

郭浩康,秦璐,于腾飞,等.冬季黄渤海海上大风年代际变化特征及可能机制分析[J].海洋气象学报,2025,45(3):84-95.
GUO Haokang, QIN Lu, YU Tengfei, et al. Analysis on interdecadal variation characteristics and possible mechanisms of the strong breeze over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(3): 84-95. DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241129001. (in Chinese)

冬季黄渤海海上大风年代际变化特征及可能机制分析

郭浩康^{1,2}, 秦璐³, 于腾飞⁴, 李春⁵

(1.烟台市气象局, 山东 烟台 264003; 2.长岛国家气候观象台, 山东 长岛 265800; 3.烟台市牟平区气象局, 山东 牟平 264100;
4.山东省气象台, 山东 济南 250031; 5.中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要 基于美国航空航天局的 CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 3.1 版海面风数据等资料, 结合 Mann-Kendall 趋势检验等方法, 对冬季黄渤海海上大风频次异常变化特征进行分析, 并探究其在年代际尺度上的可能影响因子。结果表明: (1) 1993—2008 年, 渤海、渤海海峡和黄海西北部的冬季大风频次呈显著增长趋势, 2009 年后变化趋缓。(2) 年代际尺度上去除长期趋势后, 1996—2020 年, 11 月北大西洋海面温度异常 (sea surface temperature anomaly, SSTA) 呈三极型模态。当 SSTA 呈“+、-、+”位相时, 冬季北大西洋上空 850 hPa 出现负位相的北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO), 同时 250 hPa 上的罗斯贝 (Rossby) 波列沿负位相 NAO 活跃处向下游黄渤海及日本海一带传播, 引起的环流形势异常利于冷空气在寒潮关键区积聚与爆发。此时, 黄渤海上空 850 hPa 存在经向温度梯度负异常, 有利于高空动量下传, 产生寒潮大风。(3) 保留数据长期趋势时, 11 月巴伦支海北部和喀拉海海冰密集度异常 (sea ice concentration anomaly, SICA) 在 1993—2008 年呈显著下降趋势, 与同年冬季北极涛动显著负相关。同时冬季 250 hPa 上的 Rossby 波列从北极向黄渤海和日本海一带传播, 500 hPa 上乌拉尔阻塞增强, 贝加尔湖出现异常低压, 利于北极冷空气向寒潮关键区的输送和积累, 黄渤海上空 850 hPa 出现经向温度梯度负异常。而 2009 年以来北极 SICA 趋势变化不显著, 与之对应的冬季乌拉尔阻塞高压异常偏弱, 贝加尔湖上空为异常高压, 不利于冷空气输送积聚及黄渤海寒潮大风的爆发。

关键词 黄渤海; 冬季海上大风; 年代际变化; 北大西洋海面温度异常; 北极海冰密集度异常

中图分类号: P461.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2025)03-0084-12

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241129001

Analysis on interdecadal variation characteristics and possible mechanisms of the strong breeze over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter

GUO Haokang^{1,2}, QIN Lu³, YU Tengfei⁴, LI Chun⁵

(1. Yantai Meteorological Service, Yantai 264003, China; 2. Changdao National Climatology Observatory, Changdao 265800, China; 3. Muping Meteorological Service of Yantai, Muping 264100, China; 4. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 5. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract Based on the data such as sea surface wind from Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP)

收稿日期: 2024-11-29; 修回日期: 2025-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0805102); 烟台市气象局青年专项 (2025YTQN01)

第一作者: 郭浩康, croharc@163.com。

通信作者: 李春, lichun7603@ouc.edu.cn。

version 3.1 provided by NASA, combined with the methods such as Mann-Kendall trend test, the anomalous variation characteristics of the strong breeze frequency over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter are analyzed, and the possible influencing factors on the interdecadal time scale are explored. The results are outlined below. (1) From 1993 to 2008, the strong breeze frequency over the Bohai Sea, Bohai Strait and northwestern Yellow Sea shows an overall upward trend. However, the variation has decelerated since 2009. (2) After removing the long-term trend on the interdecadal scale, the North Atlantic sea surface temperature anomaly (SSTA) in November shows a tripolar mode from 1996 to 2020. When the SSTA shows a “+, -, +” phase, a negative phase of the North Atlantic Oscillation (NAO) appears at 850 hPa above the sea surface in winter. Meanwhile, a Rossby wave train propagates downstream from the area of negative phase of NAO to the Yellow Sea, Bohai Sea and Sea of Japan at 250 hPa, which is conducive to the accumulation of cold air in the key area and the outbreak of cold waves. In winter, there is a negative anomaly of meridional temperature gradient at 850 hPa over the Yellow Sea and Bohai Sea, contributing to the downward transfer of high-altitude momentum and the outbreak of cold waves and strong breeze. (3) When it retains the long-term trend of the data, the sea ice concentration anomaly (SICA) in the northern Barents Sea and Kara Sea in November from 1993 to 2008 shows a significant downward trend, which is negatively correlated with the Arctic oscillation in winter. The Rossby wave train at 250 hPa spreads from the Arctic to the Yellow Sea, Bohai Sea and Sea of Japan, while the Ural blocking at 500 hPa intensifies, and an abnormally low pressure occurs over Lake Baikal, which is conducive to the transport and accumulation of cold air from the Arctic to the key area of the cold wave, and the occurrence of a negative anomaly of meridional temperature gradient at 850 hPa over the Yellow Sea and Bohai Sea. The SICA in the Arctic in November has not changed significantly since 2009, the corresponding Ural blocking high pressure is abnormally weak, and an abnormally high pressure appears over Lake Baikal in winter, which is not in favor of the transport and accumulation of cold air in the key area, as well as the outbreak of strong breeze over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter.

Keywords the Yellow Sea and Bohai Sea; strong breeze over the sea surface in winter; interdecadal variation; the North Atlantic SSTA; the Arctic SICA

0 引言

冬季黄渤海海上大风对海洋航运、渔业养殖及海上工程等诸多行业具有较大影响。当前对黄渤海海上及沿岸大风的气候变化特征有颇多研究,但由于海上观测资料相对匮乏,多数研究往往局限于设有观测站的沿海陆地及海岛。高瑞华等^[1]分析烟台和大连的沿岸及海岛站观测资料指出,渤海海峡全年大风日数以 -2.4 d/a 的速度减少。曲巧娜等^[2]则根据中央气象台近海海区划分标准,对1981—2010年黄渤海沿岸44个气象站资料展开分区统计研究,其结果表明黄渤海沿海的5个海区全年日最大风力达到6级和8级的日数均呈递减趋势。孙密娜等^[3]利用渤海沿岸A平台自动观测站的风速风向数据进行统计分析,发现冬季在全年中的大风累计时数最多。而张志华等^[4]利用CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 风场资料展开研

究,指出1988—2010年黄渤海大风频次以冬季最多,且呈波动上升趋势。针对上述关于黄渤海海上及沿海大风趋势变化看似相反的观点,王芳等^[5]对比观测数据和再分析数据后指出,渤海海上与沿岸大风特征差异明显。

对冬季黄渤海海上及沿海大风影响因子的研究,近年来也取得一系列进展。曲巧娜等^[2]对2008—2010年黄渤海沿海大风进行分型统计发现,冬季总计189次大风过程中,冷锋型大风占141次。尹尽勇等^[6]指出冬季影响黄渤海海上大风的冷空气主要来自偏西路径,占全部冷空气过程的50.4%。吕爱民等^[7]进一步指出,影响黄渤海大风的偏西路径冷空气以西北路径为主。王芳等^[5]的研究结果显示,冬季渤海大风日数偏多的年份,其大气环流形势具有亚欧大陆冷空气偏强、中高纬大气波动振幅偏大的特征,且在前期北大西洋西岸及西北太平洋的海面温度异常(sea surface temperature anomaly,

SSTA)明显偏高。张志华等^[4]则发现,在年际尺度上,负位相的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)会促使东亚冬季风增强,导致冷空气频繁活动,使得黄渤海冬季大风发生频率增加。综上所述,冬季黄渤海海上大风的活动在很大程度上受冷空气主导,并且与中高纬大气环流异常变化存在显著关联。需要指出的是,上述针对冬季黄渤海海上大风影响因子的研究,大多局限于年际尺度大气环流的异常变化,或仅探究与海陆下垫面有关物理量的直接相关关系,其中的可能机理和可预报性值得进一步探究。

全球变暖背景下,北极海冰的持续减少,使北极和中低纬大气环流之间的联系增强,其中西伯利亚高压是重要影响因子之一^[8]。影响中国的冷空气源地主要为新地岛以东和以西的北冰洋洋面以及冰岛以南的大西洋洋面^[9]。已有研究^[10]基于再分析数据和数值模拟方法指出,巴伦支海和喀拉海海冰持续减少,造成欧亚大陆上空的阻塞高压活动愈发频繁,从而促使冷空气南下,引发欧亚大陆一系列极寒气候事件。郑帅等^[11]近期研究发现,在年际尺度上,当11月巴伦支海海冰异常偏少时,能够激发冬季负位相的AO,使东亚大槽加深,东亚冬季风增强。值得注意的是,北极海冰减少趋势呈现出明显的年代际转折特征,其面积和范围在1996年之后加速减少^[12-13],而2004年以来其减少速度又逐渐趋缓^[14]。因此,有必要深入探究北极海冰减少趋势的年代际转折对冬季黄渤海大风的影响。

此外,三极型SSTA(“+、-、+”或“-、+、-”)是北大西洋SSTA变化的主模态之一,可从夏末一直持续到初冬^[15-17]。北大西洋三极型SSTA可通过非绝热加热与其上空大气进行热量交换,引起北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)的变化^[17-18]。也有研究^[19]指出,秋季北大西洋SSTA呈“+、-、+”位相时,往往促使东亚大槽加深,西北向的冷空气南下,引发中国北方的寒潮天气。李忠贤等^[20]研究表明,从秋季持续到初冬的北大西洋三极型SSTA,通过局地异常加热或冷却,引起对流层上层的辐合辐散,引发向下游传播的罗斯贝(Rossby)波列,影响初冬中国气温异常变化。梁静等^[21]则强调了NAO在北大西洋三极型SSTA及与向下游传播的Rossby波列之间所起到的重要桥梁作用。

综上所述,北极巴伦支海和喀拉海海冰的异常

变化以及北大西洋三极型SSTA,均可通过大气环流异常对中国东部气候异常变化产生影响。然而,在年代际尺度上,仍鲜有研究针对上述冰面和洋面有关物理量的异常变化与冬季黄渤海海上大风异常的联系进行分析。鉴于此,本文凝练出如下的科学问题:(1)冬季黄渤海海上大风有何新变化特征?(2)在年代际尺度上,影响冬季黄渤海海上大风异常变化的可能机制有哪些?

1 资料与方法

1.1 资料

为研究冬季黄渤海海上大风的年代际变化特征及可能原因,本文用到的数据资料有:

(1)逐日和逐月的10 m风场(经纬向分量及风速)数据,取自美国航空航天局的CCMP 3.1版海面风(<https://data.remss.com/ccmp/v03.1/>),原始资料起始时间为1993年1月1日,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,逐日风场资料的时间分辨率为6 h(世界时00:00、06:00、12:00和18:00)。CCMP 3.1版海面风是以欧洲中期天气预报中心最新的ERA5再分析资料为背景风场形成的时空再分析数据。CCMP 3.1版海面风在再分析数据基础上,利用变分方法融合散射计和辐射计等多种类型卫星传感器资料,因此对中国近海海上风场有较好的反馈^[22-24]。

(2)逐月的大气环流数据取自NCEP/NCAR再分析资料^[25]。采用其中位势高度场、风场经纬向分量和温度场等所需等压面上的数据,水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(3)逐月的海面温度(sea surface temperature, SST)和海冰密集度(sea ice concentration, SIC)数据均来自英国气象局哈得来中心^[26],原始资料起始时间为1870年1月,水平分辨率均为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

(4)美国气候预测中心逐月的NAO指数(<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>)和AO指数(https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml),原始资料起始时间为1950年1月。

基于以上数据的时间长度,将研究时段确定为1993—2023年当年11月—次年2月,冬季定义为当年12月—次年2月,气候态选取1993—2023年。

1.2 方法

在此研究中,将蒲福风级6级及以上,亦即大于

或等于 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速定义为大风。鉴于该数据集前期单日数据有少量缺失,为降低对研究结果精确性的影响,用频次来表征大风变化特征。单点大风频次指数的计算公式如下。

$$I_{\text{SBF}(k)} = \frac{N_{12(k)} + N_{1(k+1)} + N_{2(k+1)}}{(D_{12(k)} + D_{1(k+1)} + D_{2(k+1)}) \times 4} \times 100\% \quad (1)$$

其中: k 表示年份, $k = 1993, 1994, \dots, 2023$; $I_{\text{SBF}(k)}$ 表示 k 年冬季的大风频次指数; $N_{12(k)}$ 表示 k 年 12 月达到大风的次数, $N_{1(k+1)}$ 、 $N_{2(k+1)}$ 同理; $D_{12(k)}$ 表示 k 年 12 月数据完整的日数, $D_{1(k+1)}$ 、 $D_{2(k+1)}$ 同理。

根据研究实况,将冬季黄渤海海上大风频次指数关键区定义为 $117.75^\circ \sim 123.50^\circ \text{E}$ 、 $37.25^\circ \sim 40.75^\circ \text{N}$ 范围内的海面上空,取关键区内海面上空格点的大风频次平均值作为本研究中冬季黄渤海海上大风频次指数。此外,本文定义的北大西洋 SSTA 三极型主模态指数以及北极关键区海冰密集度异常 (SIC anomaly, SICA) 指数将在文中对应处予以说明。同时参考 Takaya 等^[27] 的方法计算 T-N 波作用通量以表征大气 Rossby 波的传播。

由于滑动平均后时间序列具有较强的自相关性,时间序列间滑动平均滤波后的相关系数 t 检验,其自由度使用有效自由度衡量,采用 Metz^[28] 提出的公式计算有效自由度 N_{eff} 。

$$N_{\text{eff}} = N / \max [1, 1 + 2 \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} (1 - k/N) r_x(k) r_y(k)] \quad (2)$$

其中: N 为滑动平均后有效的数据长度(第3节相关分析时, N 为 25;第4节滑动相关分析时, N 为对应滑动窗口长度); $r_x(k)$ 、 $r_y(k)$ 为时间序列 X 、 Y 滞后 k 年的自相关系数, k 最大不超过 $N/2$,本研究中 k 取 $(N-1)/2$ 。第4节滑动相关分析时,每一个滑动窗口下的有效自由度和对应显著性水平阈值,随向前滑动选取样本的改变而动态变化。

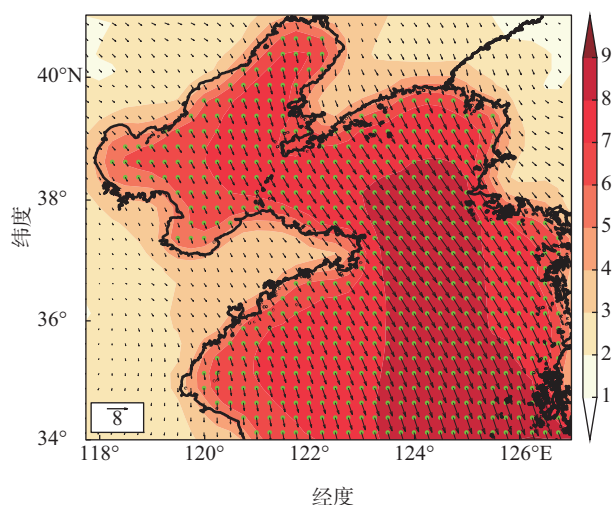
在此基础上,运用 Mann-Kendall 趋势检验、回归分析、经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分解、滑动平均、滑动相关以及偏相关分析等方法,研究冬季黄渤海海上大风频次年代际变化特征及可能原因。此外,分别对 1993—2023 年的 11 月北极关键区 SICA 以及冬季黄渤海海上大风频次异常指数进行 21 年步长的滑动平均,再通过 0.01 显著性水平的 Mann-Kendall 突变检验,确定上述时间序列趋势年代际转折时间。

受 CCMP 3.1 版海面风数据资料时间长度限

制,为尽可能保留足够有效时长的物理量信号,多年滑动滤掉年际信号时的滑动步长选为 7 年,这与步长为 9 年和 11 年的结果相似(图略)。此外,第3节数据滤掉年际信号前去掉了长期趋势,而第4节数据保留了长期趋势,趋势去留的物理意义在文中相应处予以说明。

2 冬季黄渤海海上大风特征

位于东亚冬季风区的黄渤海及其沿岸陆地,在冬季均盛行西北风。海面大部区域平均风速超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,明显大于陆地风速,风速较大的区域集中于 $123^\circ \sim 125^\circ \text{E}$ 、远离岸边的黄海中心区域(图1)。自 1993—2023 年,冬季渤海、渤海海峡及黄海西北部 6 级及以上大风出现频次整体显著增长(图2a),年增速为 0.19%(图2b)。结合 Mann-Kendall 突变检验可知,冬季黄渤海海上大风频次异常在 2008 年发生突变(图略),其中 1993—2008 年的年增速较快,且呈显著增长趋势(0.48%);而 2009—2023 年的大风频次维持在较高水平,趋势变化不再显著(图2b)。



色阶—风速, 箭头—风场, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 绿色打点区域—选取的海上数据格点。

图1 冬季 10 m 风场气候态

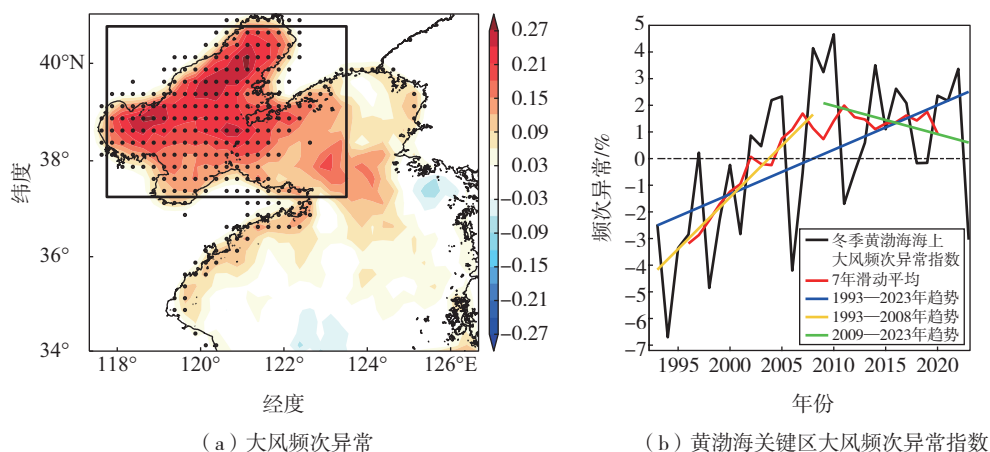
Fig.1 Climatological mean of 10-m wind field in winter

3 冬季黄渤海海上大风频次与北大西洋 SSTA 的可能联系

在年代际尺度上,1996—2020 年,当冬季黄渤海海上大风异常频发时,同年 11 月北大西洋 SSTA 出现与之显著相关的“+、-、+”位相(图3a)。11 月

北大西洋 SSTA 经 EOF 分解得到的第一模态,方差占比达 40.18%,且基于 North 等^[29]检验独立,同样具有与上述回归分析相似的三极型空间分布(图 3b)。进一步分析表明,与 11 月北大西洋 SSTA 第一模态时间序列显著相关的冬季黄渤海 10 m 风场出现异常东北风,且风速异常偏大(图 4)。表明 11 月北大西洋“+、-、+”型 SSTA 对寒潮冷空气南下以及寒潮大风的增强具有促进作用。且由表 1 可知,11 月北大西

洋 SSTA 第一模态时间序列与冬季黄渤海海上大风频次异常指数之间的相关系数为 0.68。此外,冬季 NAO 指数与同期黄渤海海上大风频次指数的相关系数为-0.63,与 11 月北大西洋 SSTA 第一模态时间序列的相关系数为-0.86(上述相关系数均能通过对应有效自由度置信水平为 90%的显著性 t 检验)。值得注意的是,上述时间序列转折时间节点一致出现在 2007 年(图 3c)。



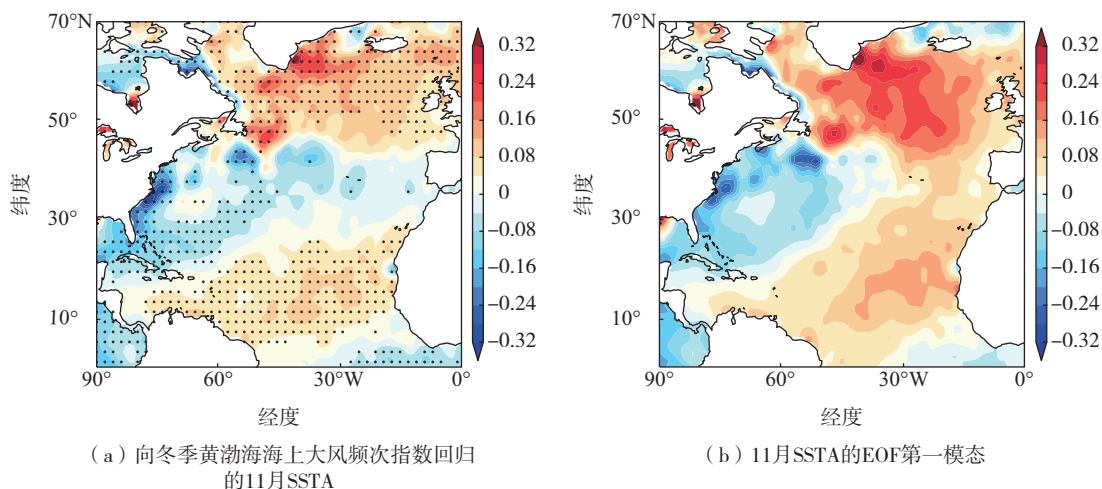
a中色阶—大风频次异常,单位为%,黑色打点区域—通过置信水平为95%的显著性 t 检验,黑框中的海面上空区域—冬季黄渤海海上大风频次指数的关键区,下同;b中蓝色、黄色趋势线—通过置信水平为95%的显著性Mann-Kendall趋势检验。

图2 冬季海上大风频次异常的趋势分布及在黄渤海关键区的时间序列

Fig.2 Trend of strong breeze frequency anomaly over sea surface in winter and its time series in key areas of the Yellow Sea and Bohai Sea

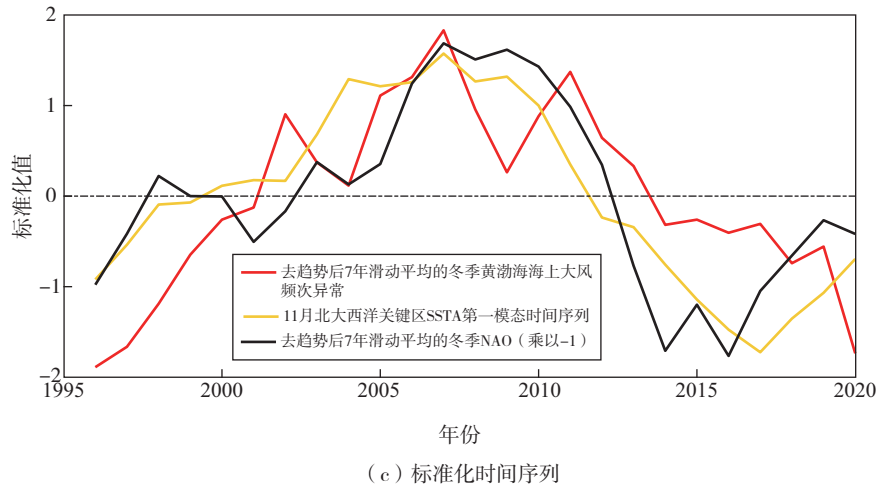
有学者认为,北大西洋三极型 SSTA 和 NAO 存在耦合,受三极型 SSTA 影响的 NAO 能够触发出下游传播的大气遥相关波列,引起东亚地区气候异常变化^[21]。此文通过偏相关分析法研究发现,剔除冬季 NAO 信号后,11 月北大西洋三极型

SSTA 和冬季黄渤海海上大风频次异常之间的相关系数降至 0.34。这表明,在年代际尺度上,冬季 NAO 在 11 月北大西洋三极型 SSTA 和冬季黄渤海海上大风频次关系的建立中可能起到纽带作用。



(a) 向冬季黄渤海海上大风频次指数回归的11月SSTA

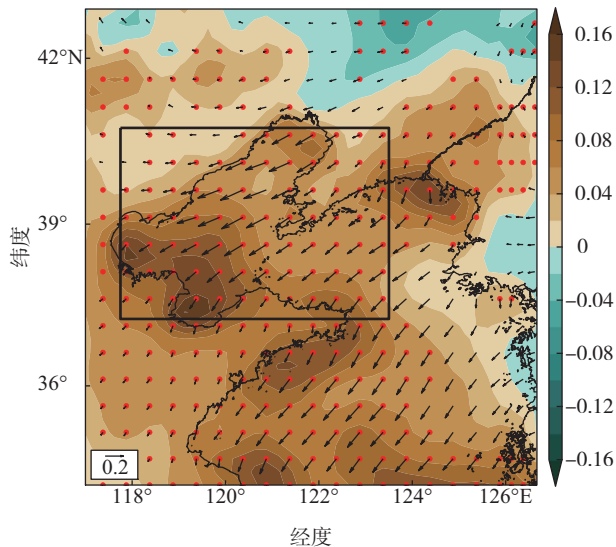
(b) 11月SSTA的EOF第一模态



a、b中色阶—SSTA, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; a中黑色打点区域—通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图3 向冬季黄渤海海上大风频次异常指数回归的11月北大西洋SSTA及北大西洋SSTA的EOF第一模态和其时间序列

Fig.3 Regression map of the North Atlantic SSTA in November onto sequence of strong breeze frequency anomaly over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter, and EOF1 mode of the North Atlantic SSTA and its time series



色阶—风速异常, 箭头—通过置信水平为95%显著性 t 检验的风场, 风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色打点区域—风速异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图4 向11月北大西洋SSTA第一模态时间序列回归的冬季10 m风场异常

Fig.4 Regression map of 10-m wind field anomaly in winter onto time series of the first mode of the North Atlantic SSTA in November

为进一步探究上述关系建立的可能机制, 首先将冬季850 hPa位势高度和风场异常分别回归到11月北大西洋SSTA第一模态时间序列上。结果表明, 在与11月北大西洋“+、-、+”位相三极型SSTA

相关的850 hPa位势高度场上, 美国以东的异常冷洋面上空出现异常低压, 该异常低压向北非至伊比利亚半岛一带延伸, 同时冰岛以南异常暖洋面上空出现异常高压, 二者共同形成负位相NAO(图5)。进一步分析发现, 该负位相NAO向上延伸至500 hPa, 与下游欧亚大陆500 hPa上空位势高度异常, 共同形成了波列状分布特征(图6)。同时在250 hPa上, Rossby波通量沿北大西洋上空的异常低压, 向冰岛以南的异常高压传播, 经地中海、乌拉尔山脉和贝加尔湖, 传向黄渤海及日本海一带(图6)。

表1 指数间的有效自由度及相关系数

Table 1 Effective degrees of freedom and correlation coefficients among time series

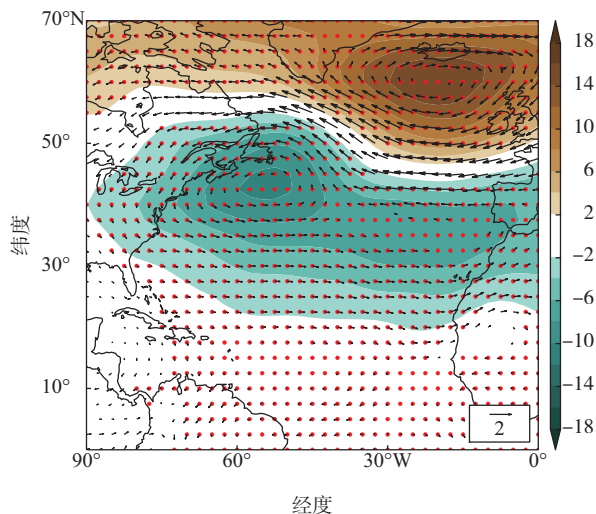
计算相关系数的时间序列	有效自由度	相关系数
11月北大西洋SSTA第一模态 & 冬季黄渤海海上大风频次	5	0.68
冬季NAO & 冬季黄渤海海上大风频次	6	-0.63
11月北大西洋SSTA第一模态 & 冬季NAO	5	-0.86

注: 所有相关系数均能通过对有效自由度的置信水平为90%的显著性 t 检验。

上述环流形势有利于冰岛以南的冷空气沿其上空异常反气旋前部向欧亚大陆输送, 乌拉尔山阻塞高压异常偏强, 也有利于冷空气的补充增强, 使得冬季1000 hPa上温度在欧亚大陆整体异常偏低。此

外,在寒潮关键区($70^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$, $43^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$) 500 hPa上空形成低压中心,1 000 hPa上形成冷中心,表明与11月北大西洋“+、-、+”位相的三极型SSTA相关的寒潮关键区上空异常低压利于冷空气在此积聚。同时,在黄渤海上空850 hPa上,出现显著的经向温度梯度负异常,利于此处冷空气下沉引起动量下传,产生寒潮大风(图7)。

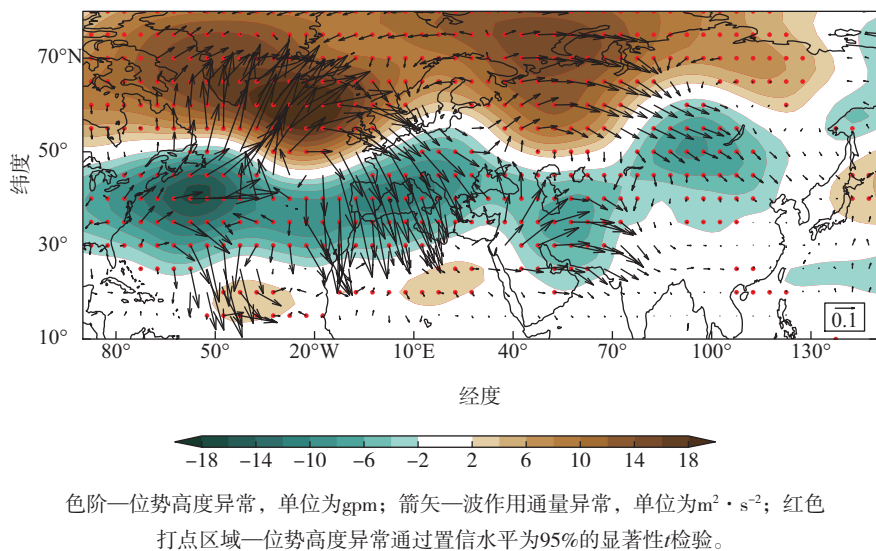
综上所述,11月北大西洋“+、-、+”位相的三极型SSTA,利于冬季负位相NAO的形成,从而产生向下游欧亚大陆传播的波列,有利于冷空气在寒潮关键区的堆积和寒潮大风的爆发。需要指出的是,本节分析建立在去除数据长期趋势前提下,保留趋势时上述关系不再显著,11月北大西洋三极型SSTA主要借助气候系统内部变率作用于冬季黄渤海海上大风相关的大气环流异常变化,而全球变暖这一外强迫因素在此过程中的影响相对较小。



色阶—位势高度异常,单位为gpm; 箭矢—通过置信水平为95%显著性 t 检验的风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色打点区域—位势高度异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图5 向11月北大西洋SSTA第一模态时间序列回归的冬季850 hPa位势高度和风场异常

Fig.5 Regression map of geopotential height anomaly and wind field anomaly at 850 hPa in winter onto time series of the first mode of the North Atlantic SSTA in November



色阶—位势高度异常,单位为gpm; 箭矢—波作用通量异常,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 红色打点区域—位势高度异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图6 向11月北大西洋SSTA第一模态时间序列回归的冬季500 hPa位势高度异常和250 hPa波作用通量异常
Fig.6 Regression map of geopotential height anomaly at 500 hPa and wave action flux at 250 hPa in winter onto time series of the first mode of the North Atlantic SSTA in November

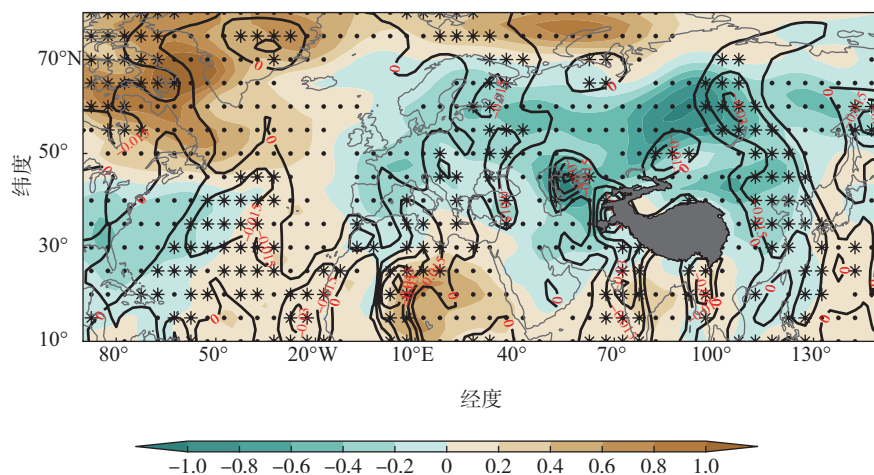
4 冬季黄渤海海上大风频次与北极海冰的可能联系

本节主要探究影响冬季黄渤海海上大风频次长期趋势变化的可能原因。需要指出的是,本节研究中各物理量间的关系建立在趋势变化上,去掉数据趋势后,各物理量间关系不再显著(图略)。这表

明,全球变暖外强迫致使北极关键区SICA减少趋势改变,进而与冬季黄渤海海上大风相关联的大气环流异常变化产生关联,在此过程中全球变暖引起的趋势变化比内部变率影响更突出。自1993年起,11月巴伦支海北部及喀拉海的SICA整体呈显著减少趋势(图8a),故将该区域作为北极SICA变化研究的关键区。结合Mann-Kendall突变检验发现,11

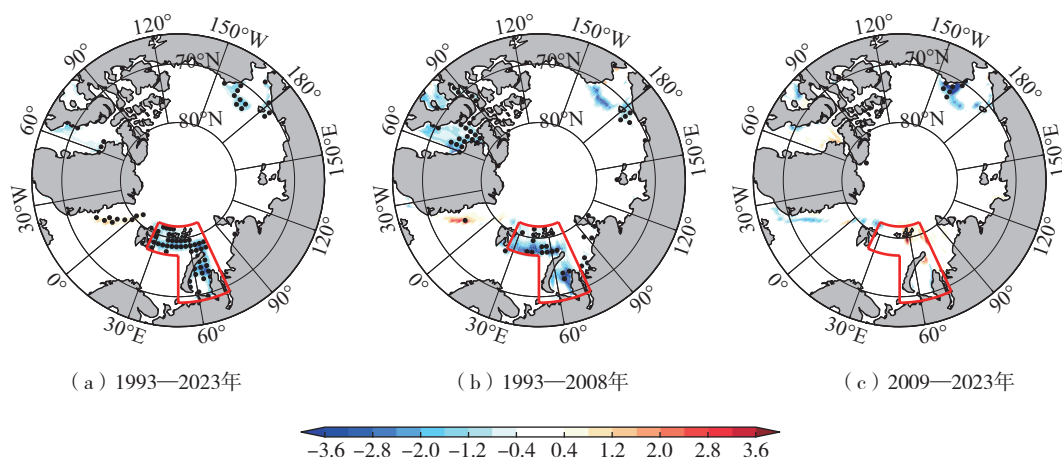
月北极关键区 SICA 于 2008 年发生突变(图略)。在 1993—2008 年,11 月北极关键区 SICA 呈显著下降趋势,同年冬季黄渤海海上大风频次异常整体呈

显著上升趋势(图 2b、图 8b、图 9a);而 2009 年之后,两者趋势变化均不显著,北极关键区 SICA 保持在较低水平(图 2b、图 8c、图 9a)。



色阶—温度异常,单位为 $^{\circ}\text{C}$;等值线—经向温度梯度负异常,单位为 $^{\circ}\text{C} \cdot (^{\circ})^{-1}$;黑色打点区域—温度异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验;星号区域—经向温度梯度负异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验;深灰色区域—青藏高原。

图7 向11月北大西洋SSTA第一模态时间序列回归的冬季1000 hPa温度异常和850 hPa经向温度梯度负异常
Fig.7 Regression map of air temperature anomaly at 1000 hPa and negative anomaly of meridional temperature gradient at 850 hPa in winter onto time series of the first mode of the North Atlantic SSTA in November

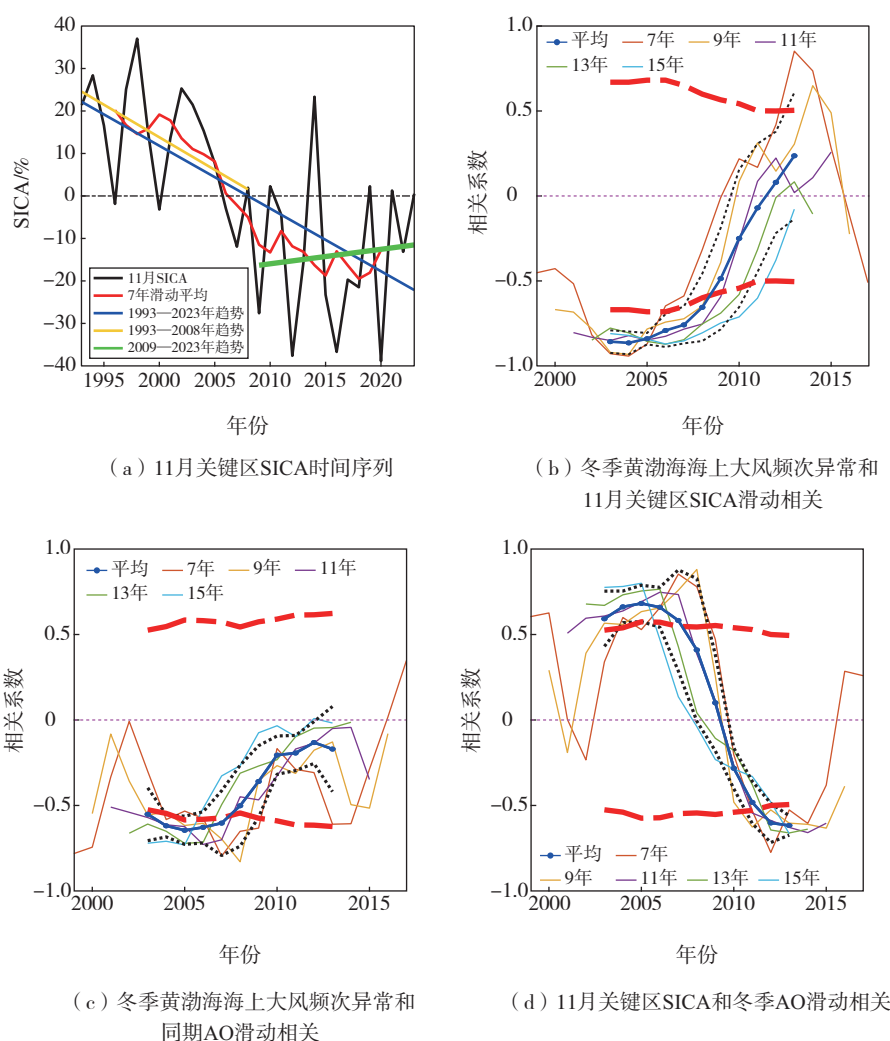


色阶—SICA,单位为%;黑色打点区域—SICA通过置信水平为95%的Mann-Kendall趋势检验;红框—北极关键区。

图8 11月北极海冰密集度异常的变化趋势
Fig.8 Trend of the Arctic SICA in November

通过分年段将11月北极SICA回归到同年冬季黄渤海海上大风频次异常指数上,并结合滑动相关分析表明,11月北极关键区SICA和同年冬季黄渤海海上大风频次异常整体呈显著负相关(图10a)。但这种关系主要在2009年之前显著(图10b、图9b),同年段内冬季黄渤海海上大风频次异常和同期AO也显著负相关(图9c),11月北极关键区

SICA和同年冬季AO显著正相关(图9d);此外,与11月SICA指数显著关联的冬季黄渤海10 m风场异常表现出了异常东北风和风速的异常增强(图11a)。2009年以来,上述三者间的相关关系均不再显著(图10c、图9b—d);与11月北极关键区SICA显著关联的冬季黄渤海10 m风场为异常西南风,风速异常偏小,但整体显著性较弱(图11b)。



a中蓝色、黄色趋势线—通过置信水平为95%的显著性Mann-Kendall趋势检验，黑色虚线—零等值线；b、c、d中红色粗虚线—0.1显著性水平的 t 检验平均阈值，紫色虚线—零等值线，黑色虚线—均值 ± 1 倍标准差，蓝色点线—平均滑动相关，红色、橙色、紫色、绿色、浅蓝色实线—滑动窗口长度为7年、9年、11年、13年、15年。

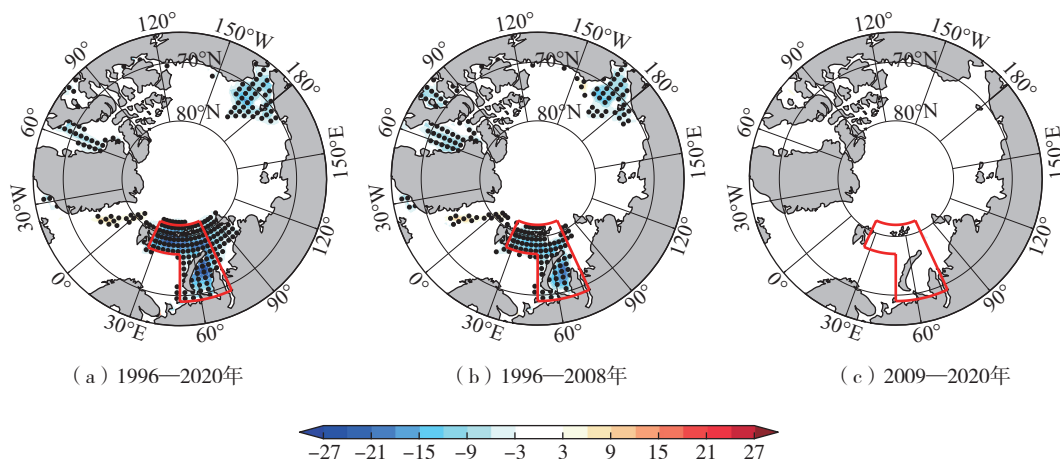
图9 11月北极海冰密集度异常的时间序列及其与冬季黄渤海海上大风频次异常指数和AO指数间的滑动相关

Fig.9 Time series of the Arctic SICA in November and their sliding correlation with sequence of strong breeze frequency anomaly over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter and AO index

为进一步探究上述关系转变的可能原因,分阶段将冬季500 hPa位势高度异常和250 hPa波作用通量异常回归到11月北极关键区SICA指数(乘以-1)上。结果表明,2009年之前,当11月北极关键区呈下降趋势的SICA偏少时,同年冬季高空250 hPa大气Rossby波通量从北极关键区经贝加尔湖向黄渤海至日本海一带传播(图12a)。冬季500 hPa北极至乌拉尔山附近气压异常偏高,下游贝加尔湖上空形成异常低压。增强的乌拉尔阻塞高压有利于引导北极冷空气南下,并在寒潮关键区内堆积,致使1000 hPa温度异常出现“暖北极、冷欧亚”的分布特征(图13a)。在冬季850 hPa上,黄渤海

上空及附近出现经向温度梯度负异常中心,促使高层动量下传,增强近海表大风(图13a)。

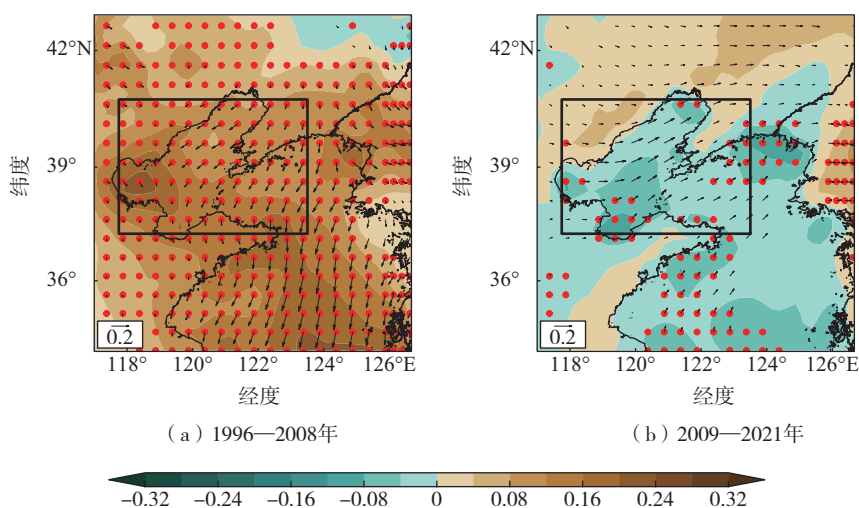
2009年以来,11月北极关键区SICA与其上空同年冬季500 hPa位势高度异常的关系不显著,且与冬季500 hPa相联系的乌拉尔山上空出现异常低压,贝加尔湖上空为异常高压,不利于冷空气向寒潮关键区的输送和积聚(图12b)。同时,北极与欧亚大陆冬季1000 hPa整体呈现暖异常特征,黄渤海及其周围上空850 hPa无明显经向温度梯度负异常(图13b)。这表明2009年以来,在长期趋势变化上,与北极关键区SICA变化相关联的环流形势不利于北极冷空气南下形成寒潮,进而难以产生寒潮大风。



色阶—海冰密集度异常, 单位为%; 黑色打点区域—色阶所示物理量通过置信水平为95%的显著性 t 检验; 红框—北极关键区。

图 10 向冬季黄渤海海上大风频次指数回归的 11 月北极海冰密集度异常

Fig.10 Regression map of the Arctic SICA in November onto sequence of strong breeze frequency anomaly over the Yellow Sea and Bohai Sea in winter



色阶—风速异常, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 箭头—通过置信水平为95%显著性 t 检验的风场异常;
红色打点区域—风速异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图 11 向 11 月海冰密集度指数 (乘以-1) 回归的冬季 10 m 风场异常

Fig.11 Regression map of 10-m wind field anomaly in winter onto SICA index (multiply -1) in November

5 总结与讨论

基于 CCMP 3.1 版海面风等资料, 对冬季黄渤海海上大风频次年代际变化特征进行了分析, 并探究了年代际尺度上的可能影响机制, 结果表明:

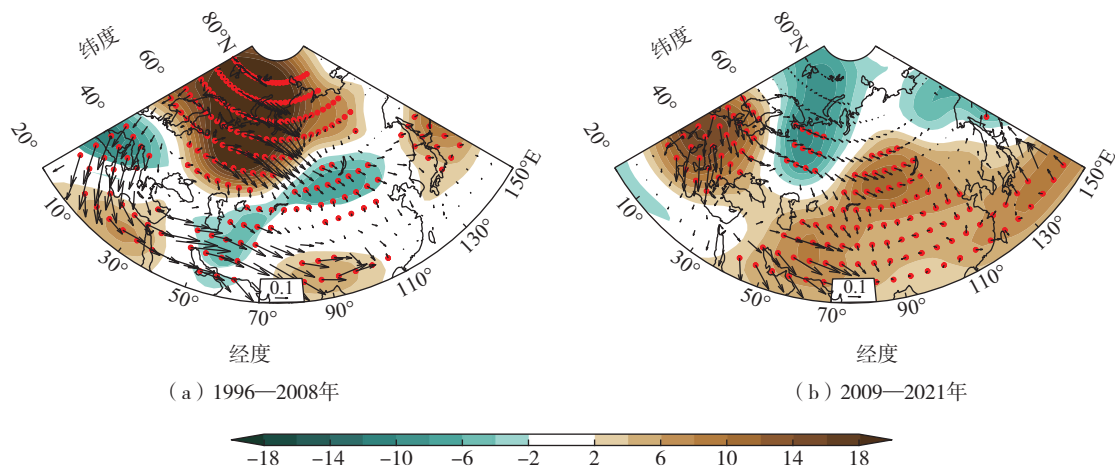
(1) 冬季黄渤海及沿岸盛行西北风, 海面风速明显大于陆面。冬季渤海、渤海海峡和黄海西北部的大风频次在 1993—2008 年增长趋势显著, 2009—2023 年趋势变化不显著。

(2) 在去除数据趋势的年代际尺度上, 1996—2020 年, 当冬季黄渤海海上大风异常频发时, 同年前

期 11 月北大西洋 SSTA 表现为“+、-、+”位相的三极型分布特征, 与 EOF 第一模态空间分布相似, 与冬季黄渤海海上大风频次和风速异常显著正相关。偏相关分析表明, 当去除冬季 NAO 信号影响后, 11 月北大西洋三极型 SSTA 和冬季黄渤海海上大风频次间的关系明显减弱, NAO 在该关系的建立中可能具有显著纽带作用。11 月北大西洋“+、-、+”位相的三极型 SSTA 上空冬季 850 hPa 形成负位相的 NAO, 同时 250 hPa 上的 Rossby 波通量从北大西洋上空的异常低压向冰岛以南的异常高压传播, 经地中海、乌拉尔山脉、贝加尔湖传向黄渤海至日本海一带。欧亚大陆 1 000 hPa 上整体

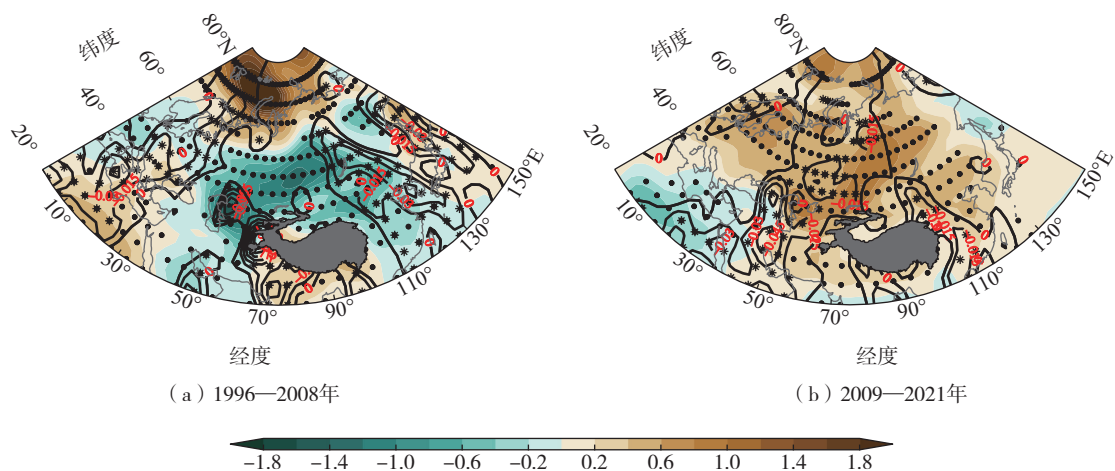
温度异常偏低,在寒潮关键区形成异常冷低压中心,有利于冷空气在此处积累增强。黄渤海上空 850 hPa 为

经向温度梯度负异常,大气斜压性增强,利于高层冷空气下沉引起动量下传,产生寒潮大风。



色阶—位势高度异常,单位为gpm; 箭头—波作用通量异常,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 红色打点区域—位势高度异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验。

图12 向11月海冰密集度指数(乘以-1)回归的冬季500 hPa位势高度异常和250 hPa波作用通量异常
Fig.12 Regression map of geopotential height anomaly at 500 hPa and wave action flux at 250 hPa in winter onto SICA index (multiply -1) in November



色阶—温度异常,单位为 $^{\circ}\text{C}$; 等值线—经向温度梯度负异常,单位为 $^{\circ}\text{C} \cdot (^{\circ})^{-1}$; 黑色打点区域—温度异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验; 星号区域—经向温度梯度负异常通过置信水平为95%的显著性 t 检验; 深灰色区域—青藏高原。

图13 向11月海冰密集度指数(乘以-1)回归的冬季1000 hPa温度异常和850 hPa经向温度梯度负异常
Fig.13 Regression map of air temperature anomaly at 1000 hPa and negative anomaly of meridional temperature gradient at 850 hPa in winter onto SICA index (multiply -1) in November

(3) 在年代际尺度上保留趋势时,1993—2008年,11月巴伦支海北部和喀拉海 SICA 整体呈显著减少趋势。SICA 偏少时,冬季 AO 具有显著负位相,同期北极至乌拉尔山一带 500 hPa 气压异常偏高,高空 250 hPa 的大气 Rossby 波通量从北极关键区附近经贝加尔湖向黄渤海和日本海一带传播。同时异常强的乌拉尔阻塞高压利于引导北极冷空气南下,在寒潮关键区积聚,对流层低层 1000 hPa 温度异常形成“暖

北极、冷欧亚”的分布特征。在黄渤海 850 hPa 上空存在经向温度梯度负异常,利于寒潮爆发和高层动量下传,近海表大风的频率和风速增大。反之 11 月北极关键区 SICA 偏多时,不利于增强海表大风。

而 2009 年以来,11 月北极关键区 SICA 维持在较低水平,趋势变化不再显著。且与冬季 AO 以及北极上空 500 hPa 位势高度异常的关系均不再显著,乌拉尔山上空表现为异常低压,贝加尔湖上空为

异常高压,不利于冷空气向寒潮关键区的输送及寒潮大风的爆发。

综上所述,11月北大西洋三极型SSTA以及北关键区SICA分别因气候系统内部变率,以及以全球变暖为主的外强迫引起的趋势变化,对冬季黄渤海海上大风相关的大气环流异常变化起到调控作用。然而,11月北大西洋三极型SSTA和北关键区SICA的不同位相,以及二者的协同作用对冬季黄渤海海上大风异常变化的影响,仍需借助气候模式进一步研究。

参考文献:

- [1] 高瑞华,申培鲁,高慧,等.渤海海峡大风日数的变化趋势分析[J].海洋预报,2010,27(1):39-43.
- [2] 曲巧娜,盛春岩,杨晓霞,等.黄、渤海沿海大风变化特征及影响系统[J].气象科学,2018,38(2):212-220.
- [3] 孙密娜,朱男男,王亚男,等.近10年渤海近海A平台大风特征分析[J].海洋通报,2016,35(4):367-379.
- [4] 张志华,郭伟,魏皓,黄.渤海大风频次的年际变化及其影响因子分析[J].海洋预报,2013,30(1):1-8.
- [5] 王芳,孙即霖,郑元鑫.冬季渤海大风年际变化特征及其影响因素分析[J].绿色科技,2020,22(22):28-31.
- [6] 尹尽勇,刘涛,张增海,等.冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计分析[J].气象,2009,35(6):90-95.
- [7] 吕爱民,杨柳妮,黄彬,等.中国近海大风的天气学分型[J].海洋气象学报,2018,38(1):43-50.
- [8] DING Y H. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia[J]. Meteor Atmos Phys, 1990, 44(1/2/3/4):281-292.
- [9] 张培忠,陈光明.影响中国寒潮冷高压的统计研究[J].气象学报,1999,57(4):493-501.
- [10] MORI M, WATANABE M, SHIOGAMA H, et al. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades[J]. Nature Geosci, 2014, 7(12):869-873.
- [11] 郑帅,孙博,邱振鹏,等.全球变暖背景下北极海冰与东亚冬季风关系的变化及其机制[J].气象科学,2024,44(2):199-209.
- [12] COMISO J C, PARKINSON C L, GERSTEN R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35(1):L01703.
- [13] 黄菲,狄慧,胡蓓蓓,等.北极海冰的年代际转型及极端低温变化特征[J].气候变化研究快报,2014(2):39-45.
- [14] 孙晓宇,孙启振,沈辉,等.1979—2022年北极海冰范围变化特征及趋势分析[J].海洋预报,2023,40(5):49-55.
- [15] CZAJA A, FRANKIGNOUL C. Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic oscillation[J]. J Climate, 2002, 15(6):606-623.
- [16] CASSOU C, DESER C, TERRAY L, et al. Summer sea surface temperature conditions in the North Atlantic and their impact upon the atmospheric circulation in early winter[J]. J Climate, 2004, 17(17):3349-3363.
- [17] GASTINEAU G, FRANKIGNOUL C. Influence of the North Atlantic SST variability on the atmospheric circulation during the twentieth century[J]. J Climate, 2015, 28(4):1396-1416.
- [18] CASSOU C, DESER C, ALEXANDER M A. Investigating the impact of reemerging sea surface temperature anomalies on the winter atmospheric circulation over the North Atlantic[J]. J Climate, 2007, 20(14):3510-3526.
- [19] 时晓曦,孙即霖,孙雅文,等.北大西洋秋季“三极子”海温结构对冬季大气环流场的影响[J].海洋学报, 2015, 37(7):33-40.
- [20] 李忠贤,王庭轩,曾刚,等.秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国气温年际变化的联系[J].大气科学, 2024, 48(3):1131-1143.
- [21] 梁静,孙建奇,洪海旭,等.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年际变化关系的年代际增强[J].大气科学, 2023, 47(4):1050-1064.
- [22] 毛科峰,陈希,李妍,等.东中国海域交叉定标多平台合成洋面风场资料的初步评估[J].气象, 2012, 38(12):1456-1463.
- [23] 张鑫凯.中国近海海上风场分布特征研究:以近10年(2010—2022年)为例[J].江苏科技信息, 2023(26):72-76.
- [24] 齐浩,马庚雪,张秀芝.卫星遥感合成数据CCMP和两种再分析风速数据在中国近海的比较研究[J].海洋湖沼通报, 2023, 45(5):17-22.
- [25] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(3):437-472.
- [26] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. J Geophys Res:Atmos, 2003, 108(D14):4407.
- [27] TAKAYA K, NAKAMURA H. 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, 2001, 58(6):608-627.
- [28] METZ W. Optimal relationship of large-scale flow patterns and the barotropic feedback due to high-frequency eddies[J]. J Atmos Sci, 1991, 48(9):1141-1159.
- [29] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(7):699-706.