doi:10.11676/qxxb2023.20220080 气象学报

东西伯利亚—波弗特海海冰多年代际变率及其与大西洋多年代际振荡的联系*

刘 莉 张文君 刘 超
LIU Li ZHANG Wenjun LIU Chao

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京，210044
Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education，Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters，Nanjing University of Information Science & Technology，Nanjing 210044，*China*
2022-05-05 收稿，2022-07-08 改回.

刘莉，张文君，刘超. 2023. 东西伯利亚—波弗特海海冰多年代际变率及其与大西洋多年代际振荡的联系. 气象学报，81(1)：137-151

Liu Li，Zhang Wenjun，Liu Chao. 2023. Multidecadal variability of sea ice in the East Siberia—Beaufort Sea region and its linkage with the Atlantic Multidecadal Oscillation. ***Acta Meteorologica Sinica*****，81(1):137-151**

Abstract This work investigates the spatial and temporal features of boreal autumn (August—October) East Siberian—Beaufort (EsCB) sea ice on decadal timescales during the period of 1950—2020 based on monthly Sea Surface Temperature (SST), Sea Ice Concentration (SIC) from the Hadley Center and atmospheric reanalysis dataset provided by the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). The possible modulation effects of Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) on the EsCB sea ice are further elaborated. The EsCB sea displays the strongest decadal component of sea ice in the Arctic, accounting for more than 40% of the local total variance of SIC anomalies. Our further analyses show that the AMO exerts a prominent modulation on the EsCB sea ice. In the positive AMO phase, warm North Atlantic SST anomalies trigger poleward propagating atmospheric Rossby waves, favoring the establishment of an anomalous high over the central Arctic region. The corresponding adiabatic descending motion warms the lower troposphere and causes the EsCB sea ice to melt. The surface warming and EsCB sea ice melting can simultaneously give rise to an increase in local cloud amount and downward longwave radiation, which in turn increases the surface air temperature. This surface air temperature-cloud-longwave positive feedback is beneficial for the long-term maintenance of the decadal sea ice signal. The North Atlantic pacemaker experiments can realistically reproduce the observed physical process as shown above, which further supports our main conclusions.

Key words Arctic sea ice，EsCB，AMO，Interdecadal modulation

摘 要 基于哈得来中心(Hadley Centre)逐月的海表温度、海冰密集度资料以及美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的大气环流再分析资料，分析了1950—2020年秋季(8—10月)东西伯利亚—波弗特海(East Siberian-Beaufort, EsCB)海冰年代际变化的时空特征，并阐述了大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)对EsCB海冰年代际变率的可能调制作用。结果表明，EsCB是秋季北极海冰年代际变化最主要的区域，该区海冰密集度年代际变率可占其异常总方差的40%以上。进一步研究发现，AMO对秋季EsCB海冰存在明显的调制作用，在AMO正位相，北大西洋正海温异常激发向极传播的大气罗斯贝波列，有利于北极中部出现高压异常，相应的大气绝热下沉运动使得对流层低层出现明显的升温，从而有利于EsCB海冰的融化。与此同时，地表升温和EsCB海冰消融会引起局地云量的增多、大气向下长波辐射增大，这反过来又使得地表气温升高，这种地表气温-云-长波辐射的正反馈过程有利于年代际海冰信号的长时间维持。耦合模式的北大西洋“起搏器”试

* 资助课题：国家自然科学基金项目(42088101、42125501)。
作者简介：刘莉，从事海-冰-气相互作用研究。E-mail：20201201050@nuist.edu.cn
通信作者：张文君，从事ENSO机理及海-气相互作用等方面研究。E-mail：zhangwj@nuist.edu.cn

验可以很好地再现观测中 AMO 调制 EsCB 秋季海冰的物理过程,进一步佐证了本研究的结论。

关键词 北极海冰,东西伯利亚—波弗特海,大西洋多年代际振荡,年代际调制

中图法分类号 P46

1 引 言

北极海冰是全球气候系统的重要组成部分,也是全球气候变化的重要指标(Barry, et al, 1993; 李培基, 1996; Stroeve, et al, 2012; Cavalieri, et al, 2012)。作为强大的冷源,北极海冰对冰盖海洋与大气的热量交换起到重要的调制作用(Aagaard, et al, 1989; Serreze, et al, 2007; Vihma, 2014; Gao, et al, 2015)。北极海冰不仅可以通过冰-反照率反馈机制影响局地的气温、降水和大气环流(Curry, et al, 1995; Lei, et al, 2016),还可以通过大气遥相关的方式对北半球中高纬度地区乃至全球的气候产生显著影响(Wallace, et al, 1981; 劳汉琼等, 2006; Budikova, 2009; Honda, et al, 2009; 武炳义等, 2016)。此外,北极海冰对当地生态系统以及海上船舶作业有着十分重要的影响(Stirling, et al, 2006; Eicken, 2013)。因此,准确理解北极海冰变率,对于气候预测、预估以及北极生态环境均有非常重要的意义。

自 1970 年以来,北极海冰的厚度、范围以及密集度都显著减小,这引起了学者们的广泛关注(Rothrock, et al, 1999, 2005; Stroeve, et al, 2007; Kwok, et al, 2009; 张璐等, 2009; Screen, et al, 2010; Parkinson, 2014; Wu, et al, 2018)。海冰厚度作为度量海冰消融状况的关键要素,通常受到气温、洋流、海温、海洋表面辐射通量、大气风场强迫以及海冰反照率反馈等的影响(Lindsay, et al, 2005; Shimada, et al, 2006; Steele, et al, 2008; Polyakov, et al, 2010)。已有研究(Lindsay, et al, 2009; Serreze, et al, 2019)表明,近年来北冰洋的多年冰迅速减少,北极大部分地区被每年形成且能完全融化的一年冰覆盖,如果海冰在夏、秋季融化过多,那么次年春季冻结的海冰通常较薄,这样海冰在接下来的夏季往往更容易融化。由此可见,北极海冰具有加速消融的趋势。一些研究指出,北极海冰面积减小的速率从 1979—1996 年的 3%/(10 a)增大到 1997—2007 年的 10.7%/(10 a),这一速率近年进一步增大到 13.4%/(10 a)(Comiso, et al, 2008; Serreze, et al, 2016),不同年代之间海冰融化速率的差异表明,北极海冰存在明显的年代际变率。由于北极海冰在夏、秋季融化最为明显,因此该季节的海冰往往更容易受到外界因素的影响而表现出增强的变率方差。Kinnard 等(2011)研究指出,从 20 世纪后期开始,夏、秋季北极海冰覆盖率在幅度和持续时间上都表现出前所未有的下降,具有明显的年代际变化特征。此外,北极海冰变化还具有明显的空间非均匀性,显著变化的区域主要位于欧亚大陆沿岸至波弗特海(Screen, et al, 2014; 隋翠娟等, 2015; 祁莉等, 2018)。在北极海冰消融的诸多区域中,东西伯利亚海—波弗特海(East Siberian-Beaufort, EsCB)的海冰减少最为明显(Comiso, 2002; 朱大勇等, 2007; 柯长青等, 2013)。以往对 EsCB 海冰的研究主要关注其对冬、春季欧亚和北美气候的影响(Kug, et al, 2015; Chen, et al, 2018; Ding, et al, 2021),对 EsCB 海冰自身变率特征和成因的研究却相对较少。隋翠娟等(2015)研究指出,EsCB 相关区域的海冰存在明显的年代际变化特征。其中,东西伯利亚海的海冰密集度(Sea Ice Concentration, SIC)在 1979—1988 年偏大,而波弗特海、楚科奇海和东西伯利亚海的海冰密集度在 2009—2012 年均显著降低。此外,也有研究指出,EsCB 海冰整体的减少速率自 2000 年以来明显增大(Frey, et al, 2015; 马靖凯等, 2019)。尽管以往研究认识到 EsCB 海冰存在明显的年代际变化,然而目前学术界对 EsCB 海冰年代际变率的认识尚不充分。

已有的研究表明北极海冰与气候系统内部变率在年代际尺度上存在一定的联系,其中地表风场(Spreen, et al, 2011; Wu, et al, 2012)和海温的异常变化可以对海冰产生重要的影响(Walsh, et al, 1979; Levitus, et al, 2009; Polyakov, et al, 2017)。海表面风场的强迫不仅影响海冰的空间分布,而且有利于海冰向格陵兰海和巴伦支海输送(Rigor, et al, 2002; Wu, et al, 2006, 2007, 2012; Wang, et al, 2009)。例如,Wu 等(2012)的研究指出北极中部型的地表风变率在 20 世纪 90 年代后期表现出年代际

变化，即1997年前为气旋式环流异常，之后则被异常反气旋所取代，这与9月海冰范围的快速下降趋势对应。除了局地风场的直接作用外，海温激发的遥强迫同样也对海冰有明显的影响。大西洋多年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO）作为北大西洋地区海表温度（Sea Surfanc Temperature, SST）年代际变化的主模态，具有60—80 a的周期，其对于全球多年代际时间尺度上的气候具有显著影响（Delworth, et al, 2000; Kerr, 2000; 李双林等, 2009; Sutton, et al, 2012）。研究发现，AMO不仅可以影响中低纬度地区的气候变率（Sutton, et al, 2005），还能够对北极地区产生影响（Lamoureux, et al, 2006; Levitus, et al, 2009; Hahn, et al, 2018; Li, et al, 2018）。AMO相关的异常海温触发大气环流异常，使得异常偏暖或偏冷的空气进入北冰洋，从而驱动北极海冰的低频变化（Miles, et al, 2014; Castruccio, et al, 2019; Yu, et al, 2019; Cai, et al, 2021）。近期研究指出，1979—2010年9月海冰减少的5%—31%可以归因于AMO（Day, et al, 2012）。Chylek等（2009）的研究发现，北极气温变化也与AMO高度相关。基于GFDL-CM2.1模式1000 a的对照试验输出，Mahajan等（2011）指出AMO与北极海冰面积存在显著的负相关。此外，也有研究证据表明欧亚大陆沿岸的北极边缘海海冰表现出类似AMO的低频振荡（Polyakov, et al, 2003），这表明EsCB海冰年代际变率似乎与AMO存在一定的联系。

总体而言，北极海冰具有明显的年代际变化特征。已有工作大多研究北极海冰的整体变化，对于区域海冰年代际变率的研究则较少。考虑到北极海冰变化的空间差异（Close, et al, 2015），因此理解海冰变化的区域特性对于加深北极海冰变率的认识是至关重要的。作为秋季海冰减少最明显的EsCB地区，该地海冰年代际变化的特征是什么？其年代际变化是否受到AMO的调控？如有，具体物理过程是怎样的？相关的科学问题目前并未有清楚的认识。针对上述问题，本研究将分析秋季EsCB海冰年代际尺度上的基本特征，并探究AMO与EsCB海冰变率的联系以及物理过程，从而为认识海冰变化规律及其相关的气候影响提供科学的基础。

2　资料与方法

2.1　观测资料与统计方法

资料包括：（1）英国哈得来中心（Hadley Centre）提供的全球月平均海表温度、海冰密集度资料HadISST（Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature dataset; Rayner, et al, 2003），水平分辨率1°×1°。其中海冰密集度表示单位网格内海冰覆盖的比例，单位为%。（2）美国国家环境预报中心/国家大气研究中心（NCEP/NCAR）全球月平均再分析资料。所使用的物理量包括：位势高度场、水平风场、温度场、大气向下长波辐射和总云量，水平分辨率为2.5°×2.5°（Kalnay, et al, 1996）。（3）美国国家海洋大气管理局（NOAA）提供的逐月AMO指数，定义为北大西洋（EQ—60°N, 7.5°—75°W）区域平均的海表温度距平（https://psl.noaa.gov/data/timeseries/AMO/）（Enfield, et al, 2001）。使用其他定义的AMO指数（Trenberth, et al, 2006）不影响本研究的定性结论。（4）太平洋年代际振荡（Interdecadal Pacific Oscillation, IPO）指数定义为赤道中部太平洋（10°S—10°N, 170°E—90°W）与西北（25°—45°N, 140°E—145°W）和西南太平洋（50°—15°S, 150°E—160°W）海表温度距平平均值之差（Henley, et al, 2015），由NOAA提供（https://psl.noaa.gov/data/timeseries/IPOTPI/）。为了同时兼顾资料质量和研究时长，选取1950—2020年作为研究时段，季节为北半球秋季（8—10月）。

在探究北极大气环流与大尺度海温的联系时，使用T-N波作用通量（Takaya, et al, 2001），其三维表达式如下

$$\boldsymbol{W}=\frac{p\cos\varphi}{2|\boldsymbol{U}|}\cdot\begin{bmatrix}\dfrac{U}{a^2\cos^2\varphi}\left[\left(\dfrac{\partial\psi'}{\partial\lambda}\right)^2-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\lambda^2}\right]+\dfrac{V}{a^2\cos\varphi}\left[\dfrac{\partial\psi'}{\partial\lambda}\dfrac{\partial\psi'}{\partial\varphi}-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\lambda\partial\varphi}\right]\\ \dfrac{U}{a^2\cos\varphi}\left[\dfrac{\partial\psi'}{\partial\lambda}\dfrac{\partial\psi'}{\partial\varphi}-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\lambda\partial\varphi}\right]+\dfrac{V}{a^2}\left[\left(\dfrac{\partial\psi'}{\partial\varphi}\right)^2-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\varphi^2}\right]\\ \dfrac{f_0^2}{N^2}\left\{\dfrac{U}{a\cos\varphi}\left[\dfrac{\partial\psi'}{\partial\lambda}\dfrac{\partial\psi'}{\partial z}-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\lambda\partial z}\right]+\dfrac{V}{a^2}\left[\dfrac{\partial\psi'}{\partial\varphi}\dfrac{\partial\psi'}{\partial z}-\psi'\dfrac{\partial^2\psi'}{\partial\varphi\partial z}\right]\right\}\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中，$\psi' = \frac{\varphi'}{f}$是准地转流函数相对于气候场的扰动，基本流场$\boldsymbol{U} = (U, V)$表示气候场，“′”表示纬向偏差。$p$为气压除以 1000 hPa，$\varphi$、$\lambda$、$f$（$=2\Omega\sin\varphi$）、$a$和$N^2$分别表示纬度、经度、科里奥利参数、地球半径和浮力频率。

本研究关注的年代际变率在季节平均的基础上均去除了长期线性趋势，并进行了 10 a 低通滤波处理。文中采用了合成和线性回归分析等统计方法，并采用双边学生 t 检验对统计结果进行显著性检验。对于低通滤波变量，使用如下等式计算有效样本量（Davis, 1976）

$$N_{\text{eff}} = \frac{N}{\sum_{j=-\infty}^{\infty} R_{xx}(j) R_{yy}(j)} \tag{2}$$

式中，N_{eff}、N、$R_{xx}(j)$和$R_{yy}(j)$分别表示有效样本量、总样本量和两个时间序列各自滞后 j 个时次的自相关系数。

2.2 模式试验资料

由于观测时段较短，年代际变率的有效样本量较小，本研究还使用年代际气候预测项目（Decadal Climate Prediction Project, DCPP）中的地球系统耦合气候模式 HadGEM3-GC31-MM（Menary, et al, 2018）来进一步验证观测的结果。以往研究表明，该模式对北极海冰具有较好的模拟能力（Ridley, et al, 2018; Andrews, et al, 2020），目前已被广泛地应用至北极海冰年代际变率及相关气候影响的研究中（Ortega, et al, 2017; Dittus, et al, 2021; Lai, et al, 2022）。该模式大气部分的水平分辨率约为 60 km，海洋部分的水平分辨率为 0.25°。遵循耦合模式比较计划第 6 阶段（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6）/DCPP-C 协议（Boer, et al, 2016），该模式分别进行了 AMO 冷暖（AMO−/AMO+）和 IPO 冷暖（IPO−/IPO+）位相下的 4 组试验（表 1）。以 AMO暖位相（AMO+）试验为例，该试验将耦合模式中北大西洋区域（10°—65°N）海温异常“恢复”至观测中 AMO 暖位相下随季节逐月演变的海表温度距平，而允许其他区域自由海-气耦合。模式中所有的外强迫均固定在大规模工业革命前（1850 年）的排放水平。通过扰动初值的方法，每组试验均包含 25 组集合成员，各集合成员的积分时长为 10 a。其中，前 11 个月通常被认为是模式启动期，在本研究的分析中并未被采用。其余 3 组试验的设计整体与 AMO+类似，仅改变海温距平“恢复”的区域和数值。更多关于 DCPP 试验方案的描述，可以参考相关的技术说明：https://www.wcrp-climate.org/wgsip/documents/Tech-Note-2.pdf。

表 1 DCPP 试验列表

Table 1 List of the DCPP experiments

试验	描述
dcppC-amv-neg	AMO−异常试验
dcppC-amv-pos	AMO+异常试验
dcppC-ipv-neg	IPO−异常试验
dcppC-ipv-pos	IPO+异常试验

3 EsCB 海冰年代际变率的特征

北极海冰变化具有明显的季节性特征（汪代维等, 2002）。随着太阳直射点的向北移动，北极在夏季进入极昼，海冰开始大量融化，并于 9 月达到最小值；随后太阳辐射逐渐减弱，北极在 11 月开始结冰。考虑到海冰在秋季融化最为明显（Serreze, et al, 2007），且 8—10 月空间形态较为连续（Ding, et al, 2021），因此本研究重点关注秋季海冰的变化。图 1 给出北极地区各海域的地理分布，文中所关注的东西伯利亚—波弗特海（EsCB：70°—80°N，145°E—

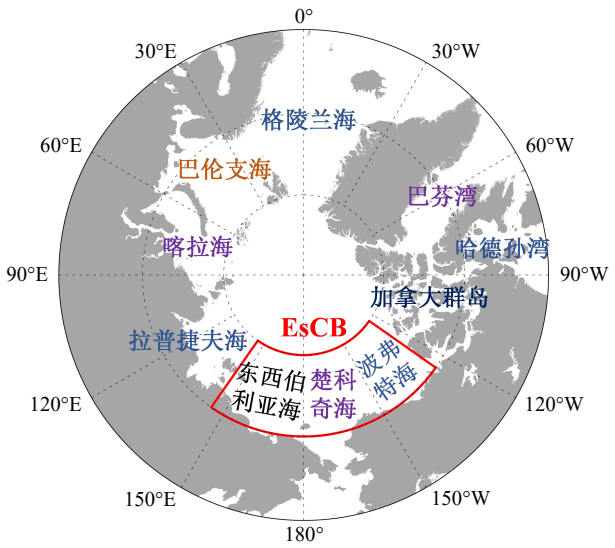


图 1 北极地区各海域地理分布（红框表示 EsCB 区域：70°—80°N, 145°E—125°W）

Fig. 1 Geographical distribution of the Arctic seas (the red sector indicates the EsCB region: 70°—80°N, 145°E—125°W)

125°W）位于太平洋北侧的极区，主要由东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海组成。

图 2 给出秋季北极海冰气候态、年代际标准差及年代际方差占比的空间分布。从气候态上可以看到，秋季海冰全冰区主要集中在北极中部的极点附近，海冰密集度超过 90%。在极地与开放水域间存在着明显的冰水混合过渡地带，海冰密集度为 10%—90%，并由极点逐步向南递减（图 2a）。特别地，EsCB 区域的海冰在秋季融化最为明显，其冰水混合状态的范围要远大于同期北极其他区域。除了明显的季节性消融外，这些冰水混合过渡区域的海冰还存在着明显的年代际变化（图 2b）。具体而言，EsCB 区域海冰密集度年代际分量占海冰密集度异常方差的 40% 以上，而在巴伦支—喀拉海等其他区域该比例仅有 20% 左右。由此可见，EsCB 是北极海冰年代际变率最主要的区域。

为便于分析，将秋季 EsCB 区域海冰密集度异常定义为 EsCB 指数，指数正和负分别表示 EsCB 海冰的增多和减少。从时间序列上可以看出，EsCB 海冰表现出明显的多年代际变化特征（图 3a），在 20 世纪 60 年代中期以前和 2000 年以后均表现为明显的负异常，而在中间的时段则表现为正异常。这种年代际变化特征从对应的低通滤波序列中能更为清楚地看到。此外，已有研究（Day, et al, 2012; Cai, et al, 2021）指出，海温异常对北极海冰变率存在明显的调制作用。为进一步探究 EsCB 海冰与海温在年代际尺度上的可能联系，图 3b 给出了年代际 EsCB 海冰与全球海温相关系数的空间分布。结果显示，太平洋和北大西洋区域均存在明显的大尺度海温信号。其中，北大西洋体现为海盆一致型变冷，整体分布与 AMO 负位相类似。在太平洋区域，信号整体与 IPO 正位相类似。从时间序列上，AMO 指数同样在 20 世纪 60 年代中期和 2000 年前后发生位相转变，因此其与 EsCB 指数对应关系较好，两者的相关系数约为 0.7，通过 90% 统计信度检验。选用其他资料来源的海冰指数也可以得到非常一致的结果（图略）。有趣的是，EsCB 指数的年代际转折出现在 2000 年前后，而 AMO 位相的转折则发生在 20 世纪 90 年代中后期，两者存在约 5 a 的时间差（图 3a）。考虑到 EsCB 区域多年海冰减少的情况（Serreze, et al, 2019; Babb, et al, 2022），这种海冰滞后海温的现象可能是由于 AMO 激发的

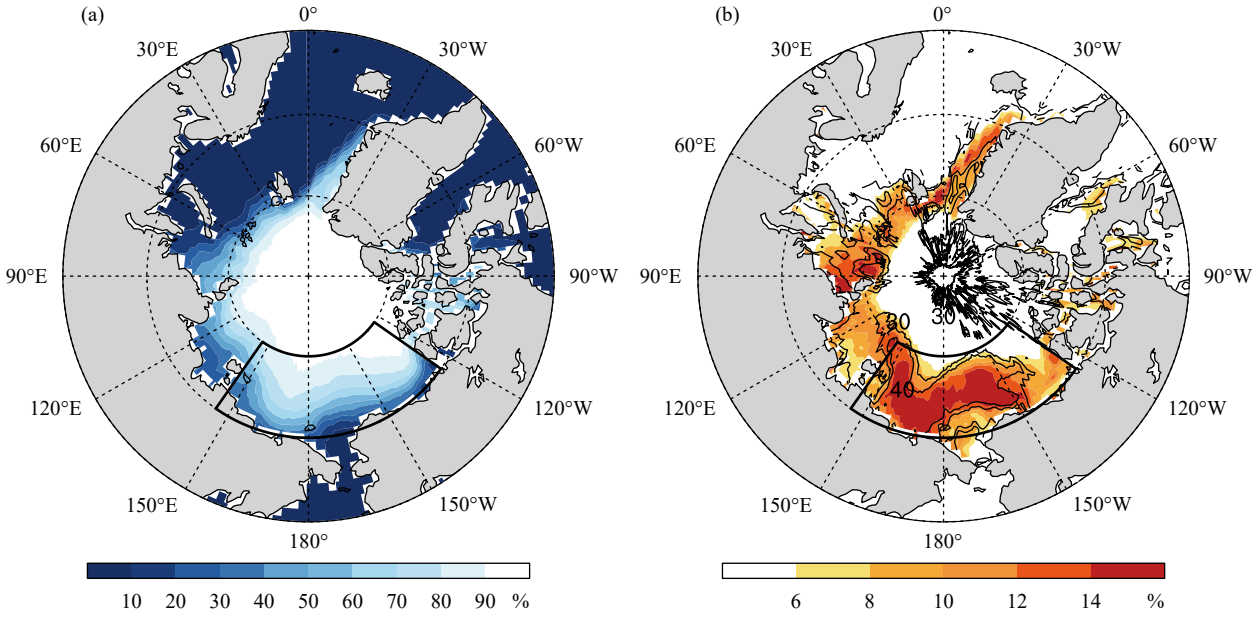


图 2　秋季海冰密集度的（a）气候态（色阶）和（b）年代际变率的标准差（色阶）及年代际方差占总方差比例（等值线，单位：%）的空间分布（黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 2　Spatial distributions of autumn SIC (a) climatological mean (shading), (b) standard deviation of the decadal component (shading), and fraction of variance explained by the decadal component with respect to the total variance (contours, unit: %) (black box indicates the EsCB region)

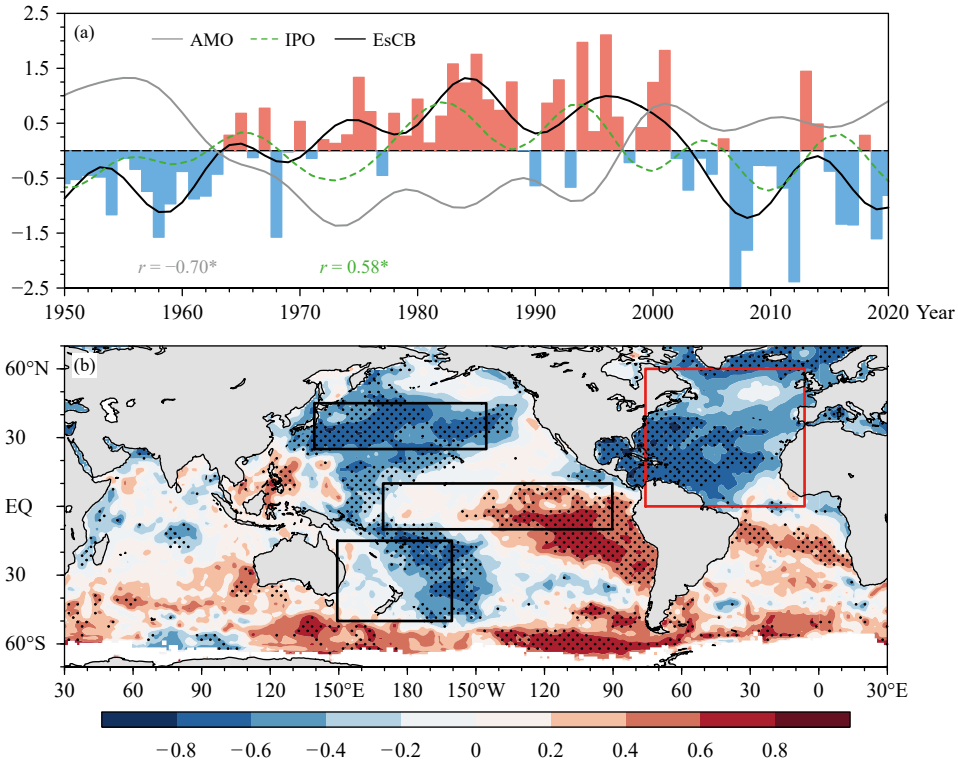


图 3 （a）标准化 EsCB 指数（柱状）、10 a 低通滤波的 EsCB 指数（黑线）、AMO 指数（灰线）和 IPO 指数（绿线）的时间序列，（b）EsCB 指数与同期全球海表温度异常相关系数的空间分布（黑框和红框分别表示 IPO 以及 AMO 指数定义的区域，打点表示通过 90% 信度检验）

Fig. 3 （a）Time series of normalized EsCB index（bar）and 10-year low-pass filtered EsCB index（black line），AMO index（gray line），and IPO index（green line）；（b）spatial distribution of correlation coefficient between the global SST anomalies and the EsCB index（black and red boxes represent the regions for the calculation of the IPO and AMO indices，respectively，values exceeding the 90% confidence interval are stippled）

大气环流首先使 EsCB 海冰变薄，然后才导致 EsCB 海冰密集度的减少。此外，自 20 世纪 90 年代以来，北极海冰呈现出非线性加速下降的趋势（Comiso, et al, 2008），本研究中去除线性趋势方法获得的指数可能仍会残存一些外强迫信号，这也有可能使得 EsCB 海冰与 AMO 年代际转变的时间节点存在一定的差异。需要强调的是，两者转变时间的微小差异并不影响本研究的主要结论。然而，IPO 位相转变发生于 1976 年和 2000 年前后，其与 EsCB 指数的对应关系较差，两者相关系数约为 0.56。事实上，以往研究指出，IPO 作为太平洋年代际变率的主导模态，包含了多种物理过程（Newman, et al, 2016）。其中，热带外北太平洋的海温信号似乎与 AMO 信号密切相关（Sun, et al, 2017; Nigam, et al, 2020; Yao, et al, 2021）。例如，Zhang 等（2007）数值模式的结果表明，AMO 可以通过影响北半球风暴轴的位置和北太平洋海-气反馈强度进而对北太平洋海表温度年代际变率产生影响。Yao 等（2021）的结果也表明，AMO 海温下降通过热带 Gill 型大气响应和中纬度大气遥相关迫使类似太平洋出现 IPO 暖位相海表温度。因此，太平洋上类 IPO 的海温信号很大程度上可以由 AMO 强迫产生。由此可以推断，EsCB 海冰的年代际变化主要受到 AMO 的调制作用。

4 AMO 影响 EsCB 海冰年代际变化的物理过程

为了进一步理解 AMO 对海冰年代际的调制作用，图 4a 给出了标准化 AMO 指数回归的秋季海冰密集度异常。结果显示，AMO 对北极海冰的影响具有明显的区域选择性，海冰负异常信号主要出现在 EsCB 区域，单位强度的 AMO 可以引起约为 16%

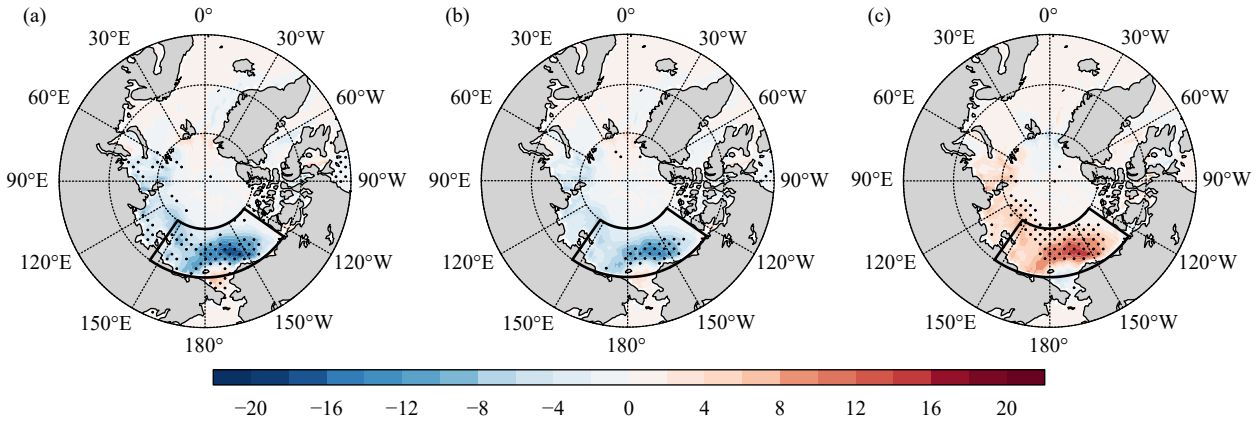


图 4　(a)标准化 AMO 指数回归的海冰密集度异常,(b) AMO 正位相和 (c) AMO 负位相合成的海冰密集度异常 (色阶, 单位: %)(打点表示通过 90% 信度检验, 黑框表示 EsCB 区域)

Fig. 4　(a) SIC anomaly regressed onto normalized AMO index, composite SIC anomaly (shading, unit: %) for (b) the positive (AMO+) and (c) negative (AMO−) AMO phases (values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region)

的海冰密集度变化, 而在巴伦支海—喀拉海—拉普捷夫海的量值仅有 2% 左右。类似的, 图 4b、c 也分别给出了 AMO 正、负位相海冰密集度异常的合成结果。可以看出, 合成结果几乎与回归一致, 大值中心同样位于 EsCB 区。此外, 正、负 AMO 位相下 EsCB 海冰几乎呈现对称的空间分布, 说明海冰对于 AMO 的响应主要以线性为主。

考虑到海冰的变化与极地局地大气环流存在直接的联系, 图 5a 给出了秋季 AMO 指数回归的 500 hPa 位势高度场和 T-N 波作用通量的空间分布。在 AMO 正位相, 位势高度整体呈现出从北大西洋至北极的正-负-正三极型波列。北极上空有明显的正位势高度异常, 大值中心位于北极中部。从波作用通量上可以清楚地看到极地异常的位势高度主要来源于北大西洋。与之相反, 虽然太平洋上空也表现为大范围的正位势高度异常, 但并没有从太平洋起源的波列传播至北极地区, 表明北太平洋海温对海冰的作用小。北极上空的高压异常在低层(850 hPa)环流场上也同样显著地存在, 表明该高压系统具有相当正压的结构(图 5b)。已有研究指出北极对流层准正压结构的反气旋环流在海冰减少中起到了重要的作用(Ding, et al, 2017), 其伴随的低层风异常在欧亚大陆边缘海的海冰变化中占据主导地位(Polyakov, et al, 2003)。据此可以推断, 北极中部的高压异常是影响 EsCB 海冰的关键环流系统之一, 其年代际变率主要受到 AMO 的调制。

图 6 进一步给出了 AMO 指数回归的极地气温、垂直速度的垂直剖面、地表温度场和 850 hPa 水平风场的空间分布。结果显示, AMO 正位相可以引起北极上空对流层一致的变暖, 并且变暖在 700 hPa 以下的对流层低层最为明显(图 6a)。此外, 在地表气温场上, 北极地区普遍变暖, 大值中心同样位于 EsCB 地区, 变暖幅度可超过 1.4℃(图 6b)。从物理上来讲, 北极上空反气旋式环流异常所对应的绝热下沉运动(图 6a)使得对流层下部出现明显的升温。

上述分析表明, AMO 正位相下北大西洋正海温异常激发向极传播的大气罗斯贝波使得北极受异常高压的控制, 直接引起 EsCB 区域的升温和海冰消融。除了 AMO 的大气外强迫作用之外, 海冰融化所产生的局地正反馈过程也会进一步放大 AMO 的作用。以往研究发现, 大气辐射可以控制北极海冰生长和消融的地表热量平衡(Lee, et al, 2011; Lee, 2012; Ding, et al, 2017), 因而是联系极地高压异常与 EsCB 海冰减少的关键物理因素之一。下文将对相关的大气辐射过程进行探究, 以明确 AMO 影响海冰减少的具体物理机制。考虑到北极云量和向下长波辐射对海冰融化的重要作用(Ding, et al, 2017; Baxter, et al, 2019; Li, et al, 2019), 图 7 给出 AMO 指数回归的总云量和地表向下长波辐射异常。在 AMO 正位相, EsCB 地区总云量明显

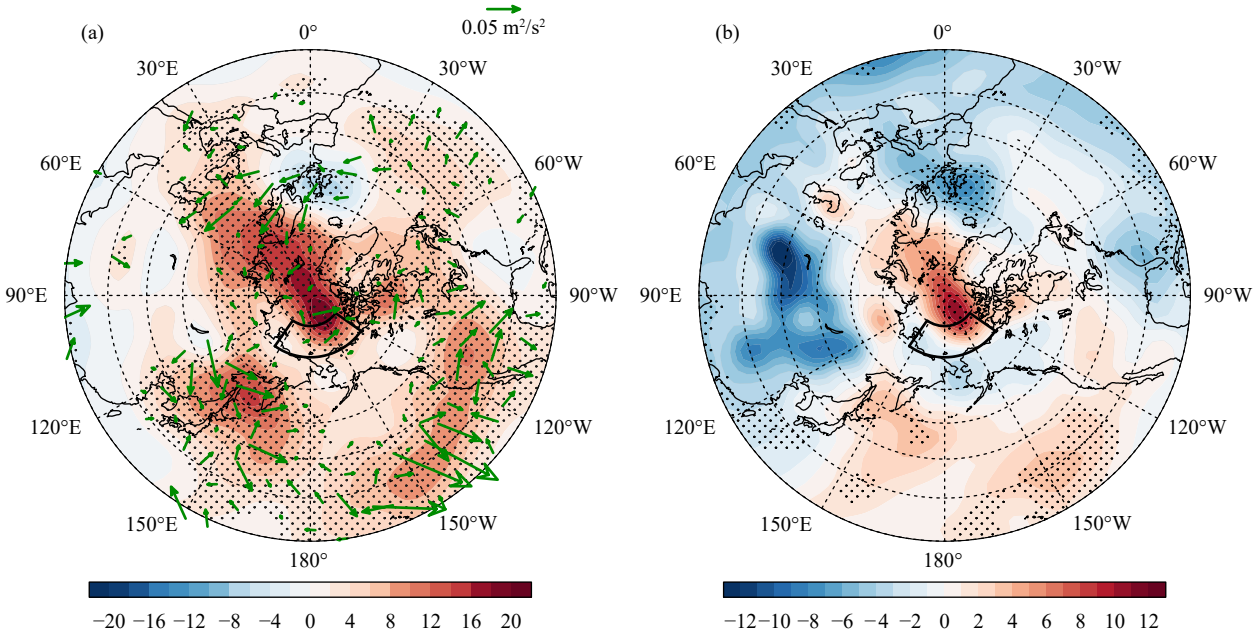


图 5 标准化 AMO 指数回归的（a）500 hPa 位势高度场（色阶，单位：m）和波作用通量（箭头，单位：m^2/s^2），（b）850 hPa 位势高度场（色阶，单位：m）（打点表示通过 90% 信度检验，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 5 （a）500 hPa geopotential height（shading, unit: m）, wave activity flux（vector, unit: m^2/s^2）, and（b）850 hPa geopotential height anomaly（shading, unit: m）regressed onto normalized AMO index（values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region）

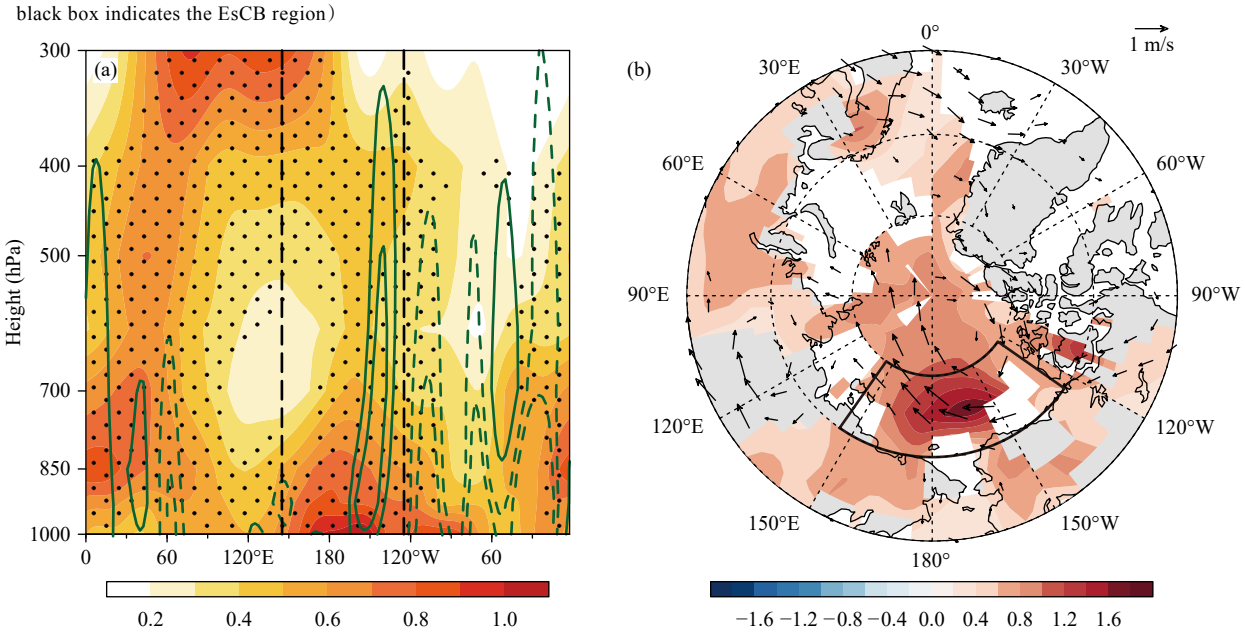


图 6 标准化 AMO 指数回归的（a）经向平均（70°—80°N）气温场（色阶，单位：℃）和垂直速度（等值线：实线为正，虚线为负，间隔 2×10^{-3} Pa/s）（打点表示气温场通过 90% 信度检验，垂直速度仅展示通过 90% 信度检验的部分，黑虚线之间的区域表示 EsCB 地区）；（b）与（a）类似，但是为地表气温（色阶，单位：℃）和 850 hPa 风场（箭头，单位：m/s）（风场和填色仅展示通过 90% 信度检验的部分，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 6 （a）Meridionally averaged（70°—80°N）air temperature（shading, unit: ℃）and vertical velocity anomalies（contour: solid lines are positive, dashed lines are negative, interval: 2×10^{-3} Pa/s）regressed onto normalized AMO index（Only values exceeding the 90% confidence interval are stippled（shading）or shown（contour）, the black dashed lines represent the zonal range of the EsCB region）; （b）similar to（a）, but for surface air temperature（shading, unit: ℃）and 850 hPa wind（vector, unit: m/s）anomalies（only values exceeding the 90% confidence interval are shown, black box indicates the EsCB region）

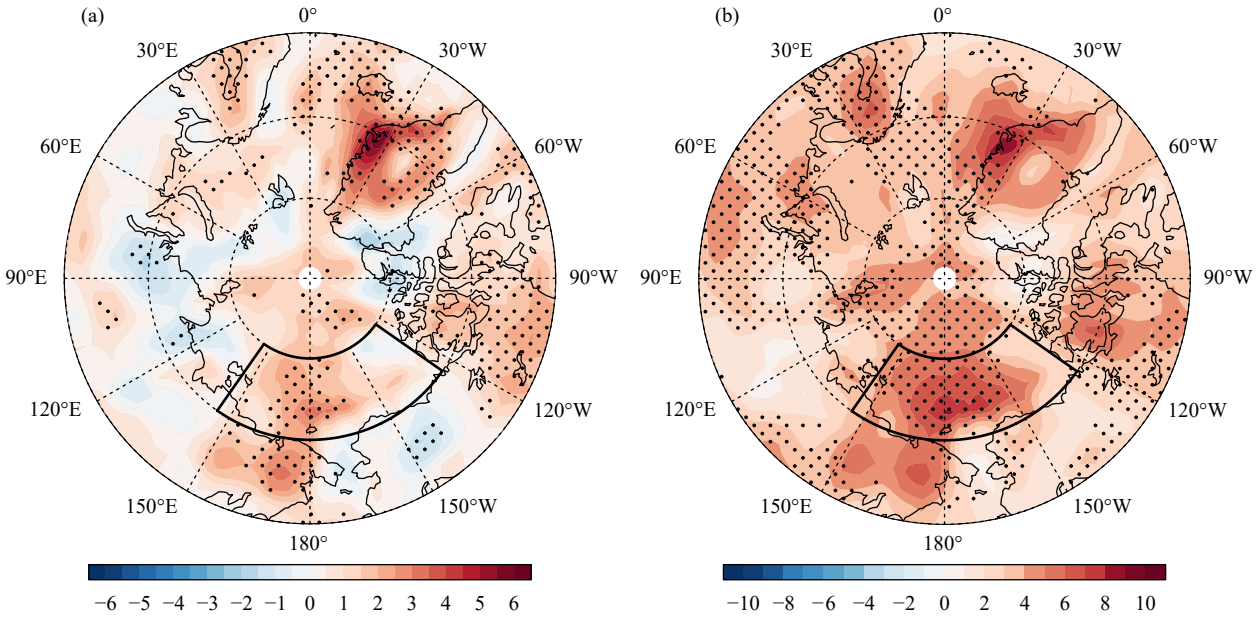


图 7　标准化 AMO 指数回归的（a）总云量（色阶，单位：%），（b）向下长波辐射通量（色阶，单位：W/m²）（打点表示通过 90% 信度检验，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 7　（a）Total cloud cover（shading, unit: %）and（b）downward longwave radiation anomalies（shading, unit: W/m²）regressed onto the normalized AMO index（values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region）

增多，进而增强了向下的大气长波辐射，增强的大气辐射又进一步反馈到地表气温上，从而使得气温升高，有利于 EsCB 海冰继续融化。换言之，EsCB 地区明显的升温有利于激发地表气温-云-长波辐射正反馈，进而使得异常海温强迫的大气信号得以维持。此外，虽然格陵兰岛东部沿岸地区也存在较强的总云量和向下长波辐射的正异常，但格陵兰岛本身是陆地且终年被冰雪覆盖，AMO 对其的影响并不明显。对于短波辐射、潜热通量和感热通量的作用，前人的研究已经指出，短波辐射主要在夏季起主要作用，秋季大尺度环流与之联系很弱（Kay, et al, 2008; Ding, et al, 2017），并且由于秋季云量的增多（图 7a）使得海冰对短波辐射的变化不敏感；而潜热通量与感热通量是大气对海冰融化的延迟响应，对海冰的反馈作用小（Luo, et al, 2019）。总的来说，地表气温-云-长波辐射正反馈有利于 EsCB 海冰减少的进一步维持。

接下来，使用气候模式 HadGEM3-GC31 的相关试验对上述观测结果进行验证。图 8 首先给出了 AMO 正、负位相试验中海表温度、海冰密集度和地表气温差异合成的空间分布。可以看到，两组试验在海温场上的差异主要表现为北大西洋一致变暖以及西北太平洋地区的海表温度正异常，表明北太平洋的海温是 AMO 强迫作用的结果，与观测一致（图 8a）。海冰场上，欧亚大陆沿岸边缘海—波弗特海有明显的海冰负异常，大值中心位于 EsCB 南部，相较于观测结果 EsCB 海冰负异常范围较小，中心略偏南并且负异常的强度仅为观测的一半，这表明模式对 AMO 影响 EsCB 海冰的范围以及强度都存在明显的低估（图 8b）。地表气温场上，北极地区表现为一致的正异常，且 EsCB 区域升高幅度最大（图 8c），这与观测结果是定性一致的。图 9 进一步给出 AMO+和 AMO−位相试验中 500 hPa 和 850 hPa 高度场合成差值的空间分布，尽管波列各中心的位置有所偏移，但模式可以定性地模拟出自北大西洋开始传播的波列，在北极上空大范围地区表现为高压异常，从中高层至低层 EsCB 区域都受到高压异常的控制。观测与模式试验结果的一致性进一步证实了 AMO 调制秋季 EsCB 海冰年代际变化的结论。

为了明确年代际尺度上 IPO 是否对 EsCB 海冰有调制作用，图 10 给出了 IPO−和 IPO+位相试验中海表温度、海冰密集度和地表气温合成差异的空间分布。可以看到，在 IPO 正、负位相试验的差值结

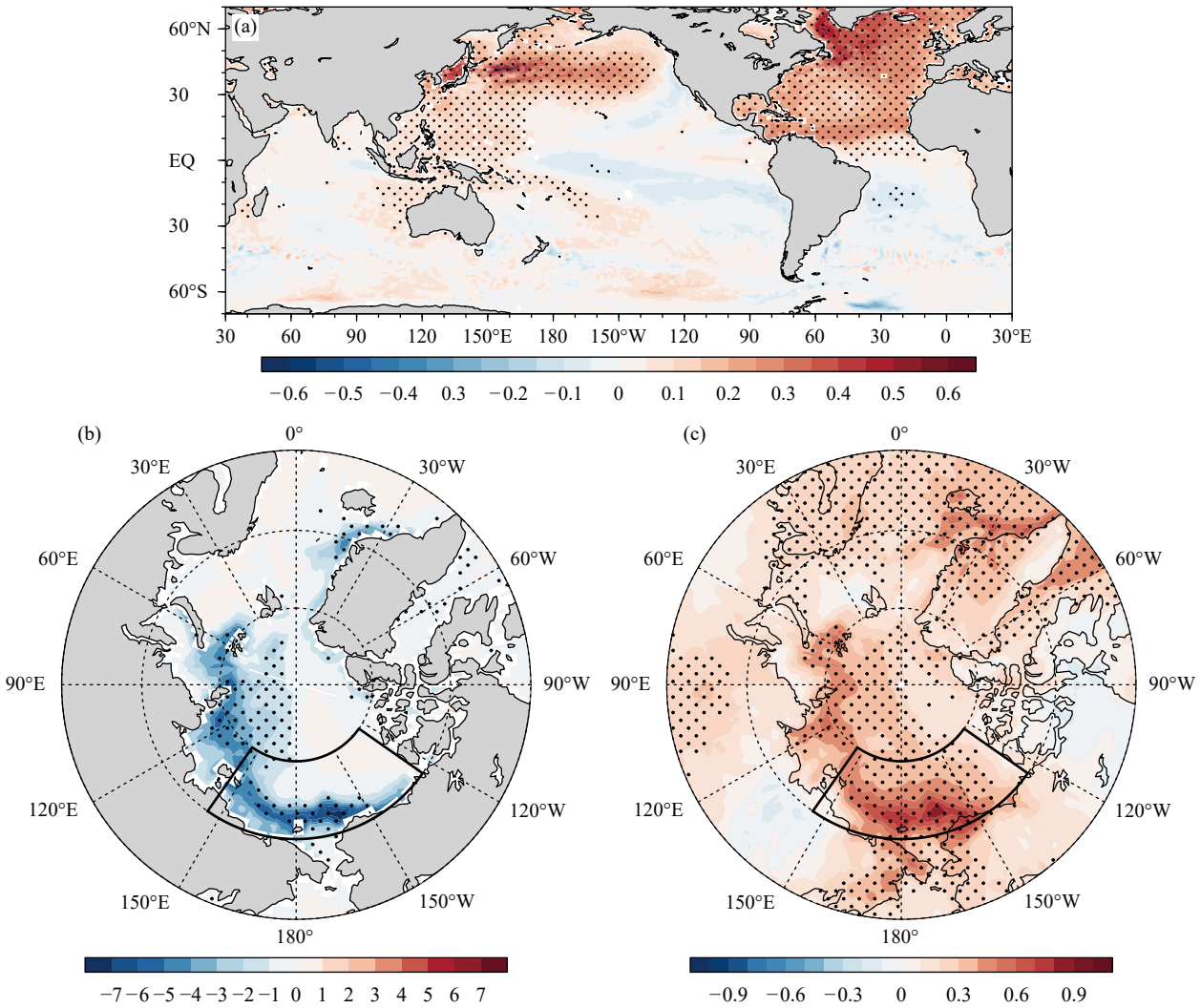


图 8 （a）海表温度异常（色阶，单位：℃）、（b）海冰密集度异常（色阶，单位：%）和（c）地表温度异常（色阶，单位：℃）在 dcppC-amv-pos 试验和 dcppC-amv-neg 试验中响应差异的集合平均值（打点表示通过 90% 信度检验，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 8 Simulated ensemble mean differences in（a）SST（shading, unit: ℃）,（b）SIC（shading, unit: %）and（c）surface temperature anomalies（shading, unit: ℃）in the dcppC-amv-pos and dcppC-amv-neg experiments（values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region）

果中，海温场上主要表现为太平洋地区明显的三极子结构并伴有大西洋弱的负异常（图 10a）；海冰场上，北极大范围表现为海冰正异常，大值中心位于格陵兰岛东侧—斯瓦尔巴群岛—喀拉海（图 10b）；地表气温场上，北极则表现为全区一致的负异常（图 10c）。总的来说，模式 IPO 正、负位相试验的差值结果在 EsCB 区域没有显著的信号，无法模拟出 EsCB 地区的海冰负异常以及地表气温正异常。这也进一步证明了秋季 IPO 对 EsCB 海冰没有明显的年代际调制作用。

5 结论与讨论

基于 1950—2020 年哈得来中心逐月海表温度、海冰密集度资料和 NCEP/NCAR 再分析资料，指出秋季 EsCB 海冰存在显著的多年代际变化特征，探讨了 AMO 与 EsCB 海冰的联系及机理，并进一步利用 HadGEM3-GC31-MM 模式的“起搏器”试验对观测结果进行了验证。主要得到如下结论：

（1）北半球秋季是北极海冰融化最多的季节，EsCB 是同期海冰融化最明显的区域。除了这种季节变化特性外，EsCB 的海冰还具有明显的年代际

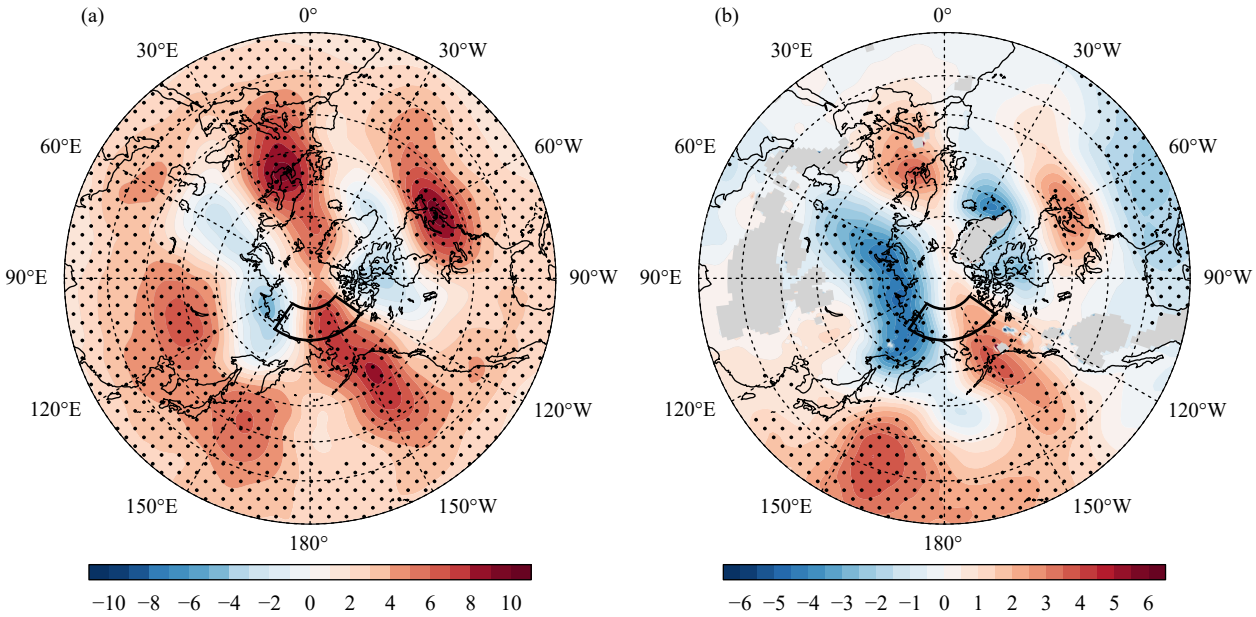


图 9　500 hPa（a）、850 hPa（b）位势高度场（色阶，单位：m）在 dcppC-amv-pos 试验和 dcppC-amv-neg 试验中响应差异的集合平均值（打点表示通过 90% 信度检验，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 9　Simulated ensemble mean differences in（a）500 hPa and（b）850 hPa geopotential height anomalies（shading, unit: m）in the dcppC-amv-pos and dcppC-amv-neg experiments（values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region）

变化特征。相应的年代际分量占海冰密集度变率总方差的 40% 以上，表明 EsCB 是秋季北极海冰年代际变化的核心区域。从指数演变上看，EsCB 海冰在 20 世纪 60 年代后期至 2000 年为正位相，在 20 世纪 60 年代中期以前和 2000 年以后为负位相。EsCB 海冰的这种多年代际变化与 AMO 具有较好的对应关系，而与 IPO 位相的对应关系则较差。

（2）观测分析表明，AMO 正位相，北大西洋暖海温激发向极传播的大气罗斯贝波使得北极中部受异常高压的控制，相应的大气绝热下沉运动使得对流层底部出现显著的升温，有利于 EsCB 海冰的融化。此外，EsCB 消融的海冰还可以通过地表气温-云-长波辐射的正反馈机制使得初始融化的海冰信号进一步地放大。AMO 影响 EsCB 海冰的详细

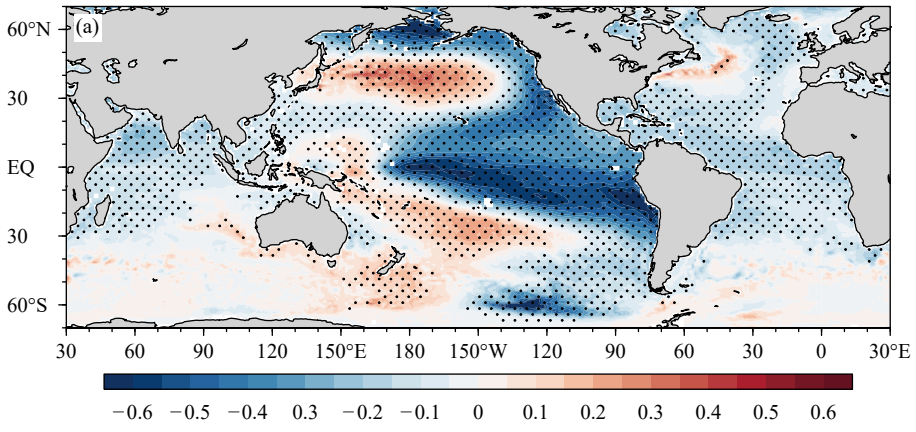
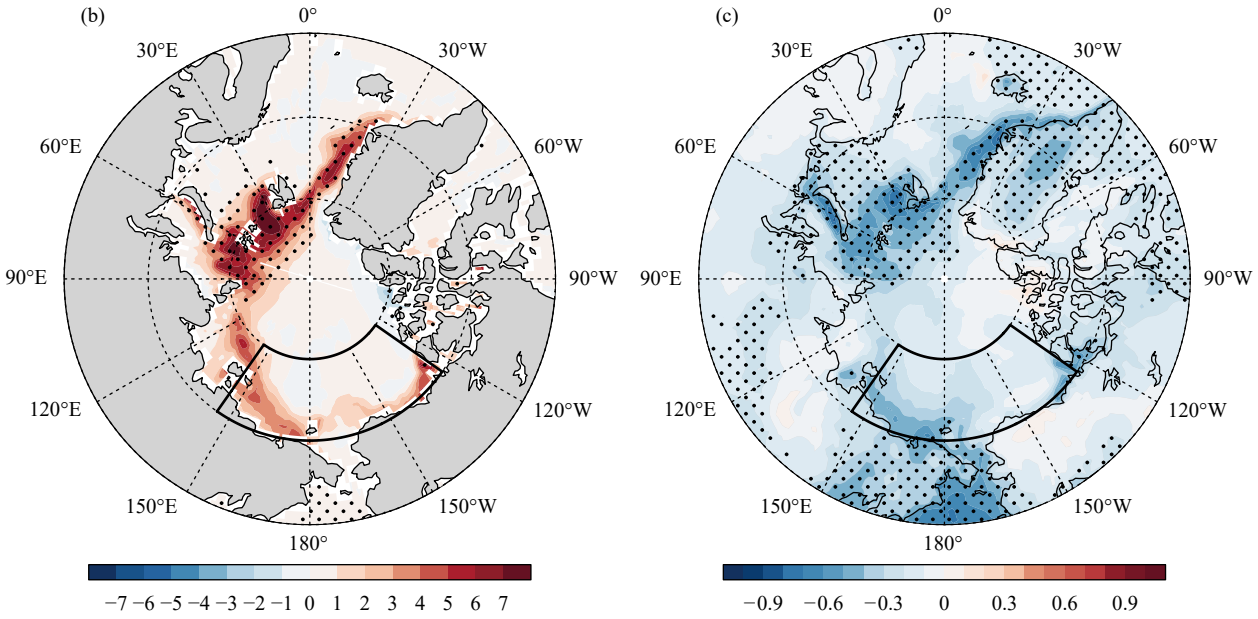


图 10　（a）海表温度异常（色阶，单位：℃）、（b）海冰密集度异常（色阶，单位：%）和（c）地表温度异常（色阶，单位：℃）在 dcppC-ipv-neg 试验和 dcppC-ipv-pos 试验中响应差异的集合平均值（打点表示通过 90% 信度检验，黑框表示 EsCB 区域）

Fig. 10　Simulated ensemble mean differences in（a）SST（shading, unit: ℃）,（b）SIC（shading, unit: %）and（c）surface temperature anomalies（shading, unit: ℃）in the dcppC-ipv-neg and dcppC-ipv-pos experiments（values exceeding the 90% confidence interval are stippled, black box indicates the EsCB region）



续图 10

Fig. 10 Continued

物理过程如图 11 所示。

(3)耦合模式 HadGEM3-GC31-MM 的 AMO 正、负位相“起搏器”试验可以较好地重现观测结果。此外,还验证了 IPO 在年代际尺度上对于 EsCB 海冰的影响。模式试验的结果在 EsCB 区域没有显著的信号,表明 IPO 对 EsCB 秋季海冰并不存在显著的年代际调制作用。因此,EsCB 海冰在年代际尺度上主要受 AMO 的调控。

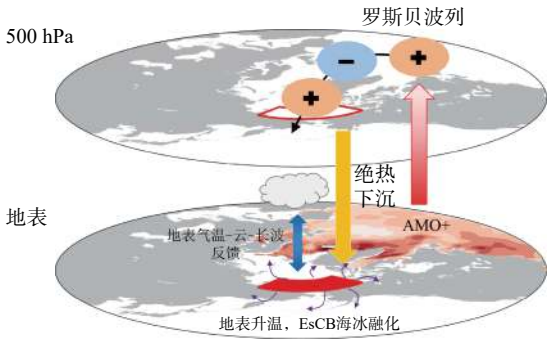


图 11 AMO 影响 EsCB 海冰物理过程的概念示意(带+(−)的橙黄色(天蓝色)圆圈代表 500 hPa 的正(负)位势高度异常,是罗斯贝波列中心;黑色箭头表示罗斯贝波传播方向,红色扇形表示 EsCB 区域,色阶表示北大西洋暖海温异常,AMO+,黄色箭头表示绝热下沉运动,云和蓝色箭头表示地表气温-云-长波反馈,地面紫色箭头表示反气旋式风)

Fig. 11 Schematic diagram of the mechanism of AMO influence on EsCB sea ice (The orange (sky blue) circles with + (−) represent positive (negative) geopotential height anomalies at 500 hPa, The black arrow indicates the direction of Rossby wave propagation; The red sector indicates the EsCB region; Shading shows North Atlantic warm SST anomalies associated with the positive AMO phase (AMO+); The yellow arrow indicates the adiabatic descent; The cloud and blue arrows indicate the surface air temperature-cloud-long wave feedback. Purple arrows on the ground indicate anticyclonic winds)

值得注意的是,尽管观测分析和数值试验模拟的结果均表明 AMO 对 EsCB 海冰有重要的调制作用,但是北太平洋海温异常在 AMO 影响的基础上是否还有作用值得未来通过模式进一步探究和完善。

参考文献

柯长青, 彭海涛, 孙波等. 2013. 2002 年—2011 年北极海冰时空变化分析. 遥感学报, 17(2): 459-466, 452-458. Ke C Q, Peng H T, Sun B, et al. 2013. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011. J Remote Sens, 17(2): 459-466, 452-458 (in Chinese)

劳汉琼, 朱伟军, 张唯. 2006. 冬季格陵兰以东区域海冰异常对北大西洋风暴轴的影响研究. 气象与减灾研究, 29(4): 6-11. Lao H Q, Zhu W J, Zhang W. 2006. Relationships of winter East Greenland sea ice anomaly and winter Atlantic storm-tracks. Meteor Disaster Reduction Res, 29(4): 6-11 (in Chinese)

李培基. 1996. 北极海冰与全球气候变化. 冰川冻土, 18(1): 72-80. Li P J. 1996. The Arctic Sea Ice and climate change. J Glaciol Geocryol, 18(1): 72-80 (in Chinese)

李双林, 王彦明, 郜永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研

究评述. 大气科学学报, 32(3): 458-465. Li S L, Wang Y M, Gao Y Q. 2009. A review of the researches on the Atlantic multidecadal oscillation(AMO) and its climate influence. Trans Atmos Sci, 32(3): 458-465 (in Chinese)

马靖凯, 陶树豪, 杜凌等. 2019. 北极太平洋扇区海冰融冻期的年代际变化. 气候变化研究快报, 8(3): 302-311. Ma J K, Tao S H, Du L, et al. 2019. Decadal variation of sea ice melting-frozen season in the Pacific sector of the Arctic. Clim Change Res Lett, 8(3): 302-311 (in Chinese)

祁莉, 徐业佳. 2018. 北极海冰及其与气象要素年际关系的年代际变化. 大气科学学报, 41(3): 355-366. Qi L, Xu Y J. 2018. Interdecadal variations of Arctic sea ice and its interannual relationship with meteorological elements. Trans Atmos Sci, 41(3): 355-366 (in Chinese)

隋翠娟, 张占海, 吴辉碇等. 2015. 1979—2012 年北极海冰范围年际和年代际变化分析. 极地研究, 27(2): 174-182. Sui C J, Zhang Z H, Wu H D, et al. 2015. Interannual and interdecadal variability of Arctic sea ice extent from 1979-2012. Chinese J Polar Res, 27(2): 174-182 (in Chinese)

汪代维, 杨修群. 2002. 北极海冰变化的时间和空间型. 气象学报, 60(2): 129-138. Wang D W, Yang X Q. 2002. Temporal and spatial patterns of Arctic sea ice variations. Acta Meteor Sinica, 60(2): 129-138 (in Chinese)

武炳义, 杨琨. 2016. 从 2011/2012 和 2015/2016 年冬季大气环流异常看北极海冰以及前期夏季北极大气环流异常的作用. 气象学报, 74(5): 683-696. Wu B Y, Yang K. 2016. Roles of Arctic sea ice and the preceding summer Arctic atmospheric circulation anomalies in the atmospheric circulations anomalies of 2011/2012 and 2015/2016 winters. Acta Meteor Sinica, 74(5): 683-696 (in Chinese)

张璐, 张占海, 李群等. 2009. 近 30 年北极海冰异常变化趋势. 极地研究, 21(4): 344-352. Zhang L, Zhang Z H, Li Q, et al. 2009. Status of the recent declining of Arctic sea ice studies. Chinese J Polar Res, 21(4): 344-352 (in Chinese)

朱大勇, 赵进平, 史久新. 2007. 北极楚科奇海海冰面积多年变化的研究. 海洋学报, 29(2): 25-33. Zhu D Y, Zhao J P, Shi J X. 2007. Study on the multi-year variations of sea ice cover of Chukchi Sea in Arctic Ocean. Acta Oceanol Sinica, 29(2): 25-33 (in Chinese)

Aagaard K, Carmack E C. 1989. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. J Geophys Res, 94(C10): 14485-14498

Andrews M B, Ridley J K, Wood R A, et al. 2020. Historical simulations with HadGEM3-GC3.1 for CMIP6. J Adv Model Earth Syst, 12(6): e2019MS001995

Babb D G, Galley R J, Howell S E L, et al. 2022. Increasing multiyear sea ice loss in the Beaufort sea: A new export pathway for the diminishing multiyear ice cover of the Arctic Ocean. Geophys Res Lett, 49(9): e2021GL097595

Barry R G, Serreze M C, Maslanik J A, et al. 1993. The Arctic sea ice-climate system: Observations and modeling. Rev Geophys, 31(4): 397-422

Baxter I, Ding Q H, Schweiger A, et al. 2019. How tropical pacific surface cooling contributed to accelerated sea ice melt from 2007 to 2012 as ice is thinned by anthropogenic forcing. J Climate, 32(24): 8583-8602

Boer G J, Smith D M, Cassou C, et al. 2016. The decadal climate prediction project (DCPP) contribution to CMIP6. Geosci Model Dev, 9(10): 3751-3777

Budikova D. 2009. Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: A review. Global Planet Change, 68(3): 149-163

Cai Q Q, Beletsky D, Wang J, et al. 2021. Interannual and decadal variability of Arctic summer sea ice associated with atmospheric teleconnection patterns during 1850-2017. J Climate, 34(24): 9931-9955

Castruccio F S, Ruprich-Robert Y, Yeager S G, et al. 2019. Modulation of Arctic sea ice loss by atmospheric teleconnections from Atlantic multidecadal variability. J Climate, 32(5): 1419-1441

Cavalieri D J, Parkinson C L. 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. Cryosphere, 6(4): 881-889

Chen S F, Wu R G. 2018. Impacts of early autumn Arctic sea ice concentration on subsequent spring Eurasian surface air temperature variations. Climate Dyn, 51(7-8): 2523-2542

Chylek P, Folland C K, Lesins G, et al. 2009. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic Multidecadal Oscillation. Geophys Res Lett, 36(14): L14801

Close S, Houssais M N, Herbaut C. 2015. Regional dependence in the timing of onset of rapid decline in Arctic sea ice concentration. J Geophys Res, 120(12): 8077-8098

Comiso J C. 2002. A rapidly declining perennial sea ice cover in the Arctic. Geophys Res Lett, 29(20): 1956

Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. Geophys Res Lett, 35(1): L01703

Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. 1995. Sea ice-albedo climate feedback mechanism. J Climate, 8(2): 240-247

Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. J Phys Oceanogr, 6(3): 249-266

Day J J, Hargreaves J C, Annan J D, et al. 2012. Sources of multi-decadal variability in Arctic sea ice extent. Environ Res Lett, 7(3): 034011

Delworth T L, Mann M E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. Climate Dyn, 16(9): 661-676

Ding Q H, Schweiger A, L'Heureux M, et al. 2017. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. Nat Clim Change, 7(4): 289-295

Ding S Y, Wu B Y, Chen W. 2021. Dominant characteristics of early autumn Arctic Sea ice variability and its impact on winter eurasian climate. J Climate, 34(5): 1825-1846

Dittus A J, Hawkins E, Robson J I, et al. 2021. Drivers of recent North Pacific decadal variability: The role of aerosol forcing. Earth's Future, 9(12): e2021EF002249

Eicken H. 2013. Arctic sea ice needs better forecasts. Nature, 497(7450): 431-

433

Enfield D B, Mestas-Nuñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U. S. Geophys Res Lett, 28(10): 2077-2080

Frey K E, Moore G W K, Cooper L W, et al. 2015. Divergent patterns of recent sea ice cover across the Bering, Chukchi, and Beaufort seas of the Pacific Arctic Region. Prog Oceanogr, 136: 32-49

Gao Y Q, Sun J Q, Li F, et al. 2015. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review. Adv Atmos Sci, 32(1): 92-114

Hahn L, Ummenhofer C C, Kwon Y O. 2018. North Atlantic natural variability modulates emergence of widespread greenland melt in a warming climate. Geophys Res Lett, 45(17): 9171-9178

Henley B J, Gergis J, Karoly D J, et al. 2015. A tripole index for the interdecadal Pacific Oscillation. Climate Dyn, 45(11-12): 3077-3090

Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. Geophys Res Lett, 36(8): L08707

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-472

Kay J E, L'Ecuyer T, Gettelman A, et al. 2008. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. Geophys Res Lett, 35(8): L08503

Kerr R A. 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. Science, 288(5473): 1984-1985

Kinnard C, Zdanowicz C M, Fisher D A, et al. 2011. Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1, 450 years. Nature, 479(7374): 509-512

Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. Nat Geosci, 8(10): 759-762

Kwok R, Rothrock D A. 2009. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958-2008. Geophys Res Lett, 36(15): L15501

Lai W K M, Robson J I, Wilcox L J, et al. 2022. Mechanisms of internal Atlantic multidecadal variability in HadGEM3-GC3.1 at two different resolutions. J Climate, 35(4): 1365-1383

Lamoureux S F, Stewart K A, Forbes A C, et al. 2006. Multidecadal variations and decline in spring discharge in the Canadian middle Arctic since 1550 AD. Geophys Res Lett, 33(2): L02403

Lee S, Gong T T, Johnson N, et al. 2011. On the possible link between tropical convection and the Northern Hemisphere Arctic surface air temperature change between 1958 and 2001. J Climate, 24(16): 4350-4367

Lee S. 2012. Testing of the tropically excited Arctic warming mechanism (TEAM) with traditional El Niño and La Niña. J Climate, 25(12): 4015-4022

Lei R B, Tian-Kunze X, Leppäranta M, et al. 2016. Changes in summer sea ice, albedo, and portioning of surface solar radiation in the Pacific sector of Arctic Ocean during 1982-2009. J Geophys Res, 121(8): 5470-5486

Levitus S, Matishov G, Seidov D, et al. 2009. Barents Sea multidecadal variability. Geophys Res Lett, 36(19): L19604

Li F, Orsolini Y J, Wang H J, et al. 2018. Atlantic multidecadal oscillation modulates the impacts of Arctic Sea ice decline. Geophys Res Lett, 45(5): 2497-2506

Li Z Y, Zhang W J, Stuecker M F, et al. 2019. Different effects of two ENSO types on Arctic surface temperature in boreal winter. J Climate, 32(16): 4943-4961

Lindsay R W, Zhang J. 2005. The thinning of Arctic sea ice, 1988–2003: Have we passed a tipping point?. J Climate, 18(22): 4879-4894

Lindsay R W, Zhang J, Schweiger A, et al. 2009. Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend. J Climate, 22(1): 165-176

Luo R, Wu Z W, Zhang P, et al. 2019. Potential influence of a developing La Niña on the sea-ice reduction in the Barents-Kara seas. Atmos-Ocean, 57(3): 182-194

Mahajan S, Zhang R, Delworth T L. 2011. Impact of the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) on Arctic surface air temperature and sea ice variability. J Climate, 24(24): 6573-6581

Menary M B, Kuhlbrodt T, Ridley J, et al. 2018. Preindustrial control simulations with HadGEM3-GC3.1 for CMIP6. J Adv Model Earth Syst, 10(12): 3049-3075

Miles M W, Divine D V, Furevik T, et al. 2014. A signal of persistent Atlantic multidecadal variability in Arctic sea ice. Geophys Res Lett, 41(2): 463-469

Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited. J Climate, 29(12): 4399-4427

Nigam S, Sengupta A, Ruiz-Barradas A. 2020. Atlantic –Pacific links in observed multidecadal SST variability: Is the Atlantic multidecadal oscillation's phase reversal orchestrated by the Pacific decadal oscillation?. J Climate, 33(13): 5479-5505

Ortega P, Robson J, Sutton R T, et al. 2017. Mechanisms of decadal variability in the Labrador Sea and the wider North Atlantic in a high-resolution climate model. Climate Dyn, 49(7-8): 2625-2647

Parkinson C L. 2014. Global sea ice coverage from satellite data: Annual cycle and 35-Yr trends. J Climate, 27(24): 9377-9382

Polyakov I V, Alekseev G V, Bekryaev R V, et al. 2003. Long-term ice variability in Arctic marginal seas. J Climate, 16(12): 2078-2085

Polyakov I V, Timokhov L A, Alexeev V A, et al. 2010. Arctic ocean warming contributes to reduced polar ice cap. J Phys Oceanogr, 40(12): 2743-2756

Polyakov I V, Pnyushkov A V, Alkire M B, et al. 2017. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. Science, 356(6335): 285-291

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 Geophys Res, 108(D14): 4407

Ridley J K, Blockley E W, Keen A B, et al. 2018. The sea ice model component of HadGEM3-GC3.1. Geosci Model Dev, 11(2): 713-723

Rigor I G, Wallace J M, Colony R L. 2002. Response of sea ice to the Arctic Oscillation. J Climate, 15(18): 2648-2663

Rothrock D A, Yu Y, Maykut G A. 1999. Thinning of the Arctic sea-ice cover. Geophys Res Lett, 26(23): 3469-3472

Rothrock D A, Zhang J. 2005. Arctic Ocean sea ice volume: What explains its recent depletion?. J Geophys Res, 110(C1): C01002

Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. Nature, 464(7293): 1334-1337

Screen J A, Deser C, Simmonds I, et al. 2014. Atmospheric impacts of Arctic sea-ice loss, 1979–2009: Separating forced change from atmospheric internal variability. Climate Dyn, 43(1-2): 333-344

Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. Science, 315(5818): 1533-1536

Serreze M C, Stroeve J, Barrett A P, et al. 2016. Summer atmospheric circulation anomalies over the Arctic Ocean and their influences on September sea ice extent: A cautionary tale. J Geophys Res, 121(19): 11463-11485

Serreze M C, Meier W N. 2019. The Arctic's sea ice cover: Trends, variability, predictability, and comparisons to the Antarctic. Ann N Y Acad Sci, 1436(1): 36-53

Shimada K, Kamoshida T, Itoh M, et al. 2006. Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. Geophys Res Lett, 33(8): L08605

Spreen G, Kwok R, Menemenlis D. 2011. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992-2009. Geophys Res Lett, 38(19): L19501

Steele M, Ermold W, Zhang J L. 2008. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years. Geophys Res Lett, 35(2): L02614

Stirling I, Parkinson C L. 2006. Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (*Ursus maritimus*) in the Canadian Arctic. Arctic, 59(3): 261-275

Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. Geophys Res Lett, 34(9): L09501

Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. 2012. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. Clim Change, 110(3-4): 1005-1027

Sun C, Kucharski F, Li J P, et al. 2017. Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation. Nat Commun, 8(1): 15998

Sutton R T, Hodson D L R. 2005. Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate. Science, 309(5731): 115-118

Sutton R T, Dong B. 2012. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. Nat Geosci, 5(11): 788-792

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 Atmos Sci, 58(6): 608-627

Trenberth K E, Shea D J. 2006. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. Geophys Res Lett, 33(12): L12704

Vihma T. 2014. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review. Surv Geophys, 35(5): 1175-1214

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 109(4): 784-812

Walsh J E, Johnson C M. 1979. An analysis of Arctic sea ice fluctuations, 1953–77. J Phys Oceanogr, 9(3): 580-591

Wang J, Zhang J L, Watanabe E, et al. 2009. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?. Geophys Res Lett, 36(5): L05706

Wu B Y, Wang J, Walsh J E. 2006. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion. J Climate, 19(2): 210-225

Wu B Y, Johnson M A. 2007. A seesaw structure in SLP anomalies between the Beaufort Sea and the Barents Sea. Geophys Res Lett, 34(5): L05811

Wu B Y, Overland J E, D'Arrigo R. 2012. Anomalous Arctic surface wind patterns and their impacts on September sea ice minima and trend. Tellus A, 64(1): 18590

Wu M Q, Jia L L, Xing Q G, et al. 2018. Spatio-temporal variation of Arctic sea ice in summer from 2003 to 2013. Chinese Geogra Sci, 28(1): 38-46

Yao S L, Zhou W, Jin F F, et al. 2021. North Atlantic as a trigger for Pacific-wide decadal climate change. Geophys Res Lett, 48(18): e2021GL094719

Yu L J, Zhong S Y, Zhou M Y, et al. 2019. Revisiting the linkages between the variability of atmospheric circulations and Arctic melt-season sea ice cover at multiple time scales. J Climate, 32(5): 1461-1482

Zhang R, Delworth T L. 2007. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on North Pacific climate variability. Geophys Res Lett, 34(23): L23708