

春季北大西洋三极型海温异常模态与中国东部极端低温事件频次年际变化关系的年代际增强

梁 静^{1,2,3} 孙建奇² 洪海旭² 艾雅雯² 华维¹

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

3 佳木斯市气象局, 佳木斯 154000

摘 要 本文研究了春季北大西洋海温异常与中国东部极端低温事件频次年际变化之间的关系。结果表明, 北大西洋三极型海温异常模态 (NATSST) 在 20 世纪 80 年代末后可以显著影响中国东部极端低温事件频次第一主导模态的变化, 但在 80 年代末之前却不能。进一步的机制分析表明, 这两者关系之所以发生年代际变化, 可能与 NATSST 激发的遥相关波列在 20 世纪 80 年代末前后期不同有关。在 1960-1987 年, NATSST 激发的遥相关波列从北大西洋向中亚南部地区传播, 路径偏南, 对东亚地区大气环流的影响较弱, 从而不能显著影响中国东部地区极端低温事件的变化。但在 1992-2019 年, NATSST 能够激发南、北两支遥相关波列到达东亚。其中, 北支波列与北大西洋涛动 (NAO) 有关, 该波列从北大西洋出发沿欧亚中高纬向东传播, 可以在蒙古地区造成异常气旋/反气旋性环流; 南支波列从北大西洋出发沿欧亚中低纬向东传播, 可以在中国中南部造成异常气旋/反气旋性环流。上述气旋/反气旋性环流有利/不利于中高纬冷空气南下, 同时改变中国东部地区地表热通量, 从而造成有利/不利于极端低温事件发生的气候背景条件, 使得中国东部地区极端低温事件频次增加/减少。通过上述物理过程, NATSST 在 20 世纪 80 年代末之后可以显著影响中国东部春季极端低温事件频次的年际变化, 而在 80 年代末之前则不能。

关键词 极端低温事件 北大西洋 波列

文章编号: 2021172C

中图分类号

文献标识码

收稿日期 2022-1-24

网络预出版日期

作者简介 梁静, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 从事极端气候方面的研究。E-mail: liangjing@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙建奇, 从事气候动力学和气候预测研究。E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

项目资助 国家自然科学基金项目 41825010 和 41991281

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41825010 and 41991281)

Interdecadal enhancement of the interannual relationship between spring North Atlantic tripolar SST mode and extreme cold event frequency in eastern China

Liang Jing^{1,2,3}, Sun Qianqi², Hong Haixu², Ai Yawen², Hua Wei¹

1 School of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Jiamusi Meteorological Bureau, Jiamusi 154000

Abstract The relationship between spring sea surface temperature in the North Atlantic and extreme cold event (ECE) frequency in eastern China at interannual timescale is investigated in this paper. The results show that the North Atlantic tripolar SST mode (NATSST) can significantly affect the first leading mode of ECE frequency in eastern China after the late 1980s, but not before. Further mechanistic analysis suggests that such an interdecadal change in the relationship between the two could be related to the difference in the NATSST-excited wave trains before and after the late 1980s. In 1960-1987, the NATSST-related wave train propagates from the North Atlantic to southern Central Asia, which is located more southward and consequently has a weak influence on atmospheric circulations and ECE in eastern China. However, in 1992-2019, NATSST can excite two wave trains. The northern one is associated with the North Atlantic Oscillation (NAO), which propagates eastward from the North Atlantic to mid-high latitudes of Eurasia, resulting in anomalous cyclonic/anticyclonic circulation in the Mongolian region. The southern one propagates eastward from the North Atlantic to mid-low latitudes of Eurasia, leading to anomalous cyclonic/anticyclonic circulation in southern-central China. These cyclonic/anticyclonic circulations are favorable/unfavorable to the southward movement of cold air from middle and high latitudes, and also change the surface heat flux in eastern China, consequently providing favorable/unfavorable climate background conditions for the occurrence of ECE. Through these physical processes, NATSST can significantly influence the interannual variability of the frequency of spring ECE in eastern China after the late 1980s, but not before.

Keywords Extreme cold event, North Atlantic, Wave train

1 引言

随着全球变暖, 全球大部分地区日最低温度呈现升高趋势, 由此导致冷日和冷夜出现减少趋势 (e.g., Karl et al., 1991; Alexander et al., 2006; Wang et al., 2017; van der Walt and Fitchett, 2020)。虽然全球变暖会导致冷事件发生频次减少, 但并不意味着冷事件不会发生。相反, 进入 21 世纪以后, 许多破纪录的极端冷事件时有发生。如 2016 年 1 月, “世纪寒潮”席卷中国东部地区, 许多地区日最低气温突破历史极值, 广州地区观测到 1929 年以来第一次固态降水 (李艳等, 2018; 谢瑞青等, 2019); 2018 年 4 月, 中国经历了 3 次大范围寒潮过程, 导致农作物受灾面积 1366.3 千公顷, 其中绝收面积 359.8 千公顷, 直接经济损失高达 237.1 亿元 (https://www.ndrc.gov.cn/fggz/jjyxtj/yjgl/201805/t20180530_1197356.html?code=&state=123 [2018-5-30]); 2020/21 年的冬季, 极端冷事件先后袭击了北半球中纬度许多地区, 北京和天津的日最低气温突破了 1967 年以来的最低值, 美国德克萨斯州的奥斯汀市和休斯敦市分别打破了自 1908 年和 1905 年以来的日最低气温记录 (Zhang et al., 2021)。因此, 在全球变暖的背景下, 开展极端低温事件的变化及其影响因子的研究具有重要的科学意义。

由于冬季的气温较低, 极端低温事件更易发生, 因此以往对中国极端低温事件的研究主要聚焦于冬季。中国冬季极端低温事件呈现出与全球一致的减少趋势 (翟盘茂和潘晓华, 2003; Zhou et al., 2011; You et al., 2011; 谢星旻等, 2018; 齐庆华等, 2019)。此外, 在 20 世纪 80 年代中期, 中国冬季极端低温事件的频次、均值和变率等均发生了年代际减少 (刘雅星等, 2010; 付冬雪等, 2011)。已有研究表明, 在东亚区域, 东亚冬季风 (Chan and Li, 2004; 王晓娟等, 2013; Hu et al., 2015; 韩永秋等, 2021)、东亚大槽 (李峰等, 2006)、西伯利亚高压 (Zhang et al., 2012; 汪子琪等, 2017; Ding et al., 2021; Zheng et al., 2021)、东北亚高空冷涡 (石晨等, 2020)、欧亚阻塞高压 (李艳等, 2012, 2018; Xie and Bueh, 2017) 等是造成该地区冬季极端低温事件的重要环流系统。当上述环流异常引发冷空气南侵时, 就会造成东亚地区出现极端低温事件。除了东亚地区的大气环流因子外, 许多大尺度遥相关因子, 例如西太平洋遥相关 (Yang et al., 2019), 太平

洋-北美遥相关 (Li et al., 2021), 北极涛动/北大西洋涛动 (AO/NAO; 龚道溢和王绍武, 2003; 杨辉和李崇银, 2008; Chen et al., 2013; You et al., 2013; Chen et al., 2015; 韩方红等, 2018), 厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO; Wang et al., 2000; Chen et al., 2013; Chen et al., 2015) 等, 也可以通过影响东亚地区大气环流异常进而引起东亚地区冬季极端低温事件的变化。

作为农耕和作物生长的关键季节, 春季的极端低温事件也往往会造成重大损失; 同时春季的冷暖空气交替频繁, 极端低温事件发生的频次也较高。因此, 对中国春季极端低温事件变化的研究是十分必要的。但相较于冬季, 目前针对春季极端低温事件的研究还较少。艾雅雯等 (2020) 分析了春季中国地区极端低温事件频次的变化特征, 指出 1961-2016 年春季中国地区极端低温事件总体呈减少趋势, 但近 10 年中国东部地区极端低温事件频次和强度却有所增加。徐玮平等 (2018) 发现春季从北大西洋至欧亚大陆的“准两波型”环流结构有利于春季华北地区出现持续时间较长的低温天气, 而“三波型”环流结构出现时低温持续时间则较短。王冀等 (2007) 研究发现中国东北地区春季极端低温事件频次与 AO 存在显著负相关关系。从预测的角度, 尹姗等 (2013) 指出前期冬季 AO 与春季中国东部北方地区极端低温事件之间也存在显著的负相关关系。

北大西洋位于东亚地区的上游地区, 该地区的海气相互作用能够对东亚地区的气候产生重要影响 (e.g., Wang et al., 2001; Zhou et al., 2013; Ye et al., 2015; Zhang and Sun, 2020)。张霏燕和徐海明 (2011) 的研究指出, 大西洋中北部地区海温异常与东北地区春季极端低温事件之间存在一定关系。在本文中, 我们将进一步探讨北大西洋海温与中国东部地区极端低温事件主导模态之间的关系; 如果两者之间有关系, 我们将进一步分析这种关系是否稳定及其可能的机制。

2 数据和方法

本文采用的站点观测资料来自于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>) 提供的 839 个台站逐日最低温度数据。本文中的中国东部地区为 100°E 以东的中国地区。为研究春季中国东部极端低温事件的变化, 本文剔除了 1960-2019 年春季 (3-5 月) 日最低温度数据缺测超过 1% 以及连续缺测 2 天以上的站点, 对于缺测数据采用缺测日期前后两天的均值进行替代, 最终选取位于中国东部地区的 437 个站点用于本文分析, 站点的空间分布如图 1 所示。

本文所使用的大气环流场资料是日本气象厅发展的 JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis Project; Kobayashi et al., 2015; Harada et al., 2016) 全球逐月大气再分析资料。JRA-55 大气再分析资料的水平分辨率为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ ，垂直方向上分为 37 层，起始时间为 1958 年。本文所使用的逐月海表温度 (SST) 数据是英国 Hadley 中心发展的月平均海表温度资料 (HadISST, Rayner et al., 2003)。该资料起始于 1870 年，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

本文采用百分位法定义春季极端低温事件，这里以某站 3 月 20 日为例来具体说明计算过程。首先，以 3 月 20 日为中心选择该站每年 3 月 18~22 日的最低气温，组成 5 日 $\times$ 60 年 (研究时段为 1960~2019 年) 的时间序列；然后，将该时间序列按照升序排列，将排列后序列的第 10 百分位值定义为该站该日极端低温的阈值，第 10 百分位值的确定采用 Bonsal et al. (2001) 的非参数化方案，公式如下：

$$P = \frac{M - 0.31}{N + 0.38} \quad (1)$$

式中 P 为概率，本文选取第十百分位即 P 值为 0.1； N 为日最低温度序列的总长度，本文中为 5×60 ； M 为 P 概率对应的序号，计算可知 M 应为 30.348，为了更准确地获得阈值，本文选择了序列中序号为 30 和 31 的最低温度平均值作为该站 3 月 20 日极端低温事件的阈值；最后，用该站 1960~2019 年 3 月 20 日逐日最低温度与上述阈值进行比较，如果某日最低气温低于阈值，则认为该日发生了一次极端低温事件。据此方法，可以依次计算得到中国东部地区 437 个台站每年春季 (3-5 月) 的极端低温事件发生频次。

本文的分析主要在年际尺度上，因此我们采用 Butterworth 高通滤波器，滤掉了所有变量中的低频变化信息，仅保留了周期小于 10 年的年际变化信息；由于滤波造成前后各 5 年数据的缺失，文中研究时段变为 1965-2014 年。在分析春季北大西洋海温与中国东部极端低温事件频次主导模态时，我们采用了经验正交分解 (EOF) 方法。本文中的相关、回归结果的信度检验用的是 Student's t 检验。

在分析大气波列传播特征时，我们计算了 T-N 波作用通量 (Takaya and Nakamura, 2001)，其水平方向的波作用通量计算公式如下：

$$W = \frac{p}{2a^2|\vec{U}|} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\bar{u}}{\cos \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \bar{v} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ & \bar{v} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \bar{v} \cos \varphi \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中，上标中的短横线和撇号分别表示气候态和相对气候态的距平， φ , λ , ψ 分别表示纬度，经度和地转流函数， a 和 $U = (U, V)$ 分别表示地球半径和水平风场的气候态。文中气候态为滤波前各研究时段内 3-5 月要素场的平均值。

本文所使用的 NAO 指数来自美国国家海洋和大气管理局 (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>)，该指数定义为 NAO 模态对应的主成分时间序列，而 NAO 模态来源于北半球 (20°N~90°N) 500 hPa 位势高度场的旋转主成分分析第一模态的结果 (Barnston and Livezey, 1987)。

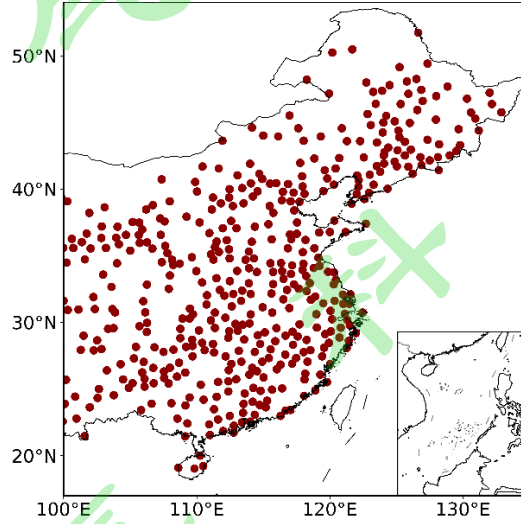


图 1 中国东部 437 个气象站点的空间分布。

Fig.1 Spatial distribution of the 437 meteorological stations in eastern China.

3 春季北大西洋海温与中国东部极端低温事件频次年际变化的主导模态及其关系

本文首先利用 EOF 分析方法，得到了春季中国东部极端低温事件频次和同期北大西洋 (0–60°N, 90°W–0°) 海温年际变化的主要模态。两者的解释方差分别为 43.38% 和 40.55%，可以表征春季中国东部极端低温事件频次和同期北大

西洋海温的主要变化特征。如图 2a 所示，在年际变化尺度上，春季中国东部极端低温事件频次的第一模态表现为全区一致变化的特征，正异常大值中心位于东北地区，并向西南地区递减。春季北大西洋海温年际变化第一模态呈现出典型的经向三极型分布（Deser et al., 2010），具体表现为北大西洋低纬度和高纬度地区海温与中纬度海温的反向变化（图 2b）。

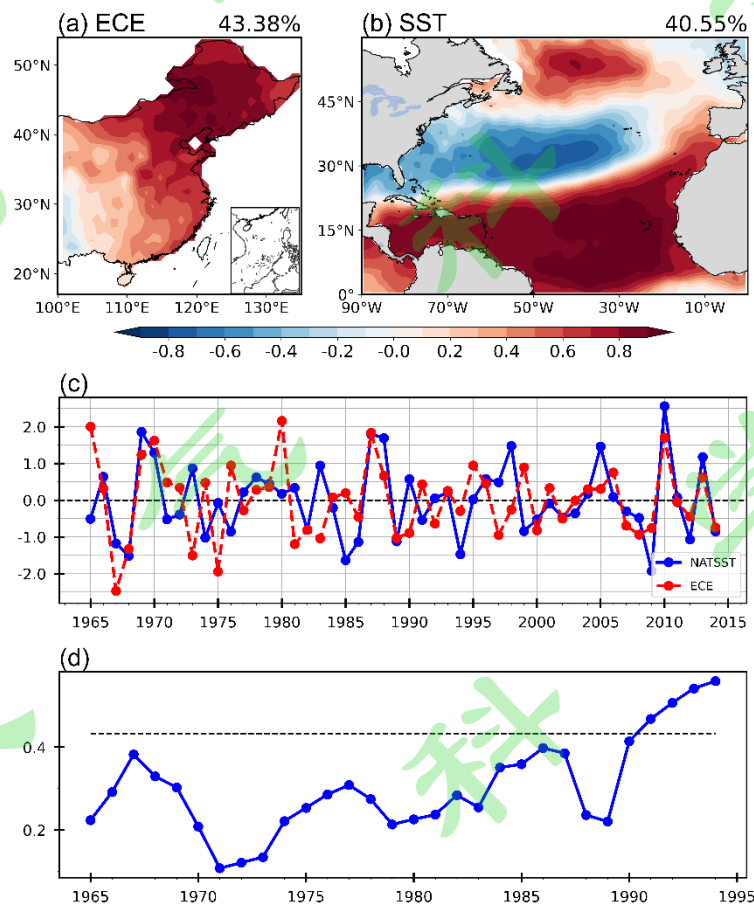


图 2 1965-2014 年 (a) 10 年高通滤波后的中国东部春季极端低温事件频次 EOF 第一模态和 (b) 春季北大西洋(0–60°N, 90°W–0°)海温 EOF 第一模态以及 (c) 两者对应的主成分时间序列（分别定义为 ECE 指数和 NATSST 指数）。(d) 1965-2014 年 ECE 指数和 NATSST 指数的 21 年滑动相关系数（横坐标代表起始年份）。(d) 图中虚线为 21 年相关系数的 95%信度阈值。

Fig. 2 The first leading modes of (a) the 10-year high-pass filtered extreme cold event frequency in eastern China and (b) spring SST in the North Atlantic (0–60°N, 90°W–0°) over the period of 1965-2014, and (c) the corresponding standardized principle component time series (defined as the ECE index and NATSST index, respectively). (d) The 21-year running correlations between the ECE index and NATSST index over the period of 1965-2014. The horizontal coordinate of (d)

represents the starting year of the 21-year running correlations. The dashed line in (d) indicates the 95% significance level.

图 2c 给出了春季中国东部极端低温事件频次和北大西洋海温 EOF 第一模态的时间序列；为了后续描述方便，我们将其分别定义为 ECE (Extreme cold events) 指数和 NATSST (North Atlantic tripolar SST) 指数。可以看到，在 1960-2019 年，ECE 指数与 NATSST 指数具有较为一致的年际变化，两者的相关系数为 0.39，通过了 99% 的信度检验，这说明北大西洋三极型海温模态与中国东部极端低温事件频次年际变化之间可能存在联系。

进一步分析图 2c 可以发现，在 20 世纪 80 年代末之后，ECE 指数与 NATSST 指数同位相变化的年份明显增多。为了进一步考察这两个指数之间的关系，我们对其进行了滑动相关分析。21 年滑动相关（图 2d）表明，ECE 指数和 NATSST 指数的相关系数在 20 世纪 80 年代末之前较弱，但在之后则显著增强，19 年和 23 年滑动窗口的结果也类似（图略）。依据滑动相关结果，我们将整个研究时段分为前后两个分时段，分别计算 ECE 指数和 NATSST 指数的相关。结果表明，在 1965-1987 年（P1 时期）两者的相关系数仅为 0.33，未通过 90% 的信度检验；而 1992-2014 年（P2 时期）两者相关系数提升到 0.55，通过了 99% 的信度检验。

图 3 为 ECE 指数和 NATSST 指数在两个时段分别与北大西洋海温和中国东部极端低温事件频次的相关分布。在 P1 时期，春季 NATSST 指数与中国东部春季极端低温事件频次年际变化之间的关系整体较弱，除了东北和西南部分小范围显著相关外，其他地区的相关系数都不显著（图 3a）；同时，ECE 指数与北大西洋海温的相关系数分布虽然呈现出三极型模态，但相关性整体较弱且中心位置偏东（图 3c）。相比之下，在 P2 时期，春季 NATSST 指数与中国东部极端低温事件频次的相关范围明显增大、相关系数显著增强，呈现出大范围的显著正相关（图 3b），该相关系数分布与春季中国东部极端低温事件频次年际变化的主模态相一致（图 2a）；另一方面，ECE 指数与春季北大西洋海温的相关也明显增强，呈现出显著的经向三极型分布（图 3d），这与春季北大西洋海温年际变化的主模态也相一致（图 2b）。

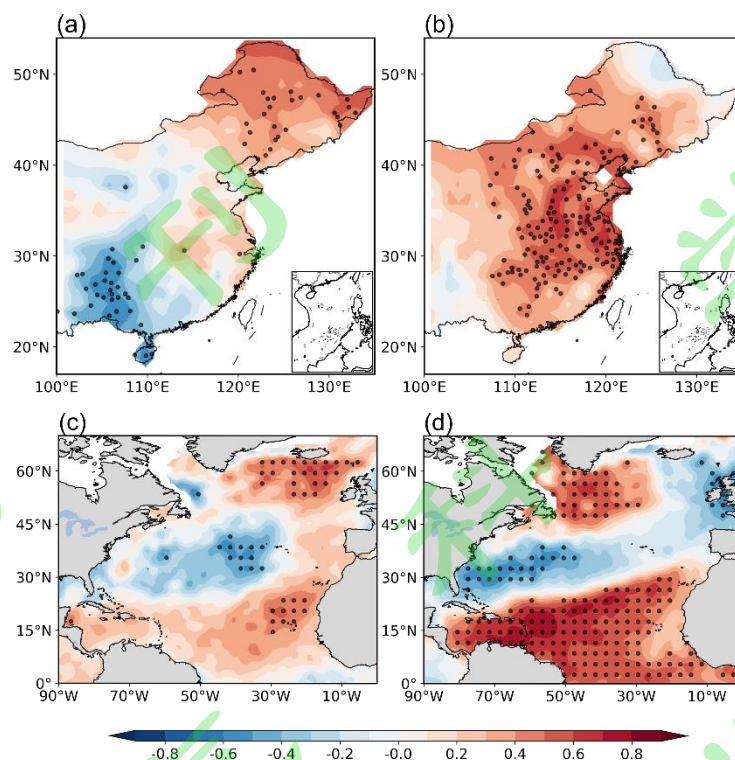


图 3 10 年高通滤波后的中国东部春季极端低温事件频次与春季 NATSST 指数在 (a) 1965-1987 年和 (b) 1992-2014 年的相关系数分布。春季北大西洋海温与中国东部 ECE 指数在 (c) 1965-1987 年和 (d) 1992-2014 年的相关系数分布。打点区域表示通过 95% 的信度检验。

Fig. 3 Correlation coefficients of the 10-year high-pass filtered spring extreme cold event frequency in eastern China with NATSST index over the period of (a) 1965-1987 and (b) 1992-2014. Correlation coefficients of spring North Atlantic SST with ECE index over the period of (c) 1965-1987 and (d) 1992-2014. The black dotted areas represent the 95% confidence level.

以上分析结果表明，在年际变化尺度上，春季北大西洋三极型海温模态与中国东部极端低温事件频次的年际变化之间存在联系，且两者的这种联系在 20 世纪 80 年代末后显著增强。

4 春季北大西洋三极型海温模态影响中国东部极端低温事件频次年际变化的可能机制

前一节的分析表明，在 P1 与 P2 时期，春季北大西洋三极型海温模态与中国东部极端低温事件频次的关系有所不同。那么两者的关系为什么会发生如此的年代际变化呢？这一节将主要探讨其中可能的机制。

北大西洋海温异常不能直接影响到东亚地区的气候，它是通过影响大气环流异常进而导致东亚地区的气候发生变化。为此，我们分析了P1和P2时期春季北大西洋三极型海温模态所对应的北半球大气遥相关波列异常；基于已有研究（Lu et al., 2002; Watanabe et al., 2004），本文利用250 hPa经向风异常场来表征欧亚大陆上空的大气遥相关波列。

如图4a所示，在P1时期，春季北大西洋三极型海温异常相关的大气遥相关波列主要位于中低纬地区，表现为南、北风异常交替出现的异常分布。波作用通量结果显示，该遥相关波列从北大西洋向东南方向的下游地区传播，一直可以到达南亚地区，但此时东亚地区的大气环流异常和波作用通量都较弱（图4a）。这说明，在P1时期，春季北大西洋三极型海温异常与东亚地区的大气环流关系较弱。

不同于P1时期，在P2时期，春季北大西洋三极型海温异常相关的250 hPa经向风正、负异常相间的波列存在于欧亚大陆中纬度和低纬度地区。对波作用通量的回归结果显示，与春季北大西洋海温相关的波通量分为南、北两支波列向下游地区传播。其中，南支波列从北大西洋中纬度先向东南方向传播至地中海地区后，再向东传播经过中亚地区南部，最终到达东亚地区中南部；而北支波列从北大西洋中纬度向东北方向传播至格陵兰岛东部后，再向东传播经过俄罗斯，最终到达蒙古地区（图4b）。

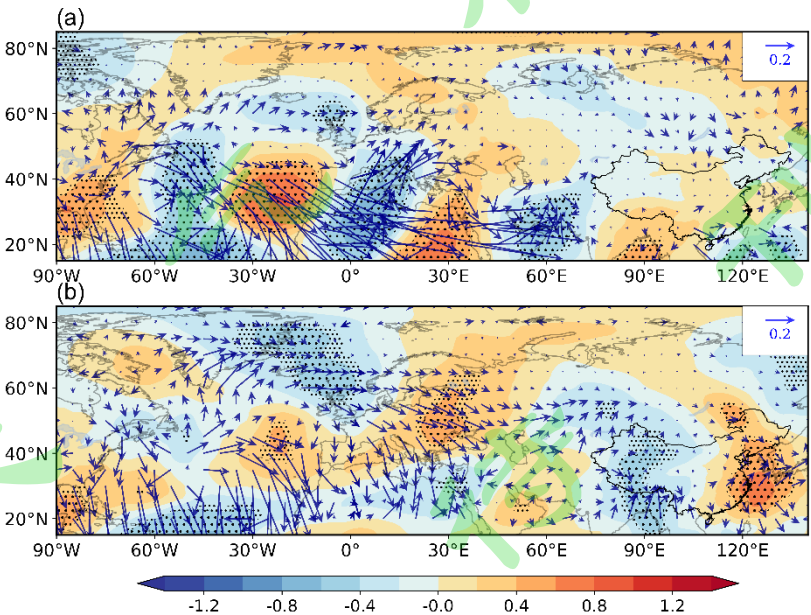


图4 NATSST指数线性回归的（a）1965-1987年和（b）1992-2014年250 hPa经向风场（等值

线；单位：m/s）和T-N波作用通量（箭头；单位： m^2/s^2 ）。图中黑色打点区域较大（较小）点表示经向风场通过95%（90%）的信度检验。

Fig. 4 Linear regression of 250 hPa meridional wind (contours; unit: m/s) against the NATSST index and the related T-N wave activity flux (arrows; unit: m^2/s^2) during (a) 1965-1987 and (b) 1992-2014. The larger (smaller) dots in the black dotted areas represent the 95% (90%) confidence level.

在上述遥相关波列的影响下，在P2时期，春季北大西洋三极型海温异常可以在蒙古地区和中国南方地区造成双低压异常（图5a）。低压异常有利于中国东部地区云量的增加（图5b），进而减少地表接收的太阳短波辐射（图5c），地表温度降低；偏低的地表温度又会减少向上的长波辐射（图5d）和感热通量（图5e），有利于近地面大气降温和极端低温事件的发生。辐射过程的影响尤其在中国东北地区 and 长江中下游地区更加显著。此外，上述大气环流异常有利于冷空气南下，使中低层出现冷平流，其中在华北到江淮、东北和南方部分区域出现显著冷平流异常（图5f）。综合以上物理过程，在P2时期，正位相的北大西洋三极型海温异常有利于中国东部地区极端低温事件频次偏多，反之则偏少。相反，在P1时期春季北大西洋海温异常所对应的遥相关波列位置偏南，只可以延伸到东南亚地区（图4a），其对中国东部地区的温度平流、云量、短波辐射、长波辐射以及感热通量的影响均较弱（图略）。因此在P1时期，中国东部极端低温事件频次与春季北大西洋三极型海温异常的关系也较弱。

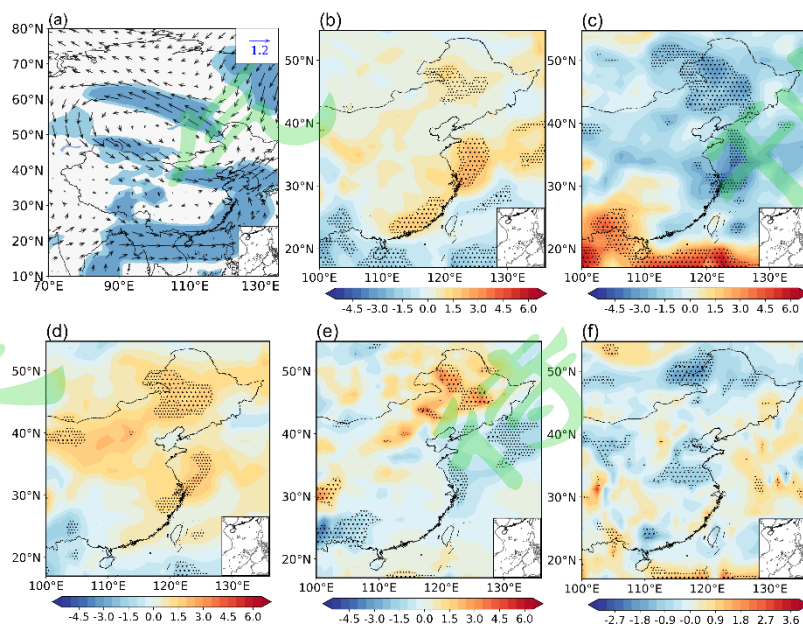


图5 NATSST指数线性回归的1992-2014年春季 (a) 500 hPa风场 (箭头; 单位: m/s), (b) 低层云量 (填色; 单位: %), (c) 净短波辐射 (填色; 单位: W/m^2), (d) 净长波辐射 (填色; 单位: W/m^2), (e) 地表感热 (填色; 单位: W/m^2), (f) 925 hPa-500 hPa垂直积分温度平流 (包含水平和垂直温度平流) (填色; 单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{K/s}$)。 (a) 图中的深色 (浅色) 区域表示风场通过95% (90%) 的信度检验。 (b) - (f) 图中黑色打点区域较大 (较小) 点表示通过95% (90%) 的信度检验。 (c) - (e) 图中热通量方向以向下为正。

Fig. 5 Linear regression of spring (a) 500 hPa wind (arrows; unit: m/s), (b) low cloud cover (shading; unit: %), (c) shortwave radiation (shading; unit: W/m^2), (d) longwave radiation (shading; unit: W/m^2), (e) sensible heat flux (shading; unit: W/m^2), (f) vertically integrated temperature advection (including horizontal and vertical temperature advection) of 925 hPa-500 hPa (shading; unit: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{K/s}$) against the NATSST index during 1992-2014. (a) Dark (light) shading indicates anomalies are significant at the 95% (90%) confidence level. (b)-(f) The larger (smaller) dots in the black dotted areas represent the 95% (90%) confidence level. (c)-(e) The convention for surface heat fluxes is positive for downward flux.

对比P1和P2时期北大西洋三极型模态所对应的250 hPa经向风异常场 (图4a和图4b) 可以看到, 在P2时期北大西洋高纬度地区存在更显著的异常信号, 而在P1时期这种异常信号并不显著。这一点在对流层低层也有所体现。图6为P1和P2时期, 利用NATSST指数回归的北大西洋上空850 hPa异常风场。可以看到, 在P2时期, 北大西洋上空呈现出类似负位相NAO模态 (Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987; Hurrell, 1995) 的经向偶极异常环流 (图6b); 但在P1时期, 北大西洋中纬度地区的异常气旋虽然存在, 但是高纬度地区的异常反气旋则并不显著 (图6a)。已有研究表明, 北大西洋三极型海温模态与NAO存在显著的耦合关系 (Czaja and Frankignoul, 2002; Peng et al., 2002)。本文的研究表明, 春季北大西洋三极型海温异常与北大西洋中纬度大气环流异常的关系是稳定的, 但与NAO模态的耦合关系则在P1阶段较弱而在P2时期增强。为进一步验证NAO与NATSST的关系, 本文计算了这两个指数的21年滑动相关。如图6c所示, 春季NATSST指数与NAO指数的相关系数在20世纪80年代末期之前不显著, 但是之后却显著增强, 19年和23年的滑动相关结果类似 (图略)。

该结论与Chen et al. (2019) 的研究结果一致，他们的研究也表明自20世纪80年代后期以来，春季NAO与同期北大西洋三极型海温之间的关系显著增强。

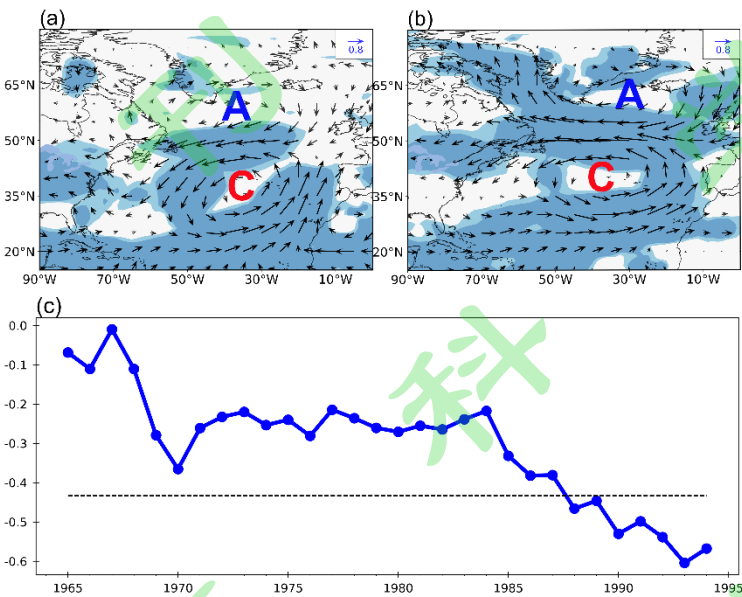


图6 NATSST指数线性回归的 (a) 1965-1987年和 (b) 1992-2014年春季850 hPa风场 (箭头; 单位: m/s)。图中的深色 (浅色) 区域表示风场通过95% (90%) 的信度检验。A、C分别表示异常反气旋和气旋。(c) 1965-2014年春季NATSST指数与春季NAO指数的21年滑动相关系数 (横坐标代表起始年份)，虚线为21年相关系数的95%信度阈值。

Fig. 6 Linear regression of spring 850 hPa wind during (a) 1965-1987 and (b) 1992-2014 against the NATSST index (arrows; unit: m/s). Dark (light) shading indicates anomalies are significant at the 95% (90%) confidence level. A and C indicate anomalous anticyclones and cyclones, respectively. (c) The 21-year running correlations between the NATSST index and NAO index over the period of 1965-2014. The horizontal coordinate of (c) represents the starting year of the 21-year running correlations. The dashed line in (c) indicates the 95% significance level.

NAO可以激发遥相关波列进而影响东亚地区的气候。因此，我们推断，在P2时期，与北大西洋三极型海温模态相关的大气遥相关波列可能与NAO有关。为了验证这个推断，我们计算了P2时期NAO模态所对应的250 hPa经向风异常。如图7a，NAO模态所激发的波列主要集中在欧亚大陆中高纬度地区，由北大西洋中部向东传播至蒙古地区。NAO所激发的波列与北大西洋三极型海温异常所对应的北支波列虽然在强度和位置上有所差异，但是总体形势还是很相似的，毕竟NAO模态除了与三极型海温有耦合关系外，还受到大气内部过程的影响。

当将春季NAO的信号从环流场中线性剔除之后，再计算北大西洋三极型海温异常所对应的250 hPa经向风异常时，我们会发现北大西洋三极型海温异常所引起的高纬度大气遥相关波列显著减弱（图7b）。这说明，在P2时期，北大西洋三极型海温模态异常与NAO模态耦合关系加强，并激发北支大气遥相关波列，进而引起东亚地区的环流异常。在这个过程中，NAO模态在其中起到重要作用。

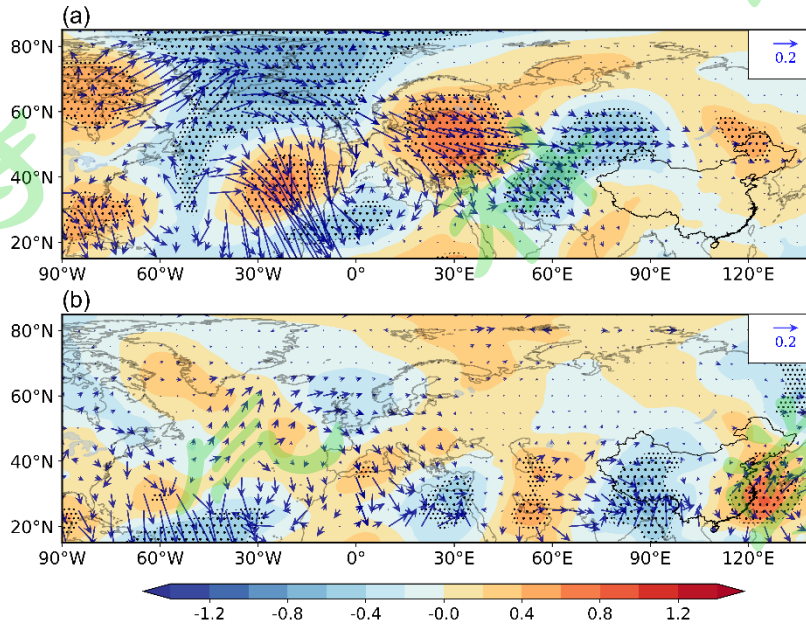


图7 1992-2014年（a）春季负NAO指数、（b）线性去除NAO信号后的NATSST指数线性回归的250 hPa经向风场（等值线；单位： m/s ）和T-N波作用通量（箭头；单位： m^2/s^2 ）。图中黑色打点区域较大（较小）点表示通过95%（90%）的信度检验。

Fig. 7 (a) Linear regression of 250 hPa meridional wind (contours; unit: m/s) against the spring negative NAO index and the related T-N wave activity flux (arrows; unit: m^2/s^2) during 1992-2014. (b) Linear regression of 250 hPa meridional wind (contours; unit: m/s) against the NATSST index after linearly removing the NAO signal and the related T-N wave activity flux (arrows; unit: m^2/s^2) during 1992-2014. The larger (smaller) dots in the black dotted areas represent the 95% (90%) confidence level.

不同于北支波列，当NAO信号被剔除之后，北大西洋三极型海温异常所对应的南支波列并未减弱，依然存在于欧亚大陆中低纬地区，并在东亚地区中南部造成大气环流异常（图7b）。这说明，在P2阶段，北大西洋三极型海温异常影响中国东部极端低温事件频次年际变化的两个遥相关波列机制具有一定的独立性。为此我们分别计算了NAO和去除NAO信号后NATSST与中国东部地区极

端低温事件频次的相关分布。可以看到，与NAO显著相关的极端低温事件频次主要分布于中国东部的中北部地区（图8a），而独立于NAO的NATSST部分所对应的显著区域主要位于中国东部的中南部地区（图8b）。以上结果表明，春季北大西洋三极型海温模态与中国东部极端低温事件频次之间关系的年代际增强，一方面与春季北大西洋三极型海温异常和NAO模态之间耦合关系的增强有关，另一方面春季北大西洋三极型海温异常也可独立于NAO对中国东部极端低温事件频次的年际变化产生影响。其中，与NAO模态有关的机制影响区域主要位于中国东部的中北部地区，而独立于NAO的机制影响区域主要位于中国东部的中南部地区。

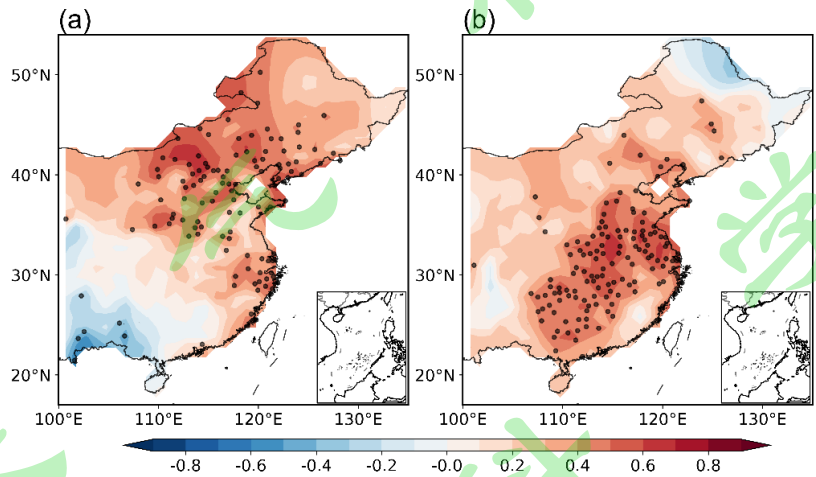


图 8 1992-2014 年（a）春季负 NAO 指数和（b）线性去除春季 NAO 信号后的 NATSST 指数与中国东部极端低温事件频次相关系数的空间分布。打点区域表示通过 95% 的信度检验。

Fig. 8 Correlation coefficients of extreme cold event frequency in eastern China with (a) the spring negative NAO index and (b) the NATSST index after linearly removing the NAO signal during 1992-2014. The black dotted areas represent the 95% confidence level.

5 结论与讨论

本文首先分析了春季北大西洋海温和中国东部极端低温事件频次年际变化主导模态之间的关系，结果显示：春季中国东部极端低温事件频次年际变化的第一模态表现为全区一致型，该模态与北大西洋三极型异常海温模态的关系具有显著的年代际变化——在20世纪80年代末之前较弱，之后则显著增强。

随后，本文研究了在20世纪80年代末前后两个时期，北大西洋三极型海温

异常所对应的大气环流异常。结果表明，在P1时期，北大西洋三极型海温异常能够激发西北—东南向的大气遥相关波列，该波列从北大西洋中纬度地区可以传播至南亚地区，但是不能显著地影响到东亚地区的大气环流。因此，在该时段，北大西洋三极型海温异常对中国东部极端低温事件频次年际变化的影响很弱。但在P2时期，北大西洋三极型海温异常能够激发南、北两支大气遥相关波列，两支波列均从北大西洋中纬度地区出发，南支波列向东南方向传播，经过地中海地区、中亚地区南部，最终可以到达东亚地区，引起东亚地区大气环流异常；北支波列则先向北经过格陵兰岛东部地区、再向东南经俄罗斯，最终到达蒙古地区，引起该地区的大气环流异常。上述南北两支大气遥相关波列可以造成蒙古到中国南部地区的气旋/反气旋性环流异常，从而一方面有利于/不利于中高纬度冷空气南侵，另一方面还可以减少/增加东亚地区的地表热通量，从而为中国东部极端低温事件的发生提供有利/不利的气候条件，使得该地区极端低温事件频次增多/减少。

以往的研究表明，北大西洋三极型海温模态与NAO模态存在耦合关系（Czaja and Frankignoul, 2002; Peng et al., 2002）。本文的研究表明，在P2时期，北大西洋三极型海温异常与NAO模态的耦合关系较强，而在P1时期较弱。该结论与Chen et al. (2019)的研究结果是一致的。Chen et al. (2019)指出在20世纪80年代末期之后，春季北大西洋三极型海温模态与NAO耦合关系的加强可能与北大西洋地区海气相互作用过程的年代际变化有关。因此，在P2时期，NAO在北大西洋三极型海温异常影响中国东部极端低温事件频次年际变化中起着重要的桥梁作用，NAO可以通过激发北支波列而将北大西洋三极型海温异常的影响传播到东亚地区。

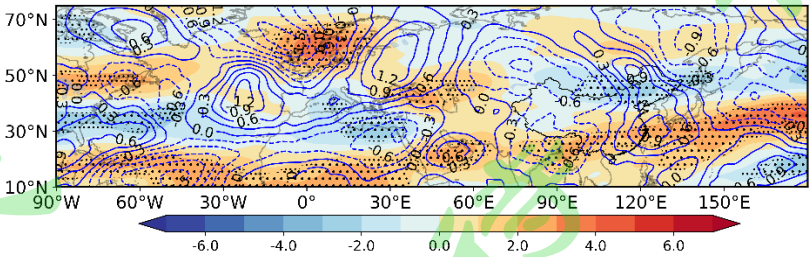


图9 1992-2014年与1965-1987年春季250 hPa纬向风差值场（填色；单位：m/s），NATSST指数线性回归的1992-2014年经向风（等值线；单位：m/s）。图中黑色打点区域较大（较小）点表示纬向风年代际差值通过95%（90%）的信度检验。

Fig. 9 Interdecadal differences of the spring 250 hPa zonal wind (shading; unit: m/s) between 1992-2014 and 1965-1987 and linear regression of 250 hPa meridional wind against the spring NATSST index during 1992-2014 (contour; unit: m/s). The larger (smaller) dots in the black dotted areas represent the interdecadal differences of 250 hPa zonal wind are significant at the 95% (90%) confidence level.

不同于北支波列，北大西洋三极型海温异常所引起的南支波列则与NAO关系不大。对于图4a和4b，可以看到北大西洋三极型海温异常所对应的南支遥相关波列在P2阶段相较P1阶段位置偏北，尤其是约60°E以东的区域。在P1时期，该波列位置偏南，可以影响到东南亚地区，但是不能到达东亚地区；在P2时期，该波列位置偏北，可以到达东亚中南部地区，进而对该时期东亚东部的中南部地区极端低温事件频次产生显著影响。北大西洋三极型海温异常所引起的南支波列的位置差异可能与欧亚大陆纬向西风波动的位置变化有关。图9为P2与P1时期250 hPa春季平均纬向风的年代际差值场。可以看到，在P2时期约60° E以东区域的20°N-30°N范围内，西风显著增强；该西风的增强与该时段北大西洋三极型海温异常所激发的大气遥相关波列的传播路径相一致。这说明，由于西风急流的波导作用（Hoskins and Ambrizzi, 1993），在P2时期，欧亚大陆纬向西风的变化有利于北大西洋三极型海温异常所激发的南支波列到达东亚中南部，进而造成中国东部的中南部地区极端低温事件频次发生显著的变化。

本文从季节平均的角度探讨了影响春季中国东部极端低温事件频次变化的气候背景场异常，而极端低温事件的实际发生主要是天气过程导致。因此，气候背景场异常只能定性的解释极端低温事件的变化。东亚地区的天气和季节内环流系统，如东亚冬季风、西伯利亚高压等（Ding and Krishnamurti, 1987; Ding et al., 2021）等是造成极端低温事件的直接原因，因此后续需要在天气和季节内尺度开展相关研究，从而加深对北大西洋三极型海温模态影响中国东部地区极端低温发生频次机制的认识。此外，在本文中仅讨论了北大西洋海温对中国东部极端低温事件的影响，有研究显示北极海冰（Li et al., 2018; 李惠心等, 2021）和热带海温（Chen et al., 2015; Zhu et al., 2020）等也可以影响中国东部地区的气温变化，它们对春季中国东部极端低温事件频次变化的影响也需要做进一步的深入研究。

参考文献 (Reference)

- 艾雅雯, 孙建奇, 韩双泽, 等. 2020. 1961-2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析 [J]. 大气科学, 44(6): 1305-1319. Ai Y W, Sun J Q, Han S Z, et al. 2020. Spatial and Temporal Feature of Spring Extreme Low Temperature Events in China during 1961-2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 44(6): 1305-1319. doi:10.3878/J.issn.1006-9895.1912.19223
- Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290
- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Weather Rev., 115(6): 1083-1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. J. Clim., 14(9): 1959-1976. doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2
- Chan J C L, Li C Y. 2004. The East Asia winter monsoon. In: Chang, C.P. (Ed.), East Asian Monsoon. World Scientific Publishing Co. Pet. Ltd, pp. 54e106 doi: 10.1142/5482
- 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. doi:10.1007/s00376-013-2296-8
- Chen S F, Yu B, Chen W. 2015. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic Oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s [J]. Climate Dyn., 44(3-4): 1109-1126. doi:10.1007/s00382-014-2152-2
- Chen S F, Eu R G, Chen W. 2019. Strengthened Connection between Springtime North Atlantic Oscillation and North Atlantic Tripole SST Pattern since the Late 1980s [J]. J. Clim., 33(5): 2007-2022. doi:10.1175/JCLI-D-19-0628.1
- Czaja A, Frankignoul C. 2002. Observed Impact of Atlantic SST Anomalies on the North Atlantic Oscillation [J]. J. Clim., 15(6):606-623. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0606:OIOASA>2.0.CO;2
- Deser C, Alexander M A, Xie S P, et al. 2010. Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms [J]. Ann. Rev. Mar. Sci., 2010, 2: 115-143. doi:10.1146/annurev-marine-120408-151453

- 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. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105198
- Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat-Budget of the Siberian High and the Winter Monsoon. [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115(10): 2428-2449. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<2428:HBOTSH>2.0.CO;2
- 付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955-2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征 [J]. *气象科学*, 31(3): 274-281. Fu D X, Sun Z B, Li Z X, et al. 2011. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955-2006. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 31(3): 274-281. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.03.005
- 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. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(4): 559-568. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.04.010
- 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 Z. 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
- 韩永秋, 周连童, 黄荣辉. 2021. 中国冬半年极端低温事件的时空特征及其与东亚冬季风的关系 [J]. *气候与环境研究*, 26(1): 1-17. Han Y Q, Zhou L T, Huang R H. 2021. Characteristics of the Extreme Low Temperature Events in China during Boreal Winter and Its Relationship to East Asian Winter Monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 26(1): 1-17. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19018
- Harada Y, Kamahori H, Kobayashi C, et al. 2016. The JRA-55 reanalysis: representation of atmospheric circulation and climate variability [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 94 (3): 269-302. doi:10.2151/jmsj.2016-015
- Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby-wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50(12): 1661-1671. doi: 10.1175/1520-0469(1993)050<1661:RWPOAR>2.0.CO;2
- Hu C D, Yang S, Wu Q G. 2015. An optimal index for measuring the effect of East Asian winter monsoon on China winter temperature [J]. *Climate Dyn.*, 45(9-10): 2571-2589. doi:10.1007/s00382-015-2493-5
- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 269(5224): 676-679. doi: 10.1126/science.269.5224.676

- Karl T R, Kukla G, Razuvayve 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
- Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93(1): 5-48. doi:10.2151/jmsj.2015-001
- 李峰, 矫梅燕, 丁一汇, 等. 2006. 北极区近 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 F, Jiao H Y, Ding Y H, 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. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.02.006
- 李艳, 王式功, 金荣花, 等. 2012. 我国南方低温雨雪冰冻灾害期间阻塞高压异常特征分析 [J]. *高原气象*, 31(1): 94-101. Li Y, Wang S G, Jin R H, et al. 2012. Abnormal characteristics of blocking high during durative low temperature, snowfall and freezing weather in southern China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(1): 94-101. doi:1000-0534(2012)31:1<94:WGNNDW>2.0.TX;2-9
- 李艳, 张金玉, 王嘉禾, 等. 2018. 典型极端低温事件中高空急流和阻塞高压的特征及其协同作用 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 54(5). Li Y, Zhang J Y, Wang J H, et al. 2018. Features and concurrent impacts of upper-level jet stream and blocking high on typical extreme cold events [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 54(5). doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2018.05.014
- 李惠心, 孙博, 周波涛, 等. 2021. 3 月巴伦支海海冰对中国东部 8 月气温偶极子型的影响及机制研究 [J]. *大气科学学报*, 44(1): 89-103. Li H X, Sun B, Zhou B T, et al. 2021. Effect of the Barents Sea ice in March on the dipole pattern of air temperature in August in eastern China and the corresponding physical mechanisms [J]. *Trans Atmos Sci (in Chinese)*, 44(1): 89-103. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201013001.
- Li H X, Chen H P, Wang H J, et al. 2018. Can Barents Sea Ice Decline in Spring Enhance Summer Hot Drought Events over Northeastern China? [J]. *J. Clim.*, 31(12): 4705-4725. doi:10.1175/JCLI-D-17-0429.1
- Li L P, Ni W J, Li Y G, et al. 2021. Impacts of Sea Surface Temperature and Atmospheric Teleconnection Patterns in the Northern Mid-Latitudes on Winter Extremely Cold Events in North China [J]. *Adv. Meteorol.*, doi:10.1155/2021/8853457
- 刘雅星, 范广洲, 董一平, 等. 2010. 近 46 年中国冬季日均气温及极端温度的变化 [J]. *成都信息工程学院学报*, 25(3): 286-292. Liu Y X, Fan G Z, Dong Y P, et al. 2010. Variations of Winter Daily Average Temperature and Extreme Temperature in the Recently 46 Years in China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 25(3): 286-292. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2010.03.012

- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 54(1): 44-55. doi:10.1034/J31600-0870.2002.00248.x
- Peng S L, Robinson W A, Li S L. 2002. Mechanisms for the Linear and Nonlinear Atmospheric GCM Responses to the North Atlantic SST Tripole [J]. *J. Clim.*, 16(12): 1987–2004. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<1987:MFTNRT>2.0.CO;2
- 齐庆华, 蔡榕硕, 郭海峡. 2019. 中国东部气温极端特性及其气候特征 [J]. *地理科学*, 39(8): 1340–1350. Qi Q H, Cai R S, Guo H X. 2019. The Climatic Variations of Temperature Extremes in the Eastern of China [J]. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 39(8): 1340-1350. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2019.08.016
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 108 (D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670
- 石晨, 廉毅, 杨旭,等. 2020. 东北亚和北半球冬季高空切断冷涡与中国极端低温事件的联系 [J]. *气象学报*, 78(5): 60-77. Shi C, Lian Y, Yang X, et al. 2020. The relationship between winter cut-off cold vortexes in Northeast Asia and northern hemisphere as well as their connections with extreme low temperature events in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 78(5): 60-77. doi:10.11676/qxxb2020.049
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608-627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:afoapi>2.0.co;2
- van der Walt A J, Fitchett J M. 2020. Trend analysis of cold extremes in South Africa:1960-2016 [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(3): 2060-2081. doi:10.1002/joc.6947
- 王冀, 江志红, 张海东, 等. 2007. 1957-2000 年东北地区春季极端气温变化及其与北极涛动的关系 [J]. *气候变化研究进展*, 3(1): 41-45. Wang J, Jiang Z H, Zhang H D, et al. 2007. Variations of spring extreme temperature indexes in northeast China and their relationships with the Arctic oscillation [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3(1): 41-45. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.01.008
- 王晓娟, 沈柏竹, 龚志强,等. 2013. 中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数极端性的联

- 系 [J]. 物理学报, 62(22):229201. Wang X J, Shen B Z, Gong Z Q, et al. 2013. The classification of winter regional extreme low temperature events in China and their corresponding relationship to climatic indices extreme anomaly [J]. Acta Phys. Sin. (in Chinese), 62(22): 229201. doi:10.7498/aps.62.229201
- 汪子琪, 张文君, 耿新. 2017. 两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响 [J]. 气象学报, 75(4): 564-580. Wang Z Q, Zhang W J, Geng X. 2017. Different influences of two types of ENSO on winter temperature and cold extremes in northern China. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75(4): 564-580. doi:10.11676/qxxb2017.038
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter [J]. Mon. Weather Rev., 109(4): 784-812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate [J]. J. Clim., 13(9): 1517-1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(3): 289-305. doi:10.1007/s00376-016-6160-5
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. Nature., 294(5550): 2345-2348. doi:10.1126/science.1064618
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation [J]. J. Clim., 17(24): 4674-4691. doi: 10.1175/JCLI-3228.1
- 谢瑞青, 刘宇迪, 朱金双, 等. 2019. 一次极端寒潮天气过程等熵位涡分析 [J]. 气象科技, 47(2): 312-321. Xie R Q, Liu Y D, Zhu J S, et al. 2019. Analysis of Isentropic Potential Vorticity for an Extreme Cold Wave Event [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 47(2):124-133. doi:10.19517/j.1671-6345.20170534
- 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 and Environmental Research (in Chinese), 23(4): 429-441. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17034
- Xie Z W, Bueh C. 2017. Blocking Features for Two Types of Cold Events in East Asia [J]. J. Meteorol. Res., 31(2): 309-320. doi:10.1007/s13351-017-6076-8

- 徐玮平, 张杰, 陈志恒. 2018. 两类春季极端低温的年代际特征与欧亚环流异常关系对比 [J]. 高原气象, 37(6): 1655-1670. Xu W P, Zhang J, Chen Z H. 2018. Comparative analysis of abnormal relationship between two types of decadal characteristics of extreme low temperature in spring and the Eurasian circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(6): 1655-1670. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00058
- 杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. 气候与变化环境, 13(4): 395-404. Yang H, Li C Y. 2008. Influence of Arctic Oscillation on Temperature and Precipitation in Winter [J]. Climatic and Environmental research (in Chinese), 13(4): 395-404. doi:1006-9585(2008)13:4<395:DJBTD>2.0.TX;2-J
- Yang Y, Xie N R, Gao M. 2019. The Relationship between the Wintertime Cold Extremes over East Asia with Large-Scale Atmospheric and Oceanic Teleconnections [J]. Atmosphere, 10(12): 813. doi:10.3390/atmos10120813
- Ye K H, Wu R, Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 120(7): 2738-2753. doi:10.1002/2015JD023148
- 尹姗, 冯娟, 李建平. 2013. 前冬北半球环状模对春季中国东部北方地区极端低温的影响 [J]. 气象学报, 71(1):96-108. Yin S, Feng J, Li J P. 2013. Influence of the preceding winter North Hemisphere annular mode on the spring extreme low temperature events in the north of eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 71(1): 96-108. doi:10.11676/qxxxb2013.008
- You Q L, Ren G Y, Fraedrich K, et al. 2013. Winter temperature extremes in China and their possible causes [J]. Int. J. Climatol., 33(6): 1444-1455. doi:10.1002/joc.3525
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003 [J]. Climate Dyn., 36(11-12): 2399-2417. doi:10.1007/s00382-009-0735-0
- 张霏燕, 徐海明. 2011. 东北春季极端低温的变化特征及其与大西洋海温的关系 [J]. 大气科学学报, 34(5): 574-582. Zhang F Y, Xu H M. 2011. Spatial/temporal variations of spring extreme low temperature in Northeast China and its relationship with SSTA in Atlantic Ocean [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 34(5): 574-582. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.007
- Zhang M Q, Sun J Q. 2020. Increased role of late winter sea surface temperature variability over northern tropical Atlantic in spring precipitation prediction over Northeast China [J]. J. Geophys. Res.: Atmos.,

125(22): e2020JD033232. doi:10.1029/2020JD033232

Zhang X D, Lu C H, Guan Z Y. 2012. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia [J]. *Environmental Research Letters*, 7(4): 044044. doi:10.1088/1748-9326/7/4/044044

Zhang X D, Fu Y F, Han Z, et al. 2021. Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: Comparisons, causes, and future implications [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s00376-021-1229-1

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 P M, Pan X H. 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:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001

Zheng F, Yuan Y, Ding Y, et al. 2021. The 2020/2021 Extremely Cold Winter in China Influenced by the Synergistic Effect of La Nia and Warm Arctic [J]. *Adv. Atmos. Sci.* doi:10.1007/s00376-021-1033-y

Zhou M Z, Wang H J, Song Y, et al. 2013. Influence of springtime North Atlantic Oscillation on crops yields in Northeast China [J]. *Climate Dyn.*, 41(11-12): 3317-3324. doi:10.1007/s00382-012-1597-4

Zhou Y Q, Ren G Y. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008 [J]. *Clim. Res.*, 50(2-3):125-139. doi:10.3354/cr01053

Zhu B Y, Sun B, Li H, et al. 2020. Interdecadal Variations in extreme High-Temperature Events over Southern China in the Early 2000s and the Influence of the Pacific Decadal Oscillation. [J]. *Atmosphere.*, 11(8): 829. doi:10.3390/atmos11080829