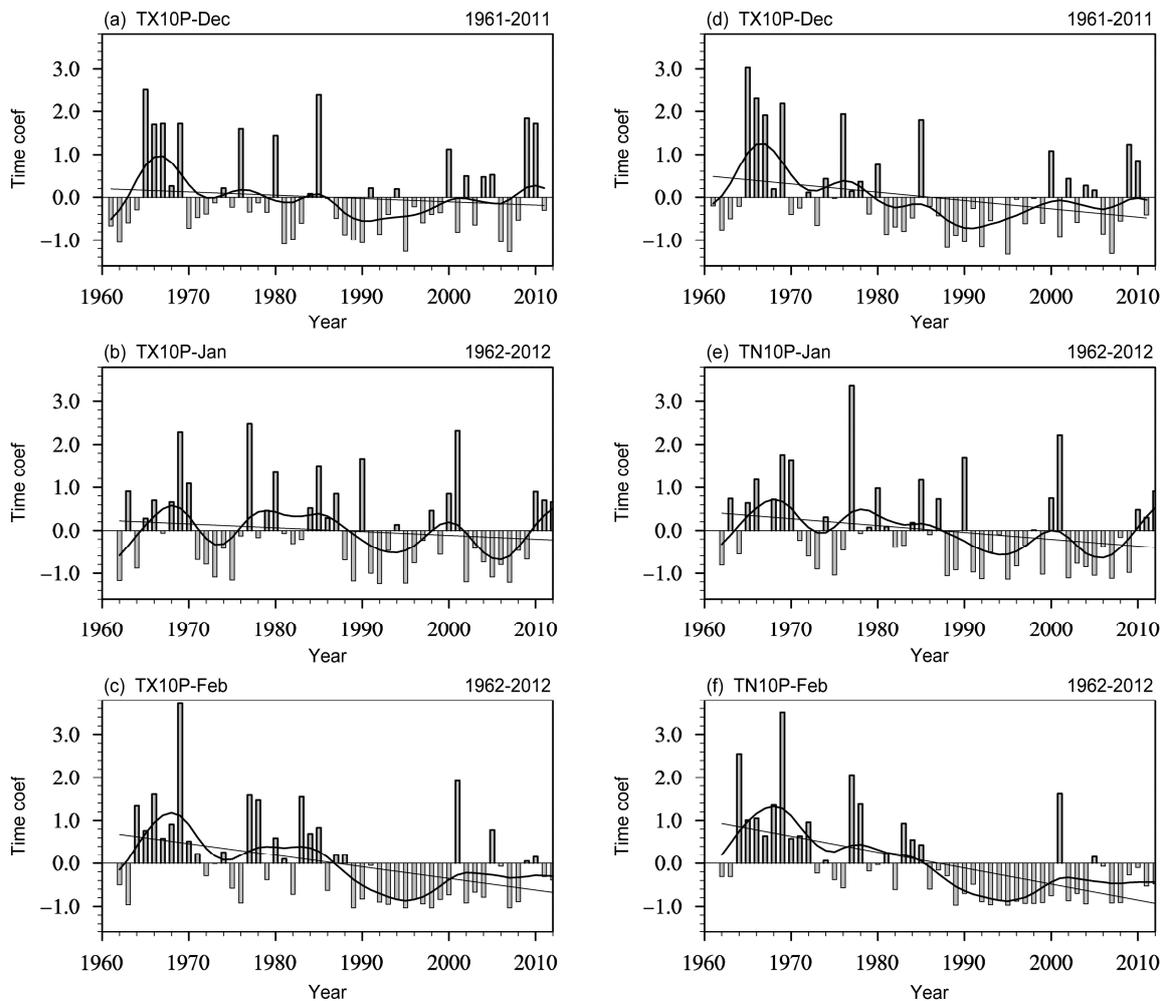


图3 东北极端低温指数 EOF1 时间序列：(a、d) 12月；(b、e) 1月；(c、f) 2月。其中 (a-c) 为冷日；(d-f) 为冷夜。曲线代表 11 点高斯滤波，直线代表趋势线

Fig.3 Time series of EOF1 of extreme low temperature index TX10P over Northeast China (NEC) in (a) December, (b) January, (c) February. (d-f) are the same as (a-c), but for TN10P. Curves indicate results of 11-point Gaussian filtering, straight lines indicate the trend line

3b、e) 和 2 月 (图 3c、f) 均存在显著的年代际变化特征 (1 月 EOF1 时间序列乘以-1.0, 下同), 在 20 世纪 80 年代中期前基本为正位相指数, 80 年代中期后基本为负位相指数。说明 20 世纪 80 年代中期前东北冬季冷日 (夜) 频发, 80 年代中期后东北冬季冷日 (夜) 少发, 这与 20 世纪 80 年代中期 NAO 位相的转变相对应 (龚道溢和王绍武, 2000)。此外, 可以看出, 12、1 月和 2 月东北冷日 (夜) 发生频次整体呈下降趋势, 与全球变暖趋势一致 (Karl et al., 1991); 但近年来东北冷日 (夜) 发生频次再次呈现增多态势。12、1 月和 2 月东北冷日 (夜) 第二模态 (EOF2) 空间分布表现为区域东北—西南反相变化 (图略), 解释方差分别为 13.7% (14.7%)、11.6% (11.3%)、14.8% (12.0%), 与 EOF1 不同的是, EOF2 时间序列表现为年际变化特征 (图略)。

表 2 是东北冬季季节内冷日 (夜) EOF1 时间序列与同期 NAOI 相关系数。由表 2 可知, 东北后冬 (1、2 月) 冷日 (夜) EOF1 时间序列与 NAOI 相关系数较大, 分别为-0.39(-0.34)、-0.49(-0.50), 除 1 月冷夜外, 均通过 99% 显著性检验。而 12 月东北冷日 (夜) EOF1 时间序列与 NAOI 相关系数较小, 且未通过显著性检验, 说明 NAO 对东北冷日 (夜) 的影响主要体现在后冬。

表 2 东北极端低温指数 EOF1 时间序列与北大西洋涛动指数 (NAOI) 相关系数

Table 2 Correlation between North Atlantic Oscillation Index (NAOI) and the time series of EOF1 (the first EOF mode) of extreme low temperature indices over Northeast China (NEC)

时间尺度/月	极端低温指数与 NAOI 的相关系数	
	TX10P	TN10P
12	-0.04	-0.03
1	-0.39**	-0.34*
2	-0.49**	-0.50**

*代表通过 0.05 显著性水平检验。

**代表通过 0.01 显著性水平检验。

4.2 相关性年代际变化分析

为研究东北后冬 (1、2 月) 冷日 (夜) 与 NAO 相关性的年代际变化, 图 4 给出了东北后冬冷日 (夜) EOF1 时间序列与同期 NAOI 的滑动相关系数 (乘以-1.0), 滑动窗口取为 21 年。在滑动相关前, 同样进行了标准化和去趋势处理。

如图 4a、b 所示, 东北后冬冷日 (夜) 与 NAO 存在 21 年滑动相关关系, 在 20 世纪 80 年代中期

前滑动相关系数维持在 0.43 左右, 基本通过 95% 显著性检验, 80 年代中期后这种相关关系明显减弱, 不再具有统计上的显著性。说明东北后冬冷日 (夜) 与 NAO 相关性存在年代际变化特征, 且该相关关系存在不稳定性, 在 20 世纪 80 年代中期前, NAO 对东北后冬冷日 (夜) 影响显著, 80 年代中期后影响不显著。值得注意的是, 虽然 1、2 月滑动相关系数均发生了年代际变化, 但比较而言, 1 月滑动相关系数变化较大, 在 70 年代末达到最大值, 随后迅速减小, 90 年代末达到最小值, 此后相关系数又有所增加。其中, 东北 1 月冷日 (夜) 与 NAO 相关系数在 1979 年 (对应 1969~1989 阶段) 最大, 为-0.54 (-0.52), 通过 95% 显著性检验, 在 1999 年 (对应 1989~2009 阶段) 最小, 为-0.02 (0.04), 未通过显著性检验。2 月滑动相关系数变化较小。在 1969~1989 和 1989~2009 阶段, 东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 具有最强、最弱相关, 为了避免时间段重合, 这里选取 1969~1988 和 1989~2009 阶段作为本文的典型阶段, 用来分析东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 相关性的年代际变化。我们同样对 1969~1989 和 1990~2009 阶段进行了分析, 最终结果与 1969~1988 和 1989~2009 阶段结果较一致 (图略)。Wu et al. (2013) 对冬季欧亚环流场分析发现, 1988 年以后欧亚大陆北部异常反气旋、欧洲南部和亚洲东北部异常气旋均呈现增强趋势。此外, 相关研究表明, NAO/AO 及极涡均是中、高纬环流系统, 三者之间关系密切, 且冬季恰好都在 1988/1989 年前后出现转折, 相应的环流场也发生了显著变化 (Tanaka et al., 1996; Walsh et al., 1996; Watanabe and Nitta, 1999)。因此, 对比分析 1988 年前后冬季 NAO 对中国北方极端低温的影响差异十分必要。

图 5 是 1969~1988 和 1989~2009 阶段东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAOI 相关系数空间分布。其中, 在 1969~1988 阶段, 东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 的相关系数较大 (图 5a、c), 在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东北部等地表现为显著负相关, 相关系数可达-0.68 (-0.66)。与 1969~1988 阶段相比, 1989~2009 阶段东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 的相关系数明显减弱 (图 5b、d), 整体相关系数较小, 相关区域不显著, 与滑动相关分析结果一致, 进一步说明东北 1 月冷日 (夜) 与 1 月 NAO 相关性存在年代际变化。

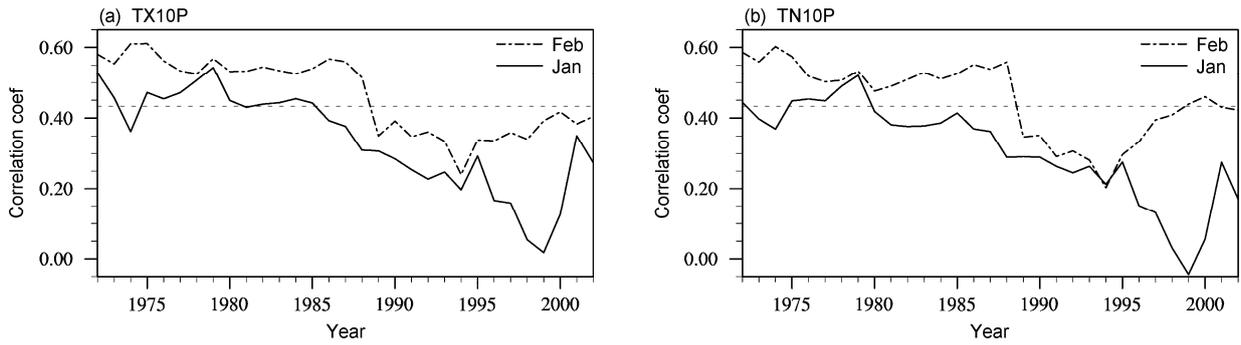


图4 东北后冬（1、2月）极端低温指数 EOF1 时间序列与 NAOI 滑动相关曲线（乘以-1.0）：（a）冷日；（b）冷夜。滑动窗口取 21 年，虚线为 0.05 显著性水平线

Fig. 4 Sliding correlations (multiplied by -1.0) in a 21-year window between NAOI and time series of EOF1 of extreme low temperature indices over NEC in late winter: (a) TX10P; (b) TN10P. Dotted line indicates significance at the 95% confidence level

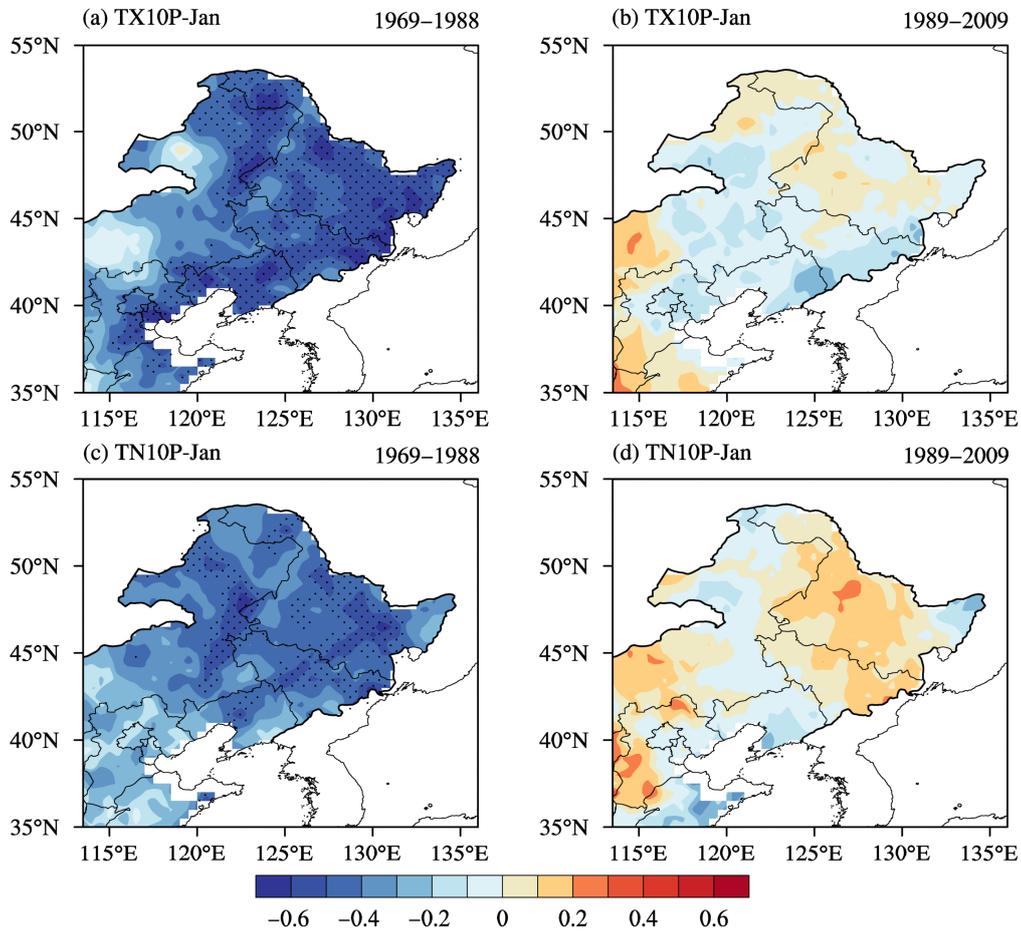


图5 东北1月极端低温指数与1月NAOI相关系数空间分布：（a、c）1969~1988；（b、d）1989~2009。其中（a、b）冷日，（c、d）为冷夜
Fig. 5 Spatial distributions of correlation coefficients between NAOI and extreme low temperature index TX10P over NEC in January for the periods (a) 1969-1988 and (b) 1989-2009. (c, d) are the same as (a, b), but for correlation coefficients between NAOI and TN10P

5 不同年代际背景下 NAO 相关的大气环流异常特征

为揭示东北 1 月冷日（夜）与 1 月 NAO 相关

性年代际变化的大气环流成因，依据 4.2 节，分别对 1969~1988 和 1989~2009 阶段 1 月大气环流场进行分析，这里将东北 1 月冷日（夜）EOF1 时间序列和 1 月 NAOI 分别与 500 hPa 位势高度场回

归。

图 6 是 1969~1988 和 1989~2009 阶段东北 1 月冷日(夜) EOF1 时间序列与 500 hPa 位势高度异常场回归系数空间分布。其显著特征是:东亚中高纬和极地地区位势高度场反位相变化,但 1989~2009 阶段极地地区的范围和强度较 1969~1988 阶段有所减弱(图 6a-d)。其中,在东亚中高纬地区表现为东西向带状分布,最大中心位于贝加尔湖附近,极地地区表现为与东亚中高纬相反的异常。极地位势高度偏高而东亚位势高度偏低,意味着极涡强度偏弱且易分裂南下。该环流形势有利于冷涡等天气系统维持在贝加尔湖到中国东北一带,从而为东北冷日(夜)频发提供有利条件。但北大西洋地区位势高度场存在显著差异:在 1969~1988 阶段北大西洋地区表现为显著的 NAO 负位相结构(图 6a,c),而在 1989~2009 阶段 NAO 结构不明显(图 6b,d),意味着 NAO 可能是影响 1969~1988 阶段东北冷日(夜)频发的重要原因。

图 7 是 1969~1988 和 1989~2009 阶段 1 月 NAOI 与 500 hPa 位势高度异常场回归系数空间分布。不同于图 6,东亚中高纬和极地地区位势高度场明显不同,1969~1988 阶段 NAO 引起的环流异常与东北 1 月冷日(夜)对应的环流异常较相似(图 7a),但符号相反。表现为东亚中高纬和极地地区位势高度场的反位相变化,说明该阶段 NAO 引起的环流异常有利于冷涡等天气系统维持在贝加尔湖到中国东北一带,使东北气温偏低,冷日(夜)频发,与 NAO 的相关性较好。1989~2009 阶段 NAO 引起的环流异常在贝加尔湖西北地区表现为低压异常(图 7b),山东半岛上空表现为高压异常,使得贝加尔湖地区高压脊和东亚大槽系统强度减弱,不利于极地冷空气南下,使该阶段东北地区气温较正常年偏高,冷日(夜)少发,与 NAO 的相关性较弱。同时,在北大西洋地区两阶段位势高度场仍存在差异,两阶段虽均存在南北偶极子,但偶极子的中心位置和振幅存在显著差异,1989~2009 阶段 NAO 活动中心相对于 1969~1988 阶段发生明显东移。NAO 活动中心的东移调控着局地环流的变化,可能是引起东北 1 月冷日(夜)与同期 NAO 相关性年代际变化的重要原因。可见,东北 1 月冷日(夜)与 1 月 NAO 相关性的年代际变化,极大程度上与 NAO 相关环流系统的年代际变化有关。

此外,不少学者从波流相互作用的角度分析 NAO 相关环流的演变(Deweaver and Nigam, 2000)。已有研究表明,副热带西风急流作为 Rossby 的传播波导,在 NAO 信号向下游传播过程中起着极为重要的作用(Branstator, 2002; Watanabe, 2004)。由于风暴轴与对流层上层急流有很好的对应关系,风暴轴区域的瞬变扰动导致的凝结加热异常,通过热量和动量的输送,对中纬度大气环流的形成和演变起着重要作用。Luo and Gong (2006) 研究指出,近 30 年来,急流和风暴轴的年代际东移一定程度上导致了 NAO 活动中心的年代际东移。因此,我们认为急流和风暴轴的年代际变化可能是引起 NAO 相关环流系统年代际变化,东北后冬冷日(夜)与 NAO 相关性年代际变化的原因之一。

6 结论和讨论

本文基于中国地面气温日值网格数据集(V2.0),采用多种统计方法,分析了中国北方冬季季节内冷日(夜)与同期 NAO 的相关性差异,并对东北 1 月冷日(夜)与 1 月 NAO 相关性的年代际变化及其可能成因进行了初步探讨。主要揭示的特征有:近 51 年来,中国北方冬季季节内冷日(夜)与 NAO 相关性在东北后冬(1、2 月)表现为显著负相关,且二者相关关系存在年代际变化,该相关关系在 20 世纪 80 年代中期后减弱。其中,东北 1 月冷日(夜)与 1 月 NAO 相关性在 1969~1988 阶段最好,相关区域显著,在 1989~2009 阶段最弱,相关区域不显著。

通过环流场分析发现,东北 1 月冷日(夜)与 1 月 NAO 相关性的年代际变化极大程度上与 NAO 相关环流系统的年代际变化有关。1969~1988 阶段 NAO 引起的大气环流异常有利于冷涡等天气系统维持在贝加尔湖到中国东北一带,使东北地区气温偏低,冷日(夜)频发,与 NAO 的相关性较好。而在 1989~2009 阶段 NAO 引起的大气环流异常不利于极地冷空气南下,使东北地区气温较正常年偏高,冷日(夜)少发,与 NAO 的相关性较弱。有研究发现,2012/2013 年冬季东北地区出现异常低温雨雪天气(李倩等, 2014),由图 4 可知,该时期东北极端低温与 NAO 的关系有增强态势。因此,通过分析极端低温与 NAO 关系的内在联系,为进一步认识 NAO 对中国北方极端低温的影响及东北冷冻原因提供科学依据,具有重要参考意义。

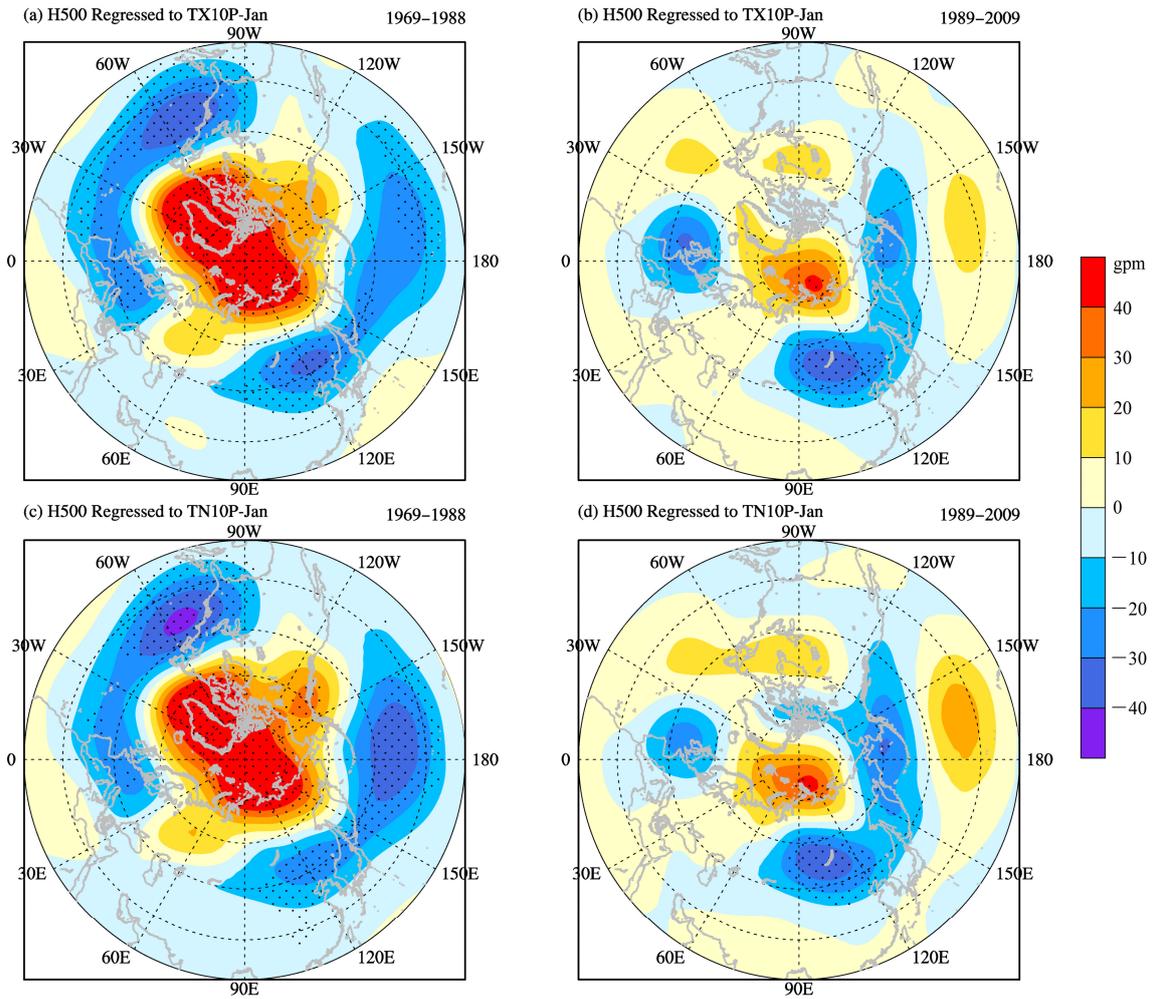


图 6 东北 1 月极端低温指数 EOF1 时间序列与 500 hPa 位势高度异常场回归系数 (单位: gpm): (a、c) 1969~1988; (b、d) 1989~2009。其中 (a、b) 为冷日, (c、d) 为冷夜

Fig. 6 Regressions of geopotential height anomalies at 500 hPa (units: gpm) against time series of EOF1 of extreme low temperature index TX10P over NEC in January for the periods (a)1969-1988 and (b)1989-2009. (c, d) are the same as (a, b), but for TN10P

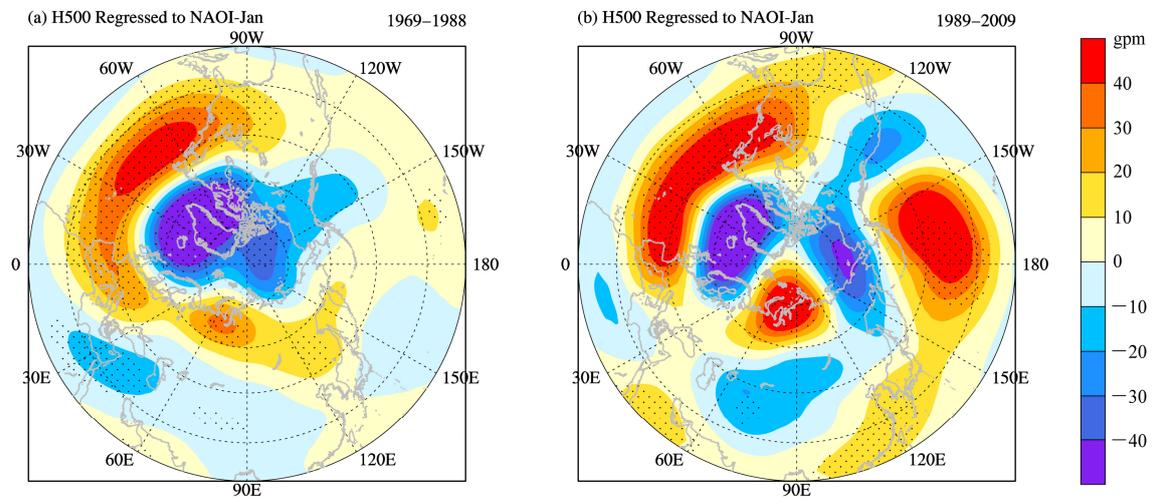


图 7 1 月 NAOI 与 500 hPa 位势高度异常场回归系数 (单位: gpm): (a) 1969~1988; (b) 1989~2009

Fig. 7 Regressions of geopotential height anomalies at 500 hPa (units: gpm) against NAOI in January for the periods (a) 1969-1988 and (b) 1989-2009

研究发现, NAO 不但对极端气温存在影响, 对极端降水也存在一定影响。如 Tian and Fan (2012) 研究表明, 春季 NAO 对夏季长江中下游极端降水存在显著影响。中高纬强降雪的年代际变化与 NAO/ AO 的年代际变化也存在较为紧密的联系 (Seager et al., 2010; 王冀等, 2015)。此外, 一些研究表明, NAO 对极端天气气候变化的影响与北极海冰及热带海温异常等外强迫有关。例如, Liu et al. (2012) 研究指出, 秋季北极海冰的异常偏少, 导致冬季北半球海平面气压场表现出类似但又区别于典型负相位 AO 模态, 在该环流型及海冰减少提供更多水汽的共同作用下, 北美、欧洲及东亚大部分地区出现异常降雪。相关研究指出, 秋季北极海冰的异常偏少可能是导致近年来欧亚大陆冬季低温雨雪冰冻频发, 中国极端天气气候灾害频繁发生的主要原因之一 (武炳义等, 2011; Liu et al., 2012; 何金海等, 2015)。Hoerling et al. (2004) 研究认为, 近几十年 NAO/AO 的增强可能与热带印度洋增暖有关。热带太平洋, 热带大西洋和热带印度洋海温异常均可在北半球激发出与 NAO/AO 模态相似的响应 (Rodwell et al., 1999; Hoerling et al., 2004; Li et al., 2006)。另外, 也有诸多研究阐述了欧亚—青藏高原积雪强迫对 NAO/AO 的影响 (Watanabe and Nitta, 1999; Cohen and Entekhabi, 2001; Gong et al., 2002)。北极海冰、热带海温和积雪等下垫面异常为冬季 NAO 影响中国极端天气气候异常提供了可能, 探讨这些因素无疑是下一阶段重点关注的内容。本文所得结果仅限于统计分析, 极端低温与 NAO 相关性年代际变化的过程、物理机制还需更多的定量诊断和数值模拟方法深入研究。

参考文献 (References)

- Ambaum M H P, Hoskins B J, Stephenson D B. 2001. Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? [J]. *J. Climate*, 14 (16): 3495–3507, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<3495:AONNAO>2.0.CO;2.
- Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1893–1910, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1893:CTTJWS>2.0.CO;2.
- 陈颖, 江远安, 毛炜峰, 等. 2011. 气候变化背景下新疆北部 2009/2010 年冬季雪灾 [J]. *气候变化研究进展*, 7 (2): 104–109. Chen Ying, Jiang Yuan'an, Mao Weifeng, et al. 2011. 2009/2010 winter snow disaster in northern Xinjiang under global warming [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 7 (2): 104–109, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.005.
- Cohen J, Entekhabi D. 2001. The influence of snow cover on Northern Hemisphere climate variability [J]. *Atmos. -Ocean*, 39 (1): 35–53, doi:10.1080/07055900.2001.9649665.
- Deweaver E, Nigam S. 2000. Do stationary waves drive the zonal-mean jet anomalies of the northern winter? [J]. *J. Climate*, 13 (13): 2160–2176, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2160:DSWDTZ>2.0.CO;2.
- 范可, 刘辉. 2013. 近百年东亚冬季气温及其大气环流变化型态 [J]. *大气科学*, 37 (2): 383–394. Fan Ke, Liu Hui. 2013. Winter temperature over East Asia and atmospheric circulation patterns in the last 100 years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 37 (2): 383–394, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12305.
- 龚道溢, 王绍武. 2000. 北大西洋涛动指数的比较及其年代际变率 [J]. *大气科学*, 24 (2): 187–192. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2000. The North Atlantic Oscillation index and its interdecadal variability [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 24 (2): 187–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.02.07.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J. 2002. A large-ensemble model study of the wintertime AO–NAO and the role of interannual snow perturbations [J]. *J. Climate*, 15 (23): 3488–3499, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<3488:ALEMSO>2.0.CO;2.
- 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 Zhimei, Miao Qilong, Li Xiong. 2005. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 25 (4): 448–454, doi:10.3969/j.issn.1000-0690.2005.04.010.
- 何金海, 武丰民, 祁莉. 2015. 秋季北极海冰与欧亚冬季气温在年代际和年际尺度上的不同联系 [J]. *地球物理学报*, 58 (4): 1089–1102. He Jinhai, Wu Fengmin, Qi Li. 2015. Decadal/interannual linking between autumn Arctic sea ice and following winter Eurasian air temperature [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 58 (4): 1089–1102, doi:10.6038/cjg20150401.
- Hoerling M P, Hurrell J W, Xu T, et al. 2004. Twentieth century North Atlantic climate change. Part II: Understanding the effect of Indian Ocean warming [J]. *Climate Dyn.*, 23 (3–4): 391–405, doi:10.1007/s00382-004-0433-x.
- Hurrell J W. 1996. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23 (6): 665–668, doi:10.1029/96GL00459.
- Hurrell J W, van Loon H. 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation [J]. *Climatic Change*, 36 (3): 301–326, doi:10.1023/A:1005314315270.
- Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. 1991. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 18 (12): 2253–2256, doi:10.1029/91GL02900.
- Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. 1999. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary [J]. *Climatic Change*, 42 (1): 3–7, doi:10.1023/A:1005491526870.
- Li J P, Sun C, Jin F F. 2013. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (20): 5497–5502, doi:10.1002/2013GL057877.
- 李倩, 秦玉琳, 裴春明. 2014. 2012/2013 年东北地区冬季异常低温多雪的气候背景分析 [J]. *气候变化研究快报*, 3 (2): 61–68. Li Qian, Qin Yulin, Pei Chunming. 2014. Climate background analysis of anomalously

- low temperature and snowy in Northeast China during 2012/2013 winter [J]. *Climate Change Research Letters* (in Chinese), 3 (2): 61–68, doi:10.12677/ccrl.2014.32010.
- Li S L, Hoerling M P, Peng S L, et al. 2006. The annular response to tropical Pacific SST forcing [J]. *J. Climate*, 19 (9): 1802–1819, doi:10.1175/JCLI3668.1.
- Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (11): 4074–4079, doi:10.1073/pnas.1114910109.
- 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 2006. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异 [J]. *热带气象学报*, 22 (6): 618–624. Liu Xuehua, Ji Zhijian, Wu Hongbao, et al. 2006. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 22 (6): 618–624, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.06.015.
- Luo D H, Gong T T. 2006. A possible mechanism for the eastward shift of interannual NAO action centers in last three decades [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24815, doi:10.1029/2006GL027860.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of Empirical Orthogonal Functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. *大气科学*, 22 (2): 217–227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951–1990 [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Sci. Atmos. Sinica)* (in Chinese), 22 (2): 217–227, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.02.10.
- Rodwell M J, Rowell D P, Folland C K. 1999. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate [J]. *Nature*, 398 (6725): 320–323, doi:10.1038/18648.
- Seager R, Kushnir Y, Nakamura J, et al. 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (14): L14703, doi:10.1029/2010GL043830.
- 孙诚, 李建平. 2012. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析 [J]. *气候与环境研究*, 17 (3): 259–273. Sun Cheng, Li Jianping. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2012 winter [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (3): 259–273, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10070.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2008. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and Middle East Asian air temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D15), doi:10.1029/2007JD009626.
- 谭桂容, 陈海山, 孙照渤, 等. 2010. 2008 年 1 月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 175–183. Tan Guirong, Chen Haishan, Sun Zhaobo, et al. 2010. Linkage of the cold event in January 2008 over China to the North Atlantic Oscillation and stratospheric circulation anomalies [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 34 (1): 175–183, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.16.
- Tanaka H L, Kanohgi R, Yasunari T. 1996. Recent abrupt intensification of the northern polar vortex since 1988 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (6): 947–954, doi:10.2151/jmsj1965.74.6_947.
- 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, doi:10.1029/98GL00950.
- Tian B Q, Fan K. 2012. Relationship between the late spring NAO and summer extreme precipitation frequency in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (6): 455–460.
- Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I. 2008. Nonstationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D20): D20120, doi:10.1029/2008JD010382.
- Walker G T. 1924. Correlation in seasonal variations of weather IX [J]. *Mem. Ind. Meteor. Dept.*, 24: 275–332.
- Walsh J E, Chapman W L, Shy T L. 1996. Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic [J]. *J. Climate*, 9 (2): 480–486, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0480:RDOSLP>2.0.CO;2.
- 王冀, 何丽焯, 张雪梅. 2015. 华北农牧交错带冬季降雪时空变化特征 [J]. *地理学报*, 70 (9): 1363–1374. Wang Ji, He Liye, Zhang Xuemei. 2015. The spatial and temporal variations of winter snowfall in agri-pasture transitional zone of North China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 70 (9): 1363–1374, doi:10.11821/dlxb201509001.
- 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估 [J]. *气象*, 34 (4): 95–100. Wang Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: I. Climatic features and its impact [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 34 (4): 95–100.
- 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 Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Shen Baizhu, 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. Sinica* (in Chinese), 71 (6): 1061–1073, doi:10.11676/qxxb2013.095.
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 17 (24): 4674–4691, doi:10.1175/JCLI-3228.1.
- Watanabe M, Nitta T. 1999. Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter [J]. *J. Climate*, 12 (2): 494–510, doi:10.1175/1520-0442 (1999) 012<0494:DCITAC>2.0.CO;2.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 23 (6): 641–651, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.01.
- 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, doi:10.1007/s11434-011-4696-4.
- Wu B Y, Wang J. 2002a. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian high, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (2): 297–320, doi:10.1007/s00376-002-0024-x.
- Wu B Y, Wang J. 2002b. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19): 3-1–3-4,

- doi:10.1029/2002GL015373.
- Wu B Y, Handorf D, Dethloff K, et al. 2013. Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic sea ice loss [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (11): 3786–3800, doi:10.1175/MWR-D-13-00046.1.
- Yuan W, Sun J Q. 2009. Enhancement of the summer North Atlantic Oscillation influence on Northern Hemisphere air temperature [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (6): 1209–1214, doi:10.1007/s00376-009-8148-x.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58 (S1): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58 (S1): 1–10, doi:10.11821/xb20037s001.
- 赵琳娜, 马清云, 杨贵名, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 556–566.
- Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. 2008. Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 556–566, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.20.
- Zuo J Q, Ren H L, Li W J, et al. 2016. Interdecadal variations in the relationship between the winter North Atlantic Oscillation and temperature in south-central China [J]. *J. Climate*, 29 (20): 7477–7493, doi:10.1175/JCLI-D-15-0873.1.