

1940~2023年北极近地面风速变化的局地与环流驱动分析

纪君龙¹, 宋世轩²

¹平度市李园街道门村中学, 山东 青岛

²山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年9月25日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月30日

摘要

在北极放大效应持续增强的背景下, 北极近地面风速发生显著长期变化, 风速演变同时受到局地热力 - 下垫面过程和北半球大尺度大气环流的共同调控。基于1940~2023年ERA5再分析数据集, 综合运用趋势分析、皮尔逊相关、偏相关、场回归诊断等统计方法, 以60°N以北北极区域为研究对象, 分别解析北极升温引发的对流层低层稳定度改变、海冰消退带来的地表粗糙度变化对局地风速的调制作用, 系统对比北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、北极偶极子(AD)、太平洋 - 北美型(PNA)四类环流模态对北极风速的影响空间范围与季节差异。结果表明: 北极升温与风速变化时空匹配度较高, 升温通过降低对流层低层静力稳定度促进高空动量向下传输, 该驱动效应在冬季最为突出; 海冰消退造成地表粗糙度下降对风速的调制作用仅显著体现在夏季, 秋冬季节该作用不明显。大尺度环流对风速调控存在明显空间和季节分异: AO对北极海域具备全域调控能力, 年代际波动与北极风速年代际振荡高度同步; NAO影响主要集中于北大西洋海域, 冬季信号最强; AD仅在春季对亚欧大陆北部边缘海产生显著作用; PNA的影响高度局地化, 仅显著作用于白令海峡北部, 冬春季效果明显。研究区分了局地过程与大气环流对北极风速的贡献以及各自的季节分工, 可为理解北极海冰 - 大气相互作用提供科学依据。

关键词

北极, 近地面风速, 北极放大, 对流层稳定度, 海冰消退, 大气环流模态

Analysis of Local and Circulation Drivers of Arctic Near-Surface Wind Speed Changes from 1940 to 2023

Junlong Ji¹, Shixuan Song²

¹Mencun Middle School of Liyuan Sub-District in Pingdu City, Qingdao Shandong

²College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan Shandong

文章引用: 纪君龙, 宋世轩. 1940~2023 年北极近地面风速变化的局地与环流驱动分析[J]. 地理科学研究, 2026, 15(6): 1015-1030. DOI: 10.12677/gser.2026.156092

Abstract

With the intensification of Arctic amplification, Arctic near-surface wind speed has experienced prominent long-term variations, which are jointly controlled by local thermal-surface processes and large-scale northern-hemisphere atmospheric circulation. Based on ERA5 reanalysis dataset covering 1940~2023, statistical methods including trend analysis, Pearson correlation, partial correlation and field regression diagnosis were adopted for the region north of 60°N. This study analyzed the modulation effects of lower-tropospheric static stability change induced by Arctic warming and surface-roughness variation caused by sea-ice retreat on local wind speed. The spatial coverage and seasonal differences of wind speed regulated by Arctic Oscillation (AO), North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Dipole (AD) and Pacific-North American pattern (PNA) were systematically compared. The results show that spatiotemporal variations of wind speed match well with Arctic warming. Warming enhances downward transport of upper-air momentum by reducing lower-tropospheric static stability, and this effect reaches its maximum in winter. The modulation of wind speed caused by surface-roughness reduction due to sea-ice retreat is significant only in summer and becomes insignificant in autumn and winter. Large-scale circulation exhibits obvious spatial-seasonal heterogeneity in regulating wind speed. AO exerts pan-Arctic influence over Arctic seas, and its decadal fluctuation is highly consistent with decadal wind-speed oscillation. NAO mainly affects the North Atlantic Ocean with strongest signal in winter. AD has notable impacts on marginal seas of northern Eurasia only in spring. PNA shows highly localized effect that is significant only in northern Bering Strait, and works prominently in winter and spring. This paper distinguishes contributions to Arctic wind speed and seasonal division between local processes and atmospheric circulation, and provides scientific support for understanding Arctic sea-ice-atmosphere interaction.

Keywords

Arctic, Near-Surface Wind Speed, Arctic Amplification, Tropospheric Stability, Sea-Ice Retreat, Atmospheric Circulation Modes

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

北极作为地球气候系统重要的调节器与放大器, 正经历着全球范围内最为剧烈和迅速的气候与环境变化。自 20 世纪下半叶以来, 特别是近三四十年, 北极地区以全球平均水平两到三倍的速率快速增暖, 这一现象被科学家们称为“北极放大”效应(Arctic Amplification) [1]-[3]。这种放大效应不仅表现为孤立的气温升高, 更是触发北极乃至全球气候系统产生连锁反应的关键驱动因素。它直接导致了北极海冰范围的急剧退缩、格陵兰冰盖的加速消融、永久冻土的持续退化以及生态系统的一系列剧变(IPCC, 2023) [4]。迄今, 北极变暖背景下的海冰消融与极端高温事件得到了学界的广泛关注[5]-[9]。相比之下, 近地面风速的变化及变化机理等相关研究仍有待进一步深入。

近地面风速变化深刻影响着北极气候系统中的局地物理过程、生态环境与人类的生产生活。在局地的物理过程层面, 近地面风速直接决定了北极海冰的漂移速度与辐合/辐散强度, 是塑造北极海冰空间分布格局的关键动力因子[10] [11]。例如: 在 2020/21 冬季, 异常强风事件引发了从北冰洋中心海域向格陵

兰海等低纬度海域的海冰输送, 而滞留在这些低纬度区域的海冰在即将到来的温暖季节中更容易发生融化[12]。在生态环境方面, 近地面风驱动着海洋表层流场与混合层过程, 调控营养盐的输运与分布, 进而影响北冰洋海域的海洋初级生产力[13][14]。同时, 近地面风速变化通过改变海冰分布与栖息地质量, 还能深刻影响到作为北极顶级捕食者的北极熊的行为与生存。在哈德逊湾西部, 风速和风向是调控北极熊向冰面迁移的关键环境变量, 在结冰期风速增大能够加速海冰向陆地方向的漂移, 可促使北极熊提前进入冰面觅食[15]。波弗特海南部的北极熊在夏季面临海冰严重消退时, 持续高风速事件又会迫使它们提前离开退化的海冰栖息地、向陆地迁移[16]。对于人们的生产生活而言, 北极的强风事件还会加剧海岸侵蚀, 进而威胁北冰洋沿岸社区安全[17][18]。强风还会直接影响到北极地区人们的出行安全甚至生命安全。例如近期发生的, 据多家媒体报道 2026 年 2 月 14 日前后位于巴伦支海沿岸的北极旅游胜地“极光村”捷里别尔卡遭遇持续强风和暴雪袭击, 导致包括数百名中国游客在内的约 480 人被困, 在 48 小时天气情况好转之后才得以撤离。这一事件生动表明, 北极强风不仅影响自然过程, 更直接威胁人类活动安全。在北极开发的战略实践层面, 未来变暖背景下海冰的持续消退将显著延长北极航道的通航窗口期, 甚至可能在本世纪中叶实现跨北极航道的季节性商业通航, 但是更高风速势必会引起更大的风浪和涌浪, 这将直接关系到新兴的北极航道的航行安全以及通航效率、通航窗口期与商业可行性, 对全球贸易与发展格局产生潜在影响[19]。因此, 对北极近地面风速变化开展系统性研究, 具有重要的科学价值与现实迫切性。

近年来的再分析资料一致表明, 在北极显著增温与海冰持续消退的背景下, 20 世纪中期以来北冰洋上空的近地面风速呈现出明确的增强趋势, 尤其是在喀拉海以及巴伦支海域附近[20]。针对这一现象的物理机制, 学界目前主要从两方面进行解释: 一是大气层结稳定性变化。北极增暖呈现显著的“近地面放大”特征, 即地表增温远高于对流层中上层, 这种不均匀加热减弱了垂直温度梯度, 导致大气静力稳定度下降[21]。不稳定的层结有利于垂直湍流发展, 促进高空动量下传, 从而驱动近地面风速增大。二是地表粗糙度变化。海冰消退导致高粗糙度的冰面被光滑的开阔水域取代, 显著降低了地表拖曳系数, 削弱了近地面的动量耗散, 进而放大了风速的增加幅度[22][23]。

然而, 尽管已有研究证实了上述局地热动力与下垫面过程对北极风速的驱动作用, 但对两类机制发挥效应的季节差异尚未开展系统辨析, 不同季节下稳定度、粗糙度对风速的调制强弱仍有待厘清。与此同时, 北半球主要大尺度大气环流模态也可以通过调控北极区域气压场与风暴轴位置, 对北极全域或者局部海域的风速产生重要影响[24]-[26]。目前, 对于大尺度大气环流对北极近地面风速的调控仍缺少系统的对比分析。

基于此, 本文依托 1940~2023 年长时序 ERA5 再分析数据集, 聚焦局地升温 - 对流层稳定度 - 海冰粗糙度过程与北半球主要大尺度大气环流模态, 定量解析各类因子对北极 60°N 以北近地面风速的调控作用, 区分不同机制的优势季节与优势影响区域, 进一步厘清北极近地面风速变化的驱动机理, 为北极海-冰-气相互作用研究提供参考依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本研究采用 ECMWF 发布的 ERA5 第五代全球再分析数据集, 时间区间 1940~2023 年, 水平分辨率约 31 km。用到变量: 月平均 10 m 风速、2 m 气温、海冰密集度、地表预报粗糙度、925 hPa 与 1000 hPa 温度场、海平面气压场、500 hPa 位势高度场。该数据集在北极区域经过多项观测评估, 可以较好复现北极近地面气象要素长期演变特征[27]-[30]。气象季节划分: 春季 3~5 月, 夏季 6~8 月, 秋季 9~11 月, 冬季 12 月~次年 2 月。

2.2. 研究方法

2.2.1. 相关与偏相关分析

采用皮尔逊相关分析 r , 获取气温、稳定度、海冰、粗糙度与风速之间统计相关关系; 使用偏相关分析剔除 2 m 气温的影响, 识别对流层低层稳定度对风速的独立调控效果。对流层低层稳定度用 925 hPa 与 1000 hPa 位温差表征:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\kappa}$$

式中 T 为气压层温度(单位: K), p 为气压(单位: hPa), $\kappa = R/c_p \approx 0.286$ 为干空气泊松常数。该指标反映低层大气层结稳定程度, $\Delta\theta$ 越小表示越不稳定。相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

相关系数的显著性检验采用学生 t 检验。

2.2.2. 环流指数计算

为量化大尺度环流模态对北极近地面风速的调控作用, 本研究基于 ERA5 月平均海平面气压场和 500 hPa 位势高度场, 计算了北极涛动(AO)、北大西洋涛动(NAO)、北极偶极子(AD)及太平洋-北美型(PNA)四种环流指数的年及季节序列。

AO 指数定义为 20°N 以北月平均海平面气压距平场的第一主成分。首先计算得到 MSLP 月距平场, 经纬度余弦加权后进行 EOF 分解, 提取第一模态时间系数并标准化, 得到 AO 月指数。

NAO 指数采用北大西洋区域(20°~80°N, 80°W~40°E)月平均海平面气压距平场的第一主成分, 计算流程与 AO 相同。

AD 指数定义为 70°~90°N 月平均海平面气压距平场的第二主成分, 对加权后的距平场进行 EOF 分解, 提取第二模态时间系数并标准化。

PNA 指数基于 500 hPa 位势高度距平场[31], 采用 NOAA 气候预测中心(CPC)定义的改进型点值法计算: 分别提取四个关键区域(Z^1 : 15°~25°N, 180°~140°W; Z^2 : 40°~50°N, 180°~140°W; Z^3 : 45°~60°N, 125°~105°W; Z^4 : 25°~35°N, 90°~70°W)的平均距平序列, 按公式(3-10)线性组合后标准化。

$$PNA = Z^1 - Z^2 + Z^3 - Z^4$$

所有月指数按北半球标准气象季节(春季 3~5 月、夏季 6~8 月、秋季 9~11 月、冬季 12 月~次年 2 月)合成为季节序列, 其中冬季因跨年处理长度为 83 年, 其余季节及年序列长度均为 84 年(1940~2023)。

2.2.3. 场回归诊断

将标准化后的各环流指数逐格点回归到风速距平场, 得到每一个标准差环流异常对应的北极风速异常空间分布, 直观展现各环流模态影响的空间范围; 同时计算环流指数与北极区域平均风速序列的时间相关系数, 表征时间维度上的调控强度。

3. 结果分析

3.1. 北极局地升温过程对近地面风速的调控

3.1.1. 近地面升温与风速的时空联系

为揭示北极近地面升温与风速变化的关联, 本文对比 1940~2023 年 2 m 气温与 10 m 风速的空间趋

势场, 计算二者空间相关系数, 并提取 60°N 以北北极区域标准化时间序列开展相关分析, 从空间匹配、时间相关两个维度开展评估。如图 1 所示, 年平均状态下, 北极全域普遍增温, 格陵兰海、巴伦支海、喀拉海增温最为剧烈, 升温趋势可达 $1.5\text{ K}/10\text{a}$ 。升温高值区与风速显著增强海域空间高度重合, 格陵兰海、巴伦支海、喀拉海关键海域二者空间相关系数可达 0.7 以上, 统计一致性较好。时间序列上, 北极区域平均标准化 2 m 气温异常与 10 m 风速异常呈显著正相关, 相关系数 $r = 0.66$ ($p < 0.01$), 气温与风速整体均呈上升趋势, 年代际波动同步性高, 说明北极整体升温与风速增强联系紧密。

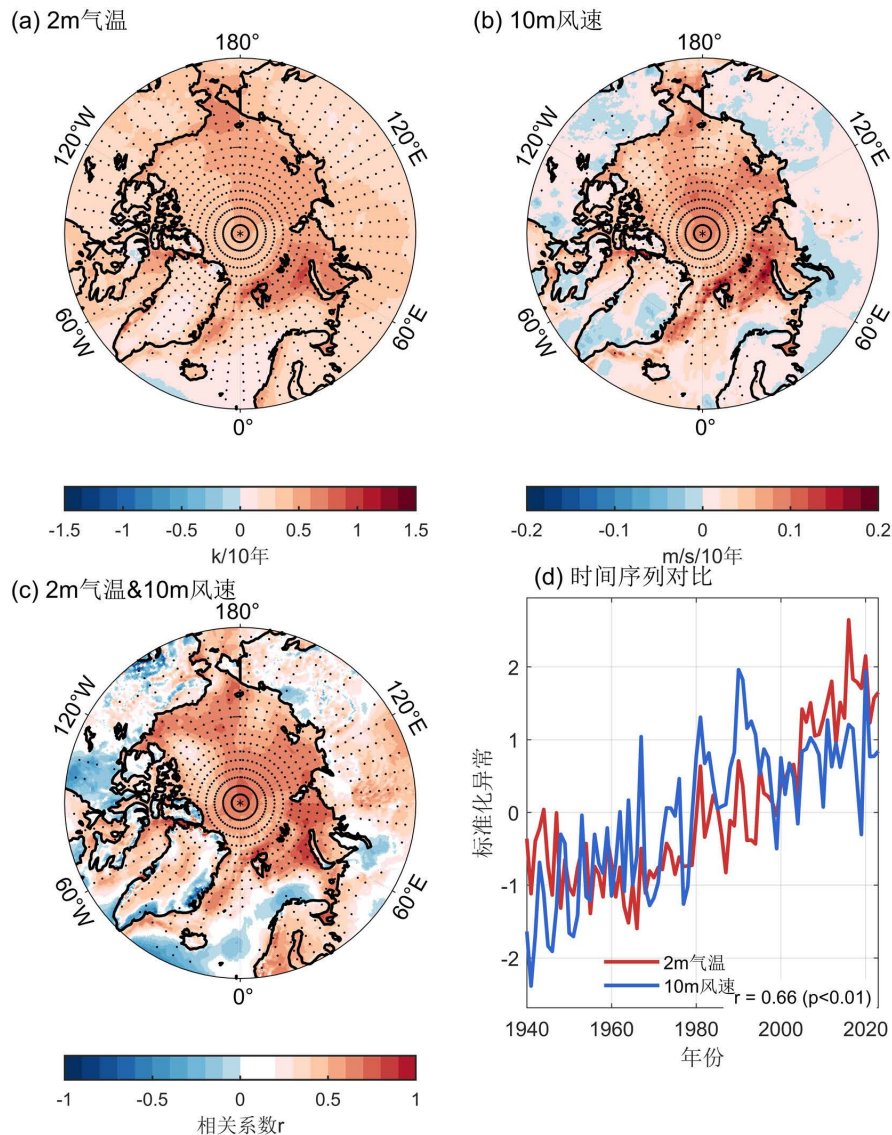


Figure 1. Trends of 2 m temperature (a) and 10 m wind speed (b), spatial correlation between 2 m temperature and 10 m wind speed (c), and comparison of standardized time series of 2 m temperature and 10 m wind speed (d) for 1940~2023

图 1. 1940~2023 年 2 m 气温变化趋势(a), 10 m 风速变化趋势(b), 2 m 气温和 10 m 风速空间相关性(c)以及标准化后的 2 m 气温和 10 m 风速时间序列对比(d)

如图 2 所示, 二者耦合关系存在显著季节依赖性。冬季升温幅度最大, 对应格陵兰海 - 巴伦支海 - 喀拉海风速增长也最为突出, 冬季气温 - 风速相关系数 $r = 0.65$ ($p < 0.01$); 春季、秋季相关系数分别为

0.60 ($p < 0.01$)、0.48 ($p < 0.01$); 夏季北极整体升温偏弱, 北冰洋中心甚至出现局部降温, 但该地区风速仍然保持上升, 夏季二者相关系数仅为 0.37, 并且 1990~2005 年前后气温与风速序列出现明显解耦。综合空间与时间分析, 北极近地面升温与风速变化整体显著正相关, 冬季耦合最强, 夏季耦合明显减弱。而升温可通过改变对流层大气层结稳定度, 调节垂直动量交换进而影响近地面风速。

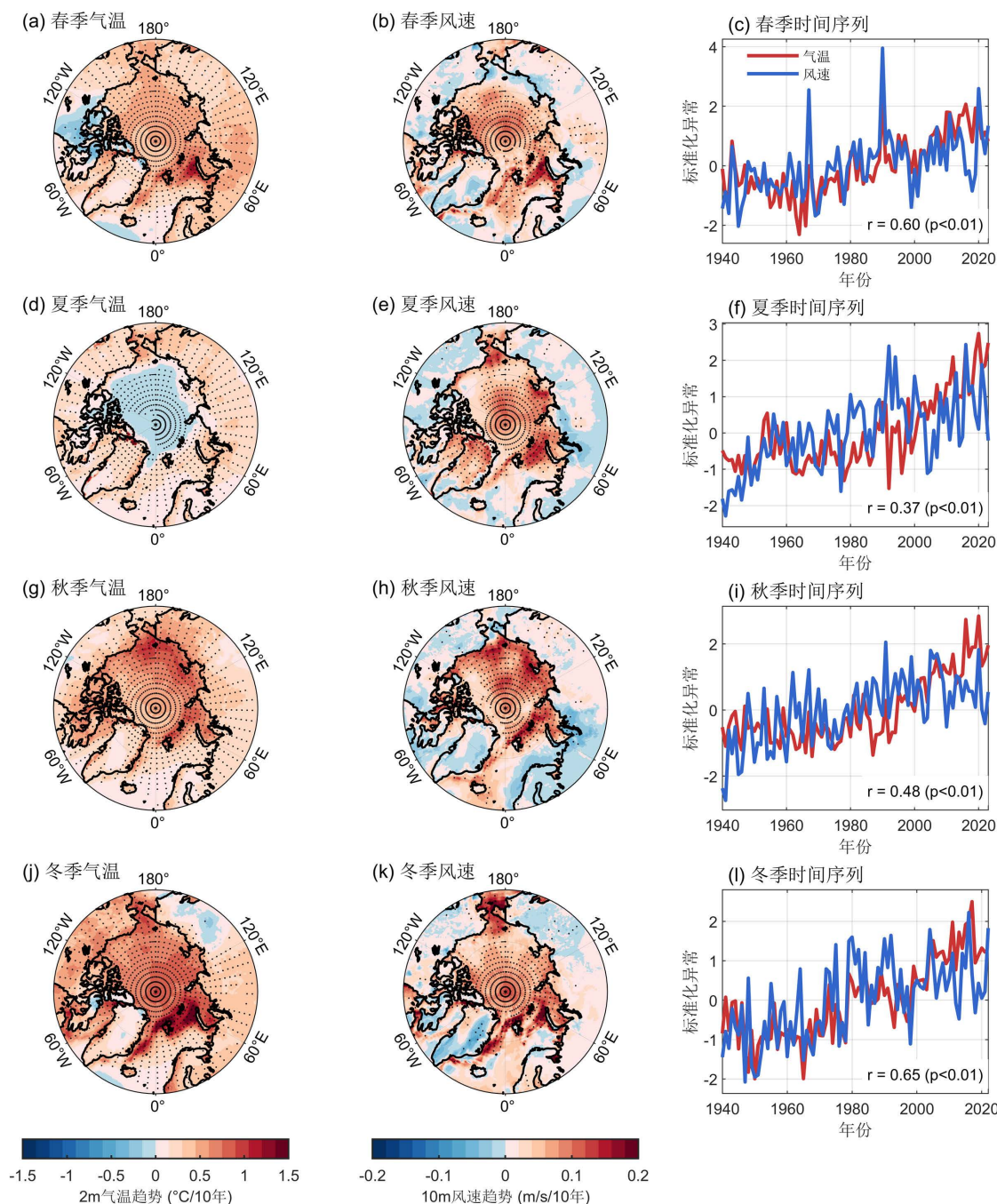


Figure 2. Seasonal trends of 2 m temperature (a) (d) (g) (j) and 10 m wind speed (b) (e) (h) (k), comparison of the standardized time series of 2 m temperature and 10 m wind speed in all four seasons (c) (f) (i) (l) for the 1940~2023

图 2. 1940~2023 年四个季节的 2 m 气温变化趋势(a) (d) (g) (j), 10 m 风速变化趋势(b) (e) (h) (k)以及标准化 2 m 气温和 10 m 风速的标准化后的时间序列对比(c) (f) (i) (l)

3.1.2. 升温驱动的对流层低层稳定度变化

北极近地面放大特征表现为地表增温强于对流层上层, 垂直温度梯度减小, 对流层低层静力稳定度降低, 有利于垂直湍流交换, 促使高空动量下传, 提升近地面风速。本文采用 925 hPa 与 1000 hPa 位温差 $\Delta\theta = \theta_{925} - \theta_{1000}$ 表征低层稳定度, $\Delta\theta$ 越小代表稳定度越低。

如图 3 所示, 1940~2023 年年平均结果显示, 北极多数海域 $\Delta\theta$ 呈显著下降趋势, 格陵兰海 - 巴伦支海 - 喀拉海降幅达到 $-0.3 \sim -0.5$ K/10a ($p < 0.05$)。区域序列统计表明, 2 m 气温异常与 $\Delta\theta$ 异常显著负相关 $r = -0.71$ ($p < 0.01$), $\Delta\theta$ 异常与 10 m 风速异常同样显著负相关 $r = -0.80$ ($p < 0.01$), 印证“升温 - 稳定度降低 - 风速增强”统计链条。为排除气温直接作用, 控制 2 m 气温开展偏相关分析, 格陵兰海、巴伦支海、喀拉海等关键海域偏相关系数仍维持 $0.3 \sim 0.6$ ($p < 0.05$), 说明稳定度本身可独立对近地面风速产生调制。

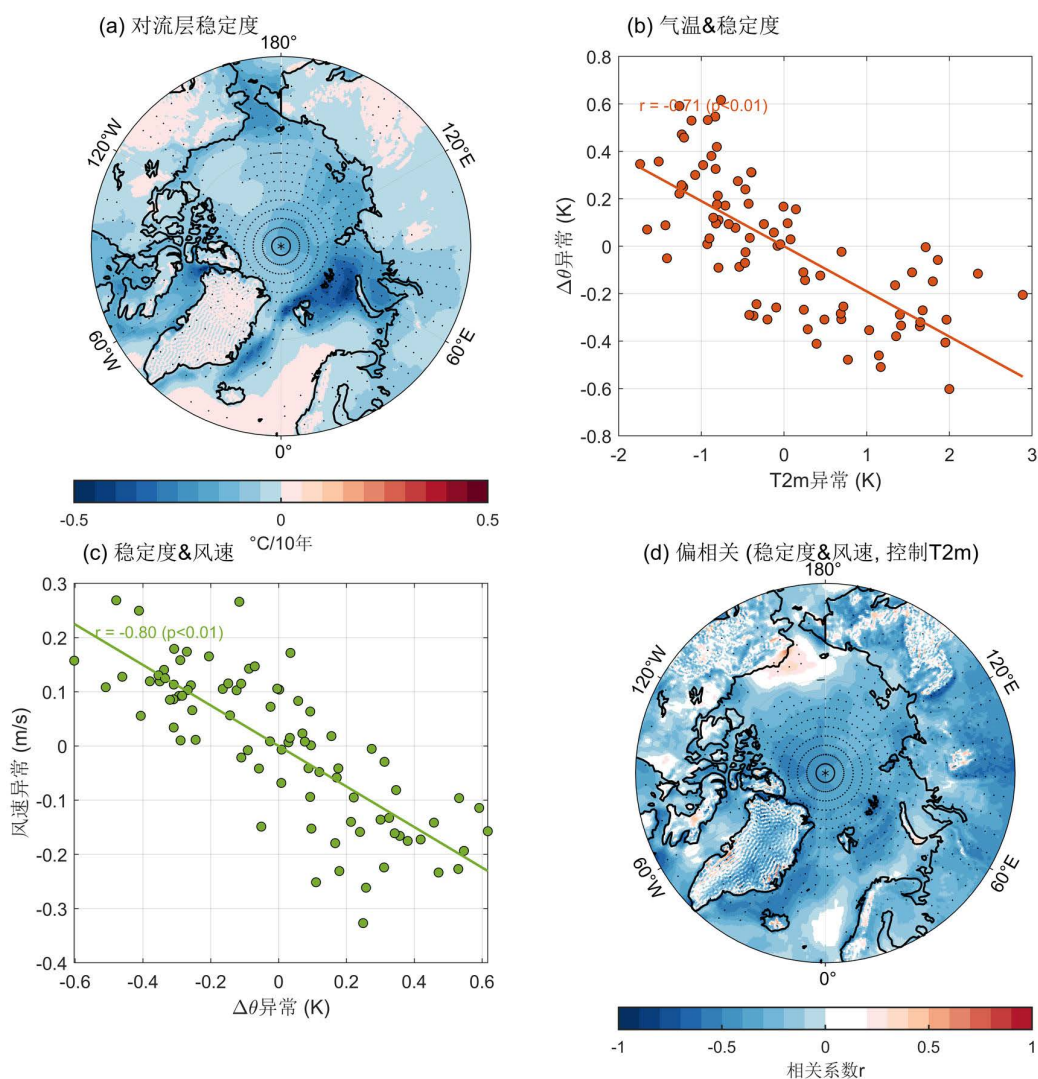


Figure 3. Trends of the lower-tropospheric static stability index $\Delta\theta$ (a), scatter plot of 2 m temperature versus $\Delta\theta$ (b), scatter plot of $\Delta\theta$ versus 10 m wind speed (c), and spatial pattern of partial correlation between $\Delta\theta$ and wind speed (d) for the 1940~2023

图 3. 1940~2023 年对流层低层静力稳定度指标 $\Delta\theta$ 变化趋势(a), 2 m 气温与稳定度 $\Delta\theta$ 的关系散点图(b), 稳定度 $\Delta\theta$ 和 10 m 风速的关系散点图(c)以及稳定度 $\Delta\theta$ 和风速的空间偏相关图(d)

如图 4 所示, 该机制存在明显季节差异。冬季格陵兰海至喀拉海海域稳定度下降幅度最大, 稳定度-风速负相关最强; 春、秋季效应减弱; 夏季北冰洋中心出现微弱增稳信号, 稳定度对风速的调控效果显著减弱。季节对比证实, 对流层低层稳定度下降是驱动冬季北极海域风速增强的核心局地机制。

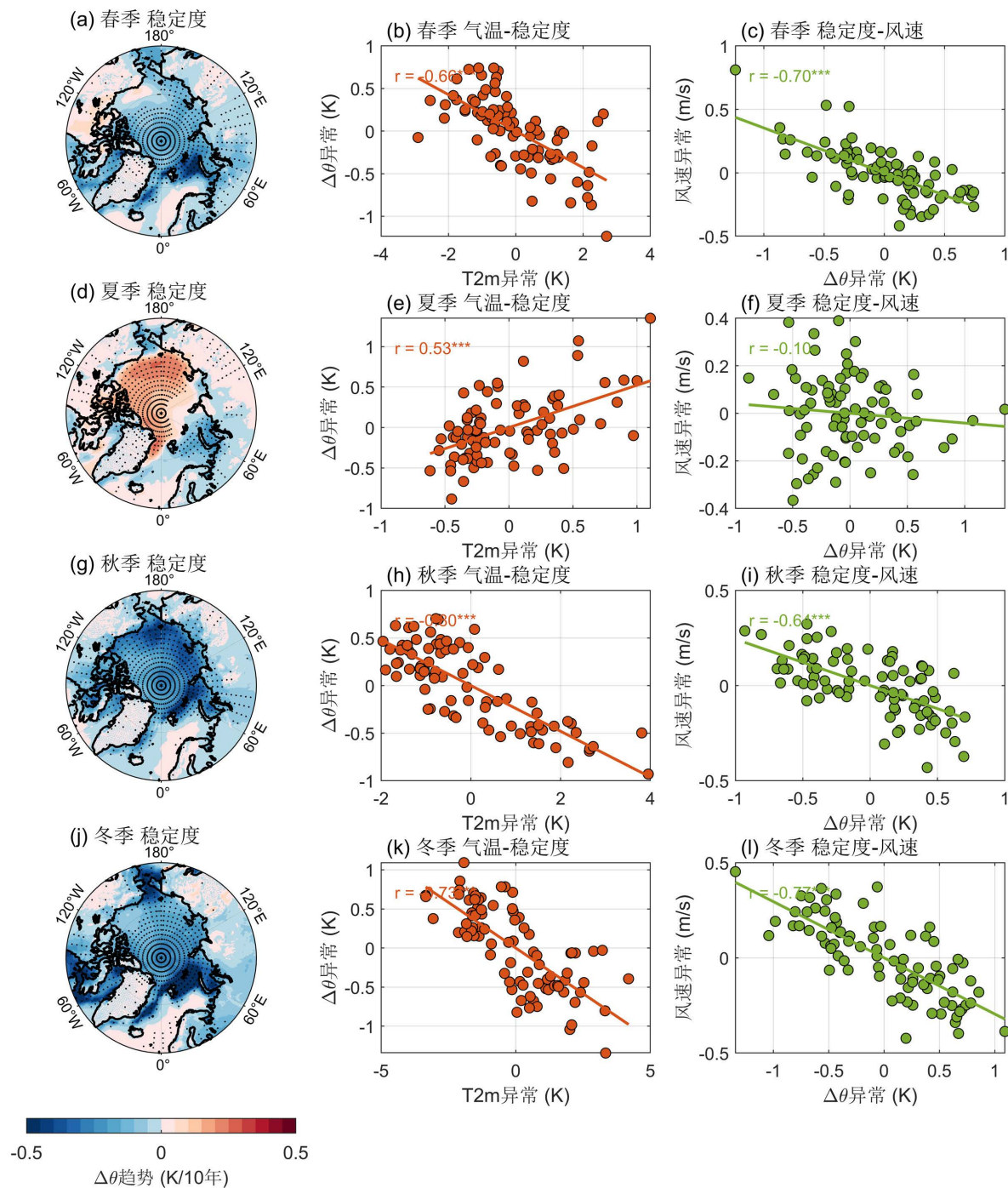


Figure 4. Seasonal trends of the lower-tropospheric static stability index $\Delta\theta$ (a) (d) (g) (j), scatter plots of 2 m temperature versus $\Delta\theta$ (b) (e) (h) (k), and scatter plots of $\Delta\theta$ versus wind speed in all four seasons (c) (f) (i) (l) for the 1940~2023

图 4. 1940~2023 年四个季节的对流层低层静力稳定度指标 $\Delta\theta$ 变化趋势(a) (d) (g) (j), 2 m 气温与稳定度 $\Delta\theta$ 的关系散点图(b) (e) (h) (k)以及稳定度 $\Delta\theta$ 和风速的关系散点图(c) (f) (i) (l)

3.1.3. 升温背景下北极海冰消退驱动的近地表粗糙度变化

北极升温造成海冰持续消退, 高粗糙度冰面转变为开阔海面, 地表空气动力学粗糙度降低, 地表摩擦耗散减弱, 有利于近地面风速增大。基于 ERA5 海冰密集度、地表预报粗糙度数据, 分析海冰消退 - 粗糙度 - 风速之间的联系。

如图 5 所示, 年海冰密集度趋势在格陵兰海向东至巴伦支海等区域显著减少, 减少幅度达 -0.1 至 $0.25/10$ 年($p < 0.05$)。与之对应, 图 5(b)显示在这些海冰减退区的地表粗糙度同样呈显著降低趋势, 降幅约 5×10^{-5} 至 1×10^{-4} m/10 年。空间上, 海冰减退越强的区域, 粗糙度降低越明显, 初步印证了海冰减少导致粗糙度下降的物理预期。为进一步验证二者的定量关系, 图 5(c)提取了海冰消退关键海域(格陵兰海、巴伦支海; $70^{\circ}\text{N} \sim 82^{\circ}\text{N}$, $23^{\circ}\text{W} \sim 60^{\circ}\text{E}$)区域平均的海冰异常与粗糙度异常, 绘制散点图。两者呈现高度显著的正相关($r = 0.97$, $p < 0.01$), 即海冰减少对应粗糙度降低。图 5(d)进一步给出了北极海冰消退的关键海域的近地面粗糙度异常与风速异常的散点关系。两者同样呈显著正相关关系($r = 0.59$, $p < 0.01$), 即粗糙度降低对应风速增强。

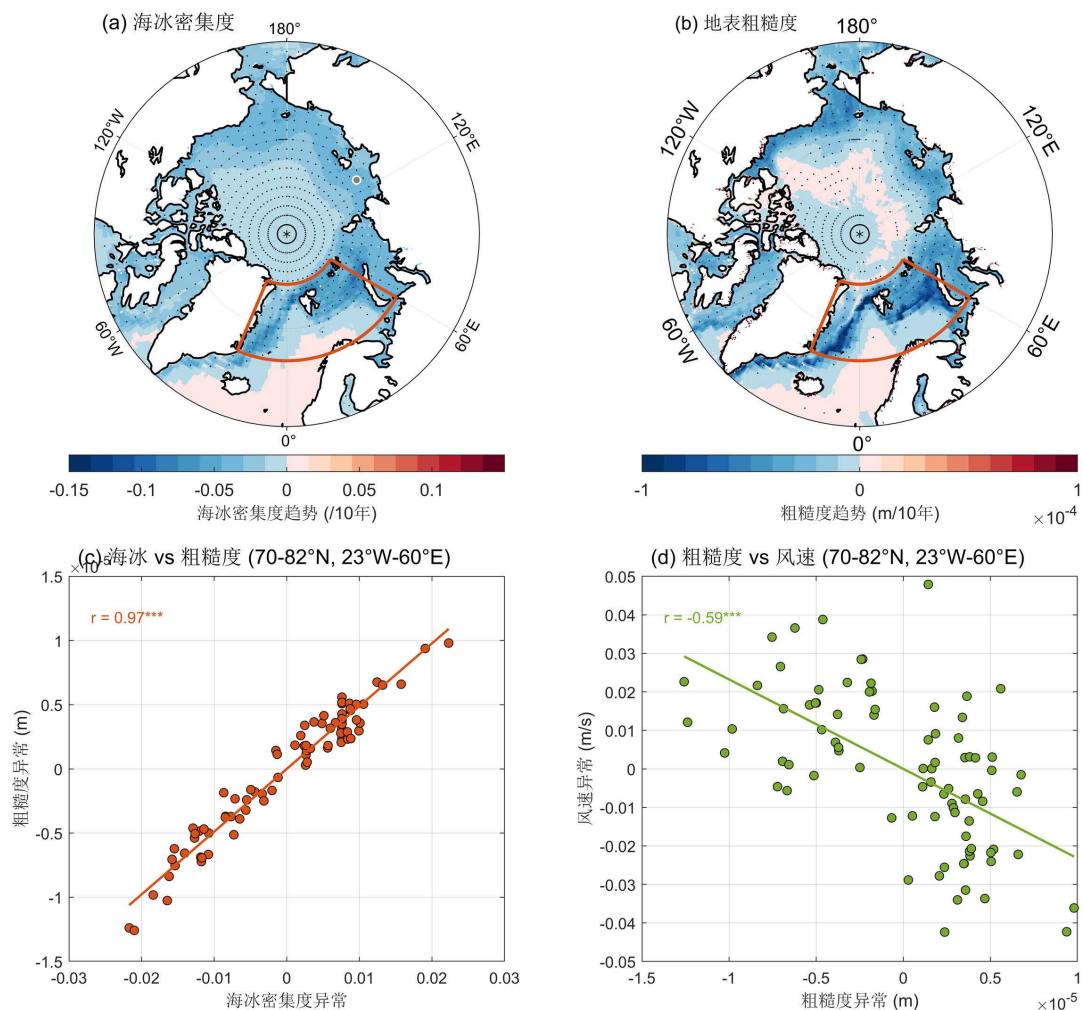


Figure 5. Trends of sea ice concentration (a) and near-surface roughness (b), scatter plot of sea ice concentration versus roughness in key marine areas (c), and scatter plot of roughness versus wind speed (d) for the 1940~2023

图 5. 1940~2023 年海冰密集度变化趋势(a), 近地表粗糙度变化趋势(b), 关键海域海冰密集度和粗糙度关系散点图(c)以及粗糙度和风速关系散点图(d)

图6进一步揭示了其季节差异。从粗糙度趋势来看(图6第一列), 夏季是海表面粗糙度下降最显著的季节, 尤其在格陵兰海向东至巴伦支海的关键海域, 下降幅度接近 1×10^{-4} m/10年。春季和秋季次之, 冬季下降最弱。这一季节特征与海冰消融的四个季节的年际变化高度一致: 北极夏季海冰减少趋势最显著, 冬季海冰减少趋势最弱。从粗糙度与风速的关系来看(图6第三列), 夏季北极海冰消退关键海区(格陵兰海向东至巴伦支海)的海表面粗糙度与风速变化的散点图呈现显著正相关($r = 0.53, p < 0.01$), 春季两者的相关性偏低($r = 0.35, p < 0.01$)。然而, 秋季和冬季二者的相关性较弱且未通过显著性检验, 说明秋冬季节风速对粗糙度变化的敏感性明显降低(图6(i)和图6(l))。

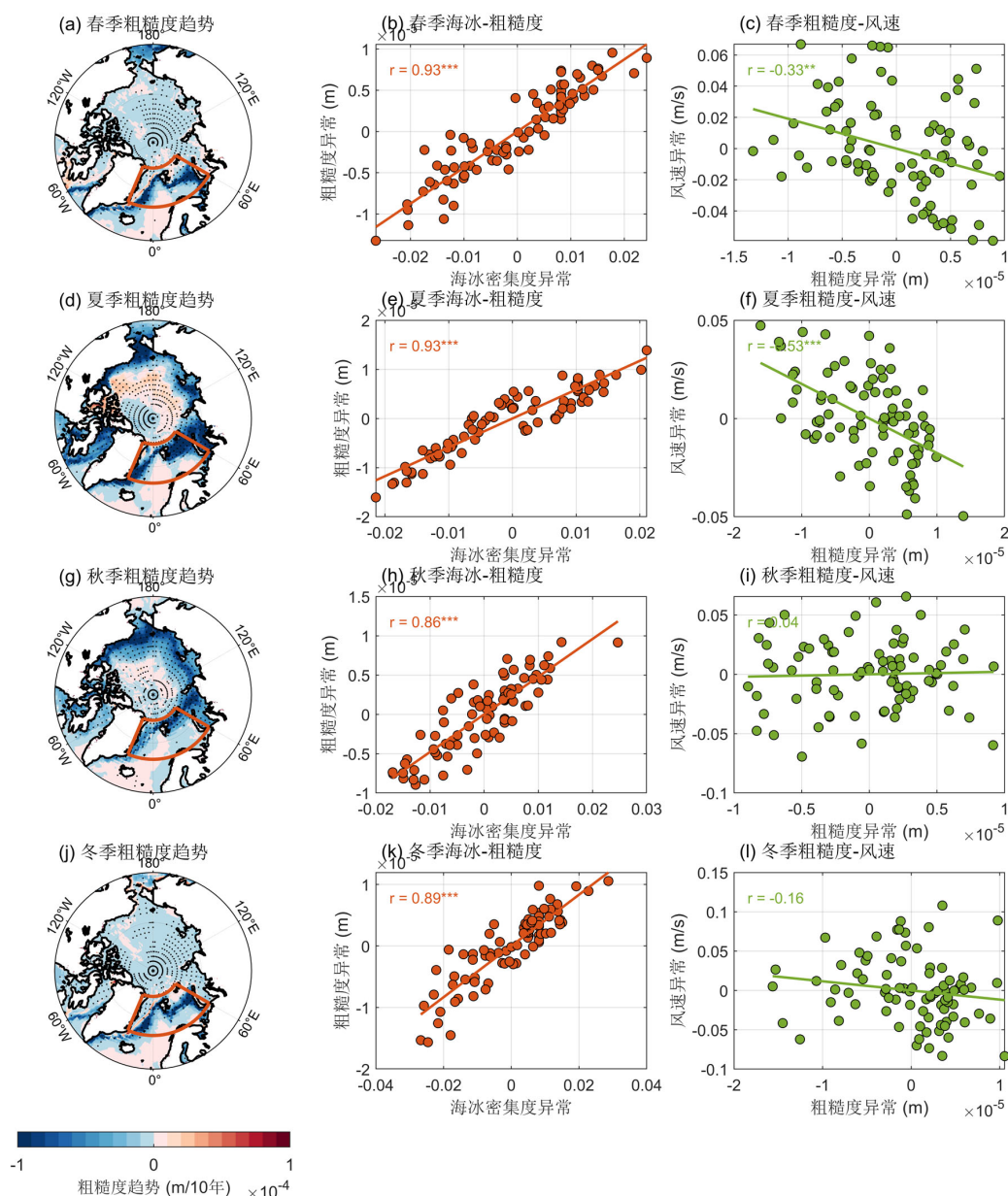


Figure 6. Seasonal trends of near surface roughness (a) (d) (g) (j), scatter plots of sea ice concentration versus near surface roughness (b) (e) (h) (k) and scatter plots of near surface roughness versus wind speed (c) (f) (i) (l) in all four seasons for the 1940~2023

图 6. 1940~2023 四个季节的近地表粗糙度变化趋势(a) (d) (g) (j), 海冰密集度与近地表粗糙度的关系散点图(b) (e) (h) (k)以及近地表粗糙度和风速的关系散点图(c) (f) (i) (l)

3.2. 大尺度大气环流模态对北极近地面风速的调控

3.2.1. 北极涛动 AO 与北大西洋涛动 NAO

AO 对北极风速调控存在明显空间差异。如图 7 所示, 年尺度 AO 正位相时, 北冰洋大部分海域风速呈正异常, 格陵兰海、挪威海响应最强, 白令海峡附近表现为风速负异常。物理机制上, AO 正位相北极出现异常低压中心, 低压槽向北大西洋伸展, 叠加冰岛低压, 增大北大西洋气压梯度, 局地风速增强; 同时异常低压削弱波弗特高压, 造成白令海峡北部风速降低。季节回归场揭示了 AO 影响的季节依赖性。春季(图 7(b)), AO 回归场空间模态与年回归场相似, 仍呈现北冰洋大部分海域(尤其是北大西洋海域)的风速正异常以及白令海峡附近的负异常。夏季回归场的空间模态发生较为显著变化(图 7(c)), 正异常高值中心自北大西洋海域转移至北冰洋中心海域。秋、冬季节正异常高值中心又从北冰洋中心逐渐过渡回北大西洋海域, 且冬季格陵兰海和挪威海的风速正异常强度达到全年最大(图 7(d)~(e))。这一季节演变与 AO 本身冬季活动最强、夏季最弱的季节特征高度吻合。

从时间演变来看(图 7(f)~(j)), 标准化 AO 指数与北极区域平均风速异常的时间序列在年际至年代际尺度上均呈现显著的同步波动特征。年尺度上(图 7(f)), 两者的相关系数达 0.64 ($p < 0.01$), AO 指数高值年通常对应风速正异常高值年。另外, 风速年代际波动特征: “1990 年前后的极端正异常峰值、1990~2000 年的年代际下降、2000 年后的再次上升”在 AO 指数序列中均有清晰体现: AO 指数同样在 1990 年附近达到正位相峰值, 随后在 1990~2000 年间正异常逐渐减弱, 2000 年之后再次同步上升。这一发现表明, 尽管升温驱动的对流层稳定度降低以及海冰消退带来的粗糙度降低等局地因素对风速长期趋势具有调控作用, 但像 AO 北极涛动这样的大尺度大气环流在年际至年代际尺度上同样显著调控着风速的波动。

季节序列中(图 7(g)~(j)), 冬季和春季相关性最强, 相关系数分别为 0.56 ($p < 0.01$)和 0.59 ($p < 0.01$); 夏秋季节相关性虽略低, 但仍通过显著性检验, 分别为 0.43 ($p < 0.01$)和 0.37 ($p < 0.01$)。总体而言, AO 在年及四季对北极风速均有显著调控, 以冬春季最为突出。

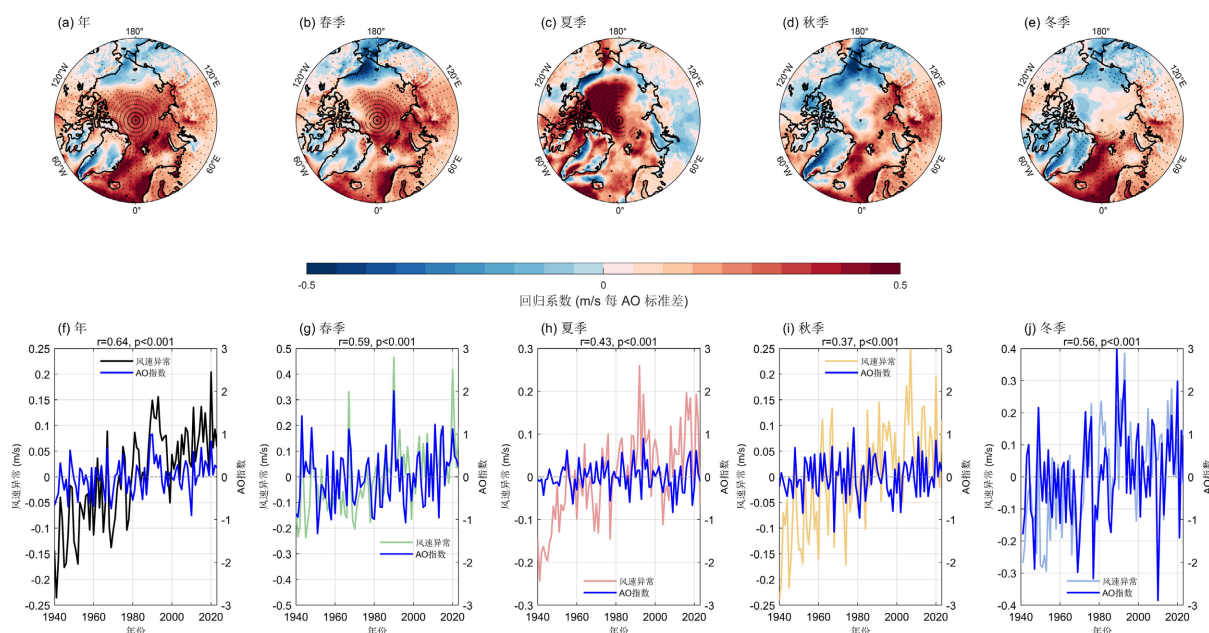


Figure 7. Annual and all four seasonal AO indices regressed onto the wind speed anomaly field (a)~(e) and comparison of time series between the AO index and wind speed anomalies (f)~(j) for the 1940~2023

图 7. 1940~2023 年及四个季节的 AO 指数回归到风速异常场(a)~(e)以及 AO 指数与风速异常的时间序列对比(f)~(j)

在年尺度上(图 8(a)), NAO 指数的风速异常回归场与 AO 回归场(图 8(a))十分接近, 仍表现为北大西洋海域(格陵兰海、挪威海)的显著风速正异常及白令海峡附近的负异常。这一相似性源于 NAO 与 AO 的密切关系, NAO 可视为 AO 在北大西洋区域的局地表现[31]。二者的指数序列本身具有高度一致性, 因此回归得到的空间模态也基本相似。春季(图 8(b))和秋季(图 8(d)), 和冬季(图 8(e)) NAO 回归场的空间模态与 AO 对应季节基本一致, 仍以北大西洋海域的正异常为主导。夏季(图 8(c))差异明显, 相较于 AO, NAO 回归场在北冰洋中心的正异常较弱, 显著区域也更少。

时间序列上来看(图 8(f)~(j)), NAO 指数对比 AO 指数在年际波动上基本具备很好的一致性, 年尺度上 NAO 指数与风速异常的相关性为 0.57 ($p < 0.01$), 略低于 AO 的 0.64, 反映出 NAO 对北极整体风速的调控作用略小于 AO。季节序列中, 冬季相关性最强 0.52 ($p < 0.01$), 春季次之为 0.48 ($p < 0.01$); 秋季较弱但仍显著, 相关系数为 0.26 ($p < 0.05$), 夏季最差且未通过显著性检验。这一季节特征与 NAO 本身的季节活动强度一致, 同时也印证了空间分析中 NAO 夏季影响有限的结论。

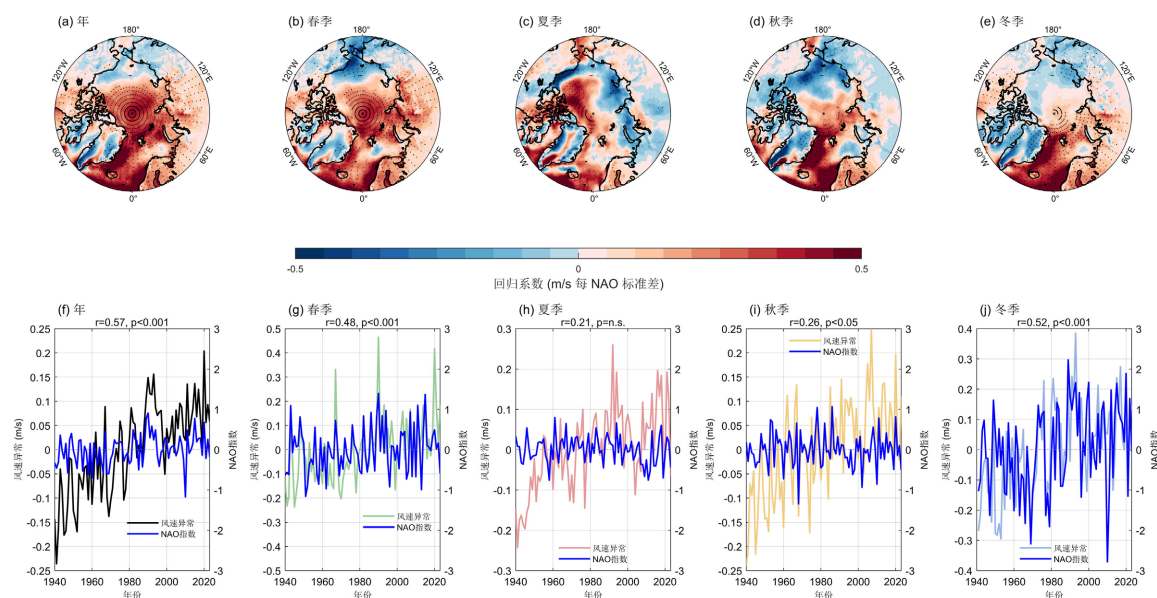


Figure 8. Annual and all four seasonal NAO indices regressed onto the wind speed anomaly field (a)~(e) and comparison of time series between the NAO index and wind speed anomalies (f)~(j) for the 1940~2023

图 8. 1940~2023 年及四个季节的 NAO 指数回归到风速异常场(a)~(e)以及 NAO 指数与风速异常的时间序列对比(f)~(j)

3.2.2. 北极偶极子 AD

如图 9 所示, AD 对北极风速的调控呈现出与 AO/NAO 截然不同的特征。其回归风速异常场在北冰洋大部分海域并未呈现显著信号, 仅有格陵兰海等局部区域表现出微弱的负趋势(图 9(a)); 亚欧大陆北部陆地区域呈正趋势。这表明 AD 对北极风速的影响相较于 AO/NAO 具有明显的区域局限性。季节上, 春季是 AD 在整体空间上对北极风速调控最为显著的季节(图 9(b)), 从北大西洋向东经巴伦支海、喀拉海至东西伯利亚海等亚欧大陆北部广大海域, 回归系数为正且统计显著。春季 AD 正位相时该区域风速趋于增强, 主要是由于 AD 正位相下在亚欧大陆北部地区的异常低压中心形成的气旋式环流造成(图 9(b))。

从时间演变来看(图 5~图 10(f)~(j)), AD 指数也仅在春季与北极整体风速的时间序列存在显著相关, 相关系数为 0.29 ($p < 0.01$), 其余季节及年平均尺度上均未通过显著性检验。AD 作为北极大气环流的第二主导模态, 与 AO/NAO 的全域性、全年性影响不同, 其对近地面风速的调控具有更加鲜明的区域局限性与季节选择性。

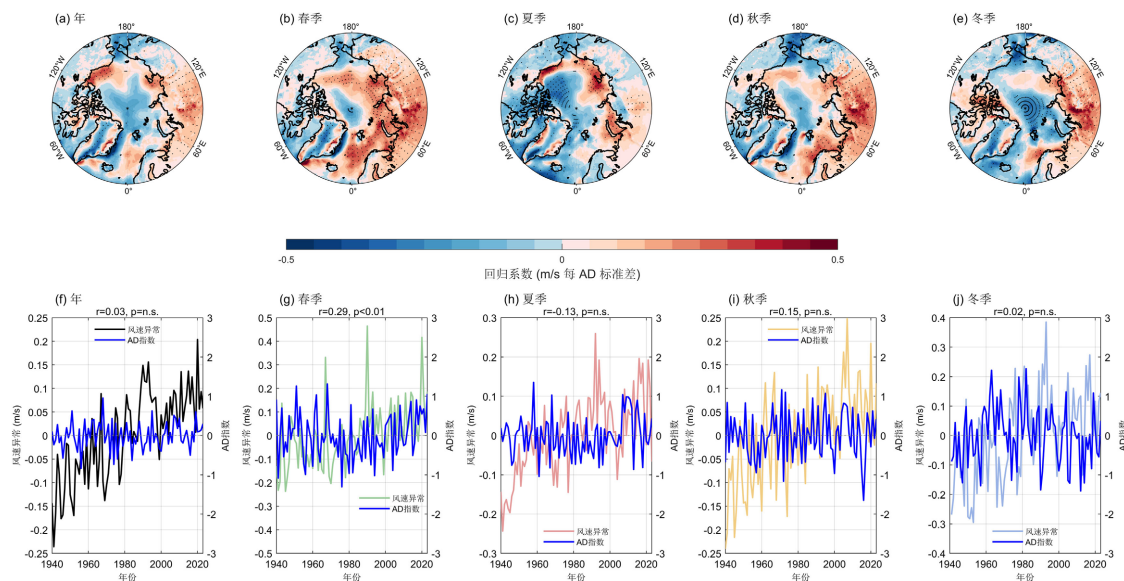


Figure 9. Annual and all four seasonal AD indices regressed onto the wind speed anomaly field (a)~(e) and comparison of time series between the AD index and wind speed anomalies (f)~(j) for the 1940~2023

图 9. 1940~2023 年及四个季节的 AD 指数回归到风速异常场(a)~(e)以及 AD 指数与风速异常的时间序列对比(f)~(j)

3.2.3. 太平洋 - 北美型 PNA

图 10 展示了 PNA 指数回归至北极风速异常场的空间分布。PNA 对北极风速的影响具有极强的局地性(图 10(a)), 显著区域主要位于白令海峡北部海域, 回归系数为正(约 0.5 m/s/标准差), 表明 PNA 正位相时该海域风速趋于增强。北冰洋其他大部分海域及陆地区域均未呈现显著信号。春季(图 10(b))和冬季(图 10(e))是 PNA 影响较为显著的季节, 在白令海峡北部海域仍呈现局地的风速正异常; 夏季(图 5~图 10(c))和秋季(图 10(d))则在整个北极区域上基本无显著区域。这一季节特征与 PNA 本身冬春季活动较强相一致, 也与其通过影响阿留申低压及太平洋风暴轴进而调制白令海区域气旋活动的物理过程相吻合。

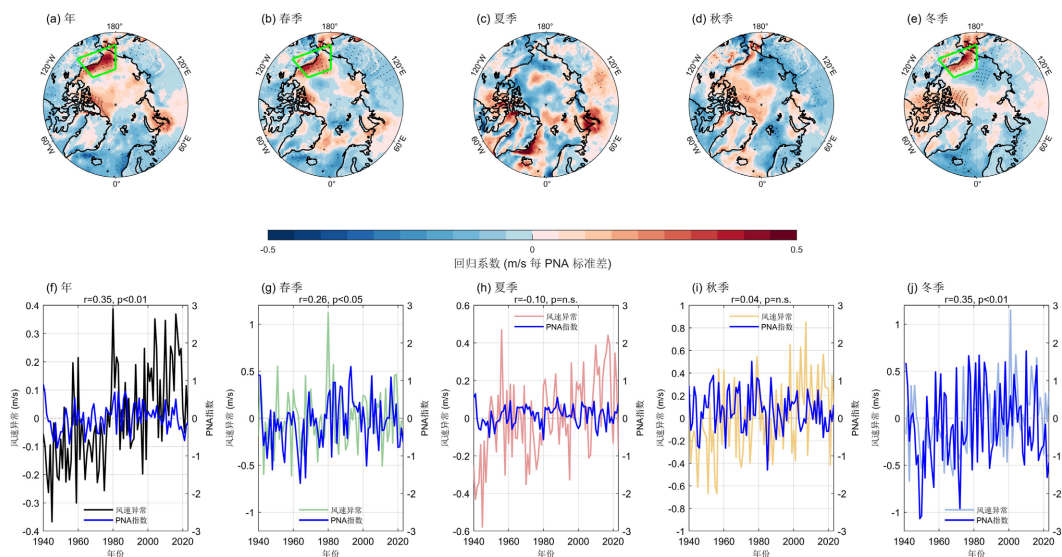


Figure 10. Annual and all four PNA indices regressed onto the wind speed anomaly field (a)~(e) and comparison of time series between the PNA index and wind speed anomalies (f)~(j) for the 1940~2023

图 10. 1940~2023 年及四个季节的 PNA 指数回归到风速异常场(a)~(e)以及 PNA 指数与风速异常的时间序列对比(f)~(j)

考虑到 PNA 影响的局地性, 提取白令海峡北部海域的区域平均风速异常序列, 与 PNA 指数进行相关分析。结果表明(图 10(f)~(j)), 在年尺度上, PNA 指数与该区域风速异常呈显著正相关($r = 0.35, p < 0.01$), 与空间回归结果一致。季节序列中, 冬季相关性最强($r = 0.35, p < 0.01$), 春季次之($r = 0.26, p < 0.05$), 夏季和秋季未通过显著性检验, 如表 1 所示。

PNA 对白令海峡北部海域风速的调制可通过其异常气压场的环流结构得到解释。PNA 正位相时, 北太平洋形成异常低压中心, 而波弗特海域倾向于出现海平面气压正异常。这一异常气压配置叠加在气压场平均态之上, 会进一步加剧自波弗特高压向南至北太平洋区域原有的经向气压梯度, 从而增强白令海峡北部海域的风速。季节上, 冬季和春季 PNA 正位相下北太平洋异常低压中心强度更大、位置更有利于驱动该区域气压梯度, 因此相较于夏秋季节对风速的调制更为显著。

Table 1. Summary of correlation coefficients between major circulation modes and wind speed changes during 1940~2023
表 1. 1940~2023 年主要环流模态与风速变化的相关系数总结表

	年	春季	夏季	秋季	冬季
AO	0.64**	0.59**	0.43**	0.37**	0.56**
NAO	0.57**	0.48**	—	0.26*	0.52**
AD	—	0.29**	—	—	—
PNA	0.35**	0.26*	—	—	0.35**

注: **表示通过 99%置信水平显著性检验($p < 0.01$), *表示通过 95%置信水平显著性检验($p < 0.05$), “—”表示未通过显著性检验; 相关系数基于各环流指数与对应区域(AO/NAO/AD 为北极整体, PNA 为白令海峡北部海域)的风速异常序列计算。

4. 讨论与结论

4.1. 讨论

本研究统计分析表明北极近地面风速变化受到局地热力-下垫面和大尺度环流的共同控制, 不同物理机制存在明确的季节分工。冬季以对流层低层稳定度降低带来的动量下传占主导; 夏季海冰消退降低地表粗糙度对格陵兰海-巴伦支海等海域产生调制。AO 主导北极全域风速的年代际波动, NAO、AD、PNA 分别在各自的空间、季节窗口发挥作用。针对夏季气温与风速解耦的现象, 由于夏季是北极海冰消退最剧烈的季节, 格陵兰海-巴伦支海等关键海域由高粗糙度冰面转变为开阔水面, 地表空气动力学粗糙度大幅下降, 摩擦耗散显著减弱, 粗糙度效应在夏季成为驱动近地面风速增强的主导因子; 与此同时, 夏季北极近地面升温幅度本身较弱, 对流层低层静力稳定度变化不显著甚至出现微弱增稳信号, “升温→稳定度降低→动量下传”链条在夏季明显弱化。因此, 夏季风速增强主要由海冰消退带来的粗糙度下降主导, 而非热力稳定度机制, 这正是夏季气温与风速统计解耦的根本原因。两种局地机制存在明确的季节分工: 冬季稳定度机制占优, 夏季粗糙度机制占优。本研究使用相关、回归等统计诊断手段, 可以识别变量之间统计联系, 但难以完全剥离各因子之间的相互耦合, 例如北极升温本身也会间接改变大气环流状态, 海冰变化同样可以反馈大气环流。统计结果不能完全等同于因果定量贡献。同时多个环流模态之间存在非线性协同、抵消作用, 本文只开展单因子回归分析, 多环流模态的协同叠加效应有待后续进一步开展深入分析。

4.2. 主要结论

北极局地升温与近地面风速时空变化高度耦合, 该耦合关系存在显著季节差异。升温通过降低对流

层低层静力稳定度促进高层动量向下传输, 该机制在冬季效果最强; 海冰消退带来地表粗糙度下降对风速的调制仅在夏季显著, 秋冬季节该作用不突出。局地热力-下垫面过程是北极风速长期变化的重要驱动。大尺度环流模态对北极风速调控存在明显的空间局限与季节选择性。AO 具备全域调控能力, 其年代际波动和北极风速年代际振荡高度同步; NAO 主要影响北大西洋海域, 冬季信号最强; AD 仅在春季对亚欧大陆北部边缘海起显著调控作用; PNA 影响高度局地化, 仅对白令海峡北部海域冬春季节有明显作用。北极近地面风速变化是局地热力-下垫面过程与大尺度大气环流协同作用的结果。

参考文献

- [1] Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., *et al.* (2022) The Arctic Has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe Since 1979. *Communications Earth & Environment*, **3**, Article No. 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- [2] Serreze, M.C., Barrett, A.P., Stroeve, J.C., Kindig, D.N. and Holland, M.M. (2009) The Emergence of Surface-Based Arctic Amplification. *The Cryosphere*, **3**, 11-19. <https://doi.org/10.5194/tc-3-11-2009>
- [3] Overland, J., Dunlea, E., Box, J.E., Corell, R., Forsius, M., Kattsov, V., *et al.* (2019) The Urgency of Arctic Change. *Polar Science*, **21**, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.008>
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- [5] Overland, J.E. (2022) Arctic Climate Extremes. *Atmosphere*, **13**, Article 1670. <https://doi.org/10.3390/atmos13101670>
- [6] Rantanen, M. (2024) Natural Variability Boosts Arctic Warming. *Nature Geoscience*, **17**, 485-486. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01458-6>
- [7] Wang, C., Su, H., Zhai, C., Zheng, J., Yu, S., Mo, H., *et al.* (2025) Recent Slowing of Arctic Sea Ice Melt Tied to Multidecadal NAO Variability. *Nature Communications*, **16**, Article No. 8504. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63520-0>
- [8] Overland, J.E. and Wang, M. (2021) The 2020 Siberian Heat Wave. *International Journal of Climatology*, **41**, 2341-2346. <https://doi.org/10.1002/joc.6850>
- [9] Comiso, J.C., Meier, W.N. and Gersten, R. (2017) Variability and Trends in the Arctic Sea Ice Cover: Results from Different Techniques. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 6883-6900. <https://doi.org/10.1002/2017jc012768>
- [10] Yu, X., Rinke, A., Dorn, W., Spreen, G., Lüpkes, C., Sumata, H., *et al.* (2020) Evaluation of Arctic Sea Ice Drift and Its Dependency on Near-Surface Wind and Sea Ice Conditions in the Coupled Regional Climate Model Hirham-Naosim. *The Cryosphere*, **14**, 1727-1746. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1727-2020>
- [11] Spreen, G., Kwok, R. and Menemenlis, D. (2011) Trends in Arctic Sea Ice Drift and Role of Wind Forcing: 1992-2009. *Geophysical Research Letters*, **38**, L19501. <https://doi.org/10.1029/2011gl048970>
- [12] Mallett, R.D.C., Stroeve, J.C., Cornish, S.B., Crawford, A.D., Lukovich, J.V., Serreze, M.C., *et al.* (2021) Record Winter Winds in 2020/21 Drove Exceptional Arctic Sea Ice Transport. *Communications Earth & Environment*, **2**, Article No. 149. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00221-8>
- [13] Chang, Y.C., Chen, G.Y., Tseng, R.S., Centurioni, L.R. and Chu, P.C. (2012) Observed Near-Surface Currents under High Wind Speeds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**, C11026. <https://doi.org/10.1029/2012jc007996>
- [14] Ardyna, M. and Arrigo, K.R. (2020) Phytoplankton Dynamics in a Changing Arctic Ocean. *Nature Climate Change*, **10**, 892-903. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0905-y>
- [15] Bohart, A.M., Lunn, N.J., Derocher, A.E. and McGeachy, D. (2021) Migration Dynamics of Polar Bears (*Ursus maritimus*) in Western Hudson Bay. *Behavioral Ecology*, **32**, 440-451. <https://doi.org/10.1093/beheco/araa140>
- [16] Kellner, A., Atwood, T.C., Douglas, D.C., Breck, S.W. and Wittemyer, G. (2023) High Winds and Melting Sea Ice Trigger Landward Movement in a Polar Bear Population of Concern. *Ecosphere*, **14**, e4420. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4420>
- [17] Nielsen, D.M., Pieper, P., Barkhordarian, A., Overduin, P., Ilyina, T., Brovkin, V., *et al.* (2022) Increase in Arctic Coastal Erosion and Its Sensitivity to Warming in the Twenty-First Century. *Nature Climate Change*, **12**, 263-270. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01281-0>
- [18] Overeem, I., Anderson, R.S., Wobus, C.W., Clow, G.D., Urban, F.E. and Matell, N. (2011) Sea Ice Loss Enhances Wave Action at the Arctic Coast. *Geophysical Research Letters*, **38**, L17503. <https://doi.org/10.1029/2011gl048681>
- [19] Min, C., Yang, Q., Chen, D., Yang, Y., Zhou, X., Shu, Q., *et al.* (2022) The Emerging Arctic Shipping Corridors.

- Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL099157. <https://doi.org/10.1029/2022gl099157>
- [20] Liu, W., Yang, S., Chen, D., Zha, J., Zhang, G., Zhang, Z., *et al.* (2024) Rapid Acceleration of Arctic Near-Surface Wind Speed in a Warming Climate. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL109385. <https://doi.org/10.1029/2024gl109385>
 - [21] Zapponini, M. and Goessling, H.F. (2024) Atmospheric Destabilization Leads to Arctic Ocean Winter Surface Wind Intensification. *Communications Earth & Environment*, **5**, Article No. 262. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01428-1>
 - [22] Muilwijk, M., Hattermann, T., Martin, T. and Granskog, M.A. (2024) Future Sea Ice Weakening Amplifies Wind-Driven Trends in Surface Stress and Arctic Ocean Spin-Up. *Nature Communications*, **15**, Article No. 6889. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50874-0>
 - [23] DuVivier, A.K., Vavrus, S.J., Holland, M.M., Landrum, L., Shields, C.A. and Thaker, R. (2023) Investigating Future Arctic Sea Ice Loss and Near-Surface Wind Speed Changes Related to Surface Roughness Using the Community Earth System Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **128**, e2023JD038824. <https://doi.org/10.1029/2023jd038824>
 - [24] Fang, Z., Sun, X., Yang, X. and Zhu, Z. (2024) Interdecadal Variations in the Spatial Pattern of the Arctic Oscillation Arctic Center in Wintertime. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL111380. <https://doi.org/10.1029/2024gl111380>
 - [25] Wanner, H., Brönnimann, S., Casty, C., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Schmutz, C., *et al.* (2001) North Atlantic Oscillation—Concepts and Studies. *Surveys in Geophysics*, **22**, 321-381. <https://doi.org/10.1023/a:1014217317898>
 - [26] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (1998) The Arctic Oscillation Signature in the Wintertime Geopotential Height and Temperature Fields. *Geophysical Research Letters*, **25**, 1297-1300. <https://doi.org/10.1029/98gl00950>
 - [27] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
 - [28] Bonavita, M., Hólm, E., Isaksen, I. and Fisher, M. (2016) The Evolution of the ECMWF Hybrid Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**, 287-303. <https://doi.org/10.1002/qj.2652>
 - [29] Fan, W., Liu, Y., Chappell, A., Dong, L., Xu, R., Ekström, M., *et al.* (2021) Evaluation of Global Reanalysis Land Surface Wind Speed Trends to Support Wind Energy Development Using in Situ Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **60**, 33-50. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-20-0037.1>
 - [30] Graham, R.M., Hudson, S.R. and Maturilli, M. (2019) Improved Performance of ERA5 in Arctic Gateway Relative to Four Global Atmospheric Reanalyses. *Geophysical Research Letters*, **46**, 6138-6147. <https://doi.org/10.1029/2019gl082781>
 - [31] Hamouda, M.E., Pasquero, C. and Tziperman, E. (2021) Decoupling of the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation in a Warmer Climate. *Nature Climate Change*, **11**, 137-142. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00966-8>