

巴伦支海地区秋季海冰偏少对西伯利亚地区反气旋活动的影响

卢楚翰^{1,2}, 夏平^{2*}, 张煜敏³, 信飞⁴

1 无锡学院中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室, 无锡, 214000

2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京, 210044

3 广东省气象台, 广东广州, 510641

4 上海市气候中心, 上海, 200030

摘 要 全球变暖背景下, 北极地区大幅升温、海冰急剧退缩, 以往研究揭示了秋季巴伦支海区域的海冰状况是后期冬季欧亚大陆气温异常的显著前兆因子, 而西伯利亚冬季低层反气旋的活动与冷空气变化密切相关, 但北极海冰对西伯利亚地区冬季低层反气旋/冷高压活动是否以及如何产生影响仍有待进一步研究。本文利用欧洲中期天气预报中心再分析资料 ERA5 及海冰资料, 研究了巴伦支海地区秋季海冰偏少对西伯利亚地区反气旋活动的影响及途径。结果表明: (1) 巴伦支海地区秋季海冰密集度的年际变化对西伯利亚地区冬季反气旋及其携带的冷空气质量作用明显, 当秋季海冰较少时, 反气旋活动增强, 其携带冷空气增多。

(2) 秋季海冰面积指数减少将导致后期更多海洋热量向大气传递, 从而降低冬季极区与中纬度间的经向温度梯度, 进而减弱中纬度西风, 造成欧亚大陆反气旋活动增强。(3) 利用大气环流模式 CAM6, 设计了巴伦支海区域海冰变化的敏感性试验, 其结果也显示在海冰偏少条件下, 除贝加尔湖以东和中国东北部地区, 欧亚大陆大部分地区均呈现反气旋频次增多、反气旋中心气压增强。其中, 海冰减少引起了位涡经向梯度的显著降低, 从而导致东欧平原、乌拉尔山以及东亚地区的阻塞发生频率增大, 使得欧亚大陆中纬度大部分区域反气旋活动增强, 气温下降。

关键词 反气旋 海冰 冷空气

文章编号 2023123A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2403.23123

收稿日期 2023-09-20; **网络预出版日期**

作者简介 卢楚翰, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 主要从事中高纬度大气环流异常。Email:

luchuhan@cw Xu.edu.cn

***通讯作者** 夏平, E-mail: 310030613@qq.com

资助项目 江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术项目 BE2022161, 上海市 2020 年“科技创新行动计划”项目(20dz1200401), 福建省灾害天气重点实验室开放课题 2023KFKT06, 无锡学院引进人才科研启动专项

Funded by Jiangsu Provincial Key R&D Programme of Industry Foresight and Key Core Technology Project(Grant BE2022161), Shanghai 2020 "Science and Technology Innovation Action Plan" Project(Grant 20dz1200401), Open Subjects of Key Laboratory of Disaster Weather in Fujian Province(Grant 2023KFKT06), Wuxi College Introduces Talents to Start the Special Purpose of Scientific Research

Effect of less sea ice in the Barents Sea on anticyclone activity in Siberia

Lu Chuhan^{1,2}, Xia Ping^{2*}, Zhang Yumin³

1 Key Open Laboratory of Ecosystem Carbon Sinks, China Meteorological Administration, Wuxi College, Wuxi, 214000, China

2 Key Laboratory of Meteorological Disasters of the Ministry of Education, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China

3 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510641, China

Abstract In the context of global warming, the Arctic region has warmed significantly and sea ice has retreated dramatically, and previous studies have revealed that the sea ice condition in the Barents Sea region in autumn is a significant precursor factor for temperature anomalies in Eurasia in late winter, while the activity of the low-level anticyclone in Siberia in winter is closely related to the change of the cold air, but whether and how the Arctic sea ice affects the activity of low-level anticyclone/cold high-pressure in winter in Siberia is still to be Further studies are needed. In this paper, the effects and pathways of low sea ice in autumn in the Barents Sea region on anticyclone activities in Siberia are investigated using the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis data, ERA5, and sea ice data. The results show that: (1) the interannual variations of the fall sea-ice density in the Barents Sea region have an effect on both winter anticyclones and the quality of the cold air they carry in the Siberian region, and the anticyclone activity is enhanced and the cold air it carries is increased when there is less sea-ice in the fall. (2) Reduced sea ice area in the fall will lead to more ocean heat transfer to the atmosphere in the late season, thus reducing the meridional temperature gradient between the polar regions and the mid-latitudes in winter, and thus weakening the mid-latitude westerly winds, resulting in enhanced anticyclone activity in Eurasia. (3) Using the atmospheric circulation model CAM6, we designed a sensitivity test for sea ice changes in the Barents Sea region, and the results also reproduced that under conditions of low sea ice, most of the Eurasian continent, except for the area east of Lake Baikal and northeastern China, showed an increase in anticyclone frequency and an enhancement of the central pressure of the anticyclone. In particular, the reduction of sea ice caused a significant decrease in the meridional gradient of the vortex, which led to an increase in the frequency of blockages in the East European Plain, the Ural

Mountains, and East Asia, resulting in an increase in anticyclone activity and a decrease in temperature in most of the mid-latitude regions of the Eurasian continent.

Keywords Anticyclone; Sea ice; Cold air

1 引言

反气旋和气旋是天气系统的重要组成部分。中纬度天气尺度主要通过气旋和反气旋进行经向动量、热量交换和水汽循环（田笑，2019）。气旋与反气旋的活动能直接与极端温度以及海表温度变化挂钩，它们的活动变化能直接影响地表空气温度，特别是夜间温度（Favre and Gershunov, 2006）。反气旋的活动和分布对邻近地区的天气影响同气旋一样重要，不能简单地认为是气旋的反相部分。温带反气旋具有自己的特征并能造成激烈的大范围天气现象，如大风、降温、降水、沙尘天气等（Wang and Chen, 2013）。相比于北美大陆，欧亚大陆是北半球反气旋活动最为频繁、发展最为强大的地区。一些研究显示，冬季欧亚大陆近地面反气旋多以天气尺度系统为主（秦育婧和卢楚翰，2017），其活动与西伯利亚高压的变化具有密切联系（Zhang et al., 2012）。有研究表明受极锋急流强度影响，气旋和反气旋在生成区、消亡区和移动路径存在明显的不对称，且在 1948-2007 年中国冬季反气旋的发生频数呈上升趋势但强度具有下降趋势（Chen et al., 2014）。反气旋发生频率的分布有明显的季节差异。反气旋的增强和维持可能与罗斯贝波与地表冷异常的相互作用有关（Takaya and Nakamura, 2001; Song et al., 2016）。

欧亚大陆冬季低层反气旋的活动与冷空气变化密切相关，其位置、强度和形状变化对寒潮低温事件具有直接影响，地面冷高压的活动常常携带大规模冷空气爆发并伴随着大风和雨雪天气，是气象学研究领域的重要课题之一。冬季在西伯利亚高压区域上空的强烈辐射冷却和大范围下降运动有利于西伯利亚高压加强，该地区上空反气旋加强有利于对流层上层质量辐合，对流层下部的冷凝过程又能反过来加强冷高压（Ding and Krishnamurti, 1987）。

西伯利亚高压的活动对亚洲大陆中高纬冬季温度、降水及低层大尺度环流有显著影响（Gong and Ho, 2002），对东亚冬季风活动异常有直接影响作用（Wu and Wang, 2002），在欧亚大陆低温事件研究中受到广泛关注。同时欧亚大陆中高纬地区与西伯利亚高压具有很好的负相关性，即西伯利亚高压偏强时，中国大部分地区气温普遍偏低（Gong and Ho, 2002）。Müller 等人（2015）研究表明南美洲寒冷事件与太平洋上的 Rossby 波列传播有关，该波列将低层反气旋从欧亚大陆西南部驱动至低纬度地区，通过经向风将冷平流带到南方，从而导致温度下降。Zhang 等人（2012）指出加剧的反气旋活动能推动西伯利亚高压强度大幅增强并向西北方向扩张，同时促进欧亚大陆中纬度地区进一步降温。Zhi 等人（2019）

研究表明由于受反气旋活动影响,西伯利亚高压向东南扩大使得东亚大槽和乌拉尔山阻高减弱,同时蒙古地区的高频动量通量显著增强,加强高纬度西风并减弱中纬度西风,这会导致极地冷空气被禁锢在高纬度地区使得东亚大部分地区地表气温偏暖。

近年来,北极海冰有显著减少趋势,北极变暖在巴伦支海-喀拉海附近尤为明显,北极表面气温的增温速度约为全球平均水平的 2-3 倍,这被称为 "北极放大"现象 (Francis and Vavrus, 2012; Gao et al., 2015)。自 20 世纪 90 年代末以来,欧亚大陆寒冷事件频发,这与北极快速变暖形成鲜明对比,形成了"暖北极-冷欧亚" (Honda et al., 2009; Kim et al., 2014) 的模式,并且可以在地表温度异常、位势高度和对流层温度异常中检测到 (Overland and Wang, 2010; He et al., 2020)。有研究指出,秋季北极海冰规模和分布的变化对北半球后期冬季天气状况存在影响,例如,北极海冰的融化会伴随大幅升温,削弱了经向温度梯度,这使得西风异常偏弱,进而影响到整个北半球的大气环流,影响高空气流及罗斯贝波的活动,有利于乌拉尔山上空阻塞高压出现正异常,使得来自高纬度的冷平流对东亚影响更加活跃 (Lu et al., 2019)。夏季北极海冰减少能够使得北太平洋 SLP 和 500 hPa 位势高度上升,并通过影响北大西洋海表温度来引发反气旋异常 (Balmaseda et al., 2010),能够作为后期冬季西伯利亚地区反气旋活动异常的预测因子之一 (Wu et al., 2011; Li et al., 2020)。

综上所述,已有的研究主要关注前期秋季北极海冰对冬季季节/季节内平均中纬度大气环流如西伯利亚高压活动以及区域冷异常的影响。由于逐日反气旋活动的突发性增强是引起大范围极端冷事件的直接因素,而关于前期秋、冬季北极海冰是如何影响冬季天气尺度反气旋活动的研究相对较少。影响冬季天气尺度反气旋长期活动的外强迫因子有哪些,其可能的影响机制是什么? 本文将结合诊断分析以及数值模拟,聚焦秋季巴伦支海-卡拉海海冰变化对西伯利亚地区冬季反气旋活动,以及与之直接相关的反气旋携带的冷空气变化的影响,并尝试通过设计海冰变化的相关敏感性数值试验,分析海冰变化对冬季反气旋活动的可能影响机理。

2 数据与方法

2.1 数据

1978-2022 年欧洲中期天气预报中心 (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 再分析资料 (Babar, 2019), 水平分辨率为 $0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$, 时间间隔为 6h, 包括海平面气压 (SLP), 地表气压, 地面 2m 气温, 温度。1981-2022 年美国国家海洋和大气管理局 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 OISST V2.1 的每日海冰密集度数据 (Huang et

al., 2021)，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。如无特别说明，本文以 1978-2022 年作为气候态，取当年 12 月至次年 2 月为北半球某年冬季。

2.2 方法

2.2.1 基于深度学习 Mask R-CNN 模型的反气旋识别算法

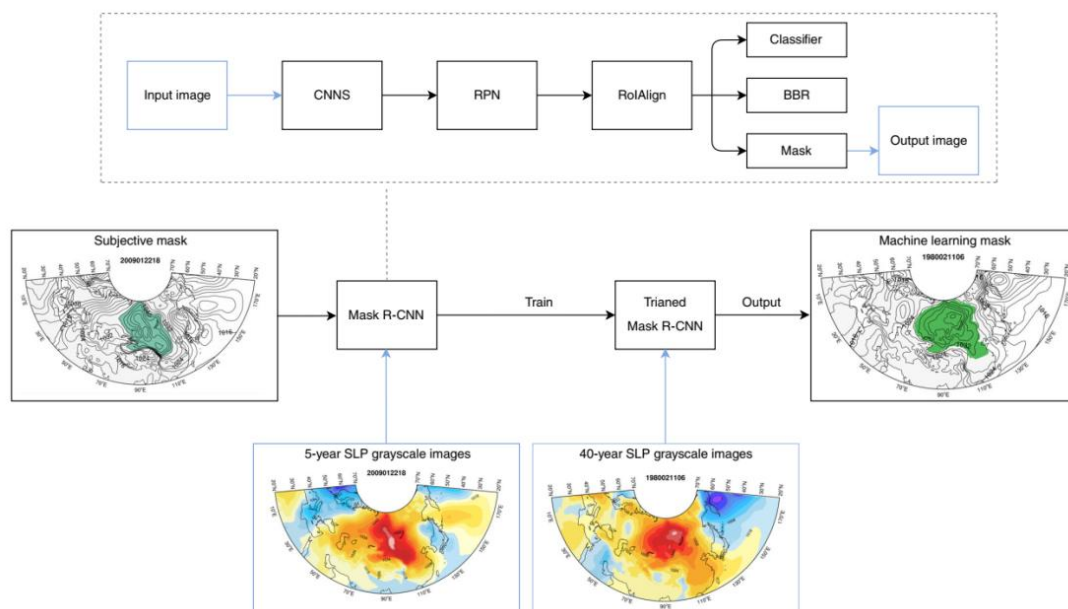


图1 基于 Mask R-CNN 模型的新反气旋客观识别方法流程(上方灰色虚线框为 Mask R-CNN 模型的简化结构，人工识别 mask 为人工分析得到的 2D 反气旋识别数据，机器学习 mask 为 Mask R-CNN 模型输出的反气旋识别数据，客观识别 mask 为传统客观识别算法得到的反气旋识别数据)

Fig. 1 Flow of the new anticyclone objective identification method based on the Mask R-CNN model (the upper gray dashed box is the simplified structure of the Mask R-CNN model, the manual identification mask is the 2D anticyclone identification data obtained from the manual analysis, the machine learning mask is the anticyclone identification data outputted from the Mask R-CNN model, and the objective identification mask is the anticyclone identification data obtained from the traditional objective identification algorithm).

为分析天气尺度反气旋活动变化，同时直观表示反气旋携带的冷空气质量，本文采用了基于 Mask R-CNN 深度学习模型的 2D 反气旋活动识别算法（Zhang and Lu, 2022），对每日四次的海平面气压进行反气旋识别与追踪。研究表明，Mask R-CNN 模型对于识别目标外形识别方面具有较好的性能，已被广泛用于图片目标分割领域（He et al., 2017）。在气象领域，该模型已应用于二维温带/热带气旋识别算法，在确定气旋的位置和二维特征方面显示出可靠的性能（Lu et al., 2020）。Zhang 等（2022）对比了利用人工分析和模型识别两种方法所得到的 5

年每日四次反气旋数据集的空间重合性，两者的匹配度平均能达到 90%，表明利用 Mask R-CNN 深度学习模型识别近地面 2D 反气旋具有较好的性能。因此，本文试图利用 Mask R-CNN 模型来直接识别反气旋的二维特征，工作流程以及实例见图 1。

2.2.2 冷空气质量

为了定量分析反气旋活动与冷空气变化之间的关系，本文使用 Iwasaki 等人 (2014) 定义的冷空气质量来计算反气旋影响范围内所包含的冷空气。冷空气质量的具体定义为地表面气压与 280K 等熵面气压之间的差值，其计算公式如下：

$$CAM = P_{\text{surface}} - P_{(\theta_T=280K)} \quad (1)$$

根据某一时刻 2D 反气旋水平影响范围，计算对应格点所携带的冷空气质量，然后以同样方式计算该格点在某一年整个冬季内受到不同反气旋影响时所携带的冷空气质量并作冬季累加，得到冬季该格点的反气旋携带冷空气质量，最后除以冬季该格点所有时次冷空气质量总和，定义为反气旋携带冷空气质量贡献率。

2.2.3 数值试验

为验证海冰对反气旋活动影响的可能机理，采用美国国家大气中心的全球大气模式第 6 版 (CAM6, Community Atmosphere Model version 6) (Danabasoglu et al., 2020) 进行数值模拟验证，水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ (纬向 $\times$ 经向)，垂直方向为 32 层的混合 σ 坐标。利用极地放大模式比对项目 PAMIP (Smith et al., 2019) 所建议的当前/未来条件下的北极海冰密集度 (SIC) 和海面温度 (SST) 强迫数据，该数据集根据试验的欧亚大陆北部边缘临近地区 ($65^\circ - 85^\circ \text{ N}$, $20^\circ - 150^\circ \text{ E}$)，主要包括巴伦支海、喀拉海和拉普捷夫海的 SIC 和 SST 强迫数据，模拟多/少海冰条件下对应后期冬季欧亚大陆环流特征和反气旋活动特征，每组试验分别运行 60 年，以此分析秋季该区域海冰对后期冬季反气旋活动产生的影响。

3 结果

3.1 西伯利亚地区反气旋及其联系的冷空气活动

前人研究表明，西伯利亚地区反气旋及其伴随的冷空气活动通常存在一个低频向南传播的过程，这主要是由于该地区对流层中上层质量辐合、辐射冷却和下垫面的感热和潜热通量共同作用的结果 (Ding, 1990)。为了研究西伯利亚地区反气旋活动的特点及活动频率，本文统计了近 45 年途径西伯利亚地区 ($45^\circ - 65^\circ \text{ N}$, $60^\circ - 115^\circ \text{ E}$) 的反气旋路径，其相对欧亚大陆地区的反气旋路径比例达 32.4%，由此说明西伯利亚区域是冬季欧亚大陆近地面反气旋的主要活动和影响区域。图

2a 计算冬季经过该地区的反气旋路径频次。可以看出，主要大值区位于阿尔泰山脉-蒙古高原地区，另有两个相对大值区分布在中西伯利亚高原南部和内蒙古高原处，表明这些地区是冬季大陆冷性反气旋主要活动地，这与前人的研究保持一致（Ioannidou and Yau, 2008; Zhang et al., 2012）。

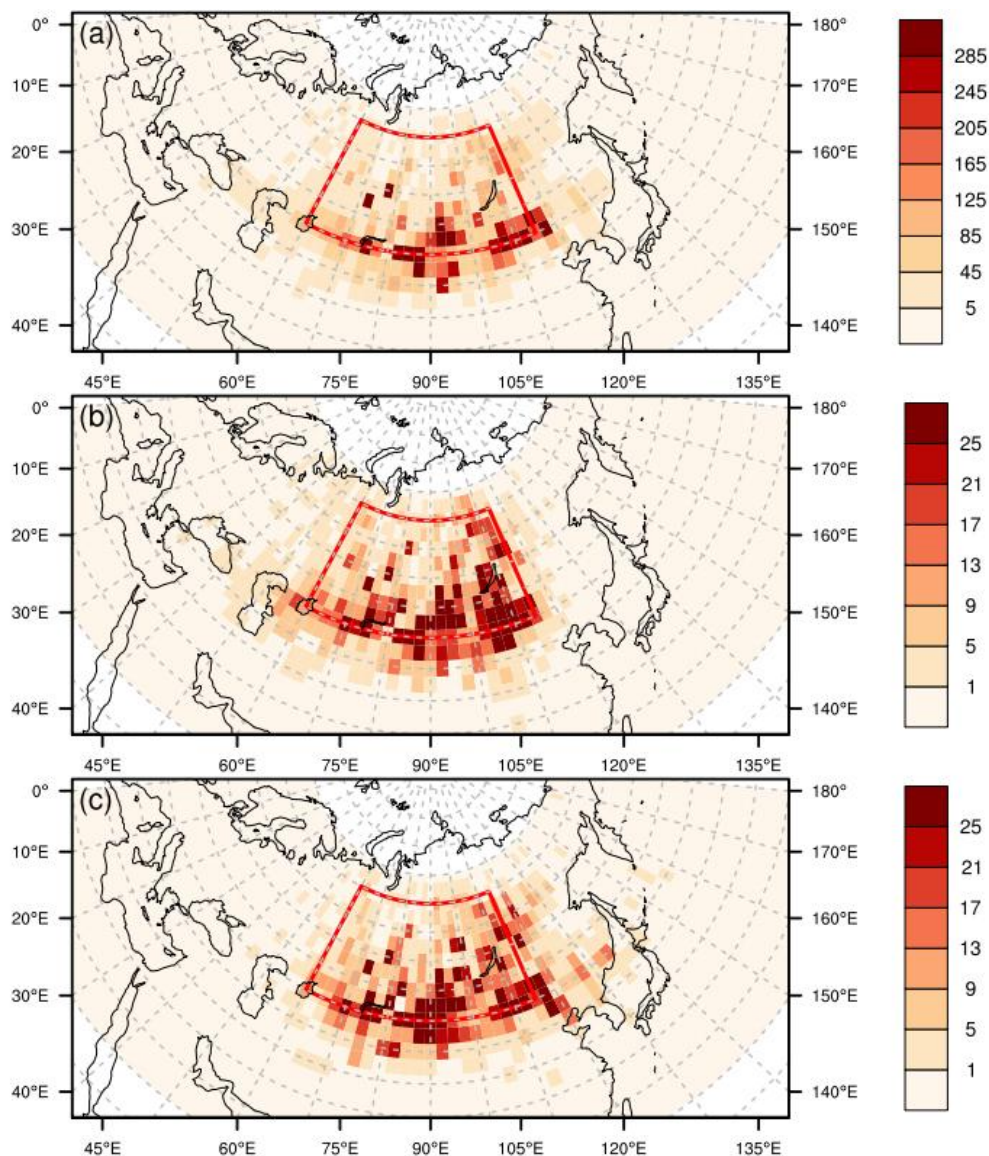


图 2 1978 年至 2022 年冬季经过西伯利亚地区（45° -65° N, 60° -115° E）的（a）反气旋路径、（b）生成频次和（c）消亡频次分布图

Fig. 2 Distribution of (a) anticyclone paths, (b) generation frequency, and (c) extinction frequency passing through Siberia (45° -65° N, 60° -115° E) during the winters from 1978 to 2022.

图 2b 统计了近 45 年途径西伯利亚地区的反气旋生成频次分布图，可以看出反气旋的生成主要集中于贝加尔湖-阿尔泰山脉-蒙古高原一带，这些地区在冬季属于欧亚大陆的冷池区，强烈的辐射冷却有利于地面冷高压/反气旋的生成与加强。同时，上游地区包括欧洲西北区域、乌拉尔山以及里海邻近地区也出现少量

生成频次，表明在中纬度西风环流引导下，上游的反气旋系统可从大陆西部移入西伯利亚地区。分析图 2c 可得，西伯利亚反气旋消亡频数大值区的空间分布与生成源地类似，这表明该区域反气旋局地活动特征明显，对准定常的冬季西伯利亚高压系统形成起重要作用。不同的是，在西伯利亚以东区域包括鄂霍茨克海以西地区以及我国华北、东北区域均出现明显的反气旋消亡。通过分析图 2 发现，所得结果与以往的研究结果是相一致的 (Ioannidou and Yau 2008; Zhi et al., 2019)，说明 Mask R-CNN 模型较好地识别出了反气旋的长期活动特征。

进一步计算了 2D 反气旋（即反气旋影响范围内）所携带的冷空气，以直观地分析反气旋对冷空气的影响。从图 3 等值线场分析可知，冷气团质量随纬度增加，冷空气在欧亚大陆北部堆积。冷气团受到蒙古高原地区的高大山脉阻挡无法继续向东移动，并在西风作用下向北绕过山脉。在东亚地区，由于受到东亚大槽的向南伸展影响，在西伯利亚平原东部及阿尔泰山附近形成明显的经向冷空气入侵通道和冷舌结构。由图 3 中的冷空气质量贡献率分布（阴影）可知，西伯利亚东南区域、我国西部，特别是蒙古高原、我国东部地区反气旋的贡献率最大可达 60%，说明这些地区的冷空气频繁受到本文识别的西伯利亚反气旋活动影响，对这些区域的冬季气候以及寒潮事件可能存在较大影响。

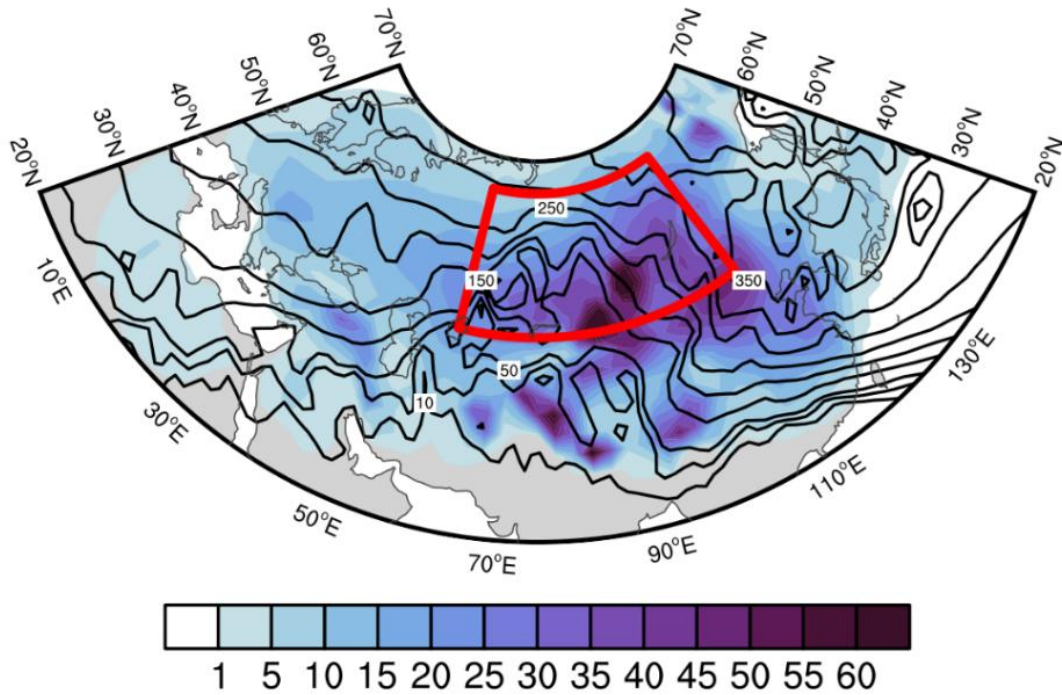


图 3 1978-2022 年反气旋携带冷空气质量贡献率（等值线，单位：%）和冬季平均冷空气质量（阴影，单位：hPa）

Fig. 3 Contribution of anticyclone-carried cold air mass (contours, unit: %) and winter mean cold air mass (shading, unit: hPa), 1978-2022.

3.2 巴伦支海秋季海冰对西伯利亚反气旋活动的影响

以往研究表明,前期北极海冰的急剧消融对欧亚大陆后期冬季天气状况存在影响(Honda et al., 2009),其中巴伦支海和喀拉海区域是北极海冰变化最显著的地区之一。为分析影响西伯利亚反气旋活动的外强迫因素以及前期预测信号,本小节主要关注秋季巴伦支海-喀拉海区海冰对冬季反气旋以及与其相联系的冷空气活动的可能影响。

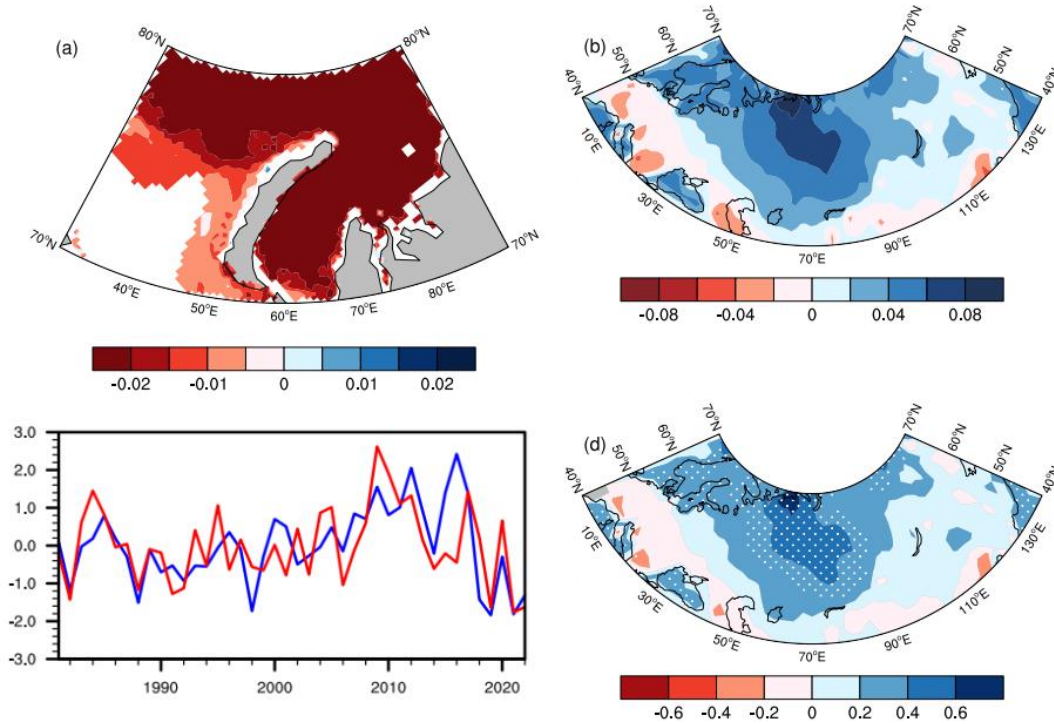


图 4 1981-2022 年巴伦支海-喀拉海区 (70° -80° N, 30° -90° E) 秋季海冰密集度 (单位: 100%) (a) 与欧亚大陆中纬度地区 (40° -70° N, 0° -140° E) 冬季反气旋携带冷空气质量 (b) (单位: hPa) 的 SVD 标准化奇异向量第一模态及 (c) 对应的标准化时间系数 (蓝线为海冰对应时间系数, 红线为冷空气质量对应时间系数) 和 (d) 相关系数 (白点区域通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 4 ((a), (b)) SVD standardized singular vectors of the sea ice density (unit: 100%) in autumn at the northwestern edge of Barents-Kara Sea area (70° -80° N, 30° -90° E) and the cold air mass (unit: hPa) carried by anticyclones in winter at mid-latitudes of Eurasia (40° -70° N, 0° -140° E), 1981-2022 first mode and (c) corresponding standardized time coefficients (blue line is the time coefficient corresponding to sea ice, red line is the time coefficient corresponding to cold air mass and (d) correlation coefficients (white-dotted region passes the significance level test of 0.05).

对 1981-2022 年巴伦支海-喀拉海区 (70° -80° N, 30° -90° E) 秋季海冰密集度与欧亚大陆中纬度地区 (40° -70° N, 0° -140° E) 反气旋携带冷空气质量进行了奇异向量(SVD)分析。图 4 中第一模态与第二模态的方差贡献率分别为 75.5%

和 10.6%，不难看出第一模态的方差贡献率远高于第二模态，因此后面主要关注 SVD 第一模态中 SIC 与冷空气质量的相互耦合联系。研究 SVD 第一模态(图 4a、b) 发现，当巴伦支海-喀拉海地区秋季海冰减少时，欧亚大陆中纬度地区反气旋携带冷空气质量增多，尤其是乌拉尔山、西西伯利亚平原和蒙古高原一带反气旋携带冷空气质量明显增多。同时这些区域也是第一模态秋季海冰密集度与反气旋携带冷空气质量相关性最大的地方(图 4d)。SVD 第一模态对应的时间变化系数的相关达 0.62，说明二者的变化具有显著的正相关联系。SVD 第一模态的海冰去趋势时间序列与原序列的相关系数高达 0.98，通过 0.01 显著性检验，这说明巴伦支海地区秋季海冰密集度的年际变化对西伯利亚地区冬季反气旋及其携带的冷空气质量都具有密切影响。综上所述，巴伦支海-喀拉海地区秋季海冰与欧亚大陆中纬度地区冬季冷空气质量活动基本呈反相位变化，即秋季海冰减少对应欧亚大陆中纬度地区冬季反气旋携带冷空气质量异常偏多，秋季巴伦支海-喀拉海地区的海冰异常变化对后期欧亚大陆反气旋携带的冷空气及其活动具有较好的指示意义。

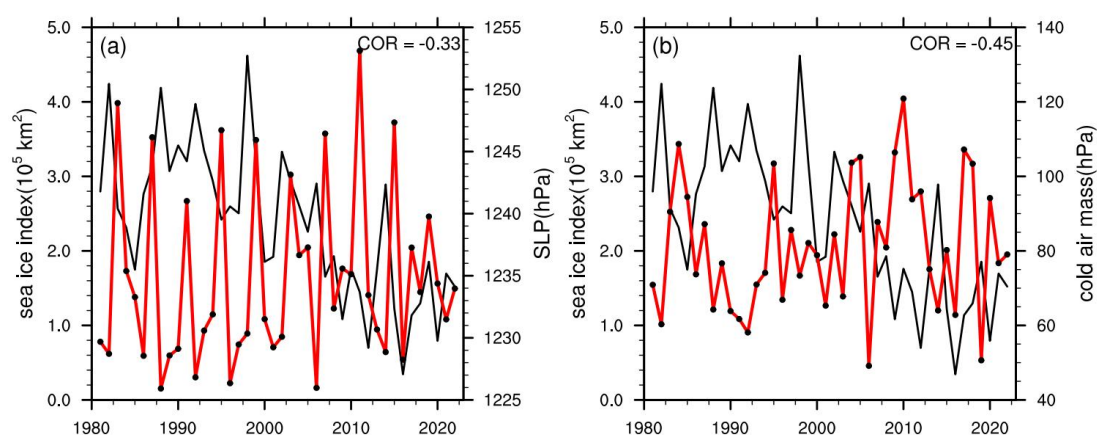


图 5 巴伦支海-喀拉海区 (70° - 80° N, 30° - 90° E) 秋季海冰面积指数 (黑线, 单位: $\times 10^5 \text{ km}^2$) 与西伯利亚地区反气旋冬季平均 SLP (图 a 红线, 单位: hPa)、冬季平均冷空气质量 (图 b 红线, 单位: hPa) 曲线 (海冰与 SLP 的回归系数通过 0.05 显著性水平, 海冰与冷空气的回归系数通过 0.01 显著性水平)

Fig. 5 Autumn sea ice area index (black line, unit: $\times 10^5 \text{ km}^2$) in the Barents-Karak Sea area (70° - 80° N, 30° - 90° E). and the winter mean sea level pressure (SLP) of the Siberian region (red line in Fig. a, unit: hPa) and the winter mean cold air mass (red line in Fig. b, unit: hPa). (Regression coefficients for sea ice and SLP pass the 0.05 level of significance, and for sea ice and cold air pass the 0.01 level of significance.)

为进一步研究海冰变化和西伯利亚高压之间的联系，图 5 进一步计算了秋季巴伦支海-喀拉海地区平均海冰指数 (Barents - Kara Index, BKI) 与冬季西伯利亚区平均反气旋中心海平面气压以及所携带冷空气质量累计总质量的时间演变。其

中, BKI 是将一天中每个格点的海冰密集度乘以对应格点面积后相加, 算出每天的海冰指数后计算季节平均。如图 5a 所示, BKI 与反气旋平均中心海平面气压的相关系数为-0.33 (通过 0.05 信度检验), 表明当 BKI 减少时, 冬季西伯利亚反气旋中心的平均海平面气压偏高, 反气旋活动偏强。如图 5b 所示, BKI 与反气旋携带的冷空气质量同样呈显著的负相关联系 ($r = -0.45$), 表明巴伦支海-喀拉海区的秋季海冰较少时, 欧亚大陆反气旋活动增强, 其携带的冷空气质量增多。进一步计算可得 1981-2022 年 BKI 指数与冬季西伯利亚大部分区域气温存在显著的正相关联系 (详见附图 1), 且与该区域平均 (45° - 65° N, 60° - 115° E) 的寒潮天数相关系数可达-0.33, 表明秋季海冰异常减少可能通过增强冬季西伯利亚反气旋活动以及其携带冷空气质量, 从而导致西伯利亚、蒙古高原和东亚地区的冬季更为寒冷。武炳义等 (2011) 也指出, 巴伦支海-喀拉海区秋冬季海冰减少对应西伯利亚高压和东亚冬季风的增强以及欧亚大陆的冷冬事件偏多。

3.3 数值模拟试验对海冰影响的验证

通过前两节的分析可知, 秋季巴伦支海-喀拉海区的海冰变化能够引起后期冬季反气旋及冷空气活动的变化。为进一步验证这种联系的机理, 本节尝试利用 CAM6 进行相应的敏感性试验。试验方案参考了 Smith 等人 (2019) 工作中第 1.1 和 1.6 项试验的设计, 即利用 PAMIP 项目中的欧亚大陆北部边缘邻近地区 (65° - 85° N, 20° - 150° E), 主要包括巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海及其周围区域 (Barents Sea, Kara Sea, Laptev Sea, BKL) 的当前/未来条件下的北极海冰密集度 (SIC) 和当前海面温度 (SST) 强迫数据模拟不同海冰条件下对应的欧亚大陆环流特征分布。需指出的是, PAMIP 试验中的 BKL 区域海温/海冰试验中的区域与前文所指在构造 BKI 指数时所用到的巴伦支海-喀拉海地区 (70° - 80° N, 30° - 90° E) 略有差异, 但由于两者在 1981-2022 年的时间序列相关系数为 0.93, 本文以 BKL 地区代表巴伦支海-喀拉海区域的海冰面积变化。根据该区域的海冰强迫场, 分为多冰和少冰两组试验, 每组试验分别运行 60 个冬季, 即每组试验利用 60 个集合样本。其具体的海冰和海温强迫场异常分布如图 6 所示。其中, 少冰/多冰年的海冰覆盖面积差异对比大值区集中在新地岛以北洋面变化, 且 78° N 以北地区的海冰覆盖面积变化幅度大于 78° N 以南地区, 数值相差可达 50%-60% (图 6a)。相应地, 海表温度合成差值大值区主要出现于北地群岛以西的欧亚大陆北边缘海区, 温度差异最大能达到 5K。在 75° N 以北的 BKL 地区, 多冰年与少冰年的秋季海表温度差异普遍处于 2K 以上 (图 6b)。

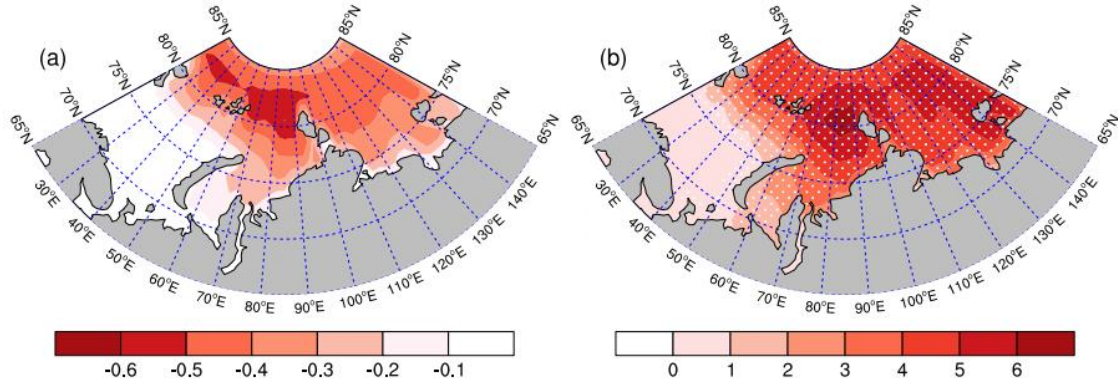


图 6 CAM6 在 BKL 地区 (65° - 85° N, 20° - 150° E) 海冰偏少与偏多条件下模拟得到的 (a) 秋季海冰覆盖面积占比 (单位: 100%) (b) 秋季海表温度 (单位: K) 的合成差值

Fig. 6 Synthetic differences in (a) percentage of area covered by sea ice in fall (unit: 100%) (b) fall sea surface temperature (unit: K) obtained from CAM6 simulations under conditions of low and high sea ice in the BKL region (65° - 85° N, 20° - 150° E).

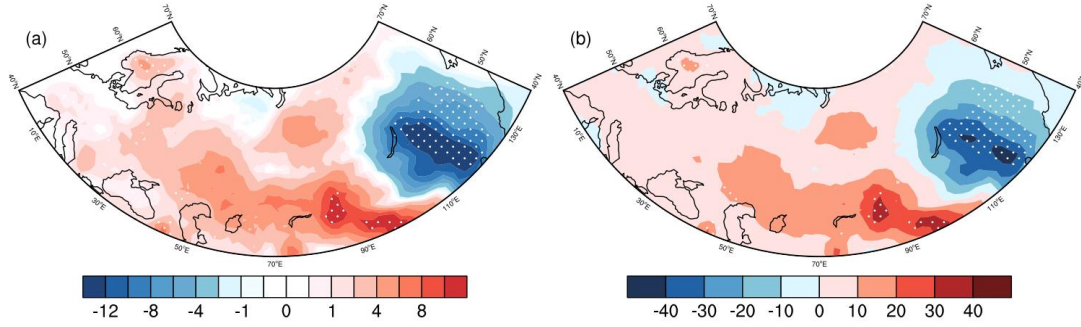


图 7 CAM6 在 BKL 地区 (65° - 85° N, 20° - 150° E) 海冰偏少和海冰偏多情况下模拟得到的 (a) 反气旋频次 (单位: 次 $\cdot$ 年 $^{-1}$), (b) 反气旋出现时刻对应的 SLP 合成差值 (单位: hPa, 白点区域通过 0.1 的显著性水平检验)

Fig. 7 (a) anticyclone frequency (unit: times $\cdot$ year $^{-1}$), (b) SLP synthetic difference (unit: hPa, white-dotted area passes significance level test of 0.1) corresponding to the moment of anticyclone occurrence, obtained by CAM6 simulation in the BKL region (65° - 85° N, 20° - 150° E) under the scenarios of low sea ice and high sea ice.

利用 Mask R-CNN 模型对试验模拟得到的每日四次 SLP 数据进行反气旋系统识别, 获取两种不同 BKL 海冰条件下的欧亚大陆反气旋识别数据集, 进而利用该识别数据计算 BKL 海冰偏少与偏多条件下对应的反气旋频次和反气旋对应 SLP 的合成差值 (图 7)。随着秋季 BKL 海冰减少, 除贝加尔湖以东和中国东北部地区, 欧亚大陆其他地区尤其是欧亚大陆中部均呈现为反气旋频次增多。同时少冰年份反气旋出现时对应的 SLP 也明显上升, 尤其是蒙古高原地区反气旋增强的情况尤为显著, 表明海冰减少有利于反气旋强度增强。这与前面再分析资料分析结果相一致, 当巴伦支海地区海冰减少时, 有利于欧亚大陆东北亚区域以

外的中高纬区域反气旋活动增强。所不同的是，模拟结果显示在东欧、蒙古高原下游地区尤其东亚沿海地区反气旋频次以及对应时刻 SLP 存在明显下降，这可能是由于反气旋活动变化引起的欧亚大陆中部积雪变化，通过影响局地加热，进而对下游大气环流产生的遥相关作用有关（Ye and Wu, 2017）。

由图 8 可知，在区域海冰偏少的条件下，西欧-地中海地区、中国东北-库页岛一带气压显著降低，欧亚大陆其余地区尤其是纳维亚半岛-乌拉尔山-西西伯利亚-蒙古高原出现气压增强的情况，其中蒙古高原以南地区的气压增强尤为明显，这种气压增强的背景有利于反气旋系统的发展与维持。海冰面积减小也对应着东欧、蒙古下游、中国东北地区冷空气质量合成差值异常增加（图 8b），这种配置有利于该地区东北冷涡发展以及东亚大槽加强，使得该地气温持续偏低，增大东亚极端寒冷事件出现的概率。

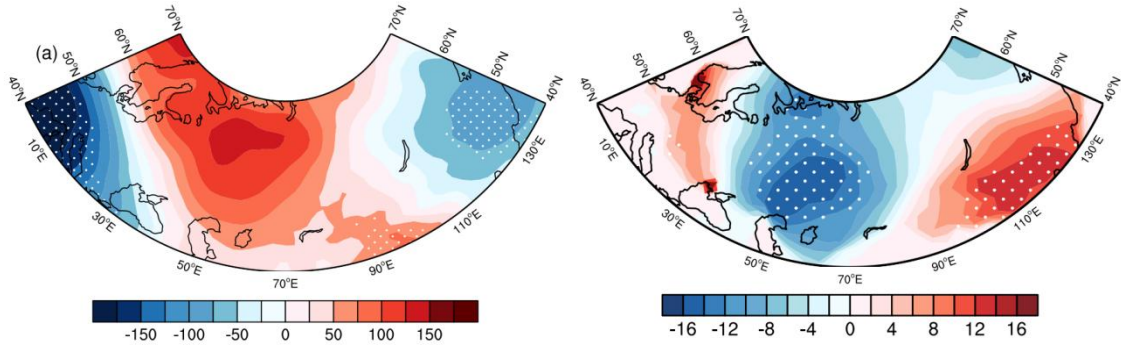


图 8 CAM6 在 BKL 地区（65°-85° N，20°-150° E）海冰偏少和海冰偏多情况下模拟得到的（a）SLP（单位：hPa），（b）冷空气质量的合成差值（单位：hPa，白点区域通过 0.1 的显著性水平检验）

Fig. 8 Synthetic differences in (a) SLP (unit: hPa), (b) cold air quality (unit: hPa, white dotted area passes the significance level test of 0.1) obtained from CAM6 simulations in the BKL region (65°-85° N, 20°-150° E) for the case of low and high sea ice.

3.4 可能的影响机制

海冰的异常变化可以通过改变海洋的热量存储（Lu et al., 2019）以对后期西伯利亚地区反气旋活动变化产生作用。图 9 首先给出了 PAMIP 试验中的区域海冰偏少和偏多情况巴伦支海-喀拉海地区海冰面积指数与海温的逐月变化，可以看出海冰偏少时，巴伦支海-喀拉海地区海冰面积指数偏少而且区域海表温度持续偏高，同时冬季（DJF）的区域海温差异明显大于秋季（SON）。对比区域海冰偏少年和偏多年海冰面积指数情况发现，11 月海冰面积指数占比差异最大达到 $1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，12 月和次年 1 月的海温差异最明显可达 5K，这表明海冰与海温对外强迫因子的敏感性响应有月份差异。由于海洋的热惯性作用，使得前期由于海冰减少导致的太阳短波辐射增加并引起了海洋热量存储，但因为夏秋季北极地

区低层主要表现为大气温度高于海洋，存储的海洋热量释放受到抑制，因此海洋的热惯性反馈将前期储存的能量转移到冬季（Screen and Simmonds, 2010; Hu et al., 2022）。

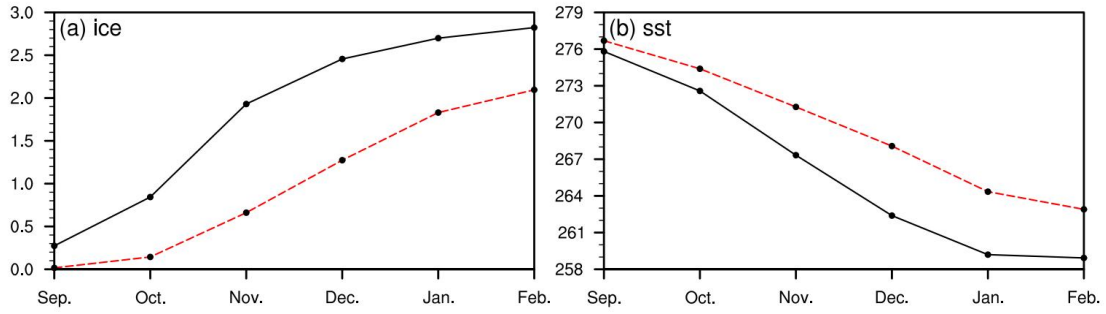


图 9 CAM6 在 BKL 地区（65° -85° N， 20° -150° E）海冰偏少（红色虚线）和海冰偏多（黑色实线）情况下模拟得到的巴伦支海-喀拉海地区（70° -80° N， 30° -90° E）（a）海冰面积指数（单位: $\times 10^5 \text{ km}^2$ ）（b）海温（单位: K）的区域平均值逐月变化（9 月-次年 2 月）

Figure 9 Monthly variations (September-February of the following year) in the regional mean of (a) sea ice extent index (unit: $\times 10^5 \text{ km}^2$) (b) SST (unit: K) in the Barents-Kara Sea region (70° -80° N, 30° -90° E) simulated by CAM6 in the BKL region (65° -85° N, 20° -150° E) in the context of both the low(red dashed) and the high sea ice(black solid) scenarios.

由于少冰和多冰情况下前期秋季海洋热量存储的差异，导致海洋表面热通量和长波辐射通量即海洋向大气热量释放存在明显月份差异（图 10a）。根据少冰与多冰条件下的合成差值情况，巴伦支海-喀拉海上海洋热通量普遍为正，且冬季的地表热通量明显强于秋季（图 10b）。同时，长波辐射通量在巴伦支海-喀拉海地区也具有一致的正大值异常区，表明前期秋季海冰偏少有利于后期冬季海洋热量向大气释放，对该区域气柱加热。Honda 等（2009）也指出，当前期海冰减少时，对应海区冬季安海洋对大气加热，并可激发向南传播的 Rossby 波列从而引起欧亚中纬度区域冷高压增强以及气温下降。

前文分析表明，巴伦支海-卡拉海区域海冰的密集度变化将会导致海洋热容量储存的季节不对称性，而这种季节性能量释放的差异可减弱中高纬度的温度经向梯度，根据热成风原理，可减弱中纬度西风以及影响阻高等环流系统变化（Li et al., 2020）。为分析海冰异常分布对西伯利亚地区反气旋活动以及冷空气活动的影响机理，参考 Luo（2019a, 2019b）等提出的 NMI 模型，通过计算位涡经向梯度 PV_y ，诊断不同海冰配置对 PV_y 以及阻塞高压造成的可能影响。其中，500 hPa 的位涡经向梯度的近似计算公式 $PV_y = \beta - U_{yy} + FU$ ($F \approx 1$)，所有值通过特征尺度标准化，因此变量是无量纲的，该物理量对阻塞能量的频散性和非线性具有较好的指示作用（Luo and Zhang, 2020）。当背景场中 PV_y 小，区域频散性弱，非

线性强，阻塞的生命期更长，反之阻塞的生命期短。在相同条件下，阻塞生命期越长，其强度越强，即 PV_y 可以作为决定阻塞的关键因子，并显著影响天气尺度涡旋的寿命、强度和结构不对称性。

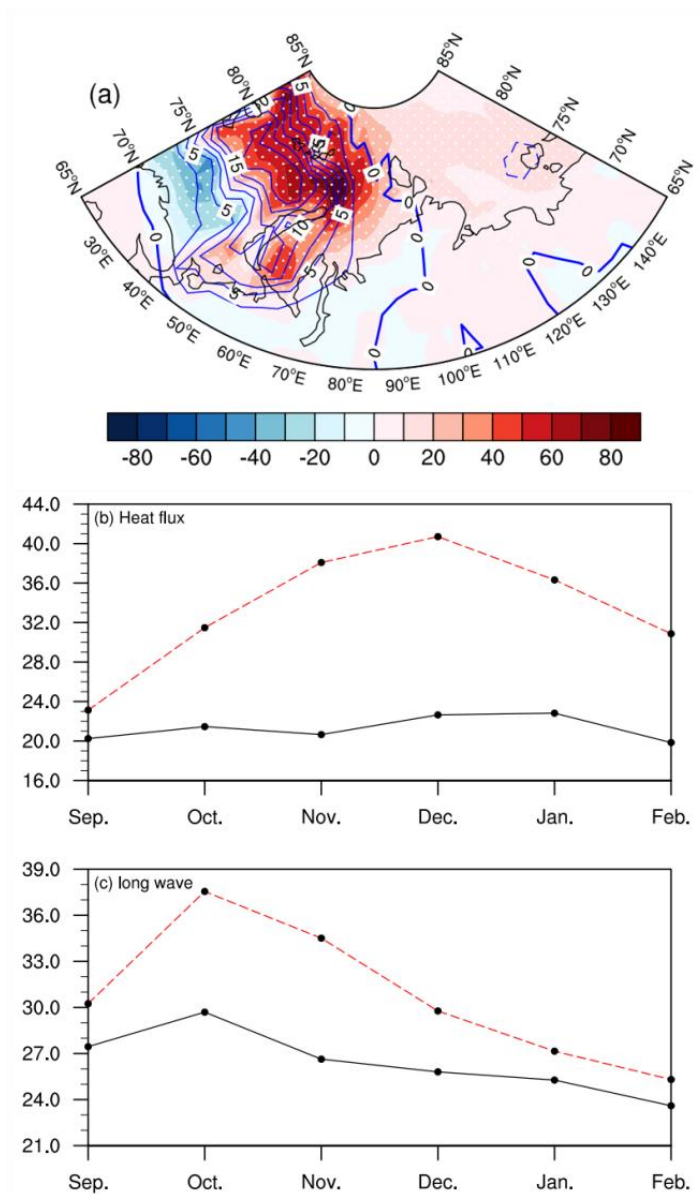


图 10 CAM6 在 BKL 地区 (65°-85° N, 20°-150° E) 海冰偏少 (红色虚线) 和海冰偏多 (黑色实线) 情况下模拟得到的 (a) 冬季热通量 (阴影, 单位: $W \cdot m^{-2}$, 白点区域通过 0.1 的显著性水平检验) 和长波辐射通量 (等值线, 单位: $W \cdot m^{-2}$) 的合成差值及 (b) 冬季热通量和 (c) 长波辐射通量的区域平均值逐月变化 (9 月-次年 2 月)

Fig. 10 Synthetic difference between (a) winter heat flux (shaded, unit: $W \cdot m^{-2}$, white-dotted area passes significance level test of 0.1) and long-wave radiation fluxes (contours, unit: $W \cdot m^{-2}$) simulated by CAM6 in the BKL region (65°-85° N, 20°-150° E) under low sea-ice (red dashed line) and high sea-ice (black solid line) scenarios and (b) monthly changes in regional means of winter heat fluxes and (c) long-wave radiation fluxes (September-February of the following year)

根据 PV_y 的计算公式可知，其主要受背景纬向风和非均匀经向切变的影响，结合图 11 可知，区域海冰减少后，除了东亚、西北太平洋及新地岛以南临海区域，大部分欧亚大陆区域尤其是中纬度 $40^\circ - 60^\circ \text{N}$ 纬带的 PV_y 显著减小，将使纬向风梯度 U_y 在 40°N 附近为负而在 60°N 附近为正，即 U_{yy} 为正，结合公式可知，海冰减少后， PV_y 在中纬度将减小。在乌拉尔区域附近， PV_y 与阻高活动间存在相互正反馈，即该区域的阻塞持续时间长，强度强，有利于乌拉尔山阻高在此地维持发展，导致东亚冬季寒冷趋势加剧，极端寒冷事件频发，与前文所得结论一致。

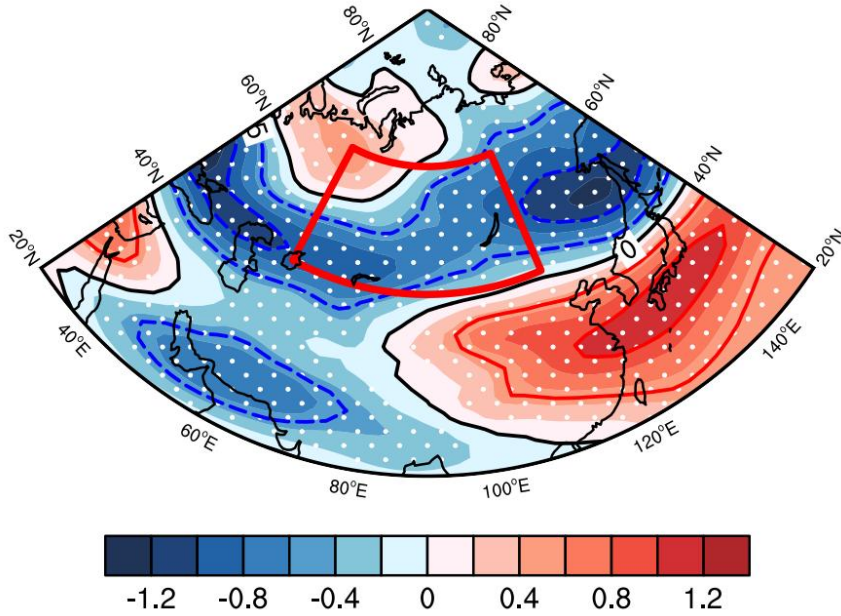


图 11 CAM6 在 BKL 地区 ($65^\circ - 85^\circ \text{N}$, $20^\circ - 150^\circ \text{E}$) 海冰偏少与偏多条件下模拟得到的无量纲 500 hPa 位涡经向梯度 (PV_y , 白点区域通过 0.05 的显著性水平检验) 和纬向风 (单位: m s^{-1} , 正值为红实线, 负值为蓝虚线, 0 为黑实线) 的合成差值

Fig. 11 Synthesis of nondimensional 500 hPa meridional potential vortex gradient (PV_y , white dotted area passes significance level test of 0.05) and latitudinal winds (unit: m s^{-1} , positive values are red solid lines, negative values are blue dashed lines, 0 values are black solid line) obtained by CAM6 simulation in the BKL region ($65^\circ - 85^\circ \text{N}$, $20^\circ - 150^\circ \text{E}$) under conditions of low and high sea ice scenarios.

为了进一步研究区域海冰密集度变化对阻塞生成的影响，基于 Charney (1981) 等人的客观阻塞检测方法，即 500hPa 位势高度的异常场大于 200 gpm 的异常现象持续 3 天以上。图 12 模拟了不同海冰条件下冬季阻塞频率的合成。结果表明，在海冰偏少条件时， $60^\circ - 90^\circ \text{E}$ 范围内阻高持续的平均天数为 4.14 天，东欧平原、乌拉尔山以及东亚地区的阻塞发生频率增大，在海冰偏多条件时， $60^\circ - 90^\circ \text{E}$ 范围内阻高持续的平均天数为 3.6 天。这与前文结论一致，即海冰减少后，

有利于乌拉尔山附近阻高的维持,将导致欧亚大陆中高纬度地区的冬季地表温度降低,有利于反气旋在该地的维持。因此,从数值模拟实验也验证了区域海冰异常对反气旋活动的影响。

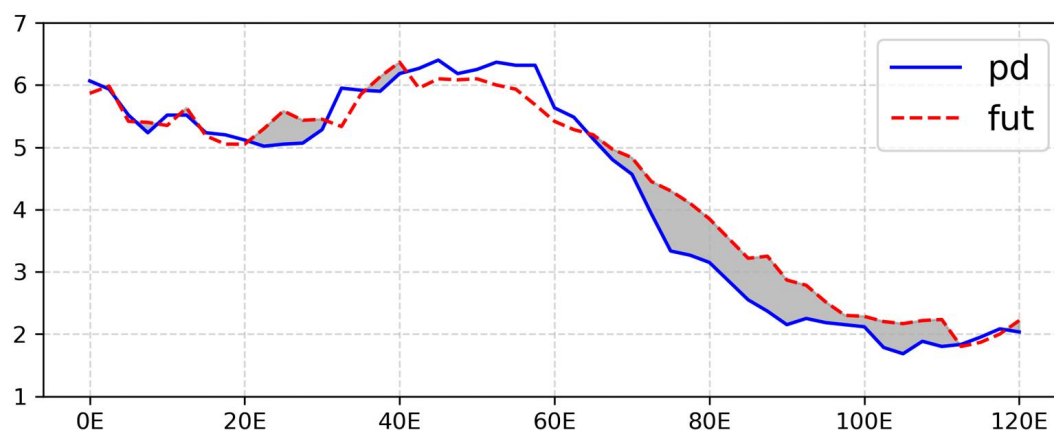


图 12 CAM6 在 BKL 地区 (65° - 85° N, 20° - 150° E) 海冰偏多和海冰偏少情况下模拟得到的冬季阻塞频率, 实线 (长虚线) 表示海冰偏多 (少) 年 (阴影区表示通过 0.1 的显著性水平检验)

Figure 12 Synthetic differences in winter blockage frequency obtained from CAM6 simulations in the BKL region (65° - 85° N, 20° - 150° E) for both high and low sea ice scenarios, with the solid curve (long dashed line) indicating the high (low) sea ice year (shaded area indicates passing the significance level test of 0.1).

4 结论与讨论

本文探讨了高纬度地区秋季海冰变化与西伯利亚地区冬季反气旋活动之间的联系,并尝试解释巴伦支海地区秋季海冰变化情况对后期反气旋活动的可能影响机制,最后利用数值模式模拟验证了巴伦支海地区海冰偏少对于西伯利亚地区反气旋活动的影响,主要研究结论如下所示:

(1) 巴伦支海-喀拉海地区秋季海冰与西伯利亚地区冬季反气旋携带的冷空气质量呈显著反位相变化。当巴伦支海-喀拉海区的秋季海冰较少时,反气旋频次与反气旋中心点 SLP 随之增加,同时反气旋携带的冷空气质量增多。

(2) 巴伦支海秋季海冰条件变化对于区域内热通量和长波辐射通量具有明显的调制作用。通过引起区域海洋能量储存增加,秋季海冰面积指数减少将导致后期更多海洋热量向大气传递,影响海洋和大气之间的局部能量转移,从而降低冬季极区与中纬度间的经向温度梯度,进而减弱中纬度西风并造成西伯利亚反气旋活动增强。

(3) 进一步利用大气环流模式 CAM6,设计区域海冰变化的敏感性试验,其结果也表明在海冰偏少条件下,除贝加尔湖以东和中国东北部地区,欧亚大陆

其他地区均呈现出反气旋频次增多、反气旋对应气压增强,尤其是蒙古高原地区反气旋增强的情况十分显著。其中,海冰减少将导致中纬度出现异常西风减弱,引起位涡经向梯度 PV_y 的显著降低,从而导致东欧平原、乌拉尔山以及东亚地区的阻塞发生频率增大,并使得欧亚大陆中纬度大部分区域反气旋活动增强,气温下降。

本文初步揭示了由于秋季欧亚大陆西北部边缘海冰消融速度加快,对西伯利亚地区反气旋及其携带冷空气的影响及可能途径。然而,北极海冰与冬季欧亚大陆中纬度气候之间的相关联系可能受到大气内部变率(Cai et al., 2023)及外强迫因子(王婧和吕俊梅, 2021)的共同调节,因此受多方面因素影响。不同时期及不同区域海冰的消融,也许会对欧亚大陆冬季天气产生不同的影响(He et al., 2023),从而导致大气环流异常变化。在北极区域快速增暖背景下,未来海冰与中纬度气候变化的相互联系是否稳定,主要因素有哪些方面,仍然需要更加深入的研究与探讨。此外,本文研究结果主要通过大气环流模式 CAM6 进行验证,该模式型具有相对粗糙的平流层表示(Danabasoglu et al., 2020),没有臭氧和其他平流层成分的预测化学模块,因此被称为“低顶”模型。而“高顶”模型 WACCM6 中存在交互式化学模块,对海冰影响北极区域平流层以及中纬度气候异常可能具有更好的模拟效果(Zhang et al., 2018)。现有模型在模拟海冰损失和对流层-平流层耦合缺乏一致性,因此有待进一步对不同模型进行评估、了解模拟偏差的原因,加深探究北极海冰变化对西伯利亚地区反气旋活动的影响。

参考文献 (References)

- Balmaseda M A, Ferranti L, Molteni F, et al. 2010. Impact of 2007 and 2008 Arctic ice anomalies on the atmospheric circulation: Implications for long-range predictions[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(652): 1655-1664. doi: 10.1002/qj.661
- Babar B, Graversen R, Boström T. 2019. Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5[J]. Solar Energy, 182(Apr.): 397-411. doi: 10.1016/j.solener.2019.02.058
- Charney J G, Shukla J, Mo K C. 1981. Comparison of a barotropic blocking theory with observation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 38(4): 762-779. doi: 10.1175/1520-0469(1981)038<0762:CO;2
- Chen L, Tan B, Kvamstø N G, et al. 2014. Wintertime cyclone/anticyclone activity over China and its relation to upper tropospheric jets[J]. Tellus: Series A, 66(21889): 969-975. doi: 10.3402/tellusa.v66.21889
- Cai Z Y, You Q L, Chen H W. 2023. Interdecadal variability of the warm Arctic-cold Eurasia pattern linked to the Barents oscillation[J]. Atmospheric Research, 287(May): 1-22. doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106712

- Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat Budget of the Siberian High and the Winter Monsoon[J]. *Mon Wea Review*, 115(10): 2428-2449. doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<2428:HBOTSH>2.0.CO;2
- Ding Y H. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relations to cold surge in East Asia[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 44(1-4): 281-292. doi: 10.1007/BF01026822
- Danabasoglu G, Lamarque J F, Bacmeister J, et al. 2020. The community earth system model version 2 (cesm2) [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(2). doi: 10.1029/2019MS001916
- Favre A, Gershunov A .2006. Extra-tropical cyclonic/anticyclonic activity in North-Eastern Pacific and air temperature extremes in Western North America[J]. *Climate Dynamics*, 26(6): 617-629. doi:10.1007/s00382-005-0101-9
- Francis J, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(6): 1-6 . doi: 10.1029/2012GL051000
- Gong D Y, Ho C H. 2002. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 72(1-2): 1-9.
- Gao Y Q, Sun J Q, Fei L, et al. 2015. Arctic Sea Ice and Eurasian Climate: A Review[J]. *Advances in atmospheric science*, 32(1): 92-114. doi: 10.1007/s00376-014-0009-6
- Honda M, Inoue J, Yamane S. 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. *Geophysical Research Letters*, 36(8): 1-6. doi: 10.1029/2008gl037079
- He K M, Gkioxari G, Dollár P, et al. 2017. MaskR-CNN[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 322: 2961–2969. doi: 10.1109/TPAMI.2018.2844175
- He S P, Xu X P, Furevik T , et al. 2020. Eurasian Cooling Linked to the Vertical Distribution of Arctic Warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 47(10): 1-10. doi: 10.1029/2020GL087212
- Huang B Y, Liu C Y, Banzon V, et al. 2021. Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1[J]. *Journal of Climate*. 34(8): 2923-2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1
- Hu X M, Liu Y C, Kong Y Q, et al. 2022. A Quantitative Analysis of the Source of Inter-Model Spread in Arctic Surface Warming Response to Increased CO₂ Concentration[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(18). doi: 10.1029/2022GL100034
- He X L, Zhang R M, Ding S Y, et al. 2023. Decadal Changes in the Linkage Between Autumn Sea Ice and the Winter Eurasian Temperature in the 20th Century[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(14). DOI: 10.1029/2023GL103851
- Ioannidou L, Yau M K. 2008. A climatology of the Northern Hemisphere winter anticyclong[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres.*, 113(D8): 197-219. doi: 10.1029/2007JD008409
- Iwasaki T, Shoji T, Kanno Y. 2014. Isentropic Analysis of Polar Cold Airmass Streams in the Northern Hemispheric Winter[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(6): 2230-2243. doi:

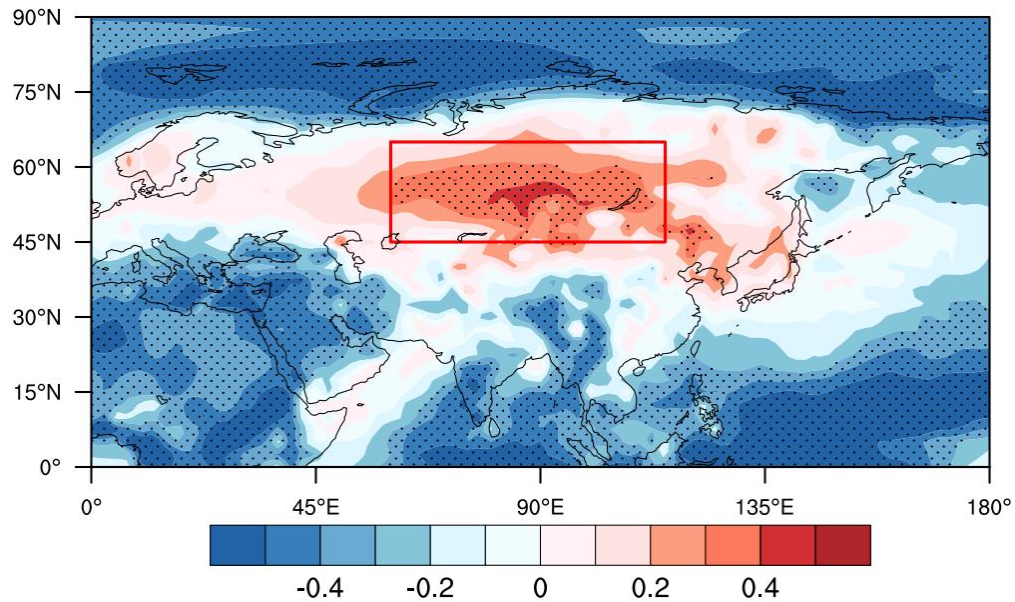
10.1175/JAS-D-13-058.1

- Kim B M, Son S W, Min S K, et al. 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss[J]. *Nature Communications*, 5(Sep.). doi: 10.1038/ncomms5646
- Lu C H, Li K L, Xie S Q, et al. 2019. Month-to-Month Variability of Autumn Sea Ice in the Barents and Kara Seas and Its Relationship to Winter Air Temperature in China[J]. *Hindawi*, 2019(2): 1-13. doi: 10.1155/2019/4381438
- Luo D H, Zhang W Q, Zhong L H, et al. 2019a. A Nonlinear Theory of Atmospheric Blocking: A Potential Vorticity Gradient View[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76(8): 2399-2427. doi: 10.1175/JAS-D-18-0324.1
- Luo D H, Chen X D, Overland J ,et al. 2019b. Weakened Potential Vorticity Barrier Linked to Recent Winter Arctic Sea Ice Loss and Midlatitude Cold Extremes[J]. *Journal of Climate*, 32(14): 4235-4261. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0449.1
- Lu C H, Kong Y, Guan Z Y. 2020. A mask R-CNN model for reidentifying extratropical cyclones based on quasi-supervised thought[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 15011. doi: 10.1038/S41598-020-71831-Z
- Li M Y,Luo D H, Simmonds I, et al. 2020. Anchoring of atmospheric teleconnection patterns by Arctic Sea ice loss and its link to winter cold anomalies in East Asia[J]. *International Journal of Climatology*, 41(1): 547-558. doi: 10.1002/joc.6637
- Li Y F, Ren R C, Cai M. 2020. Climatological features of blocking highs from the perspective of air mass and mass transport[J]. *International Journal of Climatology*, 40(2): 782-794. doi: 10.1002/joc.6238
- Luo D H, Zhang W Q. 2020. A Nonlinear Multiscale Theory of Atmospheric Blocking: Dynamical and Thermodynamic Effects of Meridional Potential Vorticity Gradient[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(7): 2471-2500. doi: 10.1175/JAS-D-20-0004.1
- Müller V G, Gan A M, Piva D E , et al. 2015. Energetics of wave propagation leading to cold event in tropical latitudes of South America. [J]. *Climate dynamics*, 45(1): 1-20. doi: 10.1007/s00382-015-2532-2
- Overland J E, Wang M Y. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. *Tellus Series A-dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(1): 1-9. doi: 10.3402/tellusa.v62i1.15661
- 秦育婧, 卢楚翰. 2017. 冬季欧亚大陆反气旋活动特征及其与中国气温的关系[J]. *大气科学学报* 40(3): 418-424. Qin Yujin, Lu Chuhan. 2017. Characteristics of anticyclonic activities in Eurasia in winter and their relationship with air temperature in China[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*. 40(3): 418-424. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150405001
- Screen J A, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature

- amplification[J]. *Nature*, 464(7293): 1334-1337. doi: 10.1038/nature09051
- Song L, Wang L, Chen W., et al. 2016. Intraseasonal variation of the strength of the east Asian trough and its climatic impacts in boreal winter[J]. *Journal of Climate*, 29(7): 2557. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00834.1
- Smith D M, Screen J A, Deser C, et al. 2019. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification[J]. *Geoscientific Model Development*, 12(3): 1139-1164. doi: 10.5194/gmd-12-1139-2019
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi geostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(6): 608-627. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- 田笑 .2019. 北半球温带反气旋的气候统计特征[J]. *科学技术与工程*, 19(22): 51-62. Tian Xiao .2019. Climatological statistical characteristics of temperate anticyclones in the Northern Hemisphere[J]. *Science Technology and Engineering*, 19(22): 51-62. doi: CNKI:SUN:KXJS.0.2019-22-007
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(19): 3-1-3-4. doi: 10.1029/2002GL015373
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(30): 3220-3228. doi: 10.1007/s11434-011-4696-4
- Wang L, Chen W. 2013. The East Asian winter monsoon: re-amplification in the mid-2000s[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(04): 430-436. doi: 10.1007/s11434-013-0029-0
- 王婧, 吕俊梅. 2021. "暖北极—冷欧亚"模态的年代际变化及其与北大西洋海温的联系[J]. *大气科学*, 45(04): 915-930. Wang Jing, Lu Junmei. 2021. Interdecadal variability of the "warm Arctic-cold Eurasia" mode and its connection with North Atlantic SST[J]. *Atmospheric Science*, 45(04): 915-930.
- Ye K H, Wu R G. 2017. Autumn snow cover variability over northern Eurasia and roles of atmospheric circulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(07): 847-858. doi: 10.1007/s00376-017-6287-z
- Zhang C D, Lu C H, Guan Z Y. 2012. Weakened cyclones, intensified anticyclones and recent extreme cold winter weather events in Eurasia[J]. *Environmental Research Letters*, 7(4): 044044. doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044044
- Zhang P F, Wu Y T, Simpson R I, et al. 2018. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss[J]. *Science Advances*, 4(7): eaat6025. doi: 10.1126/sciadv.aat6025
- Zhi X F, Tian X, Liu P, et al. 2019. Interdecadal variations in winter extratropical anticyclones in East

Asia and their impacts on the decadal mode of East Asian surface air temperature[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(6): 1763-1775. doi: 10.1007/s00703-019-00684-7

Zhang Y M, Lu C H. 2022. Detection of the synoptic southeastward-extending Siberian cold high during 1978-2017[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(3): 11-17. doi: 10.1016/J.AOSL.2021.100140



附图 1 1981-2022 年 BKI 指数与 t_2m 的相关系数（黑点区域通过 0.1 的显著性水平检验，红框为西伯利亚地区）

Attachment 1 Correlation coefficients of the BKI index with t_2m for 1981-2022 (black-dotted area passes the significance level test of 0.1, red box is the Siberian region)