

## 50周年刊庆专刊约稿

# “暖北极-冷欧亚”模态的变化及其气候环境效应

尹志聪<sup>1</sup> 张艺佳<sup>1</sup> 许天宝<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/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

**摘要：**“暖北极-冷欧亚”是冬季北极-中高纬气候变异的关键模态之一，呈多时间尺度变化特征。2012年后，“北极增暖-欧亚变冷”趋势的减弱引发了关于北极-欧亚之间气候联系是否消失或减弱的热烈讨论。基于多源数据的诊断发现，北极-欧亚气候紧密联系的时间尺度从冬季平均向次季节转移，呈现出“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转增多和增强的科学事实。“暖北极-冷欧亚”模态会导致大尺度经向温度梯度减弱，形成持续性且大振幅的大气环流异常，进而触发极端寒潮的发生。更重要的是，“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转会驱动蒙古地区和我国东部出现极端冷暖转换。蒙古地区作为我国重要沙源地，前后冬之间快速的冷暖反相变化易造成地面疏松裸露，为华北超级沙尘暴的发生提供了充足物质条件。次季节尺度上的“暖北极-冷欧亚”提供了更清晰的前、后冬变化的物理图像。后冬“暖北极-冷欧亚”模态对华北霾污染也有显著的影响，并在北极野火的预测中表现出关键作用。未来关于“暖北极-冷欧亚”模态的研究亟须关注其趋势变化和不确定性，厘清前后冬位相反转的触发机制，改进气候模式对反转模态的模拟和预测性能，以期提升对中低纬冬春季极端气候的预测能力。

**关键词** 北极增暖，“暖北极-冷欧亚”，极端气候，复合环境灾害

**文章编号：**2025065C **doi:** 10.3878/j.issn.1006-9895.2506.25065

---

收稿日期 2025-04-24 网络预出版日期

作者简介 尹志聪，男，1984年出生，博士，教授，主要从事北极-中高纬气候变异与东亚极端气候研究。E-mail: yinzhc@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基础科学中心 42088101

Funded by National Natural Science Foundation of China (42088101)

# Variations of the “warm Arctic-cold Eurasia” pattern and the climate-environment effects

Zhicong Yin<sup>1</sup>, Yijia Zhang<sup>1</sup>, Tianbao Xu<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract** “Warm Arctic-cold Eurasia” (WACE) pattern is one of the key modes of winter Arctic-Eurasia climate variability, exhibiting multi-timescale variation characteristics. After 2012, the weakening of the “Arctic warming-Eurasia cooling” trend has sparked intense discussions on whether the Arctic-Eurasia climatic linkage has disappeared or weakened. Diagnosis analyses based on multi-source data indicate that the time scale of the close connection between the Arctic and Eurasia climates shifts from the winter-mean to subseasonal variations, presenting the increasing and strengthening phase reversal of WACE between early and late winter. WACE pattern can lead to a weakened large-scale meridional temperature gradient, forming persistent and large-amplitude atmospheric circulation anomalies, thereby triggering the extreme cold waves. More importantly, the WACE reversal can drive the extreme cold-warm transitions in the Mongolian region and eastern China. As Mongolia is a major dust source for China, rapid wintertime phase reversals lead to loose, bare ground surfaces, providing ample material conditions for severe sandstorms in North China. The “Warm Arctic-Cold Eurasia” on the subseasonal scale offers a clearer physical features of the variations in early and late winter. The WACE in late winter also significantly impacts the haze pollution in North China and plays a key role in predicting Arctic wildfires. Future research on WACE pattern urgently needs to focus on its trend changes and uncertainties, clarify the trigger mechanism for its phase reversal, and improve the simulation and prediction performance of climate models, in order to enhance the prediction ability for winter-spring extreme climates in mid-low latitudes.

**Keywords** Arctic amplification, Warm Arctic-Cold Eurasia, Extreme climate, Compound environmental disasters

## 1 引言

在全球变暖加速的背景下，1979年以来北极增暖速率已达到了全球平均的2–4倍（Jansen, et al., 2020）。随着北极海冰的快速融化（Zhou et al., 2024），“无冰之夏”或在21世纪中叶成为事实（Jahn et al., 2024）。北极气候的剧烈变异增强了其对极端气候和环境事件的驱动力（Zhang et al., 2022）。然而，欧亚中高纬地区对全球变暖的区域响应存在显著差异，1990s至2010s期间频繁经历极端冷事件，呈现出变暖“空洞”特征（Gong et al., 2025），从而形成“北极增暖-欧亚变冷”的鲜明趋势对比（Cohen et al., 2014）。值得注意的是，北极和欧亚的气温趋势表现出很大不确定性。1979–2021年北极增暖速度几乎达到了全球平均变暖的4倍（Rantanen et al., 2022）。而2012年之后，冬季北极放大现象却有所减缓（Luo et al., 2025），欧亚的变冷趋势也开始减弱（Blackport and Screen, 2019）。“北极增暖-欧亚变冷”趋势的不确定性主要来源于北极和欧亚气温的多时间尺度变化（特别是其位相调整）（Yin et al., 2023）。

在年际-年代际尺度，北半球中高纬冬季气候变异的主模态之一为“暖北极-冷欧亚”模态（Mori et al., 2014），表现为巴伦支海-喀拉海附近的显著偏暖和欧亚中高纬异常偏冷之间的气温偶极型变化（Liu et al., 2012; Yin et al., 2025）。“暖北极-冷欧亚”正位相时，北极洋面的异常西南风会驱动海冰向高纬度的常年冰区漂移，进一步扩大了北极开阔洋面（Yu et al., 2022）；欧亚中纬度受异常高压调控，下沉运动和水汽辐散会使得局地降雪显著减少（Zhang et al., 2023）。北极偏暖和欧亚偏冷的异常变化会导致中高纬大尺度经向温度梯度和斜压性的调整（Wu et al., 2025），进一步促使大振幅和持续性大气环流异常的形成和维持，从而不仅能直接触发亚洲中低纬地区寒潮等极端天气气候（Zhang et al., 2021），还能通过远程调控气候异常引起超级沙尘暴、极端野火等复合环境灾害的发生（Yin et al., 2022; 2024）。

## 2 “暖北极-冷欧亚”模态的变化

冬季“暖北极-冷欧亚”偶极型气温模态不仅可以在北极-欧亚气温变化的经验正交函数分解第二模态识别到(图1; Tylis et al., 2020),也可从厚度场和对流层中层气温变化中被检测出(Screen et al, 2010; He et al., 2020)。当北极增暖延伸至对流层中层,即深层增暖时,欧亚中高纬冷异常显著,从而形成“暖北极-冷欧亚”模态;而当北极增暖局限于近地面时,中高纬的冷响应则较弱,模态则不显著,突出了其空间结构的复杂性(Li et al., 2023)。“暖北极-冷欧亚”模态发生时,西风急流减弱、乌拉尔山高压和西伯利亚高压增强(Kim et al., 2021),并与北大西洋涛动正位相配合,可通过温度平流、水汽输送以及辐射作用进一步放大了“暖北极-冷欧亚”模态(Luo et al., 2016)。“暖北极-冷欧亚”模态及其所伴随的大气环流调整是中低纬冬春季极端气候环境的重要可预报性来源(Xu et al., 2023)。然而,2012年之后“北极增暖-欧亚变冷”趋势减弱(Blackport and Screen, 2019),同时冬季平均尺度上北极-欧亚气温之间的统计联系也在变差,从而引发了关于北极与欧亚气候之间的联系强弱交替以及北极-欧亚气候预测信号“失灵”的争议(Cohen et al., 2020)。

实际上,2012年之后北极-欧亚气温之间的联系并未减弱,而是其紧密联系的时间尺度从季节平均向次季节调整(Yin et al., 2023)。在2020/21年前冬,北极-中高纬气温呈现出显著的“暖北极-冷欧亚”型气温异常,后冬则迅速反转为“冷北极-暖欧亚”型异常;与之相反,2021/22年则由前冬强烈的“冷北极-暖欧亚”转变为后冬“暖北极-冷欧亚”位相。可见,连续两年前后冬之间出现了“暖北极-冷欧亚”模态的位相反转,但其转换方向相反,突显出年际与次季节变率的增强。事实上,1979/80年至2024/25年间共有15个冬季出现了前后冬之间的“暖北极-冷欧亚”与“冷北极-暖欧亚”位相转换,呈现出以上反转模态显著存在的科学事实(Yin et al., 2023)。“暖北极-冷欧亚”发生前后冬位相反转时,

乌拉尔高压和西伯利亚高压等关键大气环流均呈现出反位相变化，并且强迫巴伦支海-喀拉海海冰异常快速变化（Zhang et al., 2023）。

基于统计方法拟合的冬季平均“暖北极-冷欧亚”模态的误差在 2012 年之后明显增大，与前后冬位相反转频次显著增多存在紧密联系（Xu et al., 2023），并且增大的误差会进一步传递到中国东部冬季气候预测中。因此，前后冬之间“暖北极-冷欧亚”模态强烈变化的正确模拟和预测可能是提升欧亚大陆冬季次季节-季节预测性能的途径之一。然而，具有更高分辨率的 C3S 实时预测和 CMIP6 历史模拟对“暖北极-冷欧亚”前后冬位相变化及其反转的模拟和预测能力均存在不足。目前几乎所有主流预测模式均无法提前给出“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转的预测。相比之下，CMIP6 历史模拟虽然大部分能捕捉“暖北极-冷欧亚”反转模态，但强度明显偏弱（Zhao et al., 2023; Xu et al., 2024）。模拟和预测模式的物理过程均表明，与“暖北极-冷欧亚”密切相关的乌拉尔高压和西伯利亚高压需同时反转才能驱动“暖北极-冷欧亚”模态前后冬反相，动力模式中物理机制能否有效应用是制约其对“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转模拟和预测的关键因素。

“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转在 2012 年之后呈现出频率增多、强度增强的新特征，前后冬之间反相变化在很大程度上抵消了冬季平均尺度上的异常（Yin et al., 2023）。冬季平均尺度上频繁的弱异常与该时段中“北极增暖-欧亚变冷”趋势减弱协同出现。CMIP6 的历史和未来模拟均能够再现“频繁的前后冬反转与趋势减弱同时出现这一现象”，但是其中的因果关系还没有充分厘清。

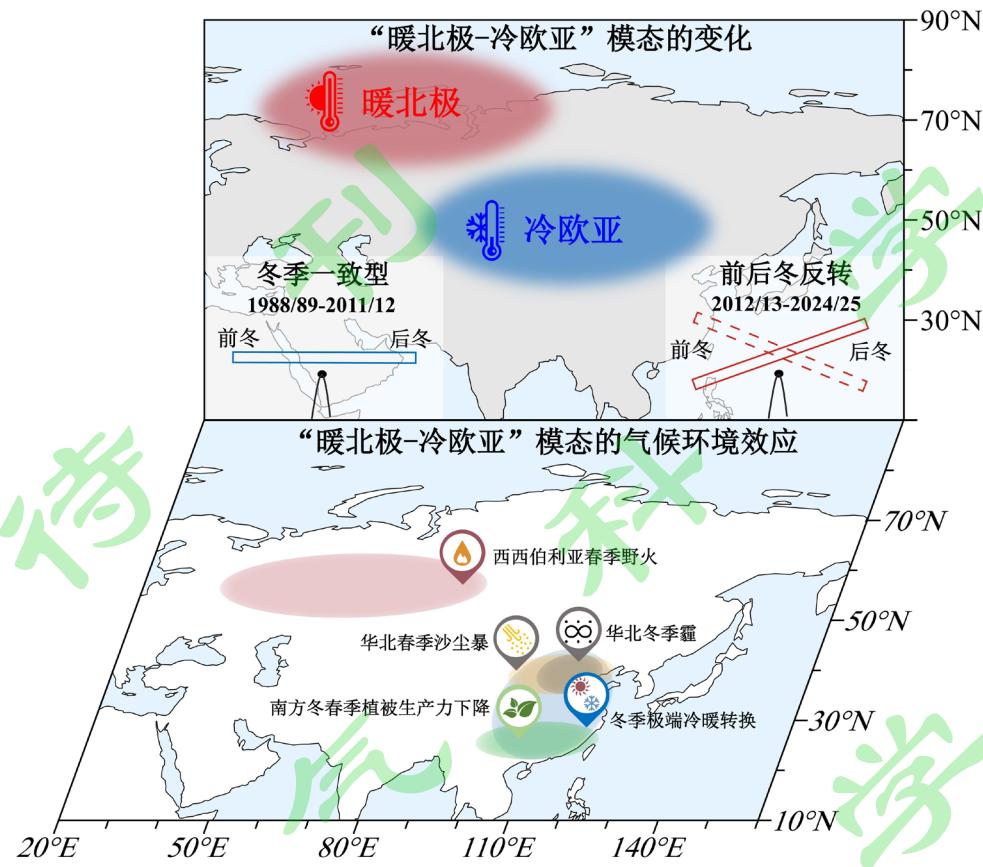


图 1.“暖北极-冷欧亚”模态的变化及其气候环境效应

**Fig. 1** Variations of the “warm Arctic-cold Eurasia” pattern and the climate-environment effects

### 3 “暖北极-冷欧亚”模态的气候环境效应

北极-欧亚气候模态的变异是欧亚中低纬地区极端气候和环境事件的重要驱动力与可预报性来源。“暖北极-冷欧亚”模态所触发的持续性且大振幅的大气环流异常，加剧了冬春季气候环境的极端性，包括极端冷暖、超级沙尘暴和野火等(图 1)。

(1) “暖北极-冷欧亚”模态加强了中国东部冬季的极端冷、暖事件和前后冬冷暖转换。北极是我国冷空气的主要源地。“暖北极-冷欧亚”模态促使了乌拉尔山高压的增强和维持，从而导致更强的冷平流入侵，例如 2020/21 年前冬三次破纪录寒潮接连侵袭东亚 (Zheng et al., 2022)。“暖北极-冷欧亚”模态的偶极分布对中国东部气温异常的影响是北极-欧亚气温一致偏冷或偏暖时的 2–3 倍，

呈现出更强的驱动力 (Zhang et al., 2021)。此外，“暖北极-冷欧亚”模态导致的气温异常响应范围也更广，可以在华南地区触发强寒潮 (Zhang et al., 2021)，进而致使中国南方亚热带常绿林叶面积指数显著降低，并引发春季物候期延迟及植被生产力系统性下降 (Kim et al., 2022)。更值得关注的是，“暖北极-冷欧亚”模态前后冬位相反转时，受其影响中国东部气温也易出现极端冷暖转换(图 2)。正如 2020/21 年，前冬在“暖北极-冷欧亚”位相的驱动下，中国东部爆发了破纪录的极端寒潮；而后冬转为“冷北极-暖欧亚”位相时，中国东部气温持续偏暖，达到了 1961 年以来同期最高 (Yang and Fan, 2021)。进一步研究表明，将“暖北极-冷欧亚”模态变化的关键过程引入冬季气温预测后，可以显著提高对我国前冬、后冬气温的预测性能，不仅有助于刻画前后冬冷暖转换的过程，也能更好地把握冬季平均气候状态 (Yin et al., 2025)。

(2) “暖北极-冷欧亚”模态的前后冬位相反转显著调控了蒙古国沙源累积状况，为华北超级沙尘暴提供丰富的物质条件。“暖北极-冷欧亚”前后冬位相反转可以驱动我国寒潮整条路径的地区发生前后冬之间的极端冷暖转换。蒙古地区作为冷空气必经之地和我国重要沙源地 (Huang et al., 2008; Chen et al., 2023)，其前后冬气温变化对“暖北极-冷欧亚”反转模态的响应是其它北极-欧亚位相配置下的 2–3 倍。沙源地气温如此快速的转换对春季华北沙尘暴的发生具有显著气候累积效应 (尹志聪等, 2023)。2021 年 3 月 15 日，华北发生了超级沙尘暴。由于 2020/21 年前冬沙源地气温和土壤温度持续偏低，导致冻土层加深；而后冬气温和土壤温度异常偏高，土壤解冻后失墒较快，土质变得更加疏松；同时，沙源地降水偏少和融雪偏强也进一步导致地面疏松裸露。北极气候冰-气系统的快速转换，拉尼娜事件以及西北大西洋暖异常共同导致了沙源地出现上述破纪录的气候异常，累积了充足的沙源 (Yin et al., 2022)。在此基础上，强蒙古气旋提供有利的动力扰动和传输条件促使超级沙尘暴的发生 (Huo et al., 2025)。可见，北

极气候系统前后冬的位相转换驱动了极端冷暖转换，并进一步有利于华北沙尘暴的发生，呈现出连锁的气候环境效应，为提前1-3个月预测沙尘暴提供了有效的预测信号（图2）。

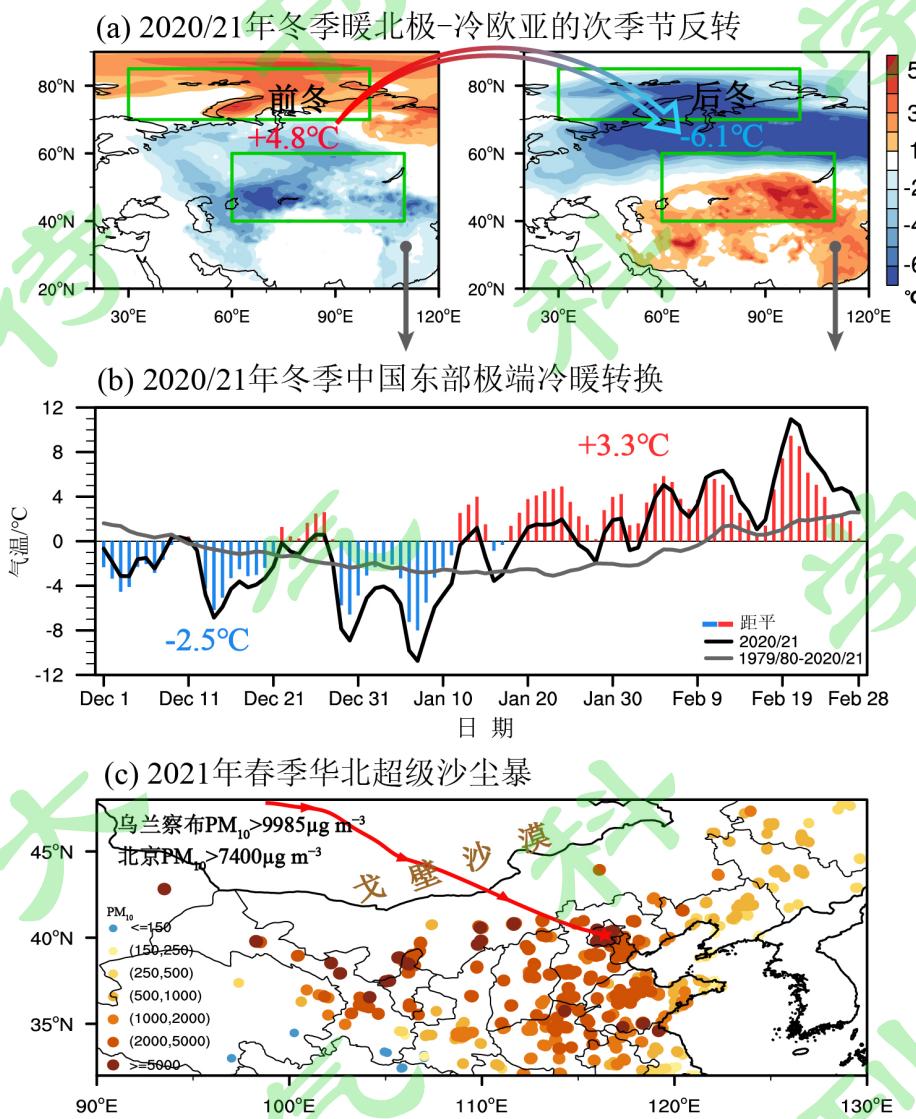


图2.“暖北极-冷欧亚”前后冬位相转换触发中国东部冬季极端冷暖转换以及有利于华北春季沙尘暴发生的连锁气候环境链条（改绘自Yin et al., 2022, 2023; Zhang et al., 2021; 王会军等, 2024）

**Fig. 2** The phase reversal of “Warm Arctic-Cold Eurasia” between early and late winter triggers the winter extreme cold-warm transition in eastern China and conducive to the occurrence of spring sandstorms in North China (Adapted from Yin et al., 2022, 2023; Zhang et al., 2021; Wang et al., 2024)

(3) 后冬“暖北极-冷欧亚”模态致使华北霾污染减弱的联系存在年代际加强。霾污染的发生、发展与局地大气的垂直和水平扩散条件密切相关，也受到大尺度大气环流的影响和调控 (Yin et al., 2017)。1月“暖北极-冷欧亚”模态与2月华北霾污染存在显著的负相关关系，并在 GEOS-Chem 模式模拟中得到了验证 (Zhang et al., 2022)。1月“暖北极-冷欧亚”模态的信号可以储存在北极海冰和欧亚土壤温度的变化中，进而在2月引起大气斜压性的调整。当华北上空出现显著的气旋性环流异常时，会调控边界层高度增高、风速增大、相对湿度减弱，有利于污染物的水平和垂直扩散 (Zhong et al., 2019)，从而减轻了2月华北的霾污染。两者之间的联系在1990s后期的显著增强，与1990s后期北极频繁出现深层增暖有关，从而使得欧亚变冷加强 (Li et al., 2023)，进而在华北上空引起更加强烈的气旋性异常环流。

(4) 后冬“暖北极-冷欧亚”模态在预测北极野火中的关键作用。在加速变暖的背景下，泛北极地区野火频发 (Descals et al., 2022)。极端野火可以直接引发“碳炸弹”，进一步加剧了气候变暖 (Zheng et al., 2023)。野火与天气-气候条件之间形成了紧密的正反馈过程 (Huang et al., 2021)。冬季1-2月的“暖北极-冷欧亚”模态会显著加强西西伯利亚春季野火的强度 (Yin et al., 2024)。与“暖北极-冷欧亚”相关的积雪变薄和雪线北退，使得春季气候条件干燥、植被物候期提前和凋落物广泛暴露，从而造成了西西伯利亚春季火灾活动增加。后冬“暖北极-冷欧亚”模态可以有效提供超前的预测信息。基于此所构建的西西伯利亚春季野火燃烧面积预测模型表现出优异的预测性能，观测与预测的相关系数可达0.80。2019年和2020年的独立预测与观测结果非常接近，平均绝对误差百分率仅为3.0%，并且能准确地再现野火大值中心的空间位置。同样的“暖北极-冷欧亚”预测因子也可以成功预测出野火所产生的碳排放，解释了其61%的年际变率，有助于更好地应对气候变化。

## 4 展望与挑战

“暖北极-冷欧亚”模态存在次季节-年际-(多)年代际等多时间尺度变化，其在各个时间尺度上的变化、机理和影响均得到了广泛的关注与研究，但也在诸多方面存在争议。在全球加速变暖的背景下，“暖北极-冷欧亚”模态的变化和气候环境效应变得更加复杂，是国际前沿的巨大科学挑战。

(1) 北极增暖和欧亚变冷趋势的不确定性凸显。北极放大的幅度存在显著的差异与不确定性。一种主流观点认为，1979–2021 年期间冬季北极增暖的放大倍数达到了 4 倍 (Rantanen et al., 2022)，太平洋年代际涛动和北极内部模态等自然变率显著贡献于这一增强的放大效应 (Zhou et al., 2024)。另有证据表明冬季北极增暖速率在 2012 年后有所减缓，可能与巴伦支海-喀拉海海冰损失明显放缓有关，这可能受到了大西洋经向翻转环流减弱的调节 (Luo et al., 2025)。欧亚气温也从 1990s–2010s 的显著变冷转变为不稳定的增暖。年际-年代际尺度上，北极-欧亚中高纬气温距平在 2010s 后也更多呈现出“暖北极-暖欧亚”的分布，这一空间模态的变化与调整可能受到了北极海冰的调控 (Wu et al., 2025)。然而，“欧亚偏冷”减弱甚至出现“暖化”现象的原因尚未得到明确的揭示，其中一个可能原因是北极放大效应减缓的同时北极深层增暖减弱，进而导致欧亚变冷消失；亦或是归因于频繁的前后冬冷暖反转相抵消，具体的原因仍有待进一步的研究与解答。未来，若大气内部变率的影响强于温室气体的长期变暖影响，与 1990s–2010s 程度相当的“北极增暖-欧亚变冷”趋势或将在 2050s 前重新出现 (Xu et al., 2023)，“暖北极-冷欧亚”型的气温异常分布或将再次显著。北极-欧亚气温模态的分布及其趋势变化的不确定性需要长期的关注与讨论 (图 3)。

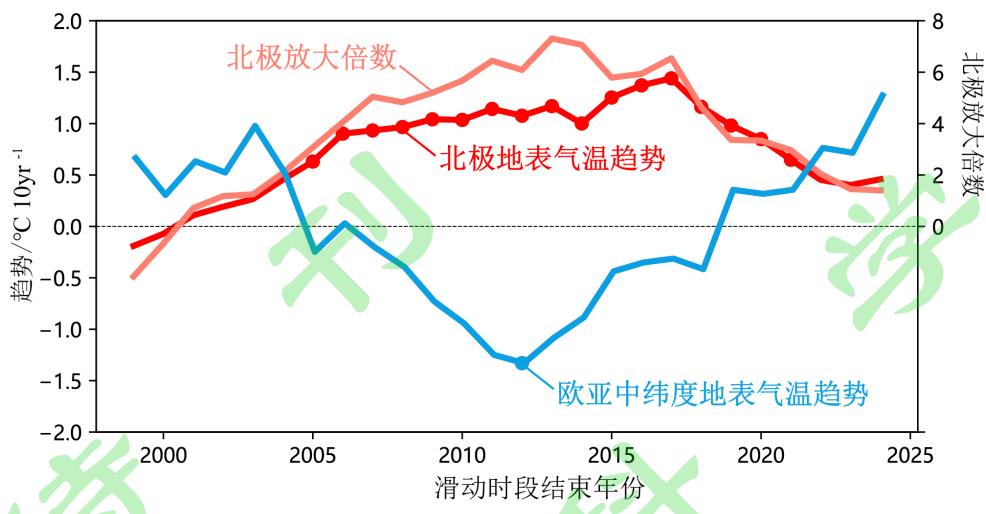


图 3. 1979/80–2024/25 年滑动 21 年的冬季北极 ( $60\text{--}90^\circ\text{N}$ ) 气温趋势 (红)、北极放大倍数 (浅红) 和欧亚中纬度 ( $40\text{--}60^\circ\text{N}, 60\text{--}120^\circ\text{E}$ ) 气温趋势 (蓝) 的变化, 打点表示通过 95% 显著性检验 (改绘自 Yin et al., 2023)

**Fig. 3** 21-year running variations of the winter Arctic ( $60\text{--}90^\circ\text{N}$ ) surface air temperature trend (red), Arctic magnification (light red), and central Eurasia ( $40\text{--}60^\circ\text{N}, 60\text{--}120^\circ\text{E}$ ) surface air temperature trend (blue) during 1979/80 to 2024/25. The dots indicate passing the 95% significance test (Adapted from Yin et al., 2023)

(2) “暖北极-冷欧亚”模态变化机制的争议仍在。“暖北极-冷欧亚”模态的形成究竟是气候系统外强迫的作用还是大气内部变率的结果一直是国际上争议的热点问题 (Cohen et al., 2020)。有研究表明, 北极海冰的融化在“暖北极-冷欧亚”的形成中起到主导作用 (Liu et al., 2012; Mori et al., 2014), 北极增暖通过热力和动力途径对欧亚变冷具有显著影响 (Xie et al., 2022; Yin et al., 2025)。热带-副热带海温等也可远程影响“暖北极-冷欧亚”模态 (Mu et al., 2022; Luo et al., 2022)。然而, 也有研究指出“暖北极-冷欧亚”模态的出现与北极增暖无关, 而是大气内部变率的结果 (Overland et al., 2016)。平流层爆发性增温、乌拉尔山高压与西风急流的相互配合以及北极深层暖均会造成“暖北极-冷欧亚”模态的形成 (Mitchell et al., 2013; Xu et al., 2022; Li et al., 2023)。一个不争的事实是,

北极-欧亚气候之间的联系以及不同时期的“暖北极-冷欧亚”模态具有时间尺度依赖性 (Yin et al., 2023)。在次季节尺度上，“暖北极-冷欧亚”前后冬反转模态的揭示在一定程度上调和了冬季平均尺度上北极-欧亚气温联系减弱的争议 (黄建平和谢永坤, 2023)。热带-副热带海温的协同调控初步解释了“暖北极-冷欧亚”前后冬位相转换的形成机理 (Yin et al., 2023)，但是“暖北极-冷欧亚”模态及其相关的大振幅环流异常在半个冬季内的持续机制尚未明确，前后冬之间位相快速转换的触发机制也未得到清晰阐释。

(3) “暖北极-冷欧亚”模态的模拟与预测亟须关注。气候动力模式对“暖北极-冷欧亚”模态前后冬变化及其反转的模拟和预测能力还十分有限 (Zhao et al., 2023)，高分辨率观测数据的缺乏进一步加剧了这一不足。模拟和预测“暖北极-冷欧亚”模态前后冬反转能力不足的原因也可能源于模式对阻塞频率的低估 (Davini et al., 2020)，以及模式中平流层-对流层相互作用的耦合不足等因素 (Ding et al., 2023)。如何更好地模拟和预测“暖北极-冷欧亚”模态在不同时间尺度的变化亟须关注与开展研究。对于“暖北极-冷欧亚”模态次季节变化模拟和预测性能提升，其中一个途径需要重点关注物理机制在模式中的应用，包括改进大气中乌拉尔山高压和西伯利亚高压前后冬反转的模拟 (Xu et al., 2024)。北极-欧亚气候变异作为中低纬极端气候的重要预测来源，对其气候变异的模拟不足将限制中低纬极端气候的次季节-季节预测性能 (Wang et al., 2022; Yin et al., 2025)。“暖北极-冷欧亚”模态模拟和预测能力的提升有助于进一步推动将其气候环境效应有效落地至沙尘暴、野火等复合环境灾害的预测和预警，更好地应对气候极端化 (王会军等, 2025)。

## 参考文献:

- Blackport R, Screen J. 2020. Weakened evidence for mid-latitude impacts of Arctic warming[J]. *Nat. Clim. Change*, 10: 105–106. doi:[10.1038/s41558-020-00954-y](https://doi.org/10.1038/s41558-020-00954-y)
- Chen S, Zhao D, Huang J, et al. 2023. Mongolia Contributed More than 42% of the Dust Concentrations in Northern China in March and April 2023[J]. *Adv. Atmos. Sci.* 40: 1549–1557. doi:[10.1007/s00376-023-3062-1](https://doi.org/10.1007/s00376-023-3062-1)
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. *Nat. Geosci.*, 7(9): 627–637. doi:[10.1038/ngeo2234](https://doi.org/10.1038/ngeo2234)
- Cohen J, Zhang X, Francis J, et al. 2020. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather[J]. *Nat. Clim. Change*, 10: 20–29. doi:[10.1038/s41558-019-0662-y](https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y)
- Davini P, Weisheimer A, Balmaseda M, et al. 2020. The representation of winter Northern Hemisphere atmospheric blocking in ECMWF seasonal prediction systems[J]. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, 147(735): 1344–1363. doi:[10.1002/qj.3974](https://doi.org/10.1002/qj.3974)
- Descals A, Gaveau D L A, Verger A, et al. 2022. Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures[J]. *Sci. Adv.*, 7: 532–537. doi:[10.1126/science.abn9768](https://doi.org/10.1126/science.abn9768)
- Ding X, Chen G, Ma W. 2023. Stratosphere-troposphere coupling of extreme stratospheric wave activity in CMIP6 models[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 128(16): e2023JD038811. doi:[10.1029/2023JD038811](https://doi.org/10.1029/2023JD038811)
- Gong H, Wang L, Screen J A, et al. 2025. Teleconnection from Arctic warming suppresses long-term warming in central Eurasia[J]. *Sci. Adv.*, 11(4): eadq9461. doi:[10.1126/sciadv.adq9461](https://doi.org/10.1126/sciadv.adq9461)
- He S, Xu X, Furevik T, et al. 2020. Eurasian cooling linked to the vertical distribution of Arctic warming[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47: e2020GL087212. doi:[10.1029/2020GL087212](https://doi.org/10.1029/2020GL087212)
- Huang J, Minnis P, Chen B. 2008. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113: D23212. doi:[10.1029/2008JD010620](https://doi.org/10.1029/2008JD010620)
- 黄建平, 谢永坤. 2023. 次季节尺度上的“暖北极-冷欧亚”模态[J]. 科学通报, 68(14): 1721–1722. Huang J, Xie Y. 2023. “Warm Arctic-cold Eurasia” mode at subseasonal time scale [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 68(14): 1721–1722.

doi: [10.1360/TB-2023-0244](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0244)

Huang X, Ding K, Liu J Y, et al. 2023. Smoke-weather interaction affects extreme wildfires in diverse coastal regions[J]. *Science*, 379: 457–461. doi:[10.1126/science.add9843](https://doi.org/10.1126/science.add9843)

Huo Q, Yin Z, Ma X, et al. 2025. Distinctive dust weather intensities in North China resulted from two types of atmospheric circulation anomalies[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 25(3): 1711–1724. doi:[10.5194/acp-25-1711-2025](https://doi.org/10.5194/acp-25-1711-2025)

Jahn A, Holland MM, Kay J E. 2024. Projections of an ice-free Arctic Ocean[J]. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 5: 164–176. doi:[10.1038/s43017-023-00515-9](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00515-9)

Jansen E, Christensen J H, Dokken T, et al. 2020. Past perspectives on the present era of abrupt Arctic climate change[J]. *Nat. Clim. Change*, 10: 714–721. doi:[10.1038/s41558-020-0860-7](https://doi.org/10.1038/s41558-020-0860-7)

Kim H J, Son S W, Moon W, et al. 2021. Subseasonal relationship between Arctic and Eurasian surface air temperature[J]. *Sci. Rep.*, 11: 4081. doi:[10.1038/s41598-021-83486-5](https://doi.org/10.1038/s41598-021-83486-5)

Kim J S, Kug J S, Jeong S, et al. 2022. Arctic warming-induced cold damage to East Asian terrestrial ecosystems[J]. *Commun. Earth Environ.*, 3: 16. doi:[10.1038/s43247-022-00343-7](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00343-7)

Li J, Chen X, Guo Y, et al. 2023. Contrasting Deep and Shallow Winter Warming over the Barents–Kara Seas on the Intraseasonal Time Scale[J]. *J. Climate*, 36: 6897–6916. doi: [10.1175/JCLI-D-22-0879.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0879.1)

Liu J, Curry J A, Wang H, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109: 4074–4079. doi:[10.1073/pnas.1114910109](https://doi.org/10.1073/pnas.1114910109)

Luo D, Xiao Q, Yao Y, et al. 2016. Impact of Ural blocking on winter warm Arctic–cold Eurasian anomalies-part II: the link to the North Atlantic Oscillation[J]. *J. Climate*, 29(11): 3949–3971. doi:[10.1175/JCLI-D-15-0612.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0612.1)

Luo N, Li J, Xiao C, et al. 2025. Slowdown of wintertime Arctic amplification since 2012[J]. *The Innovation Geoscience*, 3:100130. doi: [10.59717/j.xinn-geo.2024.100130](https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2024.100130)

Luo Y, Li C, An X, et al. 2024. Interdecadal variability of the warm Arctic-cold Eurasia: synergetic modulation by the Arctic Oscillation and Barents sea ice[J]. *Clim. Dyn.*, 62: 7417–7427. doi: [10.1007/s00382-024-07286-z](https://doi.org/10.1007/s00382-024-07286-z)

Mitchell D M, Gray L J, Anstey J, et al. 2013. The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate[J]. *J. Climate*, 26: 2668–2682. doi:[10.1175/JCLI-D-12-00030.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00030.1)

Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence to frequent Eurasian cold winters in the recent past[J]. *Nat. Geosci.*, 7: 869–873. doi:[10.1038/ngeo2277](https://doi.org/10.1038/ngeo2277)

Mu G, Zhang W, Jiang F, et al. 2024. Asymmetric impact of ENSO on the late winter Warm Arctic-Cold Eurasian pattern[J]. *Clim. Dyn.*, 62: 9807–9819. doi:[10.1007/s00382-024-07435-4](https://doi.org/10.1007/s00382-024-07435-4)

Overland J, Dethloff K, Francis J, et al. 2016. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic[J]. *Nat. Clim. Change*, 6: 992–999. doi:[10.1038/nclimate3121](https://doi.org/10.1038/nclimate3121)

Rantanen M, Karpechko A Y, Lipponen A, et al. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979[J]. *Commun. Earth. Environ.*, 3: 168. doi:[10.1038/s43247-022-00498-3](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3)

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](https://doi.org/10.1038/nature09051)

Tyrlis E, Bader J, Manzini E, et al. 2020. On the role of Ural blocking in driving the Warm Arctic-Cold Siberia pattern[J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146: 2138–2153. doi:[10.1002/qj.3784](https://doi.org/10.1002/qj.3784)

Wang H, Dai Y, Yang S, et al. 2022. Predicting climate anomalies: A real challenge[J]. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.* 15, 100115. doi:[10.1016/j.aosl.2021.100115](https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100115)

王会军, 戴永久, 杨崧等. 2024. 气候系统预测: 基础创新和集成应用[J]. 大气科学学报, 47(2): 161–172. Wang H, Dai Y, Yang S, et al. 2024. Climate system prediction: fundamental innovations and integrated applications[J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 47(2):161–172. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240303007](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240303007)

王会军, 孙建奇, 陈活泼, 等. 2025. 全球变暖加速和气候极端化—2024年中国气候研究重大进展速评[J]. 大气科学学报, 48(1): 1–7. Wang H, Sun J, Chen H, et al. 2025. Global warming acceleration and climate extremization: comments on major climate research advances in China 2024[J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 48(1):1–7. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20250122001](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20250122001)

Wu B, Li Z, Zhang X. 2025. Arctic sea ice melting has triggered distinct interdecadal

- transitions since 2000[J]. *J. Climate*, 38: 973–988. doi: [10.1175/JCLI-D-24-0163.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0163.1)
- Xie Y, Wu G, Liu Y, et al. 2022. A dynamic and thermodynamic coupling view of the linkages between Eurasian cooling and Arctic warming[J]. *Clim. Dyn.*, 58: 2725–2744. doi:[10.1007/s00382-021-06029-8](https://doi.org/10.1007/s00382-021-06029-8)
- Xu T, Yin Z, Zhang Y, et al. 2024. Identification of shortcomings in simulating the subseasonal reversal of the warm Arctic–cold Eurasia pattern[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 51: e2023GL105430. doi:[10.1029/2023GL105430](https://doi.org/10.1029/2023GL105430)
- Xu T, Yin Z, Ma X, et al. 2023. Hybrid seasonal prediction of meridional temperature gradient associated with “Warm Arctic-Cold Eurasia” [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 40(9): 1649–1661. doi: [10.1007/s00376-023-2226-3](https://doi.org/10.1007/s00376-023-2226-3)
- Xu X, He S, Zhou B, et al. 2023. Arctic warming and Eurasian cooling: weakening and reemergence[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 50: e2023GL105180. doi:[10.1029/2023GL105180](https://doi.org/10.1029/2023GL105180)
- Xu X, He S, Zhou B, et al. 2022. The role of mid-latitude westerly jet in the impacts of November Ural blocking on early-winter warmer Arctic-colder Eurasia pattern[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 49: e2022GL099096. doi:[10.1029/2022GL099096](https://doi.org/10.1029/2022GL099096)
- Yang H, Fan K. 2022. Reversal of monthly East Asian winter air temperature in 2020/21 and its predictability[J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 15(1): 100142. doi:[10.1016/j.aosl.2021.100142](https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100142)
- Ye K, Messori G. 2020. Two leading modes of wintertime atmospheric circulation drive the recent warm Arctic–cold Eurasia temperature pattern[J]. *J. Climate*, 33: 5565–5587. doi: [10.1175/JCLI-D-19-0403.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0403.1)
- Yin M, Yang X, Sun L, et al. 2025. Amplified wintertime Arctic warming causes Eurasian cooling via nonlinear feedback of suppressed synoptic eddy activities[J]. *Sci. Adv.*, 11(12): eadr6336. doi:[10.1126/sciadv.adr6336](https://doi.org/10.1126/sciadv.adr6336)
- 尹志聪, 霍芊伊, 麻晓晴, 等. 2023. 触发 2023 年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制[J]. *大气科学学报*, 46(3):321–331. Yin Z, Huo Q, Ma X, et al. 2023. Mechanisms of dust source accumulation and synoptic disturbance triggering the 2023 spring sandstorm in northern China[J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 46(3): 321–331. doi: [10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230501007](https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230501007)
- Yin Z, Wan Y, Zhang Y, et al. 2022. Why super sandstorm 2021 in North China? [J] *Natl. Sci. Rev.*, 9 (3): nwab165. doi:[10.1093/nsr/nwab165](https://doi.org/10.1093/nsr/nwab165)
- Yin Z, Wang H. 2017. Role of Atmospheric Circulations in Haze Pollution in December

2016[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17(18): 11673–11681. doi:[10.5194/acp-17-11673-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-11673-2017)

Yin Z, Xu T, Zhang Y, et al. 2025. How to improve the prediction of the phase shift of “Warm Arctic–Cold Eurasia” pattern between early and late winter?[J] *J. Geophys. Res. Atmos.*, under review.

Yin Z, Zhang Y, He S, et al. 2024. Warm Arctic-Cold Eurasia pattern helps predict spring wildfire burned area in West Siberia[J]. *Nat. Commun.*, 15: 9041. doi: [10.1038/s41467-024-53470-4](https://doi.org/10.1038/s41467-024-53470-4)

Yin Z, Zhang Y, Zhou B, et al. 2023. Subseasonal variability and the Arctic warming–Eurasia cooling trend[J]. *Sci. Bull.*, 68(5): 528–535. doi: [10.1016/j.scib.2023.02.009](https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.02.009)

Yu X, Liu C, Wang X, et al. 2022. Evaluation of Arctic sea ice drift and its relationship with near-surface wind and ocean current in nine CMIP6 models from China[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39: 903–926. doi: [10.1007/s00376-021-1153-4](https://doi.org/10.1007/s00376-021-1153-4)

Zhang R N, Screen J A, Zhang R H. 2022. Arctic and Pacific Ocean Conditions Were Favorable for Cold Extremes over Eurasia and North America during Winter 2020/21[J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 103: E2285–E2301.doi: [10.1175/BAMS-D-21-0264.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0264.1)

Zhang T, Zhu S, Song Y, et al. 2023. Leading Modes of Northern Eurasian Winter Snowfall Variability and the Potential Influencing Factors[J]. *J. Climate*, 36: 7811–7826.doi: [10.1175/JCLI-D-22-0881.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0881.1)

Zhang Y, Yin Z, Wang H. 2023. Subseasonal transition of Barents-Kara sea-ice anomalies in winter related to the reversed warm Arctic-cold Eurasia pattern[J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 16: 100392. doi:[10.1016/j.aosl.2023.100392](https://doi.org/10.1016/j.aosl.2023.100392)

Zhang Y, Yin Z, Wang H, et al. 2021. 2020/21 Record-breaking cold waves in east of China enhanced by the “Warm Arctic-Cold Siberia” pattern[J]. *Environ. Res. Lett.*, 16: 094040. doi:[10.1088/1748-9326/ac1f46](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1f46)

Zhang Y, Yin Z, Zhou B, et al. 2022. Possible relationship between January “Warm Arctic-Cold Eurasia” and February haze in North China[J]. *J. Climate*, 35: 4115–4130.doi: [10.1175/JCLI-D-21-0465.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0465.1)

Zhao L, Liu Y, Ding Y, et al. 2023. The warm Arctic–cold Eurasia pattern and its key region in winter in CMIP6 model simulations[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 40(12): 2138–2153. doi: [10.1007/s00376-022-2201-4](https://doi.org/10.1007/s00376-022-2201-4)

Zheng B, Ciais P, Chevallier F, et al. 2023. Record-high CO<sub>2</sub> emissions from boreal fires in 2021[J]. Science, 379: 912–917. doi:[10.1126/science.adc0805](https://doi.org/10.1126/science.adc0805)

Zheng F, Yuan Y, Ding Y, et al. 2022. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic[J]. Adv. Atmos. Sci., 39(4): 546–552, doi:[10.1007/s00376-021-1033-y](https://doi.org/10.1007/s00376-021-1033-y)

Zhong W, Yin Z, Wang H. 2019. The Relationship between Anticyclonic Anomalies in Northeast Asia and Severe Haze in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Atmos. Chem. Phys., 19(9): 5941–5957. doi:[10.5194/acp-19-5941-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-5941-2019)

Zhou B, Song Z, Yin Z, et al. 2024. Recent autumn sea ice loss in the eastern Arctic enhanced by summer Asian-Pacific Oscillation[J]. Nat. Commun., 2024, 15, 2798. doi: [10.1038/s41467-024-47051-8](https://doi.org/10.1038/s41467-024-47051-8)

大

科

大

博

海

游

海

刊