大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

东亚冬季气温异常冷暖反转模态的非对称特征及其维持机制

李乔 刘伯奇

Asymmetric Characteristics and Maintenance Mechanisms of the East Asian Winter Temperature Anomaly Reversal Mode

LI Qiao LIU Boqi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2501.24041

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

东亚冬季大范围长时间气温反相事件及成因探究

East Asia Large-Scale Temperature Reversal Events in Winter and the Exploration of Their Cause

大气科学. 2025, 49(2): 369 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2310.23105

中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析

Characteristics and Causes of Intraseasonal Variation of Winter Temperature in China under Different Interdecadal Scale

大气科学. 2022, 46(3): 573 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21027

东亚气温前冬与后冬反相的变化特征及可能影响因子

Variability of the Phase Reversal of the East Asia Temperature from Early to Late Winter and the Possible Influencing Factors

大气科学. 2021, 45(5): 1039 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20181

秋季北大西洋马蹄型海温异常与初冬我国气温年际变化的联系

Characteristics of North Atlantic Horseshoe Sea Surface Temperature Anomaly in Autumn and Relationship with Interannual Variation in Early Winter Temperature in China

大气科学. 2024, 48(3): 1131 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22106

热带和副热带环流对东亚低纬度冬季风强度影响

Contribution of Tropical and Subtropical Circulation Anomalies to the Intensity of East Asian Winter Monsoon over Lower-Latitude Region

大气科学. 2020, 44(5): 960 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19141

德国气候预测系统中东亚冬季风的季节预测及可预报性

Seasonal Prediction and Predictability of the East Asian Winter Monsoon by the German Climate Forecast System

大气科学. 2024, 48(3): 1027 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2206.22072

关注微信公众号，获得更多资讯信息

第 49 卷第 6 期
Vol. 49 No. 6
Nov. 2025
大气科学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

李乔, 刘伯奇. 2025. 东亚冬季气温异常冷暖反转模态的非对称特征及其维持机制 [J]. 大气科学, 49(6): 1691−1710. LI Qiao, LIU Boqi. 2025. Asymmetric Characteristics and Maintenance Mechanisms of the East Asian Winter Temperature Anomaly Reversal Mode [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 49(6): 1691−1710. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2501.24041

东亚冬季气温异常冷暖反转模态的非对称特征及其维持机制

李乔　刘伯奇

中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081

摘　要　东亚地区气温异常的冷暖反转是全球变暖背景下冬季最重要的气候现象之一。和冬季平均气温异常相比，冷暖反转现象的气候预测不确定性更大，其造成的不利影响也更为重大。本文基于 1980/81 至 2022/23 年冬季大气再分析资料，利用季节经验正交分解和合成分析方法，分析了东亚冬季气温冷暖反转模态的年际变化特征。结果表明，虽然东亚冬季气温冷暖反转模态的不同过程都与西伯利亚高压、欧亚大气遥相关和北极极涡异常的季节内相互作用有关，但“暖转冷”过程的年际变率明显强于“冷转暖”过程，说明冷暖反转模态的年际变化存在明显的非对称性。在“暖转冷”过程中，前冬类似东大西洋/西俄罗斯型的大气遥相关正位相在后冬转为负位相，西伯利亚高压随之逐渐增强，后冬东亚地区冷空气更为活跃。而在“冷转暖”过程中，冬季北极极涡强度由弱变强，西伯利亚高压随之由强变弱，有利于东亚地区出现前冬冷、后冬暖的温度异常特征。进一步分析表明，冬季 La Niña 背景下的北大西洋和热带印度洋海温异常是“暖转冷”过程的可能影响因子，而秋末巴伦支—喀拉海海冰异常偏少则是“冷转暖”过程的潜在前兆信号，说明大气下垫面外强迫差异是造成东亚冬季冷暖反转模态不同过程强度不对称的重要原因。因此，东亚冬季冷暖反转现象的气候预测需要考虑不同大气下垫面外强迫影响的多样性。

关键词　东亚冬季风　气温异常　冷暖季节内反转　年际变化　非对称性

文章编号　1006-9895(2025)06-1691-20　　**中图分类号**　P466　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2501.24041

Asymmetric Characteristics and Maintenance Mechanisms of the East Asian Winter Temperature Anomaly Reversal Mode

LI Qiao and LIU Boqi

State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology (*LaSW*), *Chinese Academy of Meteorological Sciences* (*CAMS*), *Beijing* 100081

Abstract　The reversal of temperature anomalies from warm to cold and vice versa in the East Asian region is a significant climatic phenomenon occurring during the winter season under the context of global warming. Compared to the variability of seasonal-mean winter temperature anomalies, the climate prediction uncertainty for the reversal

收稿日期　2024-04-12；**网络预出版日期**　2025-03-06

作者简介　李乔，硕士研究生，主要从事东亚冬季极端气温事件的机理研究。E-mail: liqiao224@163.com

通讯作者　刘伯奇，研究员，主要从事东亚季风气候动力学和次季节预测研究。E-mail: liubq@cma.gov.cn

资助项目　国家自然科学基金项目 U2242205、42375033，中国气象科学研究院科技发展基金项目 2023KJ036，基本科研业务费项目 2023Z018，气象能力提升联合研究专项 24NLTSZ001

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grants U2242205, 42375033), Science & Technology Development Foundation of the Chinese Academy of Meteorological Sciences (CAMS) (Grant 2023KJ036), Basic Scientific Research and Operation Foundation of the CAMS (Grant 2023Z018), Joint Research Program for Enhancing Meteorological Capabilities (Grant 24NLTSZ001)

phenomenon is greater, and its adverse effects are more significant. In this study, seasonal empirical orthogonal decomposition and composite analysis were performed on atmospheric reanalysis data from the winters of 1980/81 to 2022/23 to investigate the interannual variability of the East Asian winter temperature anomaly reversal mode (TARM). The results indicate that although the different processes of the East Asian winter TARM are related to intraseasonal reversals of the Siberian High, the Eurasian teleconnection, and the Arctic vortex anomalies, the interannual variability of the "warm-to-cold" mode is significantly stronger than that of the "cold-to-warm" mode, suggesting a pronounced asymmetry in the interannual variability of TARM. In the "warm-to-cold" mode, the lower-level Siberian High strengthens over time: the positive phase of the East Atlantic–West Russia–like teleconnection in early winter shifts to a negative phase in late winter, leading to more active cold air. Conversely, in the "cold-to-warm" mode, the intensity of the winter Arctic vortex shifts from weak to strong, and subsequently, the Siberian High weakens, favoring the appearance of temperature anomalies that are cold in early winter and warm in late winter. Further analysis shows that the North Atlantic and tropical Indian Ocean sea surface temperature anomalies with La Niña are important factors influencing the "warm-to-cold" mode, while a reduction in the Barents–Kara sea ice in November acts as a precursor signal for the "cold-to-warm" mode. Therefore, the diversity of underlying atmospheric conditions is an important cause of the asymmetry of the East Asian winter TARM. Therefore, climate prediction for the East Asian winter TARM should consider the diversity of the underlying atmospheric conditions.

Keywords East Asia winter monsoon, Air temperature anomaly, Subseasonal reversal between warm and cold anomalies, Interannual variability, Asymmetric features

1 引言

东亚地区具有明显的季风气候特征，也是世界上人口最稠密的地区之一。在东亚冬季风异常的影响下，东亚极端冷事件成为局地冬季最重要的极端天气现象之一，对人类生产生活和经济社会发展造成严重影响（Wen et al., 2009; Ding et al., 2009; Curtis et al., 2017; Ma and Zhu, 2019; Mu et al., 2022; Zheng et al., 2022）。

已有研究表明，东亚冬季平均地面气温异常包含全国一致型和南北反相型两种主导模态（康丽华等, 2006）。虽然在全球变暖背景下，东亚冬季平均气温逐渐升高，但东亚地区冬季气温异常的月际波动却变得更加明显，局地气温的次季节变率增加（Wang et al., 2021），表现为季节内极冷和极暖事件频繁交替、气温异常的"两极化"现象明显加剧（Ma et al., 2018）。极端冷、暖事件的交替发生可能对生态系统造成更加严重的损害（Casson et al., 2019）。同时，冬季气温的冷暖反转也会对居民健康、交通运输、农（渔）业生产等造成不便，影响人们的正常生活，造成巨大的经济损失（Xu et al., 2018; Dai et al., 2019）。

因此，东亚冬季气温异常的冷暖反转成为近年来东亚气候研究的新热点。东亚冬季风（EAWM）是北半球冬季最重要的环流系统之一，其季节内变化是东亚冬季气温异常冷暖反转的直接环流载体（Wang et al., 2010; Wang and Chen, 2014; 马锋敏等, 2022）。当 EAWM 强度发生次季节反转时，东亚气温异常也随之改变。尤其是当 EAWM 异常偏强时，西伯利亚高压和东亚大槽同时增强，令亚洲地表产生反气旋异常，东亚东部的偏北气流加强，引导北方冷空气入侵东亚地区（Zhong and Wu, 2023）。EAWM 异常和冬季欧亚中高纬地区对流层中、上部活跃的大气遥相关联系紧密，包括欧亚遥相关型（Wallace and Gutzler, 1981）、斯堪的纳维亚型遥相关型（SCAND 型）和东大西洋/西俄罗斯（East Atlantic/West Russia，EATL/WRUS）遥相关型（刘毓赟和王林, 2014; 韦玮等, 2014; Liu et al., 2014; Wu and Chen, 2020）。作为重要的大气内部动力过程，这些大气遥相关型能够通过影响 EAWM 来调制东亚冬季地表气温（祁莉和泮琬楠, 2021）。与此同时，热带西太平洋遥相关（李勇等, 2007）和太平洋—东亚遥相关（Wang et al., 2000）等欧亚大陆上空遥相关型都能够影响东亚冬季地面气温异常。另一方面，大气下垫面外强迫，包括海温异常、北极海冰和陆地积雪等，也是东亚冬季冷暖反转现象的可预报性来源（Wang et al., 2000; Cohen et al., 2007; Li et al., 2021; Song et al., 2022）。例如，前冬南印度洋暖海温异常能够通过局地经向环流减弱乌拉尔高压和西伯利亚高压，令

前冬东亚地区异常偏暖（Zhang et al., 2024）。而后冬极涡减弱则会导致北大西洋中纬度地区产生异常西风，令海表温度降低、乌拉尔阻塞增强，造成后冬东亚上空的异常降温（Zhong and Wu, 2024）。近年来，与北极海冰气候影响有关的“暖北极—冷欧亚”和“冷北极—暖欧亚”模态的次季节变化变得更为频繁（Yin et al., 2023）。乌拉尔山阻塞、“暖北极—冷欧亚”和巴伦支—喀拉海海冰的相互作用能够通过正反馈过程加剧欧亚大陆的异常低温（Zhang et al., 2023）。此外，欧亚大陆冬季积雪异常通过与北极海冰变化的相互作用间接影响EAWM，准确的积雪初始化能够提高东亚冬季气温的次季节和季节预报技巧（Orsolini et al., 2012, 2013）。

大气内部动力过程和大气下垫面外强迫之间复杂的相互作用，增加了东亚冬季气温异常冷暖反转现象气候预测的不确定性。虽然东亚冬季平均气温异常的气候可预报性研究取得了系统性成果，最新的动力预测系统有效提高了冬季平均气温异常的预测技巧，但气候模式对东亚冬季气温冷暖反转现象的预测技巧依然很低。已有研究大都将东亚冬季“冷转暖”和“暖转冷”过程视为对称反相的气候异常现象（韦玮等, 2020; 祁莉和泮琬楠, 2021; Zhong and Wu, 2023），但对两者之间的非对称性关注较少。业务实践经验表明，气候系统模式对“暖转冷”过程的预测技巧较高，而对“冷转暖”过程的预测技巧则明显偏低，但具体原因尚不清楚。因此，本文将聚焦东亚地区冬季气温冷暖反转模态不同位相之间的非对称性，对比冷暖反转模态不同位相大气环流和下垫面异常信号的差别，为提高东亚冬季气温异常季节内变化过程的气候预测水平提供科学依据。

2　资料和方法

2.1　资料介绍

本文采用的大气环流场资料为欧洲中期数值预报中心（ECMWF）水平分辨率为1.0°×1.0°的ERA5逐月再分析资料（Hersbach et al., 2020），变量包括：地面2 m气温，海平面气压场，850 hPa和500 hPa风场及位势高度场，200 hPa位涡，海冰覆盖率。本文的海表温度来自扩展重建海面温度（ERSST）数据集逐月海表温度，水平分辨率为2.0°×2.0°（Huang et al., 2017），降水数据来自全球降水计划（GPCP）的逐月降水资料，水平分辨率为1.25°×1.25°（Adler et al., 2018）。

2.2　方法说明

本文使用季节经验正交分解方法（S-EOF，Wang and An, 2005）提取东亚地区冬季气温冷暖反转模态及其时间序列，并使用North检验（North et al., 1982）分析主模态的正交显著性。季节性经验正交分解的优势是能够提取逐年气象要素季节或次季节演变过程的年际变化主模态特征。在此基础上，本文使用合成分析研究冷暖反转模态不同位相的非对称特征，并采用双边 t 检验计算合成分析结果的统计显著性（Student, 1992）。本文的研究时间段为1980～2022年冬季（11月至次年2月），并在分析中聚焦年际尺度分量：首先去除各要素的长期线性趋势，再通过九年滑动平均提取年代际分量，最后扣除年代际信号得到年际分量。本文所有物理量在分析中均已提取年际分量。

3　东亚冬季气温异常月际波动的主模态特征

北半球冬季气温方差变率的空间分布存在明显月际差异（图1），大值区位于高纬度地区，极大值中心位于西伯利亚和阿拉斯加地区。对东亚地区而言，冬季气温方差变率的大值中心位于东北亚地区、青藏高原和蒙古高原大地形区。我国东部地区气温年际方差变率在11月至次年1月期间相对较小（<3.0 K），但在次年2月明显加大（3.0～6.0 K），说明东亚地区冬季气温异常存在明显的月际波动特征。为了聚焦东亚地区冬季气温异常的主要特征，本文选取（20°～60°N，80°～130°E）作为研究区域。

S-EOF分析结果表明，东亚冬季气温异常月际波动的前两个主模态（图2）通过了North显著性检验。其中，第一主模态（图2a–d）的解释方差为21.70%，气温异常在前（11～12月）、后冬（次年1～2月）的变化特征保持一致，表现为青藏高原和东北亚地区存在两个反相变化的气温异常中心：当青藏高原地区异常偏冷（暖）时，东北亚地区异常偏暖（冷）。从前冬到后冬，该模态的气温异常振幅逐渐加强。第二模态（图2e–h）的解释方差为13.69%，气温异常在前、后冬呈现反相变化特征，并且空间差异更大：前冬，当东亚南部和青藏

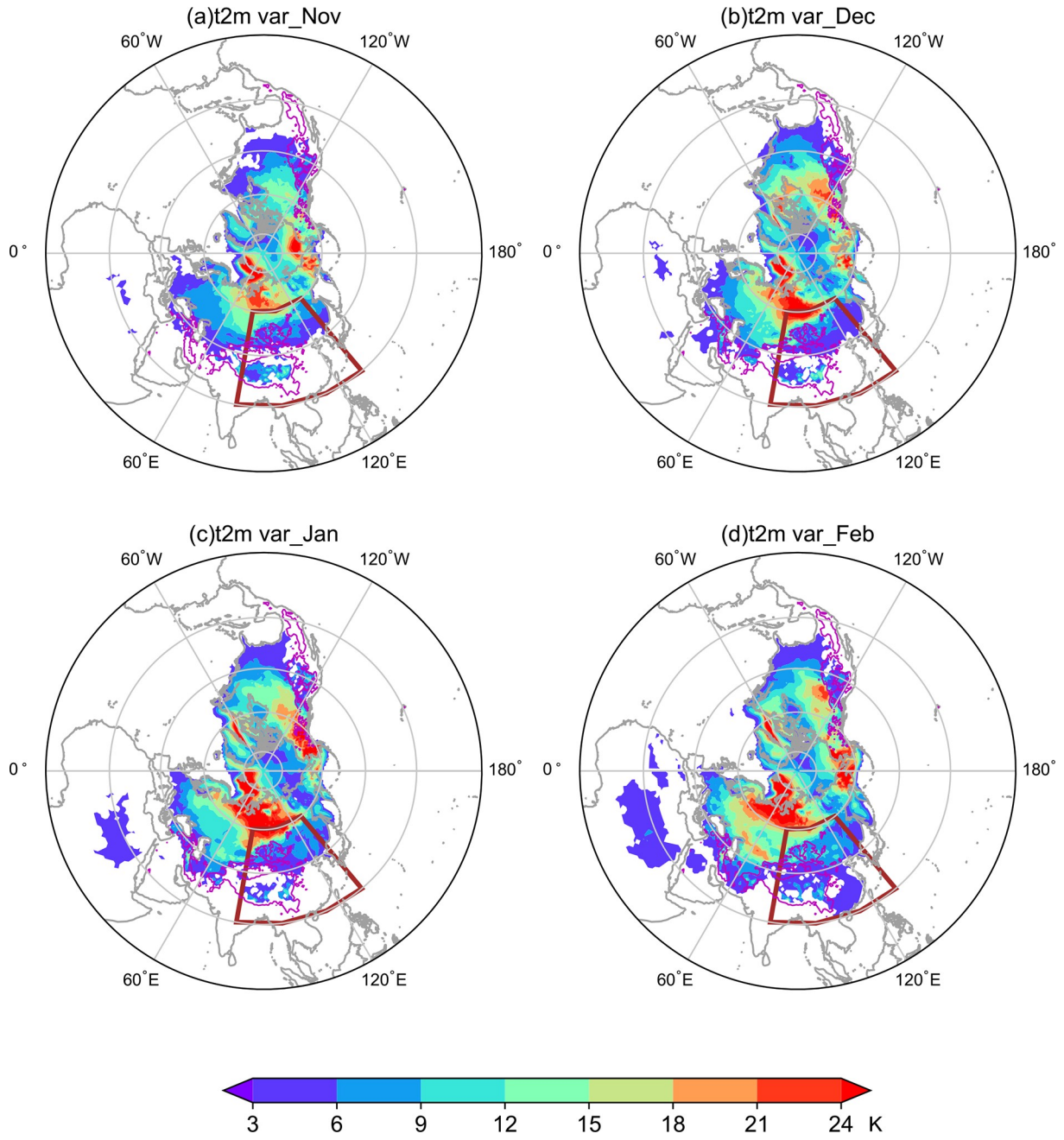


图 1 全球（a–d）11 月至次年 2 月逐月平均 2 m 气温方差空间分布（单位：K）。紫色线为地形 1500 m 等值线。棕色框区域为本文研究的东亚地区气温变化关键区。

Fig. 1 Spatial distribution of the global average winter 2-m-height temperature variance (units: K) from (a–d) November to the following February. The purple line indicates the 1500-m terrain contour. The brown box encloses the key region of temperature change in East Asia examined in this study.

高原异常偏冷（暖）时，亚洲北部异常偏暖（冷）；后冬，东亚中、南部地区出现大范围冷（暖）气温异常，而亚洲北部气温异常则迅速减弱。因此，第一模态反映了东亚地区冬季气温异常的一致性变化特征，而第二模态则描述了东亚地区冬季气温异常的冷暖反转现象。

两个主模态的时间系数（主成分）都具有明显的多时间尺度变化特征。第一主成分（PC1）呈现线性上升趋势，说明全球气候变暖对东亚冬季气温异常一致性变化存在一定的影响（IPCC, 2021），尽管该趋势未通过显著性检验（图 3a）。在年代际时间尺度上，PC1 正位相出现在 1988～2004 年，

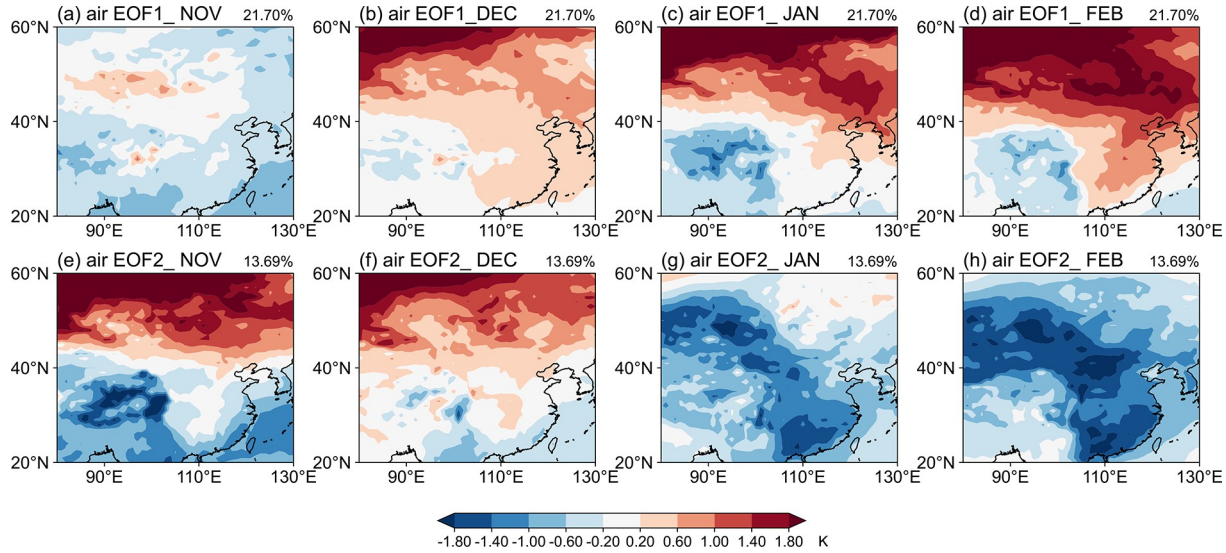


图 2　1980～2022 年东亚（20°～60°N，80°～130°E）冬季（11 月至次年 2 月）逐月 2 m 气温距平 S-EOF（a–d）第一模态和（e–h）第二模态空间分布（单位：K）。

Fig. 2　Spatial pattern of (a–d) the first S-EOF mode and (e–h) the second mode of monthly winter (November to the following February) 2-m-height air temperature anomalies (units: K) in East Asia (20°−60°N, 80°−130°E) from 1980 to 2022.

而负位相则出现在 2005～2015 年，这既和东亚地区冬季气温异常的年代际波动特征吻合（Yun et al., 2018），也与季节平均东亚冬季风的年代际变化同步（Wang et al., 2009; Wang and Chen, 2014; Wang and Lu, 2017）。PC1 年际分量的强度在正、负位相年相当，分别为+1.40 和−1.27。对第二主成分（PC2）而言，其线性下降趋势不显著（图 3b），其年代际分量的正位相出现在 1980～1987 和 2005～2018 年，负位相出现在 1987～2005 年和 2018～2022 年。尤其是在 2016～2022 年期间，PC2 年代际分量负位相和线性下降趋势相叠加，对应该时段内东亚地区“前冬冷、后冬暖”现象频发。在年际时间尺度上，PC2 年际分量在正位相年的平均值为+1.64，而在负位相年的平均值为−1.04，两者的差异通过了 95% 显著性检验，说明东亚冬季冷暖反转模态的年际变化强度具有明显不对称性。值得注意的是，冬季气温冷暖反转模态的非对称性不依赖于气候变暖的长期趋势，说明这种非对称性是东亚冬季气温异常的固有属性。

4　东亚冬季气温冷暖反转模态的非对称性

为了进一步分析东亚冬季冷暖反转模态强度的不对称性特征，本文以 PC2 年际分量标准差±0.7 作为正负位相年标准，挑选出特征年进行合成分析。其中，8 个正位相特征年（“暖转冷”）包括：1983、1988、1995、1999、2004、2007、2013 和 2021 年，10 个负位相特征年（“冷转暖”）包括：1981、1984、1986、1998、2000、2002、2009、2012、2016 和 2019 年。

4.1　大气环流异常特征

在对流层低层，正位相年 11 月份的西伯利亚高压中心位于 40°N 以北，且范围较小（图 4a）。12 月至次年 2 月，高压中心南移至 40°N 左右，中心强度加强，伴随着偏北风异常增强，此时西伯利亚高压异常加强并南压（图 4b–d）。而在负位相年，11 月份显著的位势高度正异常位于 60°N 以北的西伯利亚地区，对应此时西伯利亚高压异常偏强（图 4e）。该异常高压于 12 月份逐渐减弱（图 4f），并在 1 月份转变为异常低压，其中心位于蒙古高原附近，相应地西伯利亚高压异常偏弱（图 4g）。2 月份，东亚地区低空大气环流异常信号不明显（图 4h）。

对流层中、高层大气环流异常的合成特征在正、负位相年也存在显著差异。在正位相年，11 月对流层中部的低压异常中心位于北大西洋和西西伯利亚上空，而高压异常中心则位于斯堪的纳维亚半岛和东北亚上空（图 5a）。上述位势高度正、负中心与对流层高层的正、负位涡异常中心相对应，

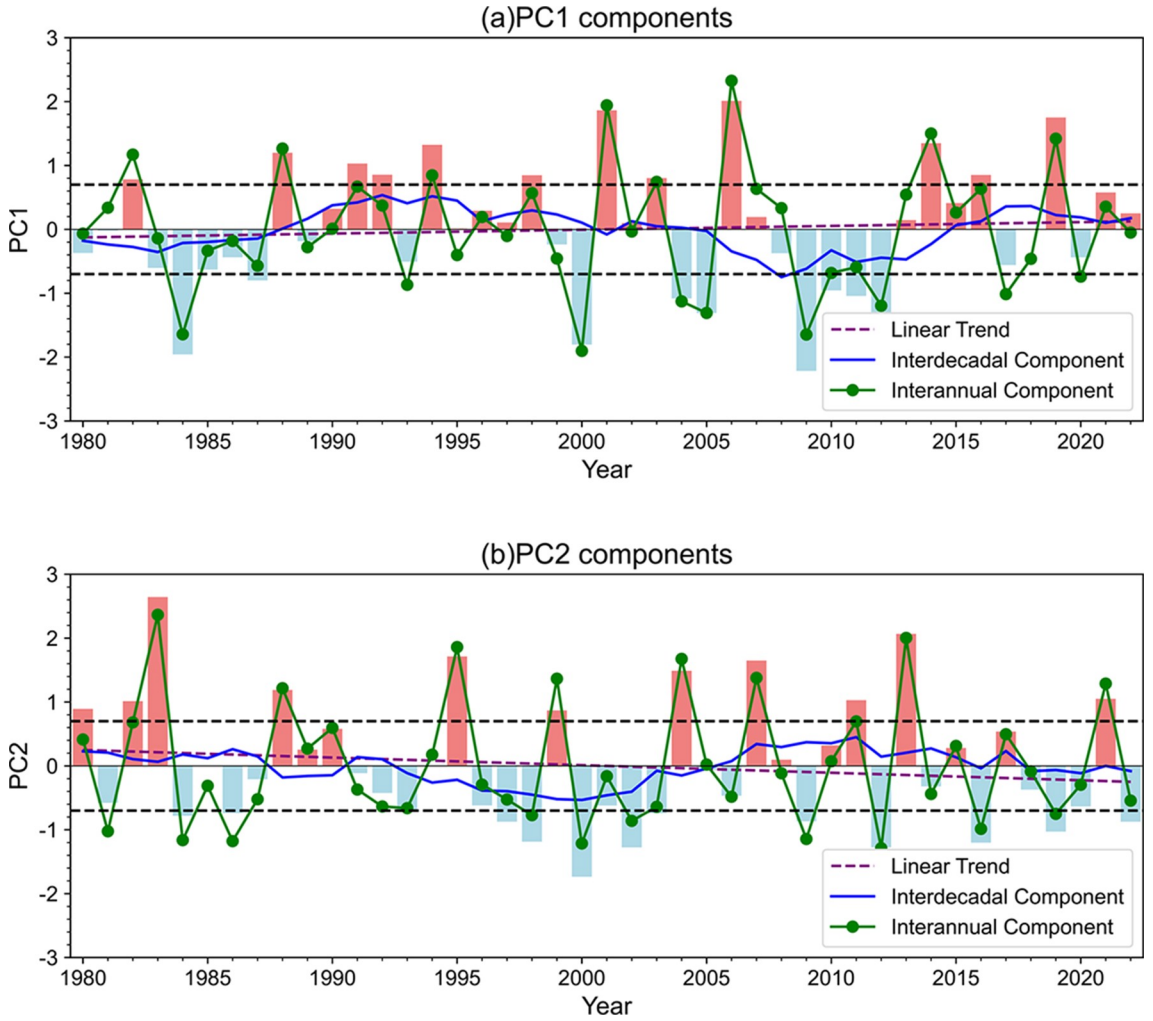


图 3 1980～2022 年冬季东亚区域（20°～60°N，80°～130°E）平均 2 m 气温标准化的（a）第一模态时间序列和（b）第二模态时间序列的线性趋势（紫色虚线）、年代际分量（蓝色实线）和年际分量（绿色实线）。

Fig. 3 Normalized time series of (a) EOF1 and (b) EOF2 of the regional average monthly winter 2-m-height air temperature anomalies in East Asia (20°−60°N, 80°−130°E) from 1980 to 2022. The purple dashed line represents the linear trend, the blue solid line indicates the interdecadal component, and the green line indicates the interannual component.

并伴随着局地气旋式和反气旋式环流异常（图 6a），表现出明显的相当正压结构。12 月，对流层中、高层的异常中心逐渐减弱（图 5b 和图 6b）。次年 1 至 2 月，高空高压异常中心移至北大西洋和东欧平原上空，而低压异常中心则位于斯堪的纳维亚半岛和东亚上空（图 5c 和 d）。此时东亚上空的异常气旋对应东亚大槽的加深发展（Barnston and Livezey, 1987; 李忠贤等, 2023）。同时，北极地区逐渐形成负位涡异常中心，对应北极极涡异常偏弱（图 6c 和 d）。在负位相年，11 月对流层中、高层的异常高压中心位于北大西洋和西西伯利亚上空，而异常低压中心则位于斯堪的纳维亚半岛和东北亚上空（图 5e 和图 6e）。该大气环流异常中心的空间分布与正位相年相近，但位相相反。12 月至次年 2 月，北极地区对流层高层的异常正位涡和气旋式环流快速发展，北极极涡异常增强、绕极西风加速，中高纬环流的经向波动减弱（图 5f–h），这时欧亚大陆对流层中层的环流异常特征不明显（图 6f–h）。上述对流层中、高层大气环流异常的空间分布特征与东大西洋/西俄罗斯（EATL/WRUS）型遥相关型相似（Wang et al., 2011; Liu et al., 2014; Gao et al., 2017; Chen et al., 2019）。

进一步分析表明，东亚地区不同纬度之间大气环流异常的联系在 PC2 年际分量不同位相下也存在明显差别，用表观热源（Q_1）异常表示（图 7）。在正位相年，11 至 12 月期间赤道附近存在强大且

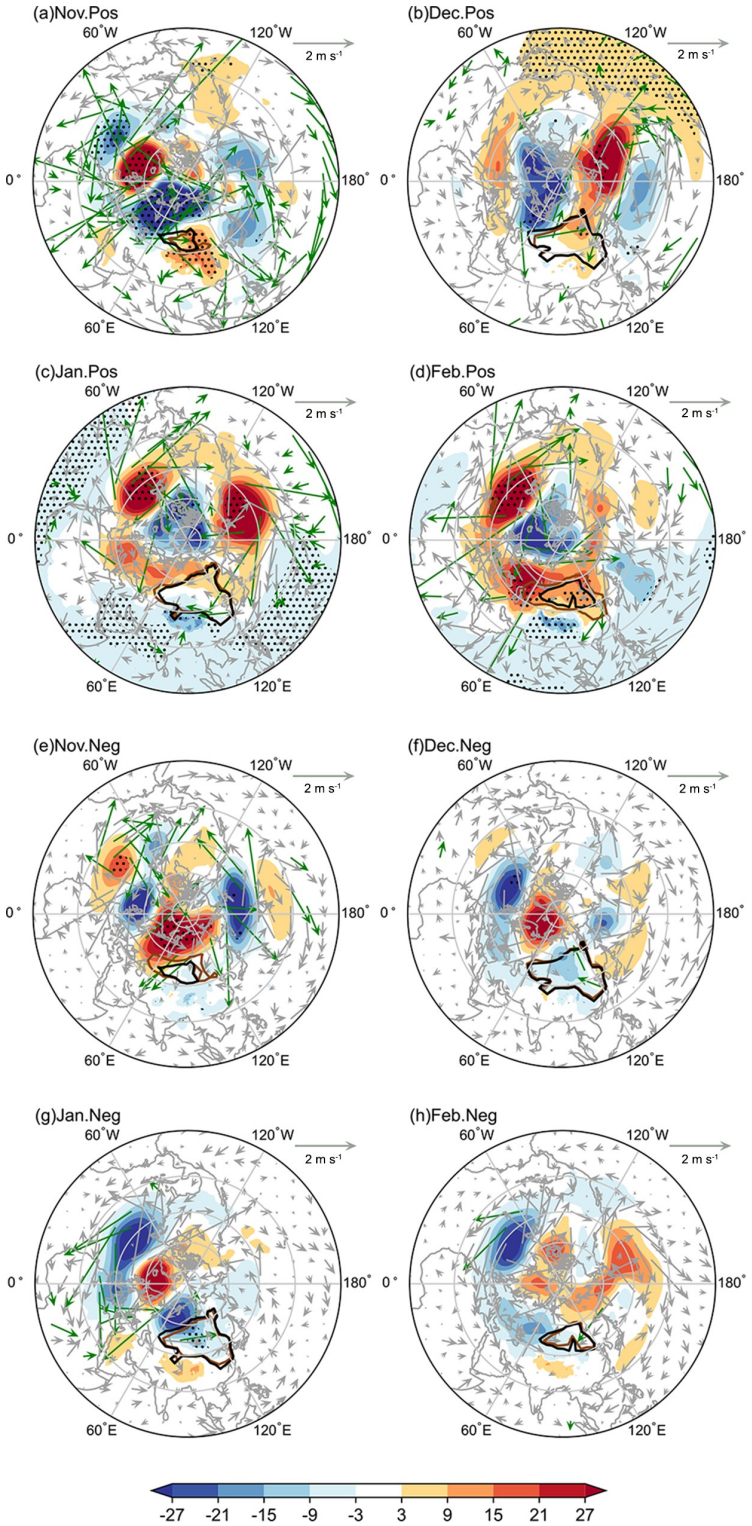


图 4　PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年 850 hPa 位势高度异常（阴影，单位：gpm）和风矢量异常（单位：m s^{-1}）以及西伯利亚高压 1047 hPa 特征线的合成场空间分布。棕色实线为正、负位相年，黑色实线为气候态。打点区域通过 95% 置信水平检验。绿色风矢量异常为通过 90%置信水平检验地区。

Fig. 4　Composites of 850-hPa geopotential height anomalies (shading, units: gpm), 850-hPa wind anomalies (units: m s^{-1}), and the 1047-hPa characteristic line of the Siberian High for (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2. The brown line indicates the the positive and negative phase years, and the black line indicates the climatic state. The dotted regions are significant at the 95% confidence level. The green wind vector anomalies are significant at the 90% confidence level.

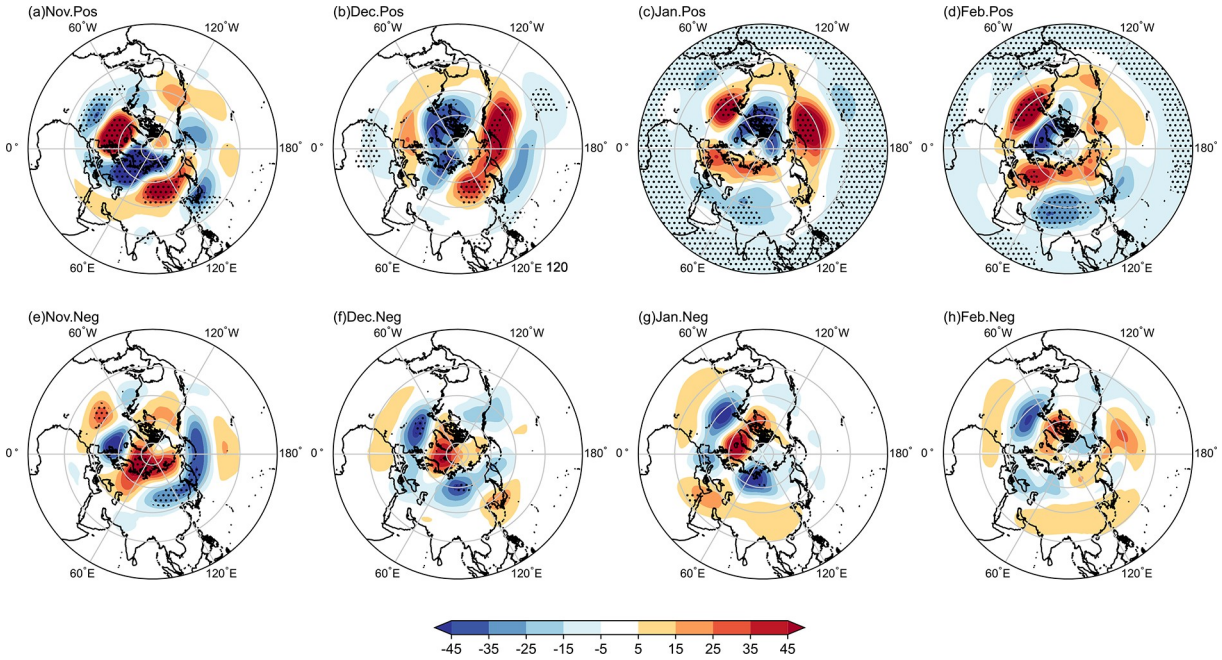


图 5 PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年 500 hPa 位势高度异常（阴影，单位：gpm）的合成场空间分布。打点区域通过 95% 置信水平检验。

Fig. 5 Composite spatial distributions of 500-hPa geopotential height anomalies (shadings, units: gpm) for the (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2. The dotted regions are significant at the 95% confidence level.

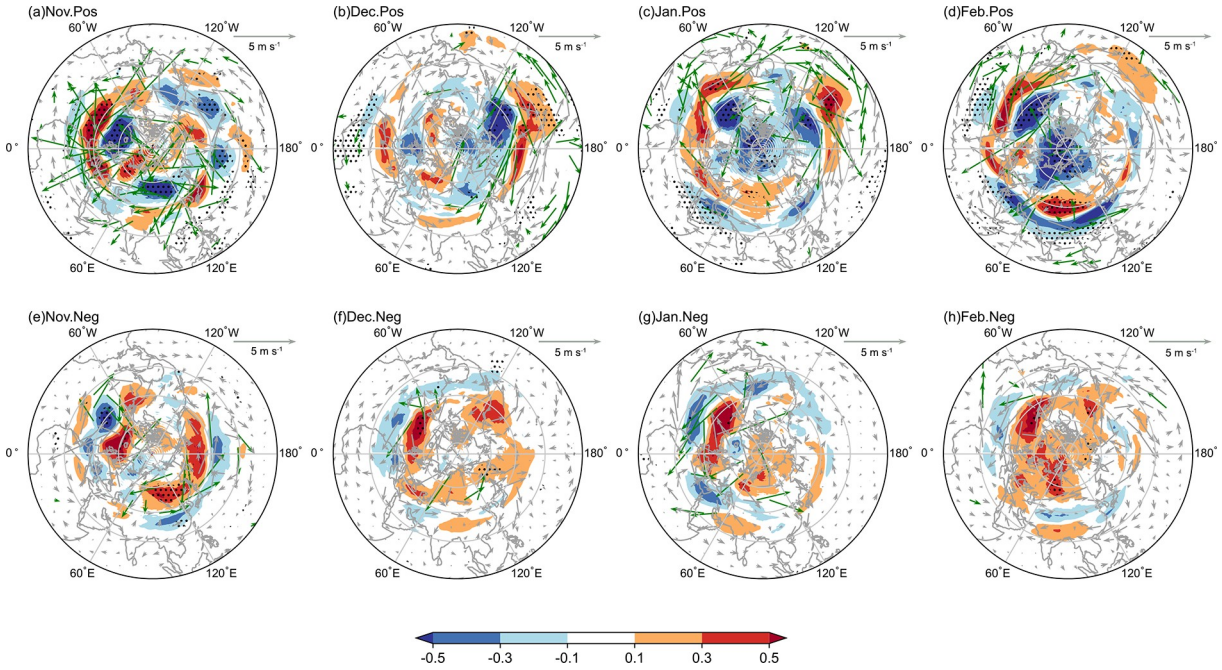


图 6 PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年 200 hPa 位涡异常（阴影，单位：K m^2 kg^{-1} s^{-1}）、500 hPa 风矢量异常（箭头，单位：m s^{-1}）的合成场空间分布。打点区域通过 95% 置信水平检验。绿色风矢量异常为通过 90%置信水平检验地区。

Fig. 6 Composite spatial distributions of 200-hPa potential vorticity anomalies (shading, units: K m^2 kg^{-1} s^{-1}) and 500-hPa wind vector anomalies (arrows, units: m s^{-1}) for the (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2.. The dotted regions are significant at the 95% confidence level. The green wind vector anomalies are significant at the 90% confidence level.

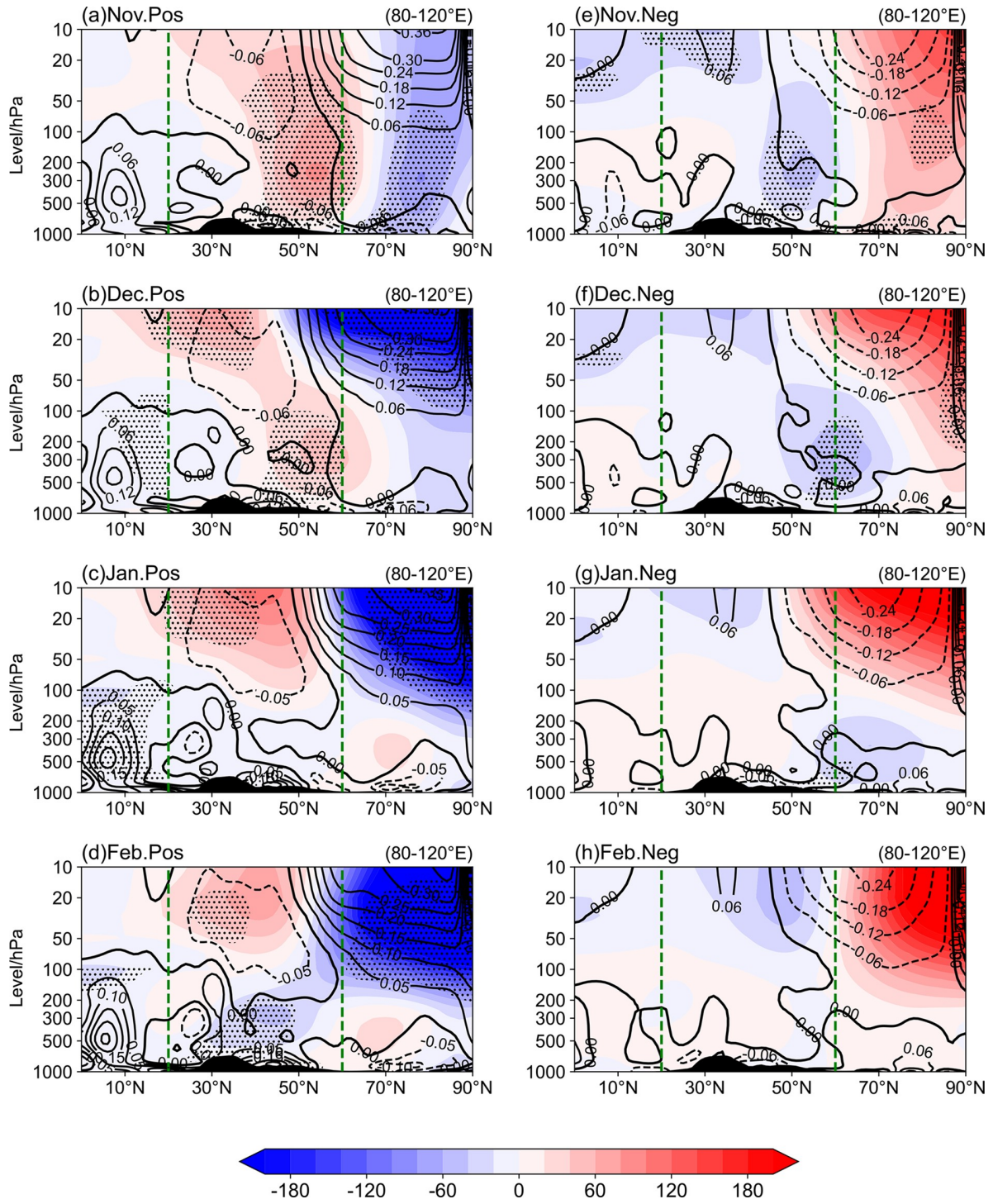


图 7　PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年的位势高度异常（阴影，单位：gpm）和表观热源（Q_1）异常（等值线，间隔为 0.06，单位：K d^{-1}）合成垂直剖面图。黑色实线为气候态；绿色虚线为研究区域。打点区域通过 95% 显著性检验。黑色阴影表示地形高度。

Fig. 7　Vertical cross-sectional composites of geopotential height anomalies (shading, units: gpm) and apparent heat source (Q_1) anomalies (contours, contour interval = 0.06, units: K d^{-1}) for the (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2. The black solid line indicates the climatic state, the green dotted line indicates the study area, and the dotted regions are significant at the 95% confidence level. Black shading indicates the topography.

深厚的大气非绝热加热异常，这与热带对流异常释放的凝结潜热有关。热带对流异常伴随着剧烈的异常上升运动，局地异常经向环流的下沉支位于东北亚地区，有利于加强东北亚地区的低空高压和反气

旋式环流，形成“前冬暖”的气候异常格局（图 7a 和 b）；次年 1 至 2 月，虽然亚洲南部的热带对流依然维持，但东亚地区对流层中、高层却转变为明显的低压异常，该低压异常逐渐向北极扩展，有利于对流层北极极涡异常减弱，东亚地区随之出现“后冬冷”的气温异常（图 7c 和 d）。在负位相年，东亚地区热带和中纬度对流层垂直环流异常并不明显。11 月，50°N 左右对流层中、高层出现显著深厚的低压异常，东亚地区出现“前冬冷”的气温异常（图 7e）。12 月至次年 1 月，该异常低压向北移动（图 7f 和 g），伴随着北极极涡逐渐增强，北半球中纬度环流经向度减小，东亚地区随之出现“后冬暖”的气温异常。次年 2 月，北极地区环流异常信号不明显（图 7h）。可见，亚洲高纬度地区对流层低压异常的向极移动超前于东亚地区的地面气温异常变化。

为了量化上述关键环流和冷暖反转模态的关系，我们进一步分析了多种环流指数和 PC2 年际分量的统计关系（图 8 和图 9），包括：（1）逐月 EATL/WRUS 遥相关指数（由美国国家海洋和大气管理局气候预测中心提供，下载数据网址为 https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.CPC/.Indices/.NHTI/ [2025-01-13]），即北半球热带外（20°N～90°N）700 hPa 位势高度距平场旋转 EOF 的第 6 主成分（Barnston and Livezey, 1987; Liu et al., 2014）；（2）西伯利亚高压指数，即（40°N～65°N，80°E～120°E）区域平均的海平面气压（Cheung and Zhou, 2015）；（3）北极极涡指数，即北极地区（65°N～90°N）加权平均的 500 hPa 位势高度场（Kolstad et al., 2010）。所有指数在统计分析之前均已提取年际分量。

在正位相年，前冬 EATL/WRUS 指数多为正值（图 8a），该指数在后冬变为负值（图 8b–d），与合成分析的结果一致。在此期间，西伯利亚高逐渐由弱变强（图 9a 红色柱），但北极极涡变化较小（图 9b 红色柱），说明 EATL/WRUS 遥相关位相的由正转负和西伯利亚高压的由弱变强是东亚冬季“暖转冷”过程的关键环流。在负位相年，虽然 EATL/WRUS 指数和 PC2 之间缺乏明显的相关性，但西伯利亚高压和北极极涡指数与 PC2 之间的对应关系却变得更加显著：11～12 月西伯利亚高压异常偏强，而北极极涡异常偏弱，对应东亚地区“前冬冷”的气温异常；次年 1～2 月，北极极涡逐渐加强，西伯利亚高压逐渐减弱，相应地东亚地区出现“后冬暖”的气温异常（图 9a 和 b 蓝色柱），说明低空西伯利亚高压和高空北极极涡异常对东亚冬季“冷转暖”过程更为重要。

EATL/WRUS 型遥相关、西伯利亚高压和北极极涡指数之间的统计相关分析进一步说明了三者内在联系在 PC2 年际分量不同位相下的明显差异（图 10）。在正位相年，冬季各月 EATL/WRUS 指数与极涡指数存在较强的同期负相关（图 10a），而 EATL/WRUS 指数与西伯利亚高压指数的同期负相关从 11 月维持至次年 2 月（图 10e），但从 11 月至次年 1 月，极涡指数与西伯利亚高压指数之间的同期相关性很弱（图 10c）。极涡指数在“暖转冷”过程中变化较小（图 9b），说明 EATL/WRUS 遥相关的位相反转并不依赖于北极极涡异常。在负位相年，EATL/WRUS 指数和西伯利亚高压指数只在 11 月存在显著的同期负相关（图 10b 和 f），而冬季各月北极极涡和西伯利亚高压指数之间均存在明显的同期正相关（图 10d），说明北极极涡和西伯利亚高压之间的联系在“冷转暖”过程中更加紧密。需要指出的是，在 12 月至次年 2 月期间，西伯利亚高压和北极极涡指数之间存在显著的超前—滞后正相关（图 10c 和 d），说明西伯利亚高压和北极极涡异常之间存在反馈过程，但具体物理机制仍有待进一步研究。因此，在正位相年，EATL/WRUS 遥相关和西伯利亚高压之间存在明显的相互作用，而在负位相年，北极极涡和西伯利亚高压的耦合联动更为明显。

4.2 大气下垫面外强迫异常

由于大气环流的记忆性小于 2 周，因此月平均环流异常必然与大气下垫面外强迫有关。北极海冰和全球海温异常作为影响东亚冬季风重要的大气下垫面外强迫，在东亚冬季气温冷暖反转模态中也存在非对称性。秋季巴伦支—喀拉海（BKS）区域（78°N–83°N，35°E～100°E）海冰是东亚冬季寒潮重要的前兆信号（Zuo et al., 2016; Zhang et al., 2020）。在正位相年，11 月 BKS 海冰的年际分量异常偏多（图 11a），2 月 BKS 海冰的年际分量显著偏少（图 11c），海冰异常和 PC2 的对应关系不稳定（图 11e），说明前期海冰异常对东亚冬季“暖转冷”过程的指示性较弱。在负位相年，BKS 海冰在 11 月异常偏少、而在 2 月异常偏多（图 11b 和 d），11 月海冰指数与 PC2 的相关系数达到+

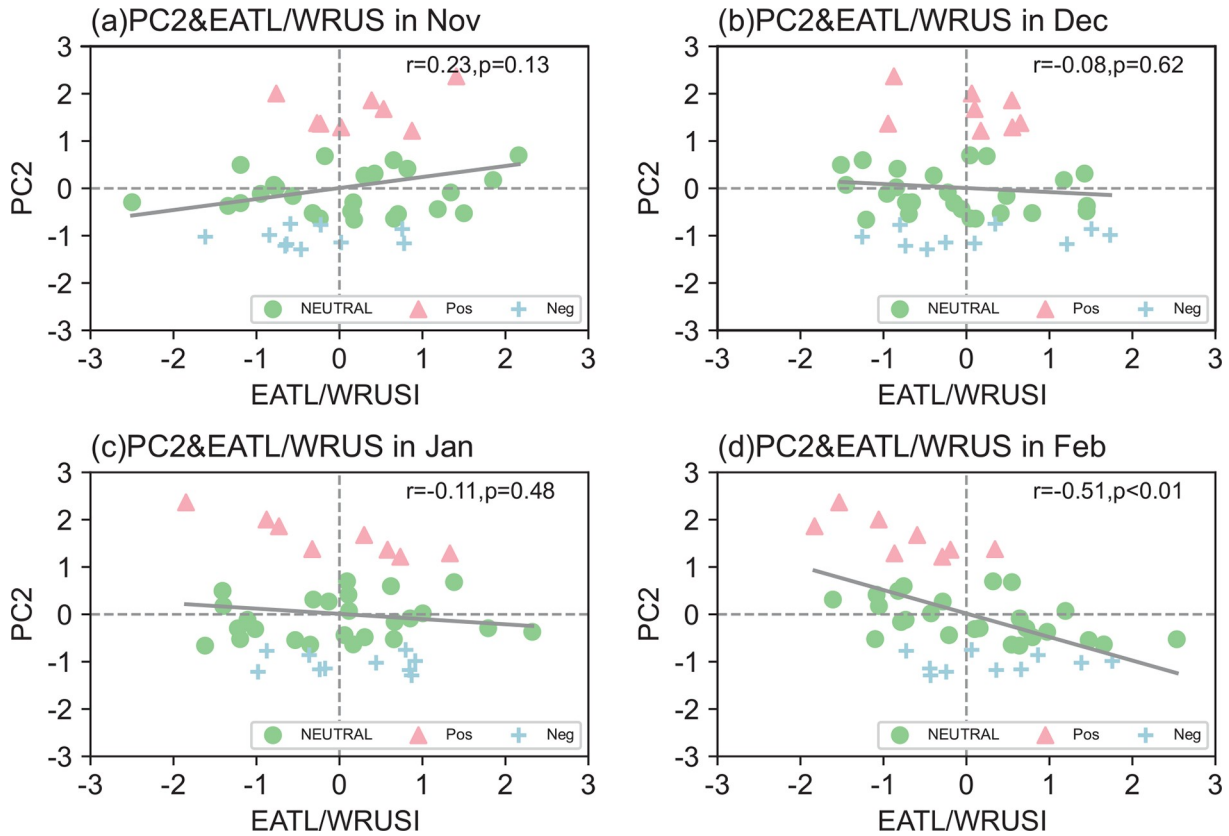


图 8　（a–d）11 月至次年 2 月月平均 EATL/WRUS 指数与 PC2 年际分量的散点图。灰线为线性回归线，粉色三角表示正位相年，蓝色加号表示负位相年，绿色圆形表示剩余年份。

Fig. 8　Scatter plot of the monthly average EATL/WRUS index and the interannual component of PC2 from (a–d) November to the following February. The gray line indicates linear regression, pink triangles indicate positive phase years; blue plus signs indicate negative phase years; and green circles indicate neutral years.

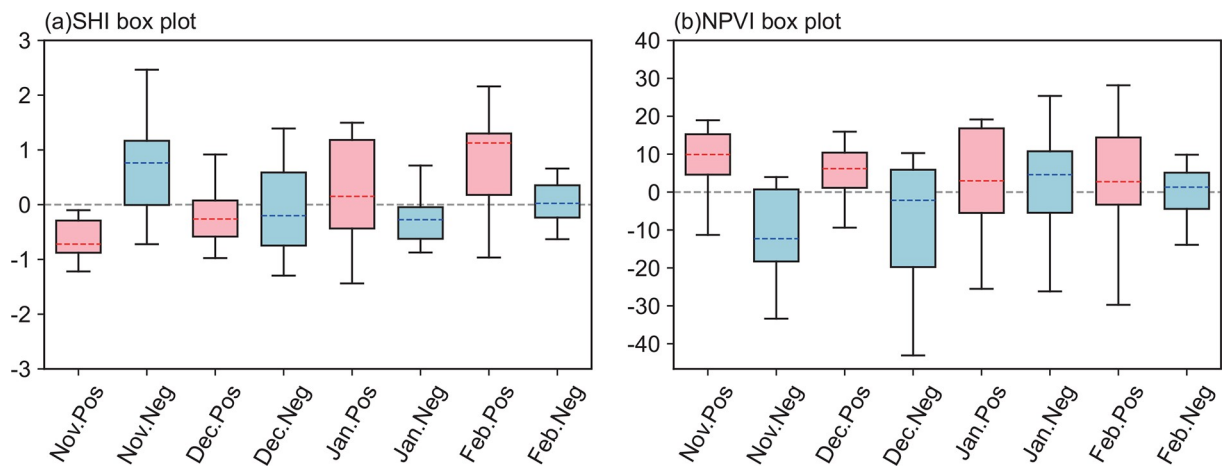


图 9　PC2 年际分量正位相年（红色柱）和负位相年（蓝色柱）（a）西伯利亚高压指数（SHI，单位：hPa，40°～65°N，80°～120°E 区域平均的海平面气压异常）和（b）北极极涡指数（NPVI，单位：K m^2 kg^{-1} s^{-1}，65°N 以北区域 500 hPa 位势高度异常）的盒须图。红色和蓝色虚线分别代表 PC2 正位相年和负位相年的中位数。

Fig. 9　Box-and-whisker plot of (a) the Siberian High index (SHI) (the average sea level pressure anomalies in the area 40°–65°N, 80°–120°E) and (b) the northern polar vortex index (NPVI; units: K m^2 kg^{-1} s^{-1}; 500-hPa geopotential height anomalies averaged northward of 65°N) for the positive phase years (red box) and negative phase years (blue box) of the interannual component of PC2. The red and blue dashed lines denote the medians of PC2 positive and negative phase years, respectively.

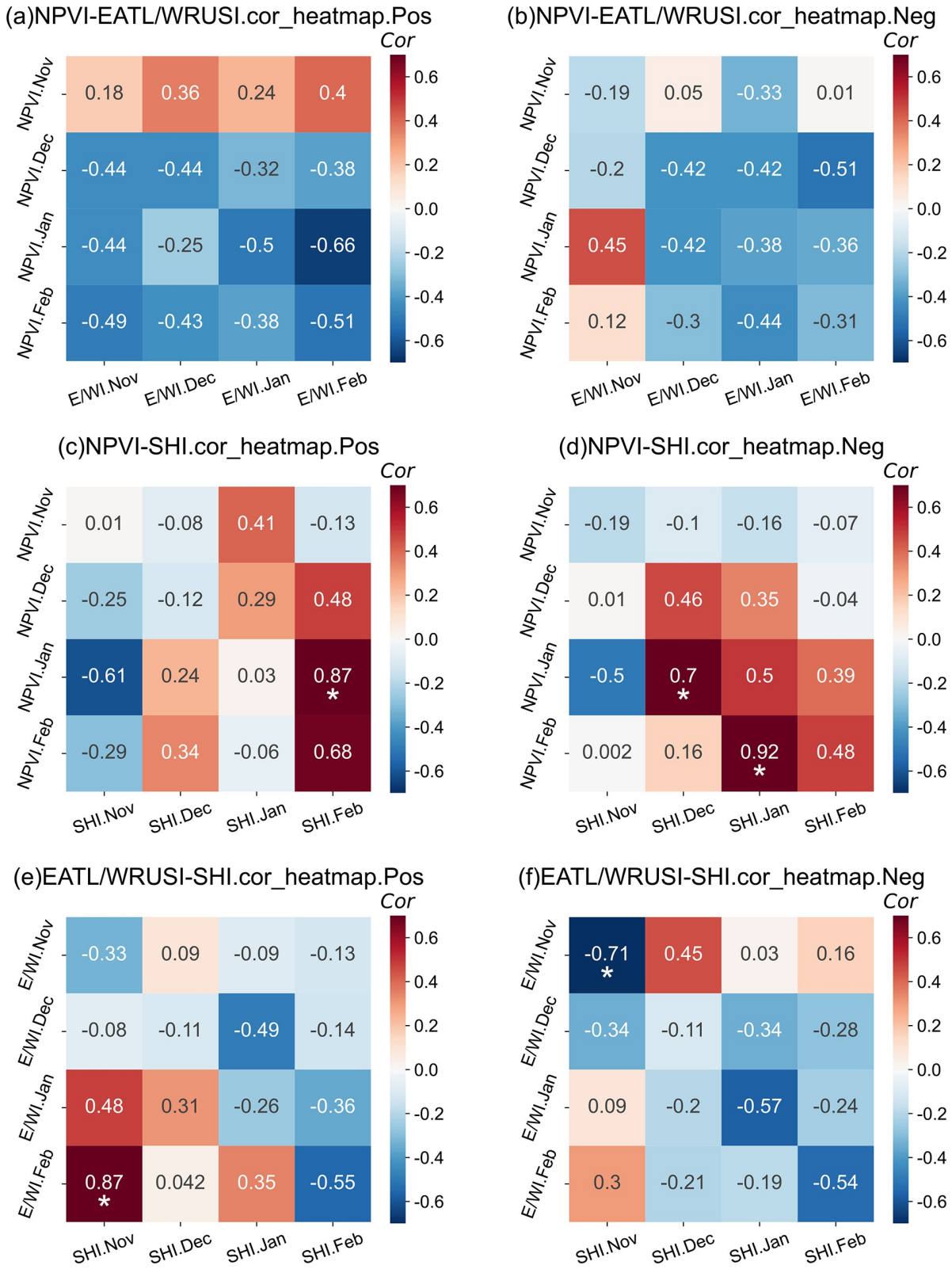


图 10 （a，c，e）正位相年和（b，d，f）负位相年 11 月至次年 2 月北极极涡指数（NPVI）、EATL/WRUS 指数（EATL/WRUSI）与西伯利亚高压指数（SHI）的相关系数热力图（“*”表示通过了 95% 置信水平检验）。

Fig. 10 Heat map of correlation coefficients about thenorthern polar vortex index (NPVI), EATL/WRUS index (EATL/WRUSI), and Siberian High index (SHI) (a, c, e) in the positive years and (b, d, f,) in the negative years for November to the following February (“*” represents the values with >95% confidence level).

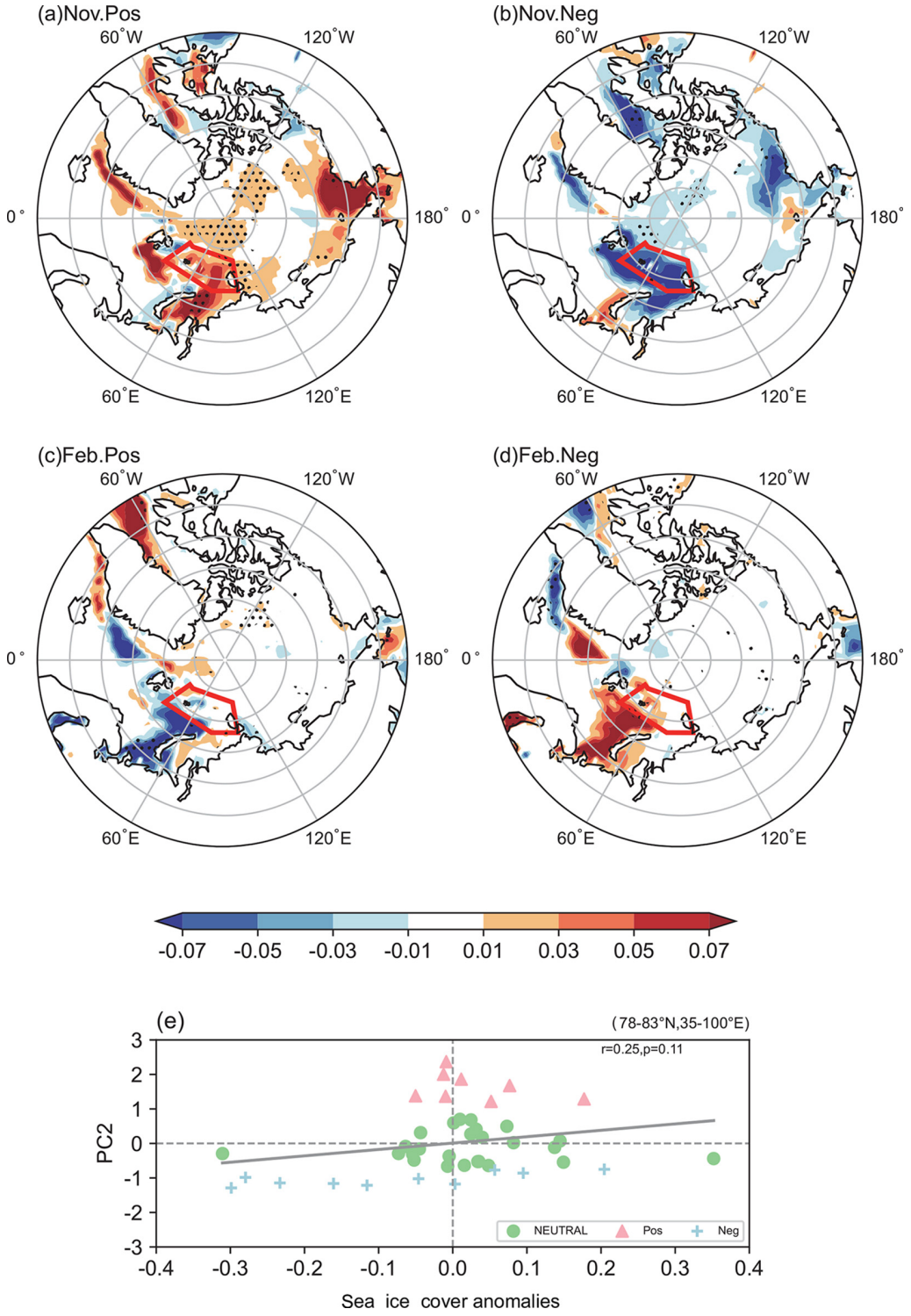


图 11　PC2 年际分量正位相年（a）11 月，（c）2 月和负位相年（b）11 月，（d）2 月海冰覆盖率异常（单位：无量纲）合成场空间分布和（e）海冰覆盖率异常与 PC2 散点图。红框为选取的海冰关键区，打点区域通过 90% 置信水平检验，灰线为线性回归线，粉色三角表示正位相年，蓝色加号表示负位相年，绿色圆形表示剩余年份。

Fig. 11　Composites of the sea ice cover anomalies (units: dimensionless) in (a, c) November and (b, d) February for positive (the first column) and negative (the second column) phase years of the interannual component of PC2. (e) Scatterplot of the sea ice cover anomalies (units: dimensionless) and PC2 on an interannual timescale. The red box shows the selected sea ice critical areas. The dotted regions are significant at the 90% confidence level. The gray line indicates linear regression. Pink triangles indicate positive phase years; blue plus signs indicate negative phase years; and green circles indicate neutral years.

0.74（图 11e）。在“冷转暖”过程中，前冬 BKS 海冰异常偏少，对应极涡异常偏弱，西伯利亚高压异常偏强（图 7e 和 f），这时东亚冬季异常寒冷天气发生东亚北部大部分地区，类似东亚冬季地表气温异常的“北方模态”（Wang et al, 2010; Wu and Zhang, 2010; Zuo et al., 2016; Zhang et al., 2020; Zhong and Wu, 2022）。后冬，随着北极极涡逐渐加强，BKS 海冰开始异常增多，伴随着西伯利亚高压由强转弱（图 7g 和 h），相应地，东亚地区出现“后冬暖”的气候异常。武炳义（2018）的研究指出，北极海冰影响东亚冬季天气气候的机制包括北极海冰负反馈机制（Alexander et al., 2004）和平流层—对流层相互作用机制（Nakamura et al., 2015）。因此，秋季 BKS 海冰异常偏少可以视为东亚冬季“冷转暖”现象的潜在前兆信号。值得注意的是，在季节内时间尺度上，冬季西伯利亚高压、乌拉尔山阻塞高压异常和北极增暖之间的因果关系尚不清楚，北极海冰异常对冬季欧亚大陆环流异常相互作用的影响也仍有待进一步研究（武炳义, 2024）。

全球海温异常是东亚冬季气温异常的另一个重要大气下垫面影响因子。在正位相年，虽然冬季各月赤道东太平洋海温异常偏低，表现出典型的 La Niña 成熟位相特征（图 12a–d），但前冬北大西洋却出现了显著暖海温异常（图 12a 和 b）。该热带外暖海温异常能够激发出 EATL/WRUS 遥相关正位相（Wang et al., 2011; Liu et al., 2014; Gao et al., 2017），引起乌拉尔山北部地区的对流层中层异常高压，造成东亚大槽和西伯利亚高压的异常偏弱（图 13a 和 b），有利于东亚北部地区异常偏暖。后冬，北大西洋暖海温异常开始减弱，同时热带印度洋和中、东太平洋海温快速降低，赤道西太平洋海温异常升高，增加了印太暖池区的纬向海温梯度（图 12c 和 d）。热带海温异常有利于增强 Walker 环流和东印度洋暖池区的上升气流，令局地降水异常偏多（图 13c 和 d），其释放的凝结潜热通过激发准定常 Rossby 波，在青藏高原上空产生异常低压，其北侧的偏东风异常有助于西伯利亚高压增强。这时，对流层中高层 EATL/WRUS 遥相关由正转负，东亚大槽加深发展（图 13c 和 d）。西伯利亚高压和东亚大槽的同时增强加剧了东亚地区的降温幅度，产生类似 La Niña 年东亚冬季地表温度“南方模态”的气温异常特征（陈文, 2002; Wang et al., 2010; 袁媛等, 2014）。因此在正位相年，海温异常在前、后冬的演变特征有利于东亚出现“暖转冷”的气温异常变化。在负位相年，冬季海温异常信号不明显（图 12e–h），热带降水和大气环流异常也不明显（图 13e–h），意味着东亚冬季“冷转暖”过程和海温异常的直接联系相对较弱。

海温异常对东亚冬季气温冷暖反转模态的影响也表现在 PC2 和冬季逐月 Niño3.4 指数的相关性上。虽然 PC2 和冬季逐月 Niño3.4 指数年际分量均呈显著负相关，但这主要来自正位相年赤道东太平洋冷海温异常的贡献（图 14a–d），说明在 La Niña 事件成熟位相，东亚冬季发生“暖转冷”过程的概率较高。而在负位相年，冬季各月 Niño3.4 指数的波动幅度大（图 14e），说明赤道东太平洋海温异常和“冷转暖”过程对应关系的不确定性较大。需要指出的是，在正位相年，2004−2005 年冬季发生了一次 El Niño 事件（图 14e 中的奇异点），与统计合成结果不一致，其具体成因仍需进一步分析。

5 结论与讨论

本文分析了东亚地区冬季气温冷暖反转过程年际变率强度的非对称特征，并研究了造成这一现象的大气环流特征和外强迫因子，主要结论如下：

（1）东亚地区冬季气温冷暖反转模态的年际变率强度具有明显的非对称性。在“暖转冷”（“冷转暖”）过程中，前冬青藏高原气温异常偏低（高）、亚洲北部地区气温异常偏高（低），后冬东亚气温整体异常偏低（高），其中心位于东亚南部地区。但“暖转冷”过程的年际变率强度明显强于“冷转暖”过程。

（2）大气环流异常在东亚冬季气温冷暖反转模态正、负位相之间的差异明显。在正位相年，西伯利亚高压和 EATL/WRUS 遥相关位相的相互作用是影响东亚冬季气温“暖转冷”过程的关键环流（图 15a 和 b）；在负位相年，北极极涡和西伯利亚高压的耦合联动则是造成东亚冬季气温“冷转暖”过程的环流载体（图 15c 和 d）。

（3）东亚冬季气温冷暖反转不同位相对应的大气下垫面外强迫异常存在显著差别。在正位相年，热带中、东太平洋海温异常表现出典型的 La Niña 特征，北大西洋和热带印度洋海温异常在前、后冬发生季节内变化，伴随着 EATL/WRUS 遥相关位相调整和西伯利亚高压强度反转，引起东亚冬季“暖转冷”过程；在负位相年，随着前冬 BKS 海

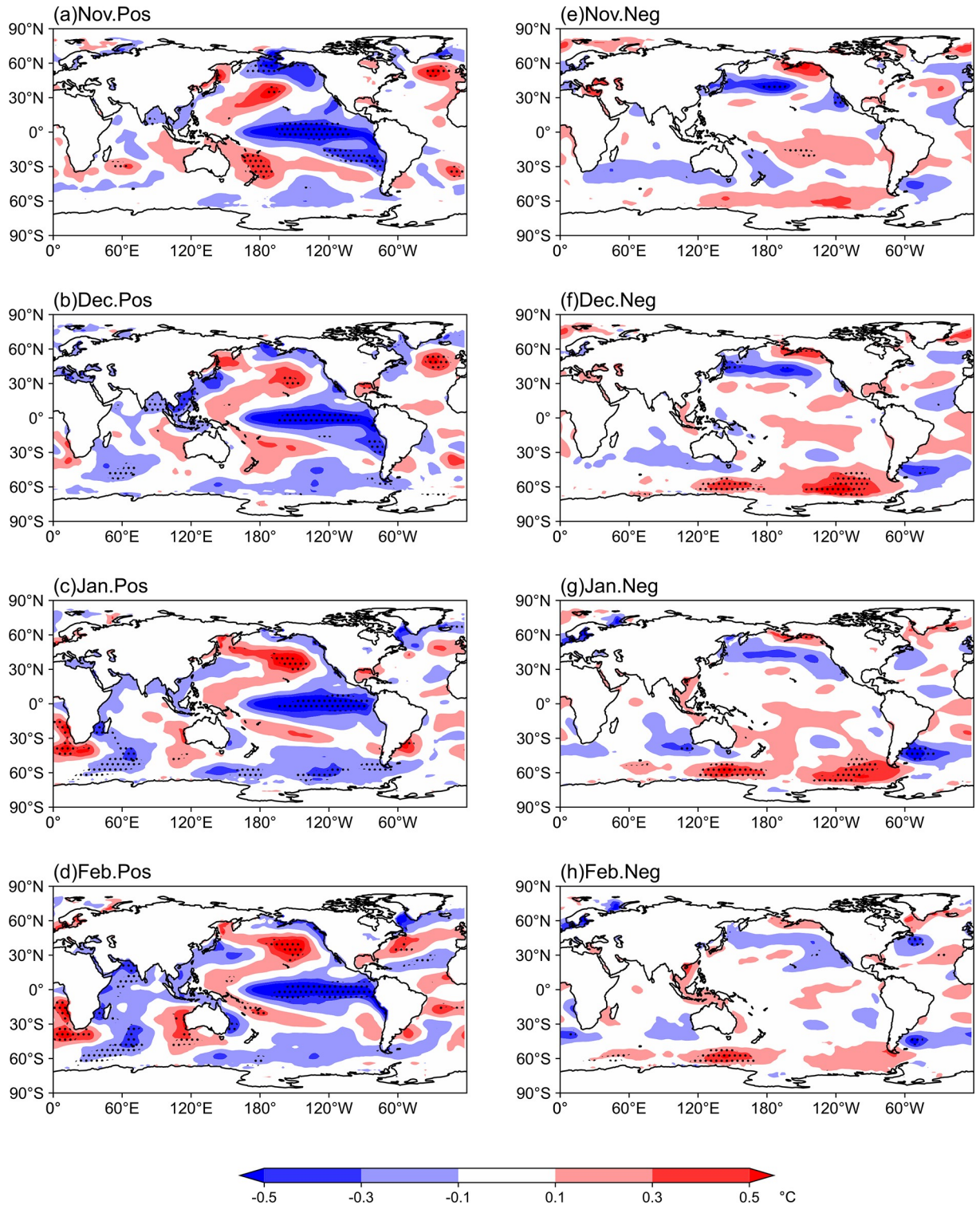


图 12　PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年海温异常（单位：°C）合成场空间分布。打点区域通过 95% 置信水平检验。

Fig. 12　Composite spatial distributions of sea surface temperature anomalies (units: °C) for the (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2. The dotted regions are significant at the 95% confidence level.

冰异常偏少到后冬转变为异常偏多，北极极涡和西伯利亚高压强度发生季节内反转，“暖北极—冷欧亚”型气候异常格局向“冷北极—暖欧亚”型调整，导致东亚冬季发生“冷转暖”过程。

与已有研究相比（韦玮等, 2014, 2020; 祁莉和泮琬楠, 2021），本文强调了“冷转暖”和“暖转

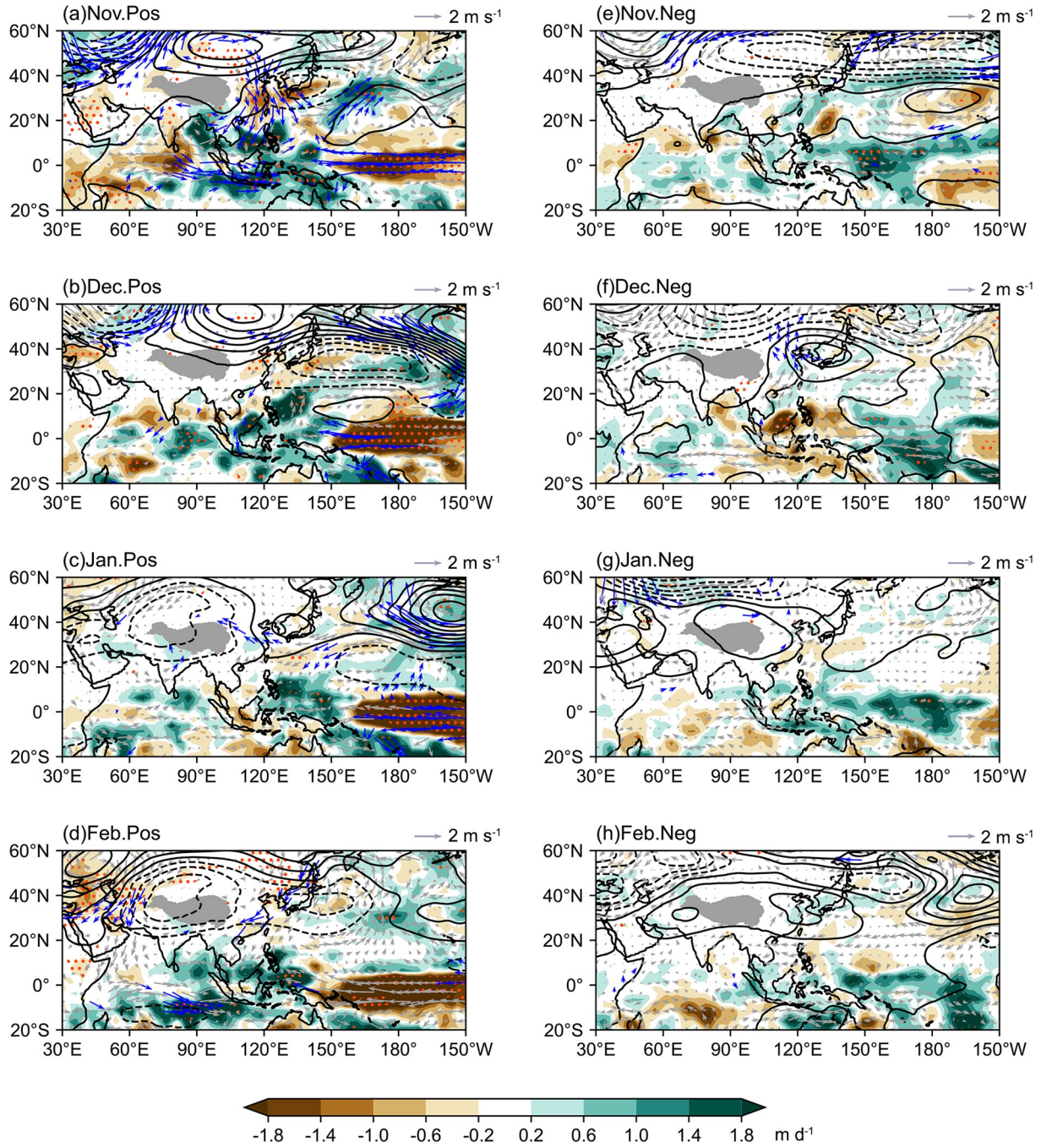


图 13 PC2 年际分量（a–d）正位相年和（e–h）负位相年降水异常（阴影，单位：mm d^{-1}）、850 hPa 风矢量异常（箭头，单位：m s^{-1}）和 500 hPa 位势高度异常（等值线，单位：gpm）合成场空间分布。打点区域通过 95% 置信水平检验。蓝色风场通过 90% 置信水平检验。

Fig. 13 Composite spatial distributions of precipitation anomalies (shading, units: mm d^{-1}), 850-hPa wind vector anomalies (arrows, units: m s^{-1}), and 500-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm) for the (a–d) positive phase years and (e–h) negative phase years of the interannual component of PC2. The dotted regions are significant at the 95% confidence level. The blue winds are significant at the 90% confidence level.

冷”过程年际变率强度的非对称性，及其相关大气环流关键因子和大气下垫面外强迫的差异性，说明东亚冬季气温月际波动过程的气候预测需要考虑不同的物理过程和影响因素，为提高东亚冬季气温预测水平提供了线索。由于“暖转冷”过程和热带海温的联系更为紧密，对应更强的年际变率和更高的动力预测技巧，这与业务实践的直观感受一致。而“冷转暖”过程和北极海冰有关，由于“暖北极—冷欧亚”联系的不确定性较大（Wu et al., 2022; 武炳义, 2024），其年际变率动力预测的不确定性也

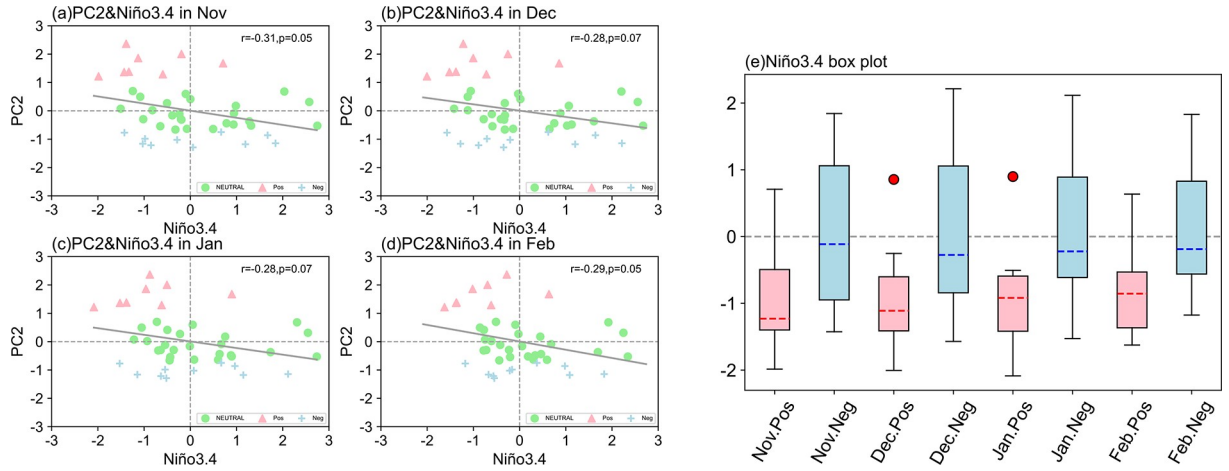


图 14　PC2 和 Niño3.4 指数（5°S～5°N，170°～120°W）年际分量的（a–d）散点图以及（e）合成箱线图。红色和蓝色虚线代表中位数，灰线为线性回归线，粉色三角表示正位相年，蓝色加号表示负位相年，绿色圆形表示剩余年份，红色实心点为奇异值（基于 1.5 倍的四分位差以外的值定义为奇异值）。

Fig. 14　(a–d) Scatterplots and (e) composite boxplots of the interannual components of PC2 and the Niño3.4 index (5°S−5°N, 170°−120°W).. The red and blue dotted lines show the median. The gray line indicates the linear regression. Pink triangles indicate positive phase years; blue plus signs indicate negative phase years; and green circles indicate neutral years. Solid red dots are singular values (values exceeding 1.5 times the quartile difference are defined as singular values).

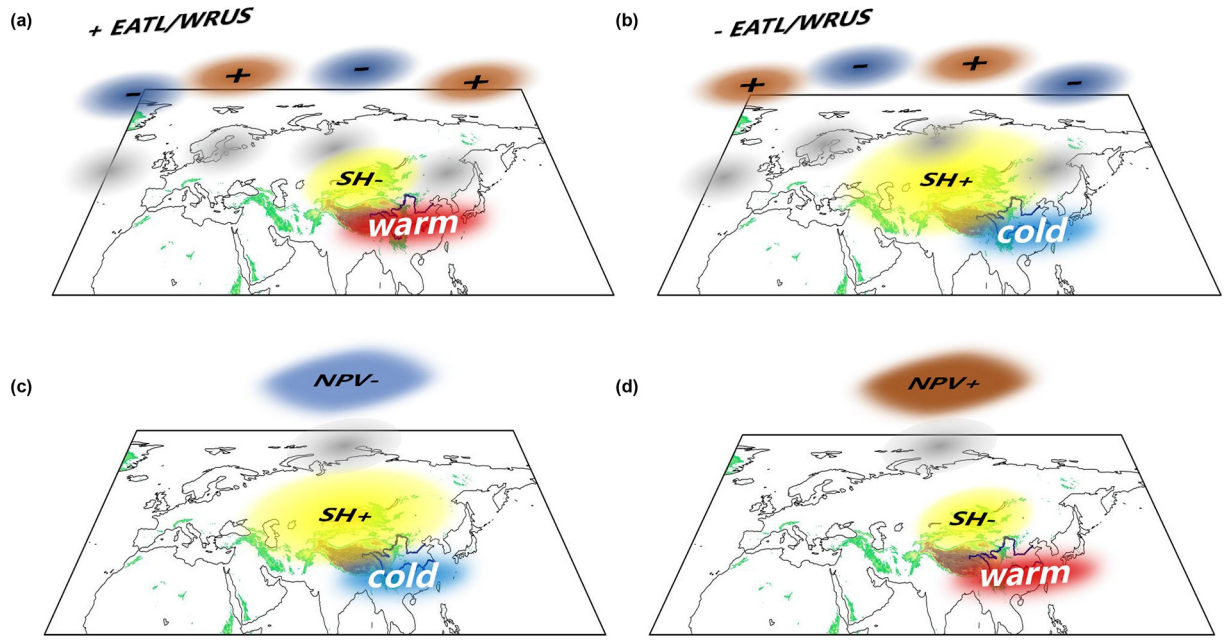


图 15　正位相年（a）前冬和（b）后冬东大西洋/西俄罗斯（EATL/WRUS）型遥相关与西伯利亚高压（SH）关系的物理图像，“+”、“–”分别表示位势高度正、负异常，“SH+”、“SH–”分别表示西伯利亚高压增强、减弱。负位相年（c）前冬和（d）后冬北极极涡（NPV）与西伯利亚高压（SH）关系的物理图像，“NPV+”、“NPV–”分别表示北极极涡增强、减弱。阴影区表示 1500 m 以上地形高度。

Fig. 15　Physical images of East Atlantic/West Russia (EATL/WRUS) telecorrelation in relation to Siberian High (SH) in the positive pahse years of the (a) pre-winter and (b) post-winter, “+” and “–” indicate positive and negative anomalies in potential heights, and “SH+” and “SH–” denote the strengthening and weakening of the Siberian High. Physical images of northern polar vortex (NPV) in relation to Siberian High (SH) in the negative phase years of the (c) pre-winter and (d) post-winter, “NPV+” and “NPV–” denote the strengthening and weakening of northern polar vortex. Shading indicates the topography above 1500 m.

更高。但决定何种大气下垫面外强迫起主导作用的因素还有待进一步研究。虽然已有很多研究使用数值模拟验证了 La Niña 型海温和北极海冰影响东亚冬季气温的物理过程和机制（Wu and Zhang, 2010;

Zhang et al., 2019），但仍缺乏对大气下垫面外强迫影响东亚冬季风季节内瞬变过程的数值试验，制约了东亚冬季气候的次季节预测时效。因此，后续工作将通过敏感性数值试验和 WMO S2S 多模式回报试验，深入研究不同大气下垫面外强迫对东亚冬季气温次季节变化的影响机制。

参考文献（References）

Adler R F, Sapiano M R P, Huffman G J, et al. 2018. The global precipitation climatology project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation [J]. Atmosphere, 9(4): 138. doi:10.3390/atmos9040138

Alexander M A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. 2004. The atmospheric response to realistic Arctic sea ice anomalies in an AGCM during winter [J]. J. Climate, 17(5): 890−905. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0890:TARTRA>2.0.CO;2

Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Wea. Rev., 115(6): 1083−1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2

Casson N J, Contosta A R, Burakowski E A, et al. 2019. Winter weather whiplash: Impacts of meteorological events misaligned with natural and human systems in seasonally snow-covered regions [J]. Earth's Future, 7(12): 1434−1450. doi:10.1029/2019EF001224

Chen S F, Wu R G, Song L Y, et al. 2019. Interannual variability of surface air temperature over mid-high latitudes of Eurasia during boreal autumn [J]. Climate Dyn., 53(3−4): 1805−1821. doi:10.1007/s00382-019-04738-9

陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. 大气科学, 26(5): 595−610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(5): 595−610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02

Cheung H H N, Zhou W. 2015. Implications of Ural blocking for East Asian winter climate in CMIP5 GCMs. Part I: Biases in the historical scenario [J]. J. Climate, 28(6): 2203−2216. doi:10.1175/JCLI-D-14-00308.1

Cohen J, Barlow M, Kushner P J, et al. 2007. Stratosphere–troposphere coupling and links with Eurasian land surface variability [J]. J. Climate, 20(21): 5335−5343. doi:10.1175/2007JCLI1725.1

Curtis S, Fair A, Wistow J, et al. 2017. Impact of extreme weather events and climate change for health and social care systems [J]. Environ. Health, 16(S1): 128. doi:10.1186/s12940-017-0324-3

Dai H X, Fan K, Liu J P. 2019. Month-to-month variability of winter temperature over Northeast China linked to sea ice over the Davis Strait–Baffin Bay and the Barents–Kara Sea [J]. J. Climate, 32(19): 6365−6384. doi:10.1175/JCLI-D-18-0804.1

Ding Y H, Jia X L, Wang Z Y, et al. 2009. A contrasting study of freezing disasters in January 2008 and in winter of 1954/1955 in China [J]. Front. Earth Sci. China, 3(2): 129−145. doi:10.1007/s11707-009-0028-2

Gao T, Yu J Y, Paek H. 2017. Impacts of four Northern-Hemisphere teleconnection patterns on atmospheric circulations over Eurasia and the Pacific [J]. Theor. Appl. Climatol., 129(3−4): 815−831. doi:10.1007/s00704-016-1801-2

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146(730): 1999−2049. doi:10.1002/qj.3803

Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons [J]. Journal of Climate, 30(20): 8179−8205. doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1

IPCC. 2021. Summary for policymakers [M]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 3–32. doi:10.1017/9781009157896.001

康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. 气候与环境研究, 11(3): 330−339. Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11(3): 330−339. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.03.009

Kolstad E W, Breiteig T, Scaife A A. 2010. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136(649): 886−893. doi:10.1002/qj.620

Li M Y, Luo D H, Simmonds I, et al. 2021. Anchoring of atmospheric teleconnection patterns by Arctic Sea ice loss and its link to winter cold anomalies in East Asia [J]. Int. J. Climatol., 41(1): 547−558. doi:10.1002/joc.6637

李勇, 何金海, 姜爱军, 等. 2007. 冬季西太平洋遥相关型的环流结构特征及其与我国冬季气温和降水的关系 [J]. 气象科学, 27(2): 119−125. Li Yong, He Jinhai, Jiang Aijun, et al. 2007. Circulation structure features of western Pacific teleconnection pattern in winter and their relation with China’s temperature and precipitation in winter [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 27(2): 119−125. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.02.001

李忠贤, 黄源源, 王健治. 2023. 春季东大西洋/西俄罗斯遥相关型异常与我国气温异常的联系 [J]. 大气科学学报, 46(6): 876−883. Li Zhongxian, Huang Yuanyuan, Wang Jianzhi. 2023. Variation characteristics of spring East Atlantic/West Russia teleconnection pattern and its relationship with temperature anomalies in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(6): 876−883. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210818001

刘毓赟, 王林. 2014. 冬季斯堪的纳维亚遥相关型在 20 世纪 70 年代末的年代际变化 [J]. 气候与环境研究, 19(3): 371−382. Liu Yuyun, Wang Lin. 2014. Interdecadal changes of Scandinavian teleconnection pattern in the Late 1970s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(3): 371−382. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13052

Liu Y Y, Wang L, Zhou W, et al. 2014. Three Eurasian teleconnection patterns: Spatial structures, temporal variability, and associated winter climate anomalies [J]. Climate Dyn., 42(11−12): 2817−2839. doi:10.1007/s00382-014-2163-z

马锋敏, 陈丽娟, 李想, 等. 2022. 中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析 [J]. 大气科学, 46(3): 573−589. Ma Fengmin, Chen Lijuan, Li Xiang, et al. 2022. Characteristics and causes of intraseasonal variation of winter temperature in China under different interdecadal scale [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(3): 573−589. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.21027

Ma S M, Zhu C W. 2019. Extreme cold wave over East Asia in January 2016: A possible response to the larger internal atmospheric variability induced by Arctic warming [J]. J. Climate, 32(4): 1203−1216. doi:10.1175/JCLI-D-18-0234.1

Ma S M, Zhu C W, Liu B Q, et al. 2018. Polarized response of East Asian winter temperature extremes in the era of Arctic warming [J]. J. Climate, 31(14): 5543−5557. doi:10.1175/JCLI-D-17-0463.1

Mu M, Luo D H, Zheng F. 2022. Preface to the special issue on extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21 [J]. Adv. Atmos. Sci., 39(4): 543−545. doi:10.1007/s00376-021-1004-3

Nakamura T, Yamazaki K, Iwamoto K, et al. 2015. A negative phase shift of the winter AO/NAO due to the recent Arctic sea–ice reduction in Late autumn [J]. J. Geophys. Res., 120(8): 3209−3227. doi:10.1002/2014JD022848

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110(7): 699−706. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2

Orsolini Y J, Senan R, Benestad R E, et al. 2012. Autumn atmospheric response to the 2007 low Arctic sea ice extent in coupled ocean–atmosphere hindcasts [J]. Climate Dyn., 38(11−12): 2437−2448. doi:10.1007/s00382-011-1169-z

Orsolini Y J, Senan R, Balsamo G, et al. 2013. Impact of snow initialization on sub-seasonal forecasts [J]. Climate Dyn., 41(7−8): 1969−1982. doi:10.1007/s00382-013-1782-0

祁莉, 洋琬楠. 2021. 东亚气温前冬与后冬反相的变化特征及可能影响因子 [J]. 大气科学, 45(5): 1039−1056. Qi Li, Pan Wannan. 2021. Variability of the phase reversal of the East Asia temperature from early to Late winter and the possible influencing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): 1039−1056. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20181

Song L Y, Chen S F, Chen W, et al. 2022. Distinct evolutions of haze pollution from winter to the following spring over the North China Plain: Role of the North Atlantic sea surface temperature anomalies [J]. Atmos. Chem. Phys., 22(3): 1669−1688. doi:10.5194/acp-22-1669-2022

Student. 1992. The probable error of a mean [M]//Kotz S, Johnson N L. Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution. New York: Springer, 33–57. doi:10.1007/978-1-4612-4380-9_4

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109(4): 784−812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2

Wang B, An S I. 2005. A method for detecting season-dependent modes of climate variability: S-EOF analysis [J]. Geophys. Res. Lett., 32(15): L15710. doi:10.1029/2005GL022709

Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13(9): 1517−1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2

Wang B, Wu Z W, Chang C P, et al. 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes [J]. J. Climate, 23(6): 1495−1512. doi:10.1175/2009JCLI3243.1

Wang L, Chen W. 2014. The East Asian winter monsoon: Re-amplification in the mid-2000s [J]. Chinese Sci. Bull., 59(4): 430−436. doi:10.1007/s11434-013-0029-0

Wang L, Lu M M. 2017. The East Asian winter monsoon [M]//Chang C P. The Global Monsoon System. 3rd ed. Singapore: World Scientific, 51–61. doi:10.1142/9789813200913_0005

Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. J. Climate, 22(18): 4860−4872. doi:10.1175/2009JCLI2973.1

Wang L, Zheng C, Liu Y Y. 2021. Understanding the East Asian winter monsoon in 2018 from the intraseasonal perspective [J]. Climate Dyn., 57(7-8): 2053−2062. doi:10.1007/s00382-021-05793-x

Wang X, Wang C Z, Zhou W, et al. 2011. Teleconnected influence of North Atlantic Sea surface temperature on the El Niño onset [J]. Climate Dyn., 37(3-4): 663−676. doi:10.1007/s00382-010-0833-z

韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 2014. 我国前冬和后冬气温年际变化的特征与联系 [J]. 大气科学, 38(3): 524−536. Wei Wei, Wang Lin, Chen Quanliang, et al. 2014. Interannual variations of early and Late winter temperatures in China and their linkage [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 524−536. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13320

韦玮, 王林, 陈权亮, 等. 2020. 我国前冬和后冬的划分及其气温的年际变异 [J]. 大气科学, 44(1): 122−137. Wei Wei, Wang Lin, Chen Quanliang, et al. 2020. Definition of early and Late winter and associated interannual variations of surface air temperature in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 122−137. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1904.18238

Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008 [J]. Mon. Wea. Rev., 137(3): 1111−1131. doi:10.1175/2008MWR2638.1

武炳义. 2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题 [J]. 大气科学, 42(4): 786−805. Wu Bingyi. 2018. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 786−805. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17262

武炳义. 2024. 北极—中纬度联系与北极海冰变化的关系研究新进

展 [J]. 大气科学, 48(1): 108−120. Wu Bingyi. 2024. Recent progresses in the study of the Arctic–midlatitude connection and its association with Arctic sea ice loss [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(1): 108−120. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23305

Wu B Y, Li Z K, Francis J A, et al. 2022. A recent weakening of winter temperature association between Arctic and Asia [J]. Environ. Res. Lett., 17(3): 034030. doi:10.1088/1748-9326/ac4b51

Wu Q G, Zhang X D. 2010. Observed forcing-feedback processes between Northern Hemisphere atmospheric circulation and Arctic sea ice coverage [J]. J. Geophys. Res., 115(D14): D14119. doi:10.1029/2009JD013574

Wu R G, Chen S F. 2020. What leads to persisting surface air temperature anomalies from winter to following spring over mid- to high-latitude Eurasia? [J]. J. Climate, 33(14): 5861−5883. doi:10.1175/JCLI-D-19-0819.1

Xu X P, Li F, He S P, et al. 2018. Subseasonal reversal of East Asian surface temperature variability in winter 2014/15 [J]. Adv. Atmos. Sci., 35(6): 737−752. doi:10.1007/s00376-017-7059-5

Yin Z C, Zhang Y J, Zhou B T, 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

袁媛, 李崇银, 杨崧. 2014. 与厄尔尼诺和拉尼娜相联系的中国南方冬季降水的年代际异常特征 [J]. 气象学报, 72(2): 237−255. Yuan Yuan, Li Chongyin, Yang Song. 2014. Decadal anomalies of winter precipitation over southern China in association with El Niño and La Niña [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(2): 237−255. doi:10.11676/qxxb2014.014

Yun J, Ha K J, Jo Y H. 2018. Interdecadal changes in winter surface air temperature over East Asia and their possible causes [J]. Climate Dyn., 51(4): 1375−1390. doi:10.1007/s00382-017-3960-y

Zhang P, Wu Z W, Li J P. 2019. Reexamining the relationship of La Niña and the East Asian winter monsoon [J]. Climate Dyn., 53(1-2): 779−791. doi:10.1007/s00382-019-04613-7

Zhang P, Wu Z W, Li J P, et al. 2020. Seasonal prediction of the northern and southern temperature modes of the East Asian winter monsoon: The importance of the Arctic sea ice [J]. Climate Dyn., 54(7-8): 3583−3597. doi:10.1007/s00382-020-05182-w

Zhang Y J, Yin Z C, Wang H J. 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(5): 100392. doi:10.1016/j.aosl.2023.100392

Zhang Y J, Yin Z C, Song X L, et al. 2024. Subtropical SST improved the understanding of the subseasonal reversal of surface air temperature in winter over the mid-high latitudes of Asia [J]. Atmos. Res., 299: 107208. doi:10.1016/j.atmosres.2023.107208

Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, 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

Zhong W G, Wu Z W. 2022. Subseasonal variations of Eurasian wintertime surface air temperature: Two distinct leading modes [J]. Climate Dyn., 59(1-2): 85−108. doi:10.1007/s00382-021-06118-8

Zhong W G, Wu Z W. 2023. Subseasonal strength reversal of the East Asian winter monsoon [J]. Climate Dyn., 61(1−2): 709−727. doi:10.1007/s00382-022-06610-9

Zhong W G, Wu Z W. 2024. Impact of stratospheric variability on subseasonal temperature reversals during Late winter over the mid-high latitudes of East Asia [J]. Atmos. Res., 297: 107115. doi:10.1016/j.atmosres.2023.107115

Zuo J Q, Ren H L, Wu B Y, et al. 2016. Predictability of winter temperature in China from previous autumn Arctic sea ice [J]. Climate Dyn., 47(7-8): 2331−2343. doi:10.1007/s00382-015-2966-6