吴雨子,胡舒涵,赵传湖,等.未来北极夏季陆面气温变化区域特征及其与北大西洋海面温度的关系[J].海洋气象学报, 2024,44(1):65-75.

WU Yuzi, HU Shuhan, ZHAO Chuanhu, et al. Regional characteristics of the future Arctic summer 2-m air temperature changes and their relationship with the North Atlantic sea surface temperature [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(1):65-75. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230311001.(in Chinese)

## 未来北极夏季陆面气温变化区域特征 及其与北大西洋海面温度的关系

吴雨子<sup>1,2</sup>,胡舒涵<sup>1,2</sup>,赵传湖<sup>1,2</sup>,黄菲<sup>1,2</sup>

(1.中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266100;2.中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心,山东 青岛 266100)

摘 未来变暖背景下北极气候变化特征研究具有重要意义,基于国际耦合模式比较计划第六 亜 阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)中对北极气候变化模拟能力较好的模 式模拟结果,研究SSP2-4.5 情景下 21 世纪北极 2 m 气温的时空变化特征及其影响因素。结果表 明:(1)极地陆地的欧亚大陆(Eurasia, EA)和北美-格陵兰(Greenland, GL)对全球变暖具有不同的 响应。EA在21世纪中叶前变暖趋势显著,之后主要表现为年代际尺度的冷暖振荡;GL则始终保 持增暖趋势。EA、GL 分区气温均存在年际、年代际(10~20 a)尺度上的波动.GL 分区还存在 20~ 40 a的准周期变化。(2)前冬北大西洋涛动正位相会引起次年夏季北大西洋呈南北向"-、+、-"三 极型海面温度异常,并通过影响大气环流导致 EA 分区气温正异常,这种影响主要体现在年代际尺 度上。(3)北大西洋多年代际振荡为正异常时,北美至格陵兰位势高度偏高,GL分区增暖,并且这 种影响在 21 世纪 70 年代后更重要:北太平洋北部的海面温度正异常对 GL 分区增温也有贡献。 关键词 北极;2m气温;国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6);北大西洋;海面温度 中图分类号: P467 文章编号: 2096-3599(2024)01-0065-11 文献标志码:A DOI:10.19513/j.cnki.hygxxb.20230311001

### Regional characteristics of the future Arctic summer 2-m air temperature changes and their relationship with the North Atlantic sea surface temperature

WU Yuzi<sup>1,2</sup>, HU Shuhan<sup>1,2</sup>, ZHAO Chuanhu<sup>1,2</sup>, HUANG Fei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** The research on the characteristics of Arctic climate change under the background of future warming is of great significance. This research studies the spatio-temporal variability of Arctic 2-m temperature in the 21st century under the SSP2-4.5 scenario based on the climate models with better

第一作者简介:吴雨子,女,硕士研究生,主要从事北极气候变化研究,wyz17866623062@163.com。

收稿日期:2023-03-11;修回日期:2023-04-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFA0607004);国家自然科学基金项目(41975061,42075024)

通信作者简介:赵传湖,男,博士,副教授,主要从事大尺度海气相互作用和北极气候变化研究,chzhao@ouc.edu.cn。

simulation of Arctic climate change in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The results are as follows. (1) The Eurasia (EA) part and the North America-Greenland (GL) part of the polar continent show different responses to global warming. EA has a significant warming trend before the middle of the 21st century, and then mainly shows the interdecadal oscillations; GL maintains a warming trend. The temperature in the EA part and the GL part fluctuates on interannual and interdecadal (10–20 a) scales, and there is also a quasi-periodic variation of 20–40 a in the GL part. (2) The positive phase of the North Atlantic Oscillation in the previous winter can cause the North Atlantic to present a south-north "-, +, -" tripolar sea surface temperature anomaly (SSTA) in the next summer, and leads to a positive temperature anomaly in the EA part by affecting the atmospheric circulation, and the effect is mainly reflected on the interdecadal scale. (3) When the Atlantic Multidecadal Oscillation is positive, the geopotential height from North America to Greenland is high, the GL part warms, and this effect is more important after the 2070s. The positive SSTA in the north of the North Pacific also contributes to the warming in the GL part.

**Keywords** the Arctic; 2-m air temperature; Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6); the North Atlantic; sea surface temperature

### 引言

自工业革命开始,全球气温呈现明显的上升趋势,且不同纬度、不同地区变暖的幅度及速率不一致。定量重建的近两千年的北极温度序列中,5个最温暖的十年中有4个发生在1950—2000年<sup>[1]</sup>, 1971—2019年北极变暖的速度是全球变暖速度的3 倍<sup>[2]</sup>,高纬度海洋、大气迅速增暖,海冰、冻土快速融化,这就是目前广泛关注的"北极放大"现象<sup>[3]</sup>。研究在未来变暖背景下北极气温的变化规律有助于 深入理解北极变暖的机制。

北大西洋的海面温度(以下简称"海温")变化对 北极地区的气候变化具有重要影响[4],北大西洋海温 异常会通过改变北半球中高纬度的大气环流来影响 北极的气候变化[5-6]。北大西洋多年代际振荡 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO) 也是影响北 极温度年代际变化的重要因素,AMO的正异常状态 会造成大西洋和欧洲上空气旋式环流异常,进而影响 这些地区的温度和降水<sup>[7]</sup>。Li 等<sup>[8]</sup>进一步指出欧亚 大陆的夏季地面气温变化会受到 AMO 的调控,当 AMO 处于正位相时欧亚大陆增暖,其中欧洲-西亚和 东北亚地区增温更明显<sup>[9]</sup>。北大西洋高纬度地区的 海温变化也受到 AMO 的显著影响<sup>[10-12]</sup>,巴伦支海、 喀拉海变暖与 AMO 具有显著相关性,海温升高还会 导致欧亚大陆上空的中高纬度西风减弱进而造成冬 季乌拉尔阻塞增多,并进一步影响该地气温<sup>[13]</sup>。但 是,AMO 对北极陆面气温影响的差异性及在全球变 暖背景下的持续性还有待进一步分析。

冬季北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)作为北半球冬季大气环流的重要模态,对北 极地区同期及次年的气候变化也有重要作用[14-18]。 NAO 被认为是北大西洋-欧亚北部气候变化的主导 模态,占总变率的三分之一以上,但其在未来暖期背 景下的影响还存在不确定性[19]。研究表明欧亚大 陆的夏季地面气温变化受到前期 NAO 的显著影响, NAO的正位相状态使得北欧温度增加<sup>[20-21]</sup>, NAO 还会与局地阻塞事件协同影响欧洲的气温、降水异 常,尤其在 NAO 中心偏东时<sup>[22-23]</sup>。此外,由于北极 变暖,北极海冰面积正在急剧下降,并通过巴伦支 海、喀拉海变暖造成乌拉尔阻塞频率增加,同时进一 步导致高纬度欧亚大陆变暖、中亚地区出现降 温[24]。如上所述,北极不同地区气温变化的物理机 制可能是不同的,研究未来全球变暖的背景下,北极 气温变化的区域特征及其影响因素具有重要意义。

对未来 21 世纪北极气候变化的预估主要基于 气候模式,耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase, CMIP)目前已经进行 到第六阶段(CMIP6),利用 CMIP6 模式对区域气候 变化的研究正逐步开展。CMIP6 的未来气候预估 情景设置了新的共享社会经济途径(shared socioeconomic pathways, SSPs),包含 SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP4-3.4、SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP3-7.0和 SSP5-8.5等7种从低到高辐射强迫情景<sup>[16,25]</sup>。新的模式 情景既考虑了人口增长、城市密度、土地使用、经济 发展的需要,也考虑了政府间应对气候变化的减缓 措施<sup>[26]</sup>,能够为北极气候预估提供更加合理的模拟 结果。

SSP2-4.5 情景表示相对于工业化前水平的中等 辐射强迫(2100 年稳定在约 4.5 W/m<sup>2</sup>),是中等社 会脆弱性与中等辐射强迫的组合,是检测归因模式 比较计划(Detection and Attribution Model Intercomparison Project, DAMIP)和年代际气候预测 计划(Decadal Climate Prediction Project, DCPP)研究 关心的重点<sup>[16,27]</sup>。本文对采用该情景下模拟较好 模式的集合平均结果进行研究,根据北极地区陆面 2 m气温的聚类分析结果,将北极划分成 2 个区域, 研究这 2 个区域气温变化的时频特征及其与北大西 洋海温异常的可能联系。

### 1 数据与方法

### 1.1 数据

使用 CMIP6 中在 SSP2-4.5 情景下对北极气候模 拟良好的 9 个模式(ACCESS-ESM1-5、BCC-CSM2-MR、 CanESM5、CESM2-WACCM、EC-Earth3-CC、EC-Earth3-Veg、HadGEM3-GC31-LL、MRI-ESM2-0、TaiESM1),这些 模式模拟结果能够较好反映出研究时段的气候均 值、海冰变化的基本特征及其对全球变暖响应的物 理约束关系<sup>[28-30]</sup>。模式资料包括 2015—2100 年的 海温、2 m 气温、位势高度资料等,水平分辨率为 1.25°×1.25°。

多模式集合平均可以减少气候模式本身带来的 不确定性<sup>[31]</sup>,本文使用 SSP2-4.5 情景下9个模式的 集合平均结果分析 2015—2100 年北极气温变化的 区域差异及其与大西洋的相关性。

### 1.2 方法

使用层次聚类(hierarchical cluster)分析北极夏 季(7—9月)2m气温变化,对北极气候变化进行区 域划分。进行聚类分析时,采用 Ward 离差平方和 作为聚类标准<sup>[32]</sup>。

使用小波分析、回归分析研究北极各分区温度 变化与海温等因子的相关关系。小波分析可反映两 时间序列的时频结构及其局部变化特征<sup>[33]</sup>,通过交 叉小波变换(cross wavelet transform,XWT)揭示 2 个 变量共同的高能量区以及相位关系,根据小波相干 谱(wavelet coherence,WTC)研究时频结构中 2 个时 间序列局部相关的密切程度<sup>[34]</sup>。

### 2 未来北极陆面 2 m 气温变化区域差异

对 2015—2100 年北极地区(66.5°N 以北)的夏 季 2 m 气温资料进行聚类分析,将各点气温序列之 间的离差平方和作为评价各站点相似程度的标准, 按照相似程度进行分类。根据聚类分析结果,欧亚 大陆(Eurasia,EA)与北美-格陵兰(Greenland,GL) 的气温变化具有显著差异,因此,将北极地区分为 2 个区域进行研究(图 1a)。

将 EA、GL 分区各点的 2 m 气温时间序列进行区 域平均后得到 2 个分区的温度时间序列 EAI\_O(EA Index\_Original)、GLI\_O(GL Index\_Original)(图 1b、 c),2 个分区都具有明显的变暖特征,并且温度变化 幅度随时间逐渐增大。EA 分区在 21 世纪中期之前 显著增温,21 世纪中期后表现为在某平均水平的冷 暖振荡,总体的线性趋势为 2.41 ℃/100 a;而 GL 分区 在整个 21 世纪都呈现显著的线性变暖趋势,为 2.67 ℃/100 a。两分区的变暖趋势可视为对全球变 暖的反映,将 2 个分区的线性变暖趋势去除,得到去 趋势温度序列 EAI(EA Index)、GLI(GL Index),分析 2 个区域气温的年际和年代际变化特征。

EAI和 GLI的小波分析结果表明,EA 分区气温 变化具有年际和年代际尺度上的信号,在 21 世纪 60 年代前以年际变化为主,自 60 年代开始还存在 10~ 20 a 周期的气温变化,并且可能存在 40~80 a 的多年 代际周期(图 2a、b)。GL 分区也存在年际、年代际的 气温变化,在 21 世纪 30 年代至 70 年代存在显著的 10~16 a 的准周期变化,在 21 世纪 40 年代至 21 世纪 末存在 20~40 a 的准周期变化(图 2c、d)。

# 3 北极 2 m 气温变化与北大西洋海温异常的关系

### 3.1 EA 分区

EAI 回归 2015—2100 年北半球 500 hPa 和 850 hPa去线性趋势并标准化后的位势高度场异常的 回归系数场(图 3a、b)显示,欧亚大陆波罗的海至黑 海、西伯利亚中东部的广大地区及北大西洋中纬度地 区为正值大值区,显著负相关的区域位于加拿大群 岛、格陵兰地区。这表明 EA 分区 2 m 气温升高对应 于北大西洋位势高度升高、北欧及亚洲高纬地区位势 高度升高。

将 EAI 回归到 2015—2100 年去趋势并标准化后 的海温异常的回归系数场(图 3c)表明,在 EA 分区气 温升高时,欧亚大陆北部的挪威海、巴伦支海和喀拉 海至北冰洋的海温呈现显著的暖异常状态。对北冰 洋显著关键区(20°~150°E,70°~90°N)的海温进行区 域平均,得到这一区域的海温时间序列,与 EAI 的相 关系数为 0.50(p<0.05),这一区域的海温变化能解释 EA 分区 25%的气温变化。同时,北大西洋区域海温 从高纬至低纬与 EAI 的回归系数场呈现显著的"-、 +、-"的特征分布,表明 EAI 异常偏高时,北大西洋海 温异常场具有南北向三极型分布特征。



图 1 北极气候分区(a,相同颜色表示同一区域)及 EA 分区陆面 2 m 气温时间序列 EAI\_O 和 去趋势序列 EAI(b)、GL 分区陆面 2 m 气温时间序列 GLI\_O 和去趋势序列 GLI(c)
Fig.1 Arctic climate subregion (a, the same color represents the same area), original time series (EAI\_O) and detrended time series (EAI) of 2-m temperature in the EA part (b), and original time series (GLI\_O) and detrended time series (GLI) of 2-m temperature in the GL part (c)

为正异常时的模态,时间系数 PC1 与 EAI 的相关系 数为 0.58(p<0.05),两者在多年代际尺度上存在一致 变化的特点(图 4b),都在 21 世纪中期出现了趋势的转 变,说明 EA 分区在该尺度上的变化受到北大西洋海温 异常的重要影响。另外,PC1 与北冰洋显著关键区(图 3c)海温序列相关系数为 0.91,两者变化具有同步性。

北大西洋海温异常的三极子型分布是北大西洋海温异常的主要模态<sup>[35]</sup>。将模式资料中 2015—2100 年海温去趋势后,对北大西洋夏季海温距平场(90°W~0°,0°~70°N)进行 EOF 分解,得到的第一模态的方差贡献率为17.2%,空间场上呈现海温南北向三极型分布特征(图4a)。北大西洋中纬度地区海温





a、c中色阶一小波分析实部,红色实线一通过α=0.05的显著性水平检验,黑色线条内区域-影响锥;b、d中红色虚线-通过α=0.05的显著性水平检验。







为进一步探究冬季 NAO 与北大西洋海温的关系,根据 Hurrell 等<sup>[36]</sup> 定义的 NAO 指数(NAO Index,NAOI)进行计算:

$$I_{\rm NAO} = P_{\rm SL} (35^{\circ} \rm N, 10^{\circ} \rm W \sim 10^{\circ} \rm E) -$$

 $P_{\rm SL}(65^{\circ}\rm N, 30^{\circ}\rm W \sim 10^{\circ}\rm W)_{\circ} \qquad (1)$ 

其中:*I*<sub>NAO</sub>表示计算得到的 NAO 指数,*P*<sub>SL</sub>表示海平 面气压。前冬 NAOI 对 2015—2100 年同期和次年 春、夏及秋季北大西洋海温异常的回归系数场(图 5)显示,冬季 NAO 可能会影响北大西洋海温异常 的三极型分布,中纬度的海温与 NAOI 存在正相关 关系,正 NAOI 对应着同期冬季北大西洋具有南北 向"-、+、-"的分布模态(图 5a),并且中纬度的偏暖 状态在春季持续发展,在夏季达到最强,秋季减弱 (图 5b—d)。这表明在未来 21 世纪全球变暖的情况下,冬季的 NAO 正位相对次年夏季 EA 分区的升温具有重要作用。

夏季北大西洋海温异常三极型分布可能通过影响欧亚地区的位势高度异常进而影响 EA 分区的陆面 2 m 气温变化。夏季北大西洋海温异常 EOF 分解第一模态的时间系数对 2015—2100 年 500 hPa 和 850 hPa 去趋势位势高度异常的回归系数场(图6)表明,北大西洋中纬度海温显著正异常、南北两侧海温为负异常时,乌拉尔山及西侧地区 500 hPa 彻海温为负异常时,乌拉尔山及西侧地区 500 hPa 位势高度明 显偏高,对应于 EA 分区气温偏高。



图 4 夏季北大西洋(90°W~0°,0°~70°N)海温距平 EOF 第一模态空间场(a,色阶) 和时间系数 PC1 及 EAI(b)

Fig.4 Spatial patterns (a, color scale) and time coefficient PC1 of the first EOF mode of summer North Atlantic  $(90^{\circ}W-0^{\circ}, 0^{\circ}-70^{\circ}N)$  SST anomaly and EAI (b)



图 5 2015—2100 年冬季 NAOI 对同期和次年春季、夏季及秋季的 北大西洋海温异常的回归系数场



对 EAI 及 NAOI 进行交叉小波谱及小波相干谱 分析(图 7),发现 EAI 与 NAOI 在年际、年代际尺度 上具有持续的同位相变化(图 7a),且在不同时段、 不同周期段显示出显著相关性(图 7b),即 EAI 与 NAOI 在 21 世纪 30 年代前于年际尺度上具有相关性,50 年代至 70 年代从年际尺度到年代际过渡,具有 10 a 左右的周期变化,70 年代以后在年代际尺度上的相关性更明显。

综上可知,前冬 NAO 正位相时会影响夏季北大 西洋三极型海温异常分布,从而导致欧亚大陆的位 势高度异常,与夏季新地岛以北的北冰洋海温的暖 异常,共同造成了 EA 分区升温;反之亦然。

### 3.2 GL 分区

图 6

GLI 回归 2015—2100 年北半球 500 hPa 和 850 hPa去趋势并标准化后的位势高度场异常的回 归系数场(图 8a、b)显示,GLI 与东北太平洋至格 陵兰,尤其格陵兰及周边海域上空的位势高度具 有显著正相关关系,而与北美中纬度地区的位势 高度为显著负相关。这表明当北美北部、格陵兰 位势高度异常偏高而北美中纬度地区位势高度异 常偏低时,GL分区2m气温偏高。GLI回归到 2015—2100年北大西洋海温异常的回归系数场 (图8c)表明,GL分区夏季陆面气温与北大西洋、 北太平洋北部海温存在正相关关系,即北大西洋 中西部、北太平洋北部海温偏暖时,GL分区气温 偏高。



夏季北大西洋海温异常 EOF 分解第一模态的时间系数 PC1 回归的 2015—2100 年 500 hPa









计算 2015—2100 年夏季的 AMO 指数(AMO Index, AMOI) 和太平洋海温关键区(150°W~ 160°E, 45°~60°N)的海温序列(Northern North Pacific SST Index, 简记为"NNPI")。AMOI、NNPI

分别回归 2015—2100 年 500 hPa 和 850 hPa 去趋势并标准化后的位势高度异常的回归系数场(图 9)表明,AMOI 正异常时,北美、加拿大群岛及格陵兰南部地区位势高度升高(图 9a、b),与图

8a、b反映的位势高度变化一致,对应于 GL 分区 2 m气温升高。NNPI 正异常时,格陵兰及周边地

区位势高度显著正异常(图 9c、d),同样促使 GL 分区升温。



-0.7-0.6-0.5-0.4-0.3-0.2-0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 色阶—回归系数;黑色等值线—位势高度,间隔为4 dagpm;蓝色扇形区域—关键海区; 黑点—通过 α=0.05的显著性水平检验。

### 图 8 同图 3,但为 GLI 回归 Fig.8 The same as Fig.3, but for regression to GLI



色阶一回归系数;黑色等值线一位势高度,间隔为4 gpm;黑点一通过 α =0.05的显著性水平检验。

图 9 AMOI 和 NNPI 回归 2015—2100 年 500 hPa(a、c)、850 hPa(b、d)去趋势位势高度 异常的回归系数场及位势高度场平均态(取 2015—2100 年平均场)

Fig.9 Regression coefficient distribution of 500-hPa (a/c) and 850-hPa (b/d) geopotential height anomaly fields between 2015 and 2100 to AMOI and NNPI, and average geopotential height (average from 2015 to 2100)

对 GLI 与 AMOI、NNPI 分别进行 XWT 及 WTC 分析(图 10),发现 AMOI 与 GLI 年际尺度变化的关 系更多体现在 21 世纪 70 年代之后,在 70 年代至 21 世纪末存在年代际尺度上的一致变化。NNPI 对 GLI

的影响主要在年代际尺度上,尤其是在 21 世纪 20 年 代初至 60 年代,在 60 年代初及 90 年代末具有年际 尺度上的相关性,此外两者还存在周期为 20~30 a 的 一致变化。在未来变暖情景下,AMO 的变化周期比

机制改变极区的气候变化<sup>[38]</sup>,格陵兰周围海冰减少 会增加海表吸收的太阳辐射,格陵兰附近海域海温升 高(图 8c),进而引起大气环流的改变<sup>[39-40]</sup>。



图 10 GLI 与 AMOI、GLI 与 NNPI 的交叉小波谱及小波相干谱分析 Fig.10 XWT and WTC analysis between GLI and AMOI, between GLI and NNPI

### 4 结论与讨论

对 SSP2-4.5 情景下未来 21 世纪北极地区陆面 2 m 气温的区域变化特征及其与北大西洋海温的关系进行研究,结果表明:

(1)欧亚大陆(EA)部分与北美-格陵兰(GL) 部分的北极陆面 2 m 气温对未来全球变暖显示出不 同的响应特征。EA 分区 21 世纪中期之前显著增 温,21 世纪中期后表现为温度的振荡,总体的线性 趋势为 2.41 ℃/100 a;GL 分区则持续变暖,线性趋 势为 2.67 ℃/100 a。EA、GL 分区气温均具有年际 和年代际(10~20 a)尺度上的变化,GL 分区还存在 显著的 20~40 a 准周期变化。

(2)21 世纪 EA 分区陆面 2 m 气温变化会受到 前冬 NAO 的调控作用。前冬 NAO 正位相会造成北 大西洋持续到次年夏季的南北向"-、+、-"的海温异 常,这种三极型海温异常分布会造成乌拉尔山及其 西侧地区、中西伯利亚 500 hPa、850 hPa 位势高度 的正异常,导致 EA 分区夏季气温偏高,这种影响主 要体现在年代际尺度上。

(3) GL 分区陆面 2 m 气温受到北大西洋和北 太平洋北部海温异常的共同影响。在 AMO 指数及 北太平洋北部海温出现正异常时,北美、加拿大群 岛、格陵兰位势高度异常偏高,有利于 GL 分区气温 暖异常,主要为年代际尺度上的影响。

基于 CMIP6 模式 SSP2-4.5 情景下的 9 个模式 资料,根据北极地区 2 m 气温的区域变化特征,采用 聚类分析进行北极气候区域划分,可为研究北极快 速升温的物理过程提供更加客观和深入的认识。对 GL 分区夏季陆面气温影响因素的研究还需要进一 步完善,如在不同变暖情景下,北极海冰的减少及减 少程度会对极地的大气环流产生不同程度的影响, 以及分析冰雪反照率反馈、普朗克反馈、水汽效应等 对气温变化的影响。本文仅采用了 SSP2-4.5 这一 中等辐射强迫下的情景,CMIP6数据集中还包括高 排放情景和未来可持续发展的低排放情景,其他排 放情景下的北极气温区域变化特征及影响因子研究 是下一步的工作。此外,北极地区除了已分析的大 陆部分,还包括海冰和海水,AMO、NAO 对这些部分 的表面气温也会造成影响,这也需要进一步拓展研 究。

### 参考文献:

- KAUFMAN D S, SCHNEIDER D P, McKAY N P, et al. Recent warming reverses long-term Arctic cooling [J]. Science, 2009, 325(5945): 1236-1239.
- [2] RANTANEN M, KARPECHKO A Y, LIPPONEN A, et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979[J]. Commun Earth Environ, 2022, 3(1):1-10.
- [3] 丁庆华.近 20 a 驱动北极夏季迅速增暖和融冰的自然因素及过程[J].大气科学学报,2021,44(1):39-49.
- [4] OLONSCHECK D, MAURITSEN T, NOTZ D. Arctic sea-ice variability is primarily driven by atmospheric temperature fluctuations [J]. Nature Geosci, 2019, 12 (6):430-434.
- [5] TRENBERTH K E, FASULLO J T, BRANSTATOR G, et al. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming [J]. Nature Clim Change, 2014, 4 (10): 911-916.
- [6] 吴泽铭,张冬娜,胡春迪,等.西北太平洋热带气旋频数 及生成位置的气候变化研究进展[J].海洋气象学报, 2020,40(4):1-10.
- KNIGHT J R, FOLLAND C K, SCAIFE A A. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33(17): L17706.
- [8] LI S L, WANG Y M, GAO Y Q. A review of the researches on the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and its climate influence [J]. Trans Atmos Sci, 2009,32:458-465.
- [9] SUN X Q, LI S L, HONG X W, et al. Simulated influence of the Atlantic multidecadal oscillation on summer Eurasian nonuniform warming since the mid-1990s[J]. Adv Atmos Sci,2019,36(8):811-822.
- [10] PARKER D, FOLLAND C, SCAIFE A, et al. Decadal to multidecadal variability and the climate change background [J]. J Geophys Res: Atmos, 2007, 112 (D18):D18115.

- [11] TRENBERTH K E, SHEA D J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005[J]. Geophys Res Lett, 2006, 33(12):L12704.
- [12] CHYLEK P, FOLLAND C K, LESINS G, et al. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36 (14):L14801.
- [13] LUO D H, CHEN Y N, DAI A G, et al. Winter Eurasian cooling linked with the Atlantic Multidecadal Oscillation
   [J]. Environ Res Lett, 2017(12):125002.
- [14] HURRELL J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. Science, 1995, 269(5224): 676-679.
- [15] THOMPSON D W J, WALLACE J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability[J]. J Climate, 2000, 13(5):1000-1016.
- [16] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌.CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP)概况与评述[J].气候变化研究进展, 2019,15(5):519-525.
- [17] CAYAN D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation [J]. J Climate, 1992, 5(4): 354-369.
- [18] 陈亚楠.冬季北大西洋涛动和乌拉尔山阻塞环流对欧亚大陆变冷的协同影响[J].海洋气象学报,2023,43
   (1):12-26.
- [19] YE K H, MESSORI G, CHEN D L, et al. An NAOdominated mode of atmospheric circulation drives large decadal changes in wintertime surface climate and snow mass over Eurasia [J]. Environ Res Lett, 2022, 17(4): 044025.
- [20] TROUET V, ESPER J, GRAHAM N E, et al. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the medieval climate anomaly [J]. Science, 2009, 324 (5923):78-80.
- [21] 任宏昌,左金清,李维京.1998 年和 2016 年北大西洋海 温异常对中国夏季降水影响的数值模拟研究[J].气象 学报,2017,75(6):877-893.
- [22] YAO Y, LUO D H. Relationship between zonal position of the North Atlantic Oscillation and Euro-Atlantic blocking events and its possible effect on the weather over Europe [J]. Sci China Earth Sci, 2014, 57 (11): 2628-2636.
- [23] 杨雯婷,朱伟军,李欣.冬季北极涛动异常对北太平洋 风暴轴的可能影响[J].海洋气象学报,2018,38(3):

20-29.

- [24] YAO Y, LUO D H, DAI A G, et al. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: insights from observational analyses[J]. J Climate, 2017, 30(10): 3549-3568.
- [25] 周天军,邹立维,陈晓龙.第六次国际耦合模式比较计 划(CMIP6)评述[J].气候变化研究进展,2019,15(5): 445-456.
- [26] O'NEILL B C, TEBALDI C, VAN VUUREN D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. Geosci Model Dev, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [27] EYRING V, BONY S, MEEHL G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. Geosci Model Dev, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [28] HUANG F, ZHOU X, WANG H. Arctic sea ice in CMIP5 climate model projections and their seasonal variability[J]. Acta Oceanol Sin, 2017, 36(8):1-8.
- [29] WANG B, ZHOU X, DING Q H, et al. Increasing confidence in projecting the Arctic ice-free year with emergent constraints[J]. Environ Res Lett, 2021, 16(9): 094016.
- [30] SONG J N, FU G, XU Y, et al. Assessment of the capability of CMIP6 global climate models to simulate Arctic cyclones[J]. Adv Clim Change Res, 2021, 12(5): 660-676.
- [31] VAN VUUREN D P, RIAHI K, MOSS R, et al. A proposal for a new scenario framework to support research

and assessment in different climate research communities [J]. Glob Environ Change, 2012, 22(1);21-35.

- [32] 康娜,高庆先,王跃思,等.典型时段区域污染过程分析 及系统聚类法的应用[J].环境科学研究,2009,22 (10):1120-1127.
- [33] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis [ J ]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(1):61-78.
- [34] BADDOO T D, GUAN Y Q, ZHANG D R, et al. Rainfall variability in the Huangfuchuang watershed and its relationship with ENSO [J]. Water, 2015, 7 (12): 3243-3262.
- [35] CZAJA A, FRANKIGNOUL C. Influence of the North Atlantic SST on the atmospheric circulation [J]. Geophys Res Lett, 1999, 26(19): 2969-2972.
- [36] HURRELL J W, KUSHNIR Y, OTTERSEN G, et al. The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact [M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 2003:1-35.
- [37] 夏松.不同排放情景下 AMO 和 PDO 的响应特征分析 [D].南京:南京信息工程大学,2021.
- [38] 赵进平,李涛,张树刚,等.北冰洋中央密集冰区海冰对 太阳短波辐射能吸收的观测研究[J].地球科学进展, 2009,24(1):33-41.
- [39] DESER C, TIMLIN M S. Atmosphere-ocean interaction on weekly timescales in the North Atlantic and Pacific
   [J]. J Climate, 1997, 10(3):393-408.
- [40] HONDA M, INOUE J, YAMANE S. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36(8): L08707.