

2021 年 1 月与 2024 年 1 月我国东部极端寒潮 发生原因及机制探讨

李欣轩^{1,2}, 崔红艳^{1,2,3*}, 陈宝旭^{1,2}, 张子群^{1,3}, 李品⁴

1. 青岛科技大学 数理学院, 山东 青岛 266061;
2. 青岛科技大学 数学与交叉科学研究院, 山东 青岛 266061;
3. 青岛市人工智能技术创新中心, 山东 青岛 266061;
4. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 伴随全球变暖和有卫星观测记录以来北极秋季海冰密集度的下降, 近几年, 东亚地区极端降温事件频繁发生。基于北极涛动指数、北极海冰密集度及温度、位势高度和风场等大气环流数据, 研究 2021 年 1 月和 2024 年 1 月我国极端寒潮的时空变化特征及其原因机制。2021 年 1 月 1 日至 9 日, 2024 年 1 月 17 日至 24 日, 我国东部地区(115°00'~120°00'E, 20°00'~37°30'N)均出现极端寒潮, 最低温异常分别达到-9.028 °C 和-7.574 °C, 降温中心分别集中在蒙古高原南部和秦岭北部。2021 年 1 月我国东部地区平均气温降至-3.8 °C, 达到 21 世纪以来的次低温纪录。本文基于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的再分析资料, 得出西风带的异常减弱致使西风带对高纬度冷空气的阻拦作用减弱。2021 年、2024 年寒潮爆发时位于西伯利亚、太平洋西北部的高压中心和华北地区低压中心均出现显著增强, 导致位于西伯利亚的冷空气的南移, 致使我国东部地区出现寒潮现象。2024 年 1 月极端寒潮现象显示于气温经验正交分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)的第一模态(29.33%), 而 EOF 分解的第二模态(14.92%)显示 2021 年出现降温现象。回归分析表明北极涛动指数和北极海冰的下降与 1 月我国东部地区气温之间存在较强的关系, 北极涛动负相位及北极海冰的减少也是促使北极冷空气南下的重要因素。异常强劲的北风、减弱的西风急流及对应高压中心的移动共同作用导致了极地寒流入侵我国大陆地区, 是造成 2021 年 1 月和 2024 年 1 月我国大陆地区极端天气事件的主要原因之一。

关键词: 极端寒潮; 西风急流减弱; EOF; 回归分析

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2024)02-0116-13

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20240331001

引用格式: 李欣轩, 崔红艳, 陈宝旭, 等, 2024. 2021 年 1 月与 2024 年 1 月我国东部极端寒潮发生原因及机制探讨[J]. 海岸工程, 43(2): 116-128. LI X X, CUI H Y, CHEN B X, et al, 2024. Discussion on reasons and mechanisms of the extreme cold waves in eastern China in January 2021 and 2024[J]. Coastal Engineering, 43(2): 116-128.

2021 年 1 月 1 日至 9 日, 我国出现了极端寒潮天气, 造成了大范围的降温雨雪天气, 对交通、电力、农业和渔业产生了严重的影响(Liu et al, 2022)。类似这样的极端天气事件时有发生, 对我国经济社会造成了巨大影响(Liu et al, 2022), 也极大地影响着海洋工程安全和海洋工程建设。因此, 关于极端天气事件的机制分析和原因探讨十分重要。极端寒潮事件是我国冬季典型的极端天气事

收稿日期: 2024-03-31

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目(2022YFE0140500); 国家重点研发计划课题(2022YFA1004403); 大学生创新创业训练计划项目(X202310426198); 国家自然科学基金项目(42130406)

作者简介: 李欣轩(2002—), 男, 主要从事极端寒潮方面研究. E-mail: lixinxuan@mails.qust.edu.cn

*通信作者: 崔红艳(1984—), 女, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事北极海冰、极端天气事件等气候变化方面研究. E-mail: cuihy@qust.edu.cn

(李 燕 编辑)

件类型之一,普遍认为是由于中纬度大气环流异常,如负相位的北极涛动、强阻塞高压等因素引发高纬度冷空气南下造成的(Bueh et al, 2022)。Ma等(2019)通过分析2016年的极端寒潮得出该寒潮过程下北半球大气环流表现为乌拉尔阻塞高压极强异常、地表西伯利亚高压破纪录异常,而这主要源于自然内部的大气变率(Ma et al, 2019)。本文在前人研究的基础上,将北极涛动指数与温度进行回归分析,以研究寒潮的成因,并探讨了寒潮发生时3个不同阶段的位势高度场在西伯利亚的变化特点。在全球变暖的背景下,极端天气事件频繁发生,表现出群发性、持续性和复合性等特点(夏坤宁等, 2019),使得对极端天气事件的预测极为困难(Zhong et al, 2024)。Lin等(2024)指出全球变暖将导致京津冀地区出现更频繁的极端气候(Lin et al, 2024)。Dai等(2022)得出2020/2021年东亚极端寒潮的关键引发因素是极涡南移、欧亚大陆高压脊和亚洲阻塞的发展等(Dai et al, 2022)。副热带低压的加强可能对极端寒潮天气的引发起到了补充作用,通过捕捉热带辐合带北移的信号,海平面气压呈现北高南低的气压偶极子模式,经向气压梯度差清楚地揭示了副热带低压对2021年极端寒潮过程的影响(Li et al, 2022)。因此,本文主要关注位势高度场的相关研究,将西伯利亚地区和我国东部地区位势高度场相结合,以此研究2021年和2024年寒潮形成的动力机制。

大量的研究表明极端寒潮与阻塞环流联系密切(Ma et al, 2019; Dai et al, 2022; Zhang et al 2024)。阿拉斯加阻塞和乌拉尔阻塞以及伴随的北大西洋涛动位相转换是北半球极寒天气产生的主要环流型(Zhang et al, 2023)。而北美到东亚频繁的罗斯贝波向下游的能量频散和传播为这2个地区的阻塞环流建立了联系(Yao et al, 2023)。当极涡中心向欧亚大陆移动时,由于冷空气输送更强,中国东北地区的降温更加剧烈(Zhong et al, 2024)。除此之外,极地海冰对中纬度极端气候的影响不可忽视(Liu et al, 2012)。因此,本文在研究我国冬季寒潮成因中,加入了喀拉海、巴伦支海的海冰与温度的相关性分析,以此探讨巴伦支海、喀拉海的海冰的变化与我国冬季寒潮的关系。

研究表明,前期秋季北极海冰减少及热带太平洋海表温度偏冷有利于欧亚大陆冷事件的发生(Cui et al, 2016; Lin et al, 2024)。本文在此基础上分析了北极海冰密集度和我国温度的相关性,以此来探讨北极海冰密集度与2021年1月、2024年1月极端寒潮的关系。北极海冰损失量决定了北半球中高纬度地区大气环流减弱的空间范围和程度,导致极端寒冷和极端温暖的非线性变化(Mi-Rong et al, 2021)。巴伦支海、喀拉海海冰范围与华南冬季极端寒潮事件呈负相关,北大西洋涛动和西伯利亚高压在其中扮演“桥梁作用”(Wu et al, 2013)。巴伦支海和喀拉海作为2021年1月和2024年1月两次寒潮的关键点,本文选用这2个海区海冰密集度与我国东部温度的进行相关性分析。然而在年代际尺度上,这种关系并不稳定,秋季海冰范围快速减小时期冬季出现极端寒潮的频次更大,负相关更为显著,而海冰范围偏高时期二者相关关系减弱,这可能受到大气内部变率的调控(Xiao et al, 2023)。北极海冰密集度的下降中心由过去(1982—2001年)的楚科奇海及白令海峡一带,转移至亚欧大陆海岸的巴伦支海附近,且海冰范围减少速度由 $0.44 \times 10^6 \text{ km}^2/10 \text{ a}$ 增长至 $0.72 \times 10^6 \text{ km}^2/10 \text{ a}$,速度加快近一倍(李淑瑶等, 2022)。谢瑱璠等(2023)研究发现巴伦支海和喀拉海区域内海冰分别和海表温度以及地表气温呈现较为显著的负相关性变化。全球变暖将进一步导致巴伦支海和喀拉海海冰的减少。赵海波等(2024)研究发现,未来北极将会出现无冰情况,这或将导致寒潮事件更频繁地发生。

本文为研究2021年1月和2024年1月两次寒潮的形成机制和大气环流各要素随寒潮到来产生的变化,将寒潮分为爆发前、爆发时及爆发后三个阶段,基于2001—2024年1月的地表气温、500 hPa位势高度场及风场数据进行分析,再利用主成分分析、回归分析进一步研究这两次寒潮爆发的原因。

1 数据、方法和地理位置标识

1.1 主要研究区域

本文探讨了2021年1月和2024年1月发生在我国东部地区的两次寒潮事件的原因及路径。近

年来, 北极地区的巴伦支海和喀拉海的海冰的融化, 改变了局地的反照率, 造成气温的升高, 与乌拉尔及西伯利亚地区的降温形成鲜明对比。温度梯度的增大为冷空气经过蒙古高原进入我国东部平原创造了条件。本文主要研究欧亚大陆地区(图1)的温度演变, 需要探讨环流场、风场等物理量的全经度范围的变化。

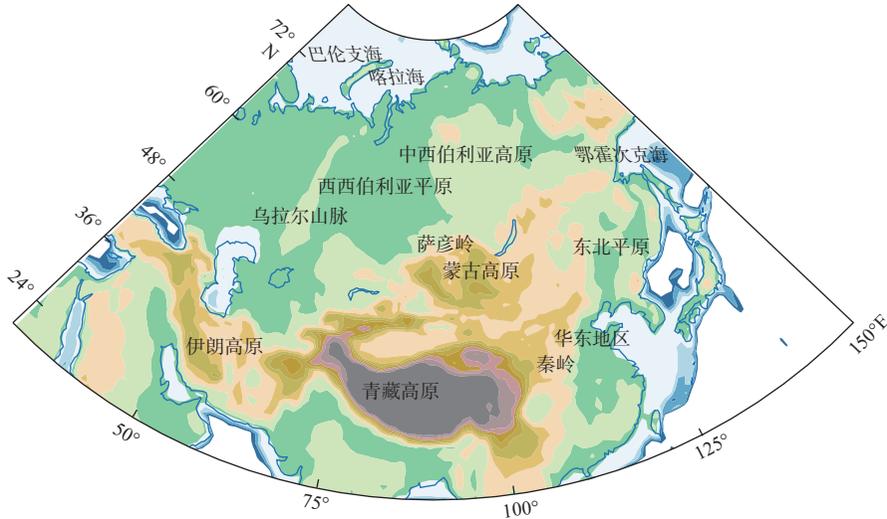


图1 本文主要研究区域

Fig. 1 The main region of this study

1.2 数据

本文采用的日均温度数据分析 2021 年 1 月及 2024 年 1 月极端天气事件的发生、发展和消退的过程。选取大气环流数据包括 500 hPa 气压场、经向风和纬向风场, 从动力学角度分析 2021 年 1 月及 2024 年 1 月极端天气事件的成因及路径。利用北极涛动指数及北极海冰密集度指数探讨 2 次极端天气事件的机制。

表面气温、气压场、风场的日平均数据和北极涛动指数来自美国国家环境预报与国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>), 空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。上述各变量均选取 $0^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{N}$, 时间跨度为 2001—2024 年, 月份选取 1 月。巴伦支海、喀拉海海冰密集度数据来自美国国家和大气海洋局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml)最优插值数据版本 2, 空间分辨率为 $1.458^{\circ} \times 1.458^{\circ}$, 时间跨度为 2000—2023 年, 月份选取 9 月。海冰密集度以覆盖面积的百分比来表示。

1.3 方法

本文采用线性回归方法探讨寒潮的空间分布与北极涛动和喀拉海、巴伦支海海冰密集度的相关性。利用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解方法研究底层大气温度的时空变化特征。本文采用的主要方法如下。

1.3.1 线性回归

时间序列 x_t 的样本量为 n , 对应的一元线性回归方程为 $\hat{x}_t = a + bt_t$, 斜率 b 代表所求时间变化, 式中系数 a 和 b 的计算如下:

$$\begin{cases} a = \bar{x} - b\bar{t} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{t} 分别为 $x_i(1 \leq i \leq n)$ 、 $t_i(1 \leq i \leq n)$ 的均值。

1.3.2 EOF分解

EOF分解在气象中常用来分析单一场的空间和时间变化,又称为空间分解。**EOF**代表着模态的空间分布,主成分时间序列**PC**则对应着相应空间模态随时间的变化。将气候要素矩阵**X**分解为空间模态及时间序列,也即**X**=**EOF** $_{m \times n}$ ×**PC** $_{m \times n}$, m 为空间点个数, n 为时间序列长度。本文将表面气温的距平矩阵进行EOF分解,求矩阵的特征值和特征向量,来探究其空间分布特征与空间模态随时间的变化,以便达到稳定性(Zhang et al, 2020)。EOF分解的步骤如下。

1)将矩阵预处理为距平矩阵**X**:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2)计算距平矩阵**X**与其转置矩阵的交叉积**C** $_{m \times m}$:

$$\mathbf{C}_{m \times m} = \frac{1}{n} \mathbf{X} \times \mathbf{X}^T. \quad (3)$$

3)计算矩阵的特征值矩阵**A** $_{m \times m}$ 及特征向量**V** $_{m \times m}$,二者满足:

$$\mathbf{C}_{m \times m} \times \mathbf{V}_{m \times m} = \mathbf{V}_{m \times m} \times \mathbf{A}_{m \times m}. \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_m \end{bmatrix},$$

特征值按 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_m \geq 0$ 排列,每一个特征值对应一个特征向量**EOF**,**EOF** $_i = V(:,i)$ 。

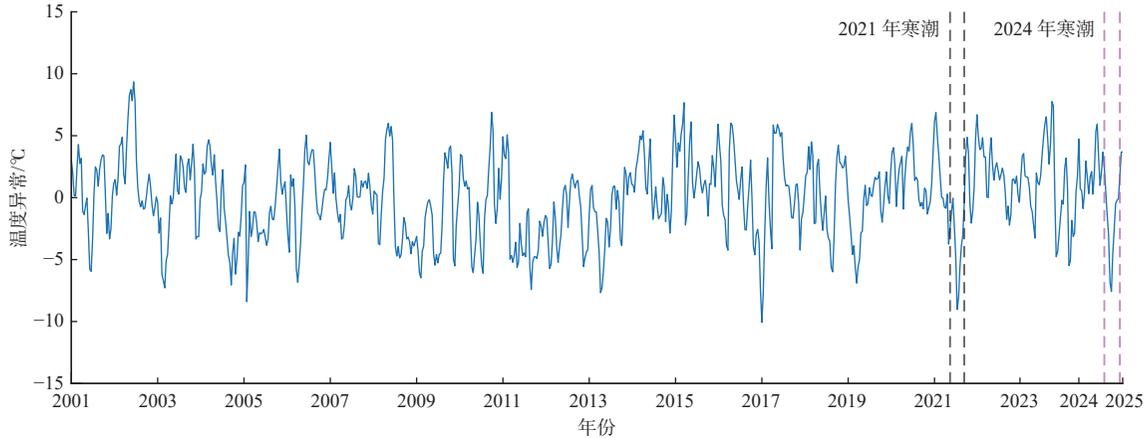
4)计算主成分**PC**,将**EOF**投影于原始数据矩阵,得到对应的时间系数即主成分:

$$\mathbf{PC}_{m \times n} = \mathbf{V}_{m \times m}^T \times \mathbf{X}_{m \times n}. \quad (5)$$

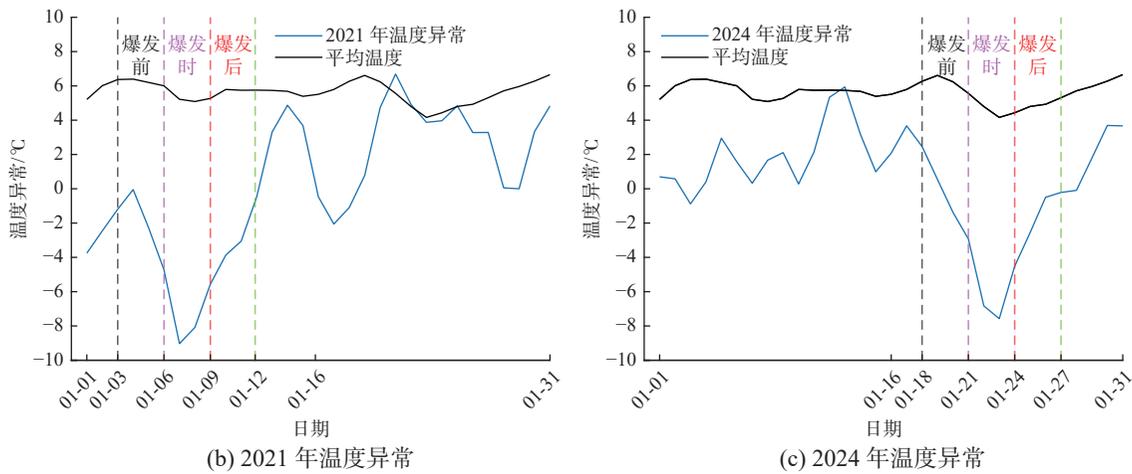
2 寒潮3个阶段的划分

2001—2024年1月我国东部地区(115°00'~120°00'E, 20°00'~37°30'N)温度时间序列如图2所示。黑线和红线之间分别代表2021年1月及2024年1月的寒潮事件(图2a)。从图2a可知,2021年1月及2024年1月的2次寒潮事件是我国东部中低纬沿海地区(22°30'~37°30'N)1月较强的2次寒潮事件。寒潮爆发时,2021年和2024年异常最低温分别达到-9.028℃和-7.574℃(图2b和图2c)。图2b和图2c中的黑色折线代表24年的平均气温,为我国东部地区2001—2024年逐日平均的温度。我国东部沿海地区遍布富有经济意义的渔场,如舟山渔场和黄渤海渔场等。寒潮的剧烈降温引起水温快速下降,造成变温动物——鱼类强烈应激反应,引起越冬鱼应激脱黏、冻伤甚至死亡。研究我国东部中低纬度沿海地区寒潮的成因有着巨大的经济意义(Aalijahan et al, 2019)。

本文将2次寒潮分为爆发前、爆发时和爆发后三个阶段(图2b和图2c)。2021年1月3日至5日为2021年寒潮爆发前,共3天;2021年1月6日至8日为2021年寒潮爆发时,共3天;2021年1月9日至11日为2021年寒潮爆发后,共3天。以2021年1月7日(图2b中异常最低温出现时间)作为中间时刻对称划分区域。2024年1月18日至20日为2024年寒潮爆发前,共3天;2024年1月21日至23日为2024年寒潮爆发时,共3天;2024年1月24日至26日为2024年寒潮爆发后,共3天。将2024年1月22日(图2c中异常最低温出现时间)作为中间时刻对称划分区域(图2c)。



(a) 2001—2024年我国东部地区(115°00'~120°00'E, 20°00'~37°30'N) 1月逐日气温(°C)



(b) 2021年温度异常

(c) 2024年温度异常

图2 我国东部地区(115°00'~120°00'E, 20°00'~37°30'N) 温度异常变化时间序列

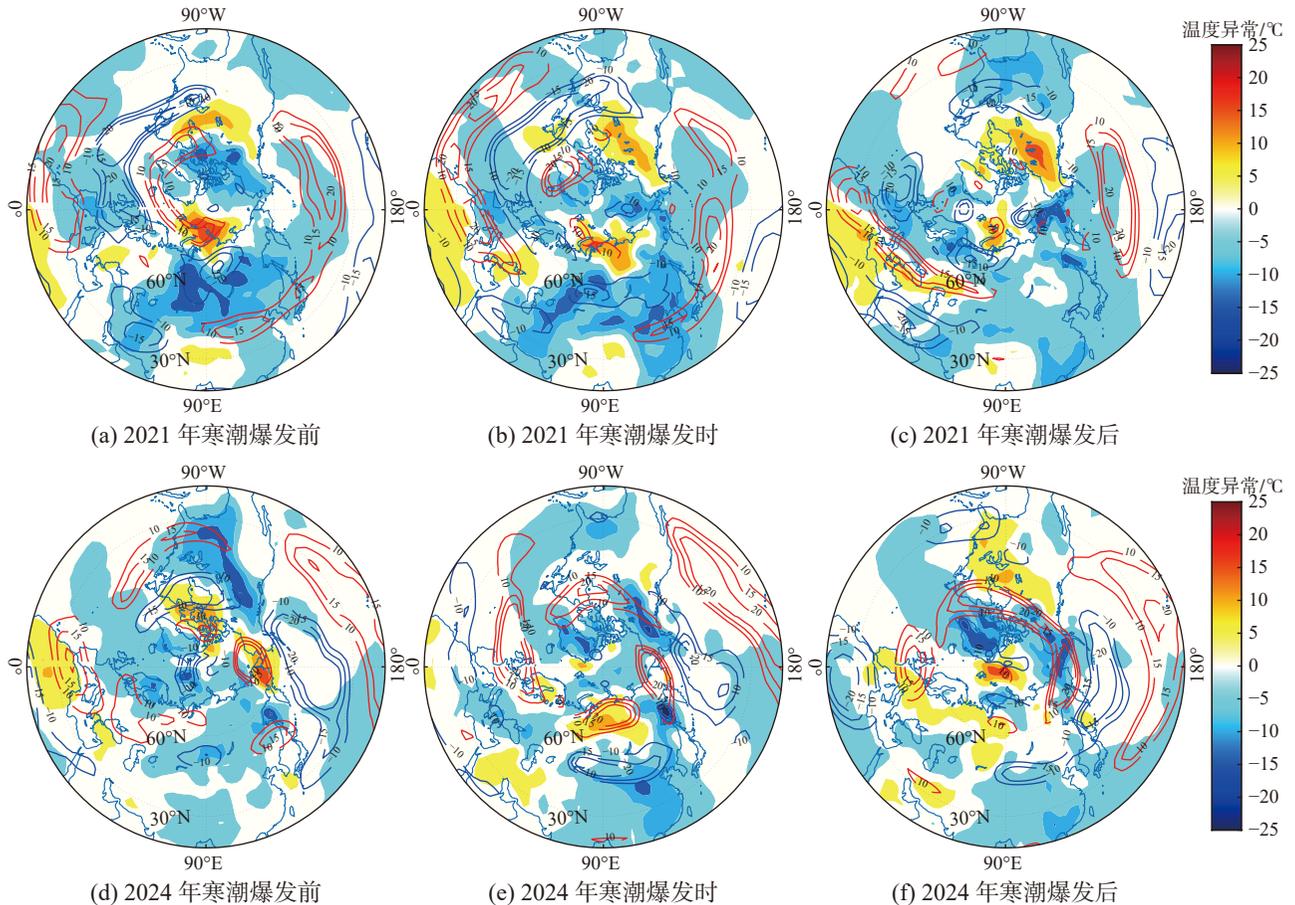
Fig. 2 Time series of the abnormal changes in temperature in the eastern part of China (115°00'-120°00'E, 20°00'-37°30'N)

3 2次寒潮事件北半球大气环流变化特征

3.1 表面温度和纬向风空间分布

为分析图2中2次极端寒潮的空间分布,下文利用2001—2024年1月的温度和纬向风数据得到2021年1月和2024年1月的温度和纬向风异常(图3)。为探索寒潮与西风急流的关系,将纬向风(等值线)和气温的异常(颜色)数据相结合(图3)。从2021年寒潮爆发前、寒潮爆发时和寒潮爆发后的空间分布变化可知,寒潮爆发前温度负异常主要位于西伯利亚和蒙古高原地区,西风带的减弱主要出现在西西伯利亚南部地区(图3a)。在2021年寒潮爆发时,温度的负异常范围扩大并南移。降温主要区域在伊朗高原、蒙古高原、华北平原和东北平原,亚洲东部的温度的负异常中心在华

北平原。西风带的减弱区域在西伯利亚南部、蒙古高原和东北平原(图 3b), 西风带的减弱中心位于西伯利亚南部($60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$, $45^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)。2021年寒潮爆发后, 温度的负异常区域位于西伯利亚地区。亚洲东部的西风带的减弱消失(图 3c)。而2024年寒潮爆发前, 温度的负异常区域在蒙古高原西部和鄂霍次克海附近, 西风带在萨彦岭地区偏弱, 在东北平原地区偏强(图 3d)。2024年寒潮爆发时, 温度的负异常中心移动到秦岭地区, 西风带减弱的区域扩大到蒙古高原和东北平原(图 3e), 西风带的减弱中心位于西伯利亚南部($80^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$); 2024年寒潮爆发后, 亚洲东部温度的负异常在南岭地区, 西风带减弱的区域缩小到蒙古高原(图 3f)。



注: 等值线为纬向风($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)异常, 对应的气候态为2001—2024年1月。

图3 2021年1月和2024年1月寒潮爆发3个阶段温度和纬向风异常

Fig. 3 Anomalies of temperature and zonal wind in the three stages of cold wave outbreak in January 2021 and 2024

对比2次寒潮天气的3个阶段, 得到2次寒潮变化的相同点: 寒潮爆发前均在蒙古高原西部存在着较强的温度负异常和西风急流减弱的现象, 减弱的数值均达到 10 m/s 以上(图 3a和图 3d)。寒潮爆发时, 西风带均在蒙古高原和华东平原的北部出现明显的减弱现象, 西风带的减弱中心均位于西西伯利亚南部地区, 2021年减弱的数值达到 15 m/s 以上, 2024年减弱的数值达到 20 m/s 以上(图 3b和图 3e); 寒潮爆发后, 西风带减弱现象消失或减弱(图 3c和图 3f)。西风带负异常有利于冷空气南下。对比2次寒潮天气的3个阶段, 得到2次寒潮变化的不同点: 寒潮爆发前, 2021年在西西伯利亚北部地区出现极地东风带的增强, 这一现象在2024年1月并未出现; 寒潮爆发时, 2021年在西风带减弱区域两侧(伊朗高原和华北平原)均出现降温。2024年仅在华北平原出现降温; 寒潮爆发后, 2021年亚洲东部地区西风带减弱消失, 2024年西风带减弱的范围缩小到蒙古高原。当西风带偏弱时, 西伯利亚的冷空气容易突破西风急流, 南移到我国东部地区。西伯利亚南移的冷

空气导致我国东部地区出现寒潮或极端降温。据此得出西风急流在寒潮爆发前期的减弱是我国东部地区出现寒潮的一个重要的前提条件之一。

3.2 位势高度场和风场的空间分布

为深入探讨这2次寒潮的成因,进一步探寻引起这次寒潮的冷空气的来源和形成的机制,本文给出2001—2024年1月的500 hPa位势高度和风场异常的空间分布(图4)。2021年寒潮爆发前,西西伯利亚地区北部地区和太平洋北侧位势高度异常偏高,在蒙古高原地区和东北平原地区位势高度负异常,导致极地冷空气南移,并在西伯利亚地区堆积(图4a)。2021年寒潮爆发时,西西伯利亚地区位势高度场持续偏高,并向东偏移。太平洋西北沿岸位势高度异常偏高。并且西西伯利亚位势高度正异常场和太平洋位势高度正异常相互接近。在东北平原和华北平原位势高度负异常。西伯利亚和极地冷空气南移并在华北平原和东北平原堆积(图4b)。2021年寒潮爆发后,西伯利亚、蒙古高原、东北平原和华北平原出现位势高度负异常。在巴伦支海和喀拉海出现位势高度正异常(图4c)。而2024寒潮爆发前,西西伯利亚和太平洋西北岸出现位势高度正异常。青藏高原地区出现位势高度负异常。极地冷空气在西伯利亚地区堆积(图4d)。2024年寒潮爆发时,西西伯利亚地区位势高度正异常增强并向东扩张。北太平洋地区位势高度正异常减弱。东北平原南部和华北平原出现位势高度负异常。西伯利亚的冷空气通过东北平原进入我国东部地区(图4e)。2024年寒潮爆发后,西伯利亚和太平洋西北部位势高度场正异常范围扩张并连在一起。亚洲东部位势高度场负异常范围减小,中心位置位于青藏高原(图4f)。

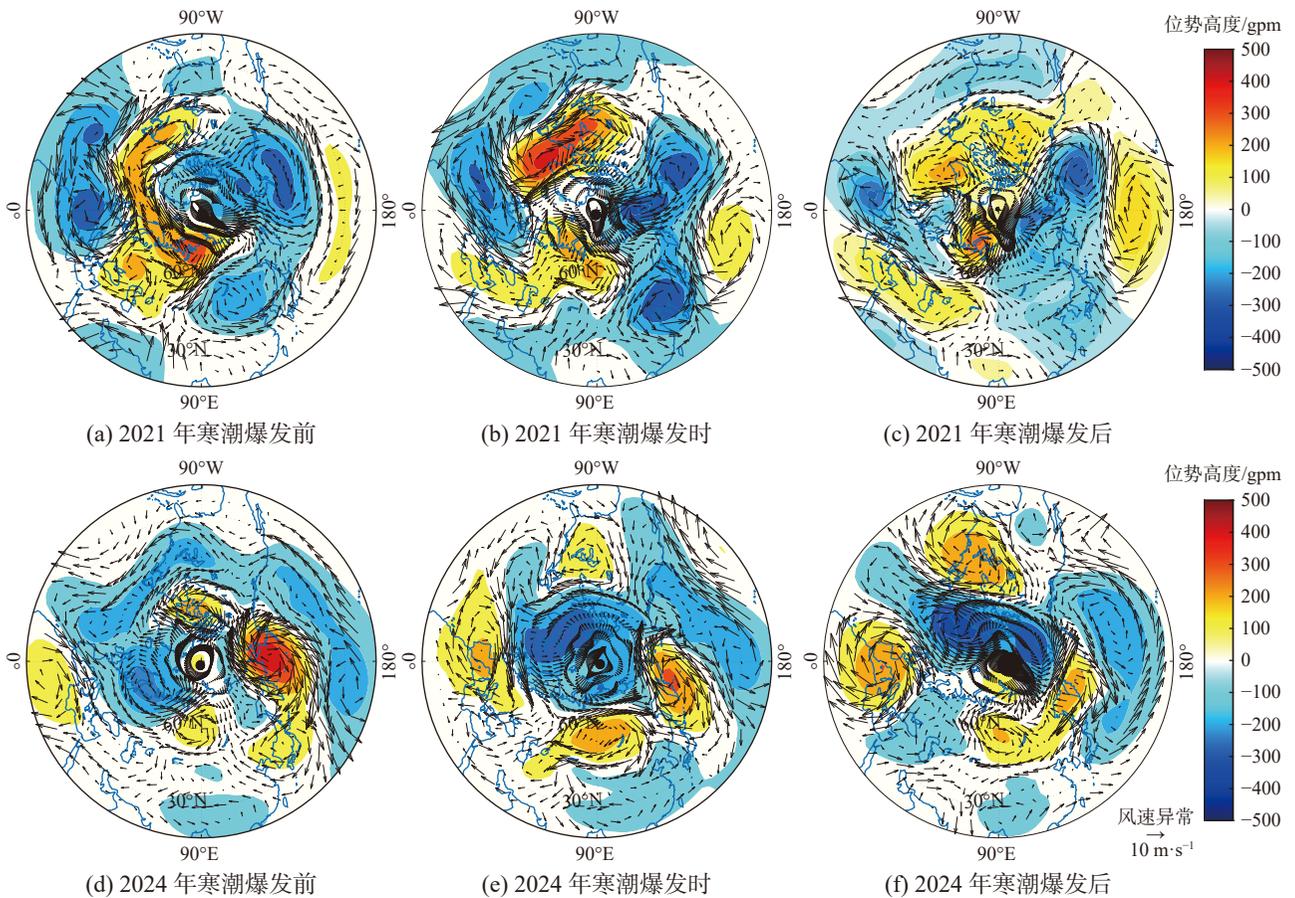


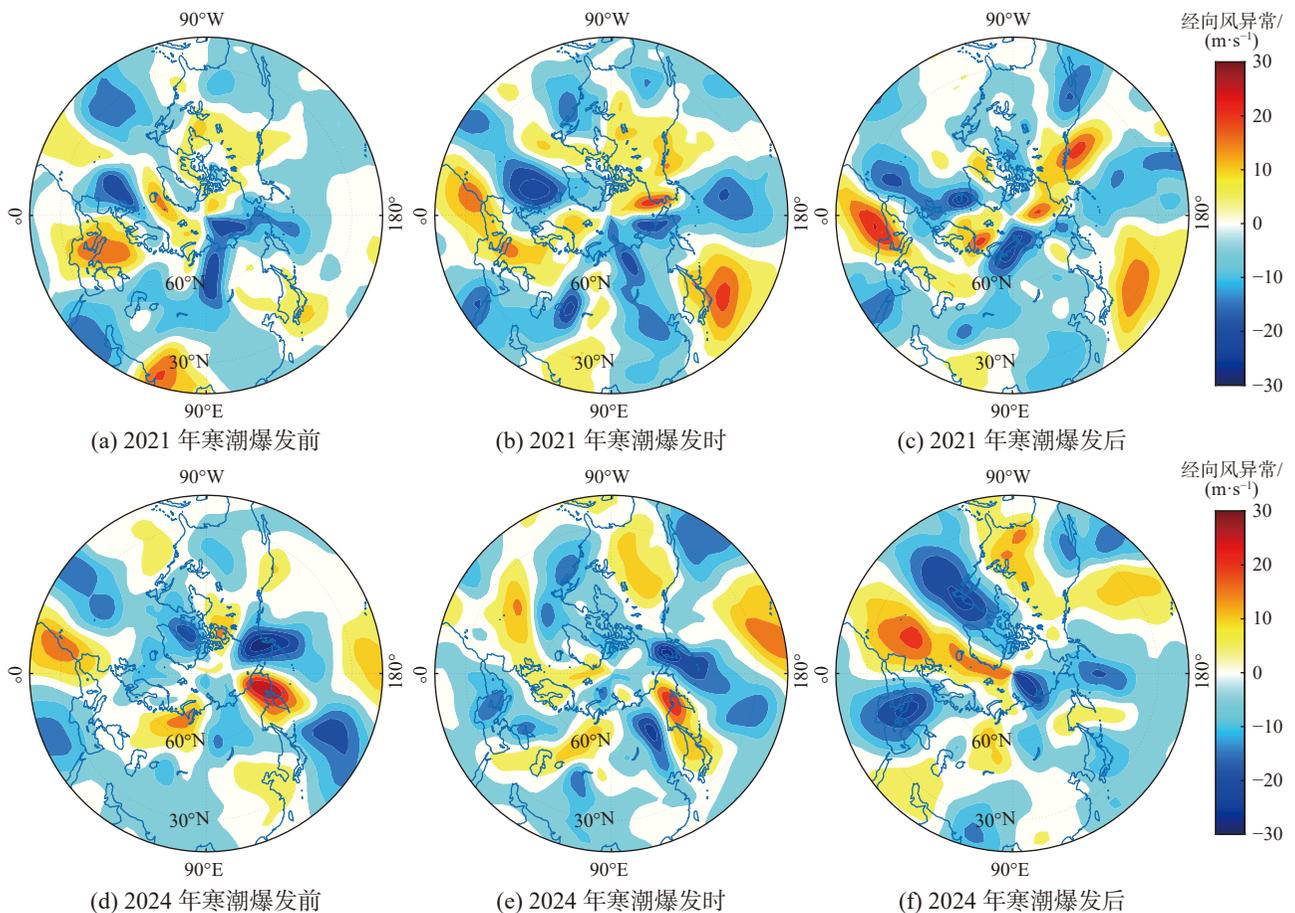
图4 2021年1月及2024年1月位势高度场和风场异常

Fig. 4 Anomalies of geopotential height field and wind field in January 2021 and 2024

对比2次寒潮过程的位势高度场和风场异常,在寒潮爆发前,均出现极地冷空气在西伯利亚堆积的现象(图4a和图4d)。寒潮爆发时,2次寒潮均出现西伯利亚和北太平洋位势高度场正异常,并且2个正异常场相互靠近而并不连续(图4b和图4e)。在华北平原地区位势高度负异常。这种现象有利于西伯利亚和极地冷空气南移,导致我国东部出现降温现象。

3.3 经向风空间分布

为进一步探讨2021年1月及2024年1月两次寒潮事件的冷空气的来源,本文得到3个阶段的经向风异常场(图5)。2021年寒潮爆发前,西伯利亚地区北风异常偏高,此时冷空气在西伯利亚地区堆积(图5a);2021年寒潮爆发时,北风在中西伯利亚、蒙古高原、华北平原及我国所有沿海城市异常偏高(图5b);2021年寒潮爆发后,亚洲东部地区持续出现北风异常增强,范围增大,但整体强度降低(图5c)。2024寒潮爆发前,中西伯利亚高原地区北风异常偏高(图5d);2024寒潮爆发时,在西伯利亚高原和东北平原地区北风异常偏高,北风异常偏高的中心位于东北平原(图5e);2024寒潮爆发后,北风异常偏高位于西伯利亚西部和东北平原。但北风偏高强度相较于爆发时降低(图5f)。



注: 对应的气候态为2001—2024年1月。

图5 2021年和2024年1月经向风异常

Fig. 5 Anomalies of radial wind in January 2021 and 2024

比较2次寒潮的经向风异常,在2021年的爆发前与爆发后两阶段均出现较强来自极地的北风盘踞在西伯利亚地区。2次寒潮爆发时,由图5b和图5e可知,强劲的北风从西伯利亚吹入我国大陆地区,2021年1月的寒潮北风波及的范围更靠南,甚至到达广州地区。2次寒潮冷空气的发源地

均为北极，北极的极地冷空气通过西伯利亚地区进入我国东部，进而导致我国东部的降温。

4 北半球表面气温 EOF 分解

2001—2024 年北半球表面气温 EOF 分解结果如图 6 所示。本文将温度划分为时间函数和空间函数。在 EOF 中，第一模态和第二模态分别占比 29.33% 和 14.92%(两模态均通过独立性检验)。第一模态的空间分布显示在亚洲南部地区出现降温现象(图 6a)，第二模态的空间分布显示在亚洲东部地区出现升温现象(图 6b)。图 6c 为表面气温 EOF 分解的时间序列，PC₁ 为第一模态的时间序列，PC₂ 为第二模态的时间序列，从第一模态的时间序列看出 2021 年处于负相位，而 2024 年处于正相位(图 6c)。从第二模态的时间序列中知 2021 年和 2024 年均处于正相位(图 6c)。本文对第一模态和第二模态时间序列进行线性拟合得到它们均有上升的趋势，第一模态上升速度高于第二模态(图 6c)。结合第一、第二模态的空间分布和时间序列(图 6)分析得出在第一、第二模态中均体现出 2021 年 1 月的降温现象。而 2024 年的寒潮现象只在第一模态中有所体现。

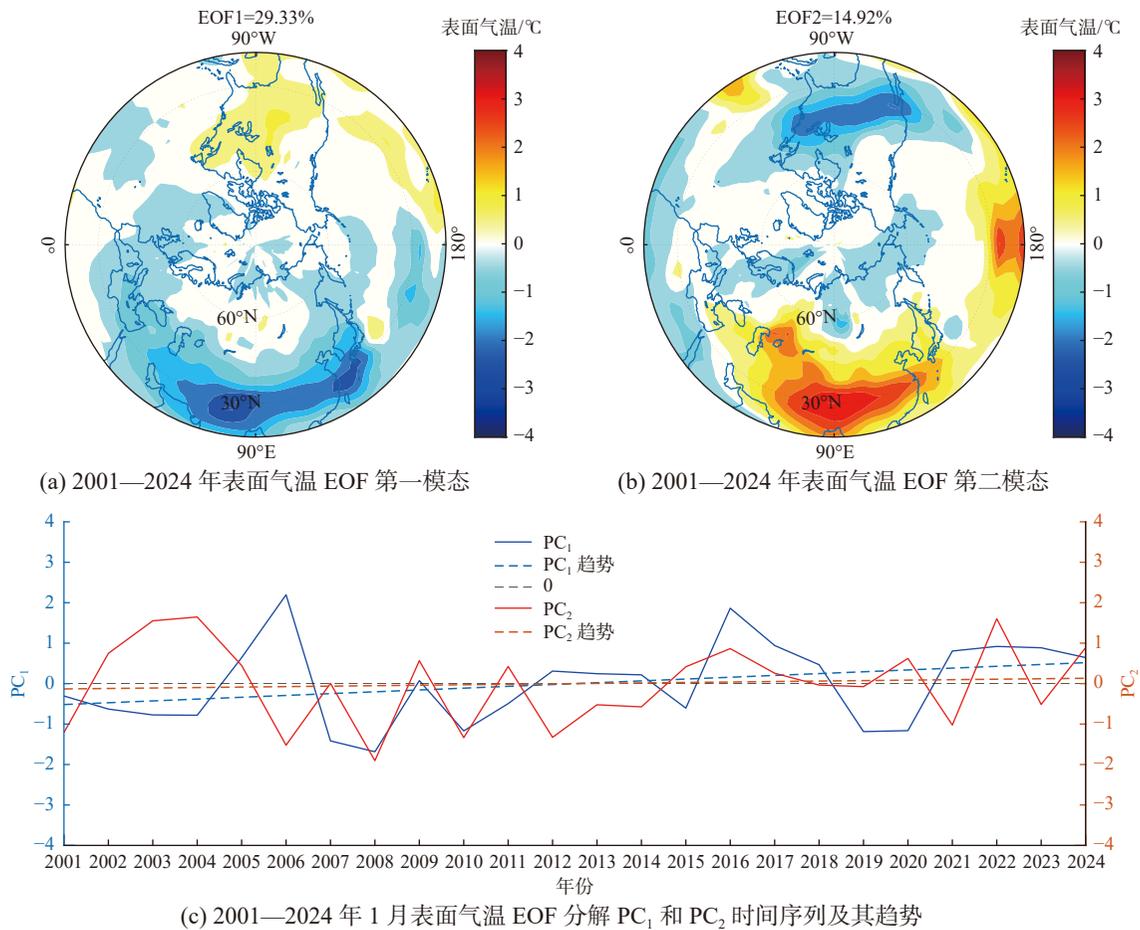


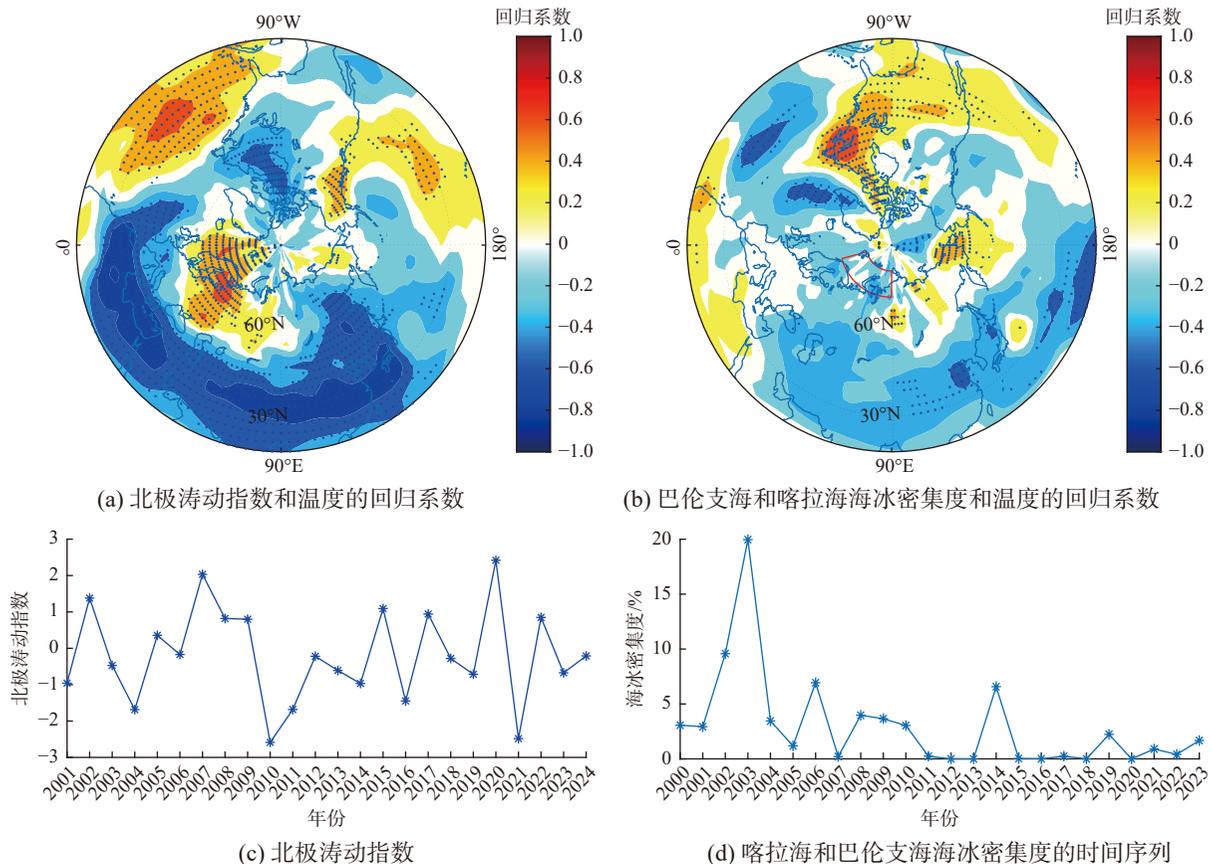
图 6 北半球表面气温 EOF 空间分布和 PC₁ 和 PC₂ 时间序列

Fig. 6 The EOF spatial distribution of surface temperature and the PC₁ and PC₂ time series in the Northern Hemisphere

5 北极涛动指数和北极海冰与表面气温的回归分析

为了研究 2 次极端事件期间北极涛动对表面气温异常的影响，使用线性回归，并将 2001 年 1 月

至2024年1月的北极涛动指数回归到表面气温上,绘制了图7a,以解释北极涛动对冷空气南下的贡献。鉴于北极涛动指数和北极海冰明显的下降趋势,本文选取回归系数的相反数(图7a和图7d),当北极涛动指数为负时我国东部地区出现降温,当北极涛动指数为正时我国东部地区出现升温。在2021年和2024年北极涛动指数均为负值(图7c),北极涛动指数出现负值是2021年和2024年寒潮爆发的原因之一。



注:图a为2001—2024年1月北极涛动指数与北半球表面温度($^{\circ}\text{C}$)的回归系数的空间分布;图b为2000—2023年9月喀拉海和巴伦支海海冰密集度($\%$)与2001—2024年1月北半球表面温度($^{\circ}\text{C}$)的回归系数的空间分布,红框区域为海冰密集度选取区域。打点区域代表通过90%置信水平检验。

图7 北极涛动指数和巴伦支海和喀拉海海冰密集度与温度的回归系数空间分布,及北极涛动指数和喀拉海和巴伦支海海冰密集度的时间序列

Fig. 7 The spatial distributions of the regression coefficients among the Arctic Oscillation Index, the sea ice density in the Barents Sea and the Kara Sea and the temperature, and the time series of the Arctic Oscillation Index and the sea ice density in the Kara Sea and the Barents Sea

巴伦支海和喀拉海(图7b红框内区域)海冰的融化与表面气温的变化息息相关。北极海冰的融化不仅影响着比湿、气压和风场,还进一步影响表面气温的变化(Cui et al, 2016)。随着北极海冰在卡拉海以及巴伦支海一带的融化(Li et al, 2021),这些地区的海冰密集度出现了大幅度下降。将喀拉海和巴伦支海的北极海冰密集度数据回归到表面气温上,得到图7b,图中显示当海冰密集度降低时我国东部地区出现降温。当海冰密集度升高时我国东部地区出现升温。2001年至2023年,北极这2个地区的海冰密集度在2007年达到最低值,近10年来融化尤为显著(图7d)。喀拉海和巴伦支海的海冰密集度是影响我国东部地区寒潮的原因之一(Wu et al, 2013)。随着全球逐渐变暖,海冰

的密度逐渐降低,这或将导致更多异常寒潮天气的发生。北极涛动指数与北极海冰密集度标准化后,求得两者的相关性为-5.6%。因此可知北极涛动指数和海冰密集度对温度的影响是2个相对独立的因素。

6 结 语

本文探讨了2021年1月和2024年1月我国发生的2次极端寒潮天气事件的特征及其原因和机制。将寒潮事件分为3个过程:爆发前,爆发时和爆发后。在寒潮爆发前,西伯利亚地区首先出现异常升高的位势高度场,冷空气在西伯利亚地区盘踞。此时,我国东部地区还未出现降温现象;西风急流在乌拉尔山一带出现衰减的现象,为盘踞在西伯利亚地区的寒潮入侵我国创造了条件。在寒潮爆发时,西伯利亚高压进一步增强,加上西风带出现大范围的减弱,为寒潮入侵打开了通道,冷空气长驱直入,我国东部地区开始全面受到寒潮影响,出现极端降温;在寒潮衰退期,西风带恢复到以往水平,将冷空气阻挡在高纬度地区,寒潮过程结束。本文探讨的2次极端寒潮的结束方式也有不同点。首先,2021年1月和2024年1月的气压场不同,寒潮爆发后,2021年1月,当西伯利亚高压消失时,此次寒潮结束;而2024年,西伯利亚高压和太平洋西北部高压连成一体,阻碍高纬度冷空气的进一步南下,此次寒潮结束。其次,西风急流也表现出不同的特点:2021年寒潮爆发前,西伯利亚地区已形成了较强的西风急流减弱的现象,并导致亚洲中部地区的部分降温,2024年寒潮爆发前,仅在西伯利亚南部小块区域出现西风急流减弱的现象,在东北平原出现西风急流增强;2021年寒潮爆发后,西风急流减弱消失,2024年寒潮爆发后,蒙古高原地区仍存在西风急流减弱。西风急流减弱是西伯利亚冷空气南下的原因之一。但当西伯利亚、东北平原和太平洋西北沿岸位势高度场正异常时,就会阻碍高纬度冷空气的南下。

EOF的结果也很好地分析出了2021年1月和2024年1月两次极端寒潮事件,第一模态和第二模态分别占比29.33%和14.92%。本文将北极涛动指数和北极海冰密集度指数回归到气温数据上,得出北极涛动指数长期处于负相位导致冷空气的南移,并进一步导致我国东部地区极端寒潮事件的发生。喀拉海和巴伦支海的海冰密集度下降也是我国东部地区极端寒潮事件发生的原因之一。随着全球变暖,海冰密集度下降,异常寒潮天气的出现进一步增加(Lin et al, 2024)。

极端寒潮天气可能会引起寒潮大风。寒潮大风具有风力强、降温快、范围广、预报难等突出特点,给海上航行与作业安全、交通建设工程施工和港口生产带来严重影响,其破坏力不亚于台风。极端天气事件是一个随机的过程,探讨极端寒潮发生的原因和机制是一个热点话题。本文仅探讨了2021年1月和2024年1月我国发生的2次极端寒潮的特征及成因,还可以继续研究其他年份的极端天气事件,探讨它们的共同特征及机制。比如西风急流的减弱,或者位势高度场的移动规律,将得到的规律或者阈值放在模式中,对当下机制和模式作为补充,使预测极端天气事件成为可能。其次,北极地区的变化不仅体现在海冰密集度上,还体现在海冰的范围、冰龄及海冰厚度等参数中。影响极端寒潮的因素有很多,除了本文分析的位势高度场的移动及西风急流的减弱,还有很多其他因素,如太平洋的副热带高压的移动(张凌艺, 2023)、北极地区的“放大效应”导致与中纬度地区温差的减弱、冬季西边界流(汪嘉宁等, 2022)等都对我国东部地区冬季的降温降雪产生深远的影响,有待进一步研究。随着海洋大气模式的不断发展,利用观测数据与数值模式相结合的方法探讨极端天气事件发生、发展和溃散原因成为可能,对减少自然灾害及提高农业、牧业和海洋养殖的经济效益等具有重要意义。

参考文献 (References):

李淑瑶, 崔红艳, 2022. 1982—2001年与2002—2021年北极秋季融冰的时空变化及原因[J]. 海岸工程, 41(2): 162-172. LI

- S Y, CUI H Y, 2022. The spatial-temporal variation of Arctic autumn sea ice and its impact factors in 1982-2001 and 2002-2021[J]. *Coastal Engineering*, 41(2): 162-172.
- 汪嘉宁, 马强, 王凡, 等, 2022. 西太平洋深层西边界流研究进展[J]. *地球科学进展*, 2022,37(1): 26-36. WANG J N, MA Q, WANG F, et al, 2022. Advances in research of the deep western boundary current in the Western Pacific Ocean[J]. *Advances in Earth Science*, 2022,37(1): 26-36.
- 夏坤宁, 文韬, 马亮, 2019. 正在变暖的全球气候与依旧凛冽的寒潮大风[J]. *生命与灾害*, (12): 10-13. XIA K N, WEN T, MA L, 2019. The warming global climate and the still bitter cold wave and high winds[J]. *Life and Disaster*, (12): 10-13.
- 谢瑱璿, 张瑜, 陈长胜, 等, 2023. 巴伦支海和喀拉海区域海冰变化关键过程及热力响应[J]. *海洋科学进展*, 41(1): 24-39. XIE T L, ZHANG Y, CHEN C S, et al, 2023. Key processes of sea ice variation and thermodynamic response in the Barents Sea and Kara Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 41(1): 24-39.
- 张凌艺, 2023. 西太平洋副热带高压的变化趋势及其气候效应[J]. *大众科技*, 25(1): 58-61. ZHANG L Y, 2023. The changing trends and climate effects of the subtropical high in the Western Pacific[J]. *Volkswagen Technology*, 25(1): 58-61.
- 赵海波, 李佳琦, 王梓琦, 等, 2024. CMIP6模式对北极海冰的模拟及夏季无冰时间集合预估[J]. *海洋科学进展*, 42(2): 238-253. ZHAO H B, LI J Q, WANG Z Q, et al, 2024. CMIP6 simulations of the Arctic sea ice and their ensemble projection of ice free time in boreal summer[J]. *Advances in Marine Science*, 42(2): 238-253.
- AALIJAHAN M, SALAHI B, RAHIMI G Y, et al, 2019. A new approach in temporal-spatial reconstruction and synoptic analysis of cold waves in the northwest of Iran[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1/2): 341-352.
- BUEH C, PENG J, LIU D, et al, 2022. On the two successive supercold waves straddling the end of 2020 and the beginning of 2021[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4): 591-608.
- CUI H Y, QIAO F L, 2016. Analysis of the extremely cold and heavy snowfall in North America in January 2015[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(2): 75-82.
- DAI G, LI C, HAN Z, LUO D, et al, 2022. The nature and predictability of the East Asian extreme cold events of 2020/21[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4): 566-575.
- LI S Y, CUI H Y, XU J L, et al, 2021. Factors contributing to rapid decline of Arctic sea ice in autumn[J]. *Advances in Polar Science*, 32(2): 96-104.
- LI X, ZHANG Y J, GAO H, DING T, 2022. Extreme cold wave in early November 2021 in China and the influences from the meridional pressure gradient over East Asia[J]. *Advances in Climate Change Research*, 13(6): 797-802.
- LIU J, CURRY J A, WANG H, et al, 2012. Impact of declining Arctic Sea-ice on winter snowfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(11): 4074-4079.
- LIU C Y, BO L U, JIN L, et al, 2022. Impact of the cold surge event in January 2021 on the power system of China[J]. *Progress in Climate Change Research*, 13(6): 803-810.
- LIN X, WANG Y, SONG L, 2024. Variation of temperature extremes in wintertime over Beijing-Tianjin-Hebei region in the era of sharp decline of Arctic sea ice[J]. *Atmospheric Research*, 297: 107113.
- MA S, ZHU C, 2019. Extreme cold wave over East Asia in January 2016: a possible response to the larger internal atmospheric variability induced by Arctic warming[J]. *Journal of Climate*, 32(4): 1203-1216.
- MI-RONG S, SHAO Y W, ZHU Z, et al, 2021. Nonlinear changes in cold spell and heat wave arising from Arctic sea-ice loss[J]. *Advances in Climate Change Research*, 12(4): 553-562.
- WU B, HANDORF D R, DETHLOFF K, et al, 2013. Winter weather patterns over northern Eurasia and Arctic Sea ice loss[J]. *Monthly Weather Review*, 141(11): 3786-3800.
- XIAO C, ZHANG Q, YANG J, et al, 2023. A statistical linkage between extreme cold wave events in southern China and sea ice extent in the Barents-Kara seas from 1289 to 2017[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(12): 2154-2168.
- YAO Y, ZHUO W, GONG Z, et al, 2023. Extreme cold events in north America and Eurasia in November-December 2022: a potential vorticity gradient perspective[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(6): 953-962,1159-1162.
- ZHANG C, HUANG Y, WANG L, et al, 2020. Stability of two weakly coupled elastic beams with partially local damping[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 20(2): 1-9.

- ZHANG Z Q, CUI H Y, CHEN B X, et al. 2023. The combined effects of North Atlantic Oscillation and Western Pacific teleconnection on winter temperature in Eastern Asia during 1980-2021[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 42(10): 1-9.
- ZHANG W, LUO D, 2024. The variability of winter North Atlantic blocking and cold extremes connected to North Atlantic Sea surface temperature modes and ENSO: the mediated role of North Atlantic jet[J]. *Atmospheric Research*, 297: 107092.
- ZHONG W, WU Z, 2024. Impact of stratospheric variability on subseasonal temperature reversals during late winter over the mid-high latitudes of East Asia[J]. *Atmospheric Research*, 297: 107115.

Discussion on Reasons and Mechanisms of the Extreme Cold Waves in Eastern China in January 2021 and 2024

LI Xinxuan^{1,2}, CUI Hongyan^{1,2,3}, CHEN Baoxu^{1,2}, ZHANG Ziqun^{1,3}, LI Pin⁴

1. *College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;*
2. *Institute of Mathematics and Interdisciplinary Sciences, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;*
3. *Qingdao Innovation Center of Artificial Intelligence Ocean Technology, Qingdao 266061, China;*
4. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)*

Abstract: With the global warming and the decreasing of Arctic autumn sea ice density since the onset of satellite observations, extreme cooling events in East Asia become more frequent in recent years. Based on the atmospheric circulation data such as the Arctic Oscillation Index, Arctic sea ice density and temperature, geopotential height and wind field, the causes and the spatio-temporal variations of the extreme cold waves occurred in China in January 2021 and 2024 are studied. The extreme cold waves occurred in the eastern part of China (115°00'-120°00'E, 20°00'-37°30'N) from January 1 to 9 in 2021 and from January 17 to 24 in 2024, with the lowest temperature anomalies being $-9.028\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-7.574\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively and the cooling centers being concentrated in the southern Mongolian Plateau and the northern Qinling Mountains respectively. In January 2021, the average temperature in the eastern part of China dropped to $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, being the secondary lowest temperature record since the 21st century. According to the reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), USA, the abnormal weakening of the westerlies has made the obstruction effect of the westerlies on the cold air at high latitude weakened. When the cold waves broke out in 2021 and 2024, the cold waves located both in the high-pressure centers in Siberia and the northwest Pacific Ocean and in the low-pressure center in North China exhibited significant enhancement, which led to the cold air moving southward from Siberia, resulting in the cold wave phenomenon in the eastern part of China. The extreme cold wave in January 2024 was manifested in the first mode of the Empirical Orthogonal Function (EOF) (29.33%), while the second mode of the EOF decomposition (14.92%) indicated a cooling trend in 2021. Regression analysis demonstrates a strong correlation among the Arctic Oscillation Index, the decline in Arctic sea ice and the air temperature in the eastern part of China in January. The negative phase of the Arctic Oscillation and the decrease of the Arctic sea ice were also significant factors promoting the southward movement of the Arctic cold air. The combination of unusually strong north winds, the weakened westerly jet and the movement of the corresponding high-pressure center led to the invasion of the polar cold into the mainland of China. This is one of the main reasons for the extreme weather events in the mainland of China in January 2021 and 2024.

Keywords: extreme cold events; weakening of westerly jet stream; EOF; regression analysis

Received: March 31, 2024