

● 短论 (2025-02-06T17:30)

“创刊 50 周年专刊约稿”

东亚前冬与后冬气候异常差异性研究的新视角

陈文^{1,2*} 安霞东^{1,2†}

1 云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室/云南省季风与极端气候灾害国际联合实验室, 昆明 650500

2 云南大学大气科学系, 昆明 650500

摘要 东亚冬季气候的准确预测事关民生福祉, 然而该地区冬季气候异常往往在前冬与后冬存在显著差异。以往研究使用季节平均 (12 月至次年 2 月的平均, DJF) 的方法可能滤掉了一些重要气候因子的作用, 导致对东亚冬季气候的理解与预测存在偏差。本短论主要解读了近期在东亚前冬与后冬气候异常差异性研究方面取得的新进展, 这些研究可以为理解和预测东亚冬季气候提供新的视角。

关键词 东亚气候异常 前冬与后冬 海气耦合 陆气耦合 北极海冰 对流层-平流层相互作用

文章编号 2025022B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2502.25022

New sights on East Asian climate anomaly differences between early and late winter

CHEN Wen^{1,2}, AN Xiadong^{1,2}

1 Yunnan Key Laboratory of Meteorological Disasters and Climate Resources in the Greater Mekong Subregion/Yunnan International Joint Laboratory of Monsoon and Extreme Climate Disasters, Kunming 650500

2 Department of atmospheric sciences, Yunnan University, Kunming 650500

Abstract The accurate prediction of East Asian winter climate is crucial for people's well-being. However, there are significant differences in the winter climate anomalies between early and late winters in this region. Previous studies using the seasonal average (December to February, DJF) may have filtered out the effects of some important climate factors, leading to biases in the understanding and prediction of East Asian winter climate. This short commentary provides an interpretation of the relevant work on the climate anomaly differences between early and late winters in East Asia. The results may provide new perspectives for understanding and predicting East Asian winter climate.

Keywords East Asian climate anomalies, Early and late winter, Air-sea interaction, Air-land coupling, Arctic Sea ice, Stratosphere-troposphere interaction

收稿日期 2025-02-06; 网络预出版日期

作者简介 陈文, 男, 1966 年出生, 教授, 主要从事季风与气候动力学研究。E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn

通讯作者 陈文, E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn; 安霞东, E-mail: anxd@ynu.edu.cn

资助项目 云南省季风与极端气候灾害国际联合实验室基金 202403AP140009

Funded by The Yunnan International Joint Laboratory of Monsoon and Extreme Climate Disasters (202403AP140009)

1 引言

东亚地区位于世界最大大洲的东部,东临世界最大的大洋,是全球人口最为密集的地区之一。由于其处于亚洲季风的关键区,该地区的天气气候复杂多变,一直是国内外大气科学界重点研究的领域。近年来,东亚地区频繁经历前后冬气温异常反转的现象。例如,2022年2月,中国东部遭遇了持续低温天气,成为自2013年以来最冷的2月(Chen et al., 2023)。而2021年12月和2022年1月,东亚整体气候偏暖,使得2021/2022年展现出“前冬暖、后冬冷”的特征(Zhao et al., 2023)。此外,2022/2023年冬季,我国气候则又呈现“前冷后暖”的模式[‡]。类似的异常气温反转现象在我国东部空气污染过程中亦有所体现(An et al., 2023a)。这种复杂多变的气候模态为东亚冬季气候与空气质量的预测带来了严峻挑战。因此,深入理解并揭示导致东亚气候前后冬气候异常呈现差异性的关键因子,能够显著提升对该地区冬季气候和空气质量的预测水平,对于进一步加强国家防灾减灾能力及改善我国空气质量具有重要意义。

近年来在东亚冬季前后冬气候异常差异性驱动因子的研究方面取得了系列进展。Zhao et al. (2022) 和 An et al. (2022a) 发现,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件可以导致华北地区前冬(11至12月,ND)发生大气污染,但对后冬(1至2月,JF)大气污染的影响较小,其中前冬污染过程主要由源自北印度洋的与ENSO有关的波列引起(Ma et al., 2022)。An et al. (2025) 进一步指出,后冬西伯利亚地区的陆-气耦合过程对该时期ENSO信号的传播起着重要作用。此外,An et al. (2023a) 的研究还表明,北极海冰对东亚前后冬气温异常和空气污染过程的反转现象具有重要调制作用。Ma et al. (2021) 则发现,平流层准两年振荡(QBO)对东亚前冬气候具有显著调节作用。这些研究从热带、中纬度、极地和平流层比较系统地揭示了东亚前后冬气候异常存在差异的潜在驱动因素,为提高东亚冬季气候和空气质量的预测精度提供了重要的科学依据。

2 ENSO及相关海温对东亚前后冬气候异常的不同影响

ENSO作为年际尺度上最显著的海气耦合系统,对全球天气气候具有重要影响。然而针对ENSO是否影响华北空气质量,前人研究存在巨大争议,部分基于统计的研究认为ENSO对华北空气质量没有影响,而部分基于个例的研究则认为有影响。这些认为ENSO对华北空气质量没有影响的研究通常取12至2月的季节平均作为研究对象,这可能滤掉了ENSO的信号。Geng et al. (2023) 的研究指出ENSO对东亚气候的影响存在明显的深冬中断特征。Zhao et al. (2022) 基于观测和数值模拟指出ENSO对京津冀前冬的空气质量有显著的影响,而对后冬的空气质量没有影响。An et al. (2022a) 的研究进一步指出ENSO事件特别是强东部型厄尔尼诺事件对华北平原前冬的空气质量具有显著影响,而影响途径主要为沿中纬度传播的与ENSO直接相关的北半球中高纬度环球Rossby波列和沿印太大圆路径传播的与ENSO间接相关的类东亚-太平洋遥相关型(EAP)波列(图1)。其中环球Rossby波列之所以能够跨越北大西洋和欧亚大陆而影响华北地区,这与该波列相关的地中海地区海气耦合过程有密切联系,其对该环球Rossby波列起到了接力的作用(An et al., 2022b)。此外,Cai et al. (2024) 的研究指出前冬的欧亚遥相关型(EU)与ENSO的关系在最近的年代际有所增强,而驱动因子是热带印度洋的暖异常,这可能也贡献到前述的环球Rossby波列。而沿印太大圆路径传播的类EAP波列则由前冬北印度洋降雨过程释放的潜热加热所激发,故该波列是否出现与上述地区降雨的分布有关。降雨空间分布在后冬发生明显变动,致使该波列显著减弱,甚至不再出现(Ma et al., 2022)。值得注意的是,东亚沿岸地区的气温同样受上述波列的影响,因此在前、后冬也存在明显差异,如ENSO年前冬东亚地区的温度显著变化

[‡] 2023年中国气候公报

主要出现在沿岸地区，而后冬则主要出现在大陆腹地，并且温度的分布在不同 ENSO 位相年的前、后冬呈现出明显的非线性和非对称性 (Ma et al., 2022)。不容忽视的是 ENSO 与东亚前、后冬气候关系的这种差异性同样可能受到诸如北太平洋涛动 (PDO) 和北大西洋涛动 (AMO) 等年代际气候因子的调制 (Shi, 2021)，具体机制还需未来更进一步的研究。

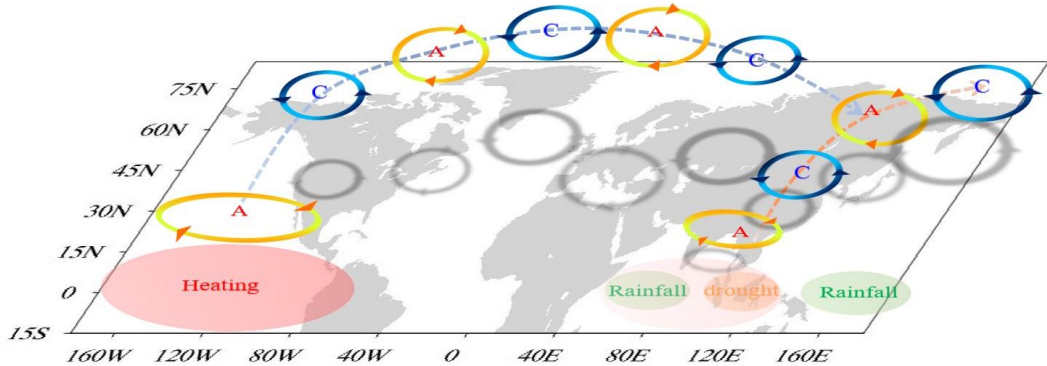


图 1 前冬 ENSO 影响东亚气候异常的两支 Rossby 波列示意图。其中红色阴影表示暖海温异常，黄色圆圈代表反气旋式环流异常，而蓝色圆圈表示气旋式环流异常。灰色圆圈代表气旋/反气旋在地图上对应的具体位置 (An et al., 2022a)。

Fig. 1 Schematic diagram of ENSO influencing East Asian climate anomaly in early winter. The red shading indicates positive SST anomalies. Letters C (blue circles) and A (red circles) represent cyclonic and anticyclonic circulation, respectively. The gray circles represent the specific locations of cyclones/anticyclones on the map (An et al., 2022a).

3 陆-气耦合对 ENSO 遥相关在东亚前后冬呈现非对称性的影响

正如前文所述，ENSO 主要通过两支波列影响东亚前冬气候异常，但其对后冬气候异常的影响和影响途径却存在明显的差异性 (Ma et al., 2022)。An et al. (2025) 发现后冬与 ENSO 相关的波列之所以能够传播至东亚地区 (图 2b)，主要与西伯利亚地区的陆气耦合有关。具体地，前冬与 ENSO 相关的环球 Rossby 波列导致西西伯利亚和中西伯利亚地区积雪减少，对应减少的雪水当量，该过程会一直持续到后冬，并在后冬通过陆气相互作用使得该地区出现非绝热冷却，其会作为冷源在上空激发出气旋式环流异常，该气旋式异常以波动的形式向下游传播，将储存在雪水当量中的 ENSO 信号传播至东亚地区，最终引起该地区后冬的气候异常。上述过程主要发生在拉尼娜期间，厄尔尼诺期间大致与之相反。

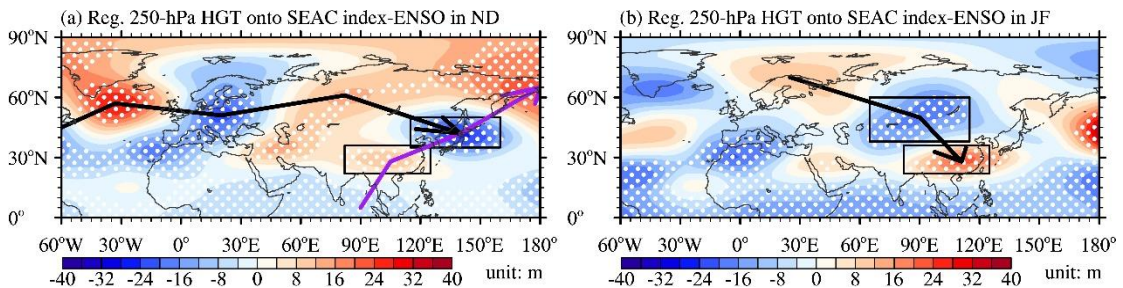


图 2 与 ENSO 相关的欧亚遥相关波列分布。(a) 前冬，(b) 后冬。打点区域表示回归的 250 hPa 位势高度通过 90% 显著性检验 (An et al., 2025)。

Fig. 2 Eurasian teleconnections related to ENSO. (a) in early winter, (b) in late winter. The white dotted areas indicate the regressed 250-hPa geopotential height anomalies that exceed the 90% confidence level (An et al., 2025).

4 北极海冰在东亚前后冬气候异常呈现差异性中的作用

除热带系统对东亚前后冬气候异常呈现差异性有影响外,北极的气候系统同样在东亚气候异常呈现差异性中扮演着重要角色。An et al. (2023a) 发现华北平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与地表气温在前、后冬存在明显的次季节反转特征。前冬,与正北大西洋涛动 (NAO) 型相关的负类斯堪的纳维亚模态在东北亚地区引起准正压的反气旋式异常 (东北亚异常反气旋), 该反气旋异常通过动力和热力过程导致华北平原出现更高的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。与此同时,与正 NAO 型相关的异常暖平流促使巴伦支海海冰融化,进而释放热通量,该热通量在后冬达到峰值。后冬,巴伦支海海冰融化后释放的热通量在北极地区激发出反气旋式异常,该反气旋式异常以波动的形式向低纬地区传播,形成极地-欧亚型 (POL) 遥相关,进而在东北亚地区引起准正压的气旋式异常,该气旋式异常则通过动力和热力过程导致华北平原出现更低的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。反之亦然 (图 3)。此外,An et al. (2023b) 进一步指出前冬的北极海冰与 ENSO 对华北平原的地表气温及空气质量的变化具有显著协同影响效应。

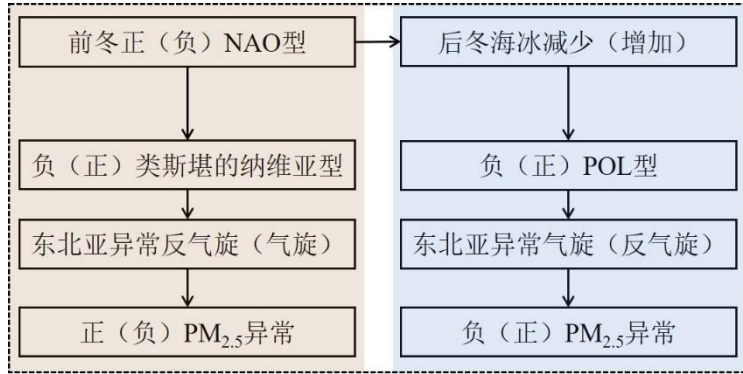


图 3 北极海冰影响华北平原气候异常在前冬和后冬次季节反转的物理机制流程图, 图片改自 An et al. (2023a)。

Fig. 3 Schematic diagram of Arctic sea-ice influencing subseasonal reversal of early and late winter climate anomaly. The figure was adapted from An et al. (2023a).

5 平流层准两年振荡对东亚前冬气候异常的可能影响

除了对流层系统,平流层系统同样对东亚前、后冬气候异常具有不同的影响。Ma et al. (2021) 发现东风位相的 QBO 可通过对流层-平流层相互作用显著影响东亚前冬的气候异常,如在 QBO 东风位相年,东亚地区的温度明显偏高 (图 4)。An et al. (2025) 进一步发现 QBO 非线性调制 ENSO 对华北平原空气质量的影响。具体表现为,在 QBO 东风位相年,ENSO 对华北平原前冬空气质量的影响更加显著;而在 QBO 西风位相年,ENSO 对华北平原前冬空气质量无显著影响。

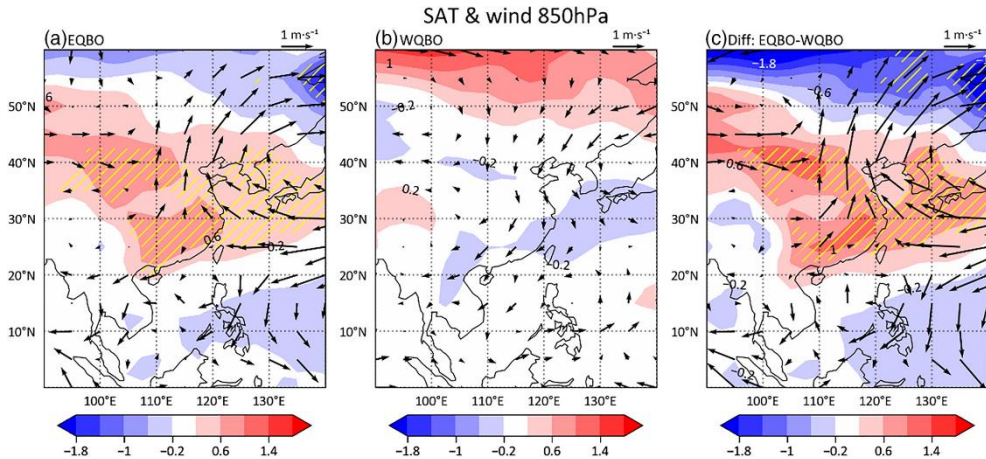


图 4 QBO 东风位相年 (a) 和西风位相年 (b) 地表气温异常和 850-hPa 风场异常, (c) 图为二者的差值。

黄色斜线表示地表气温异常通过 95% 的显著性检验 (Ma et al., 2021)。

Fig. 4 Composite patterns for the anomalous SAT (shading; $^{\circ}\text{C}$) and 850-hPa horizontal winds (vectors; m s^{-1}) for the (a) EQBO, (b) WQBO, and (c) difference between the EQBO and WQBO. Yellow hatching indicates significant anomalous SATs at the 95% confidence level (Ma et al., 2021).

6 可能的应用价值及对未来研究的启示

上述研究均指出东亚前冬和后冬的气候异常存在明显差异性, 并从热带、中纬度、极地和平流层比较系统地揭示了可能导致这种差异性的驱动因子。研究发现的这些驱动因子对未来东亚冬季气候预测具有重要参考价值。此外, 本文指出在研究和预测东亚冬季的气候异常时, 需要重视从前冬和后冬分别展开, 甚至可以使用逐月的时间尺度进行研究, 而非简单地取季节平均 (12 至 2 月, DJF)。此外, 东亚冬季气候异常往往是多因子协同作用的结果, 因此结合机器学习等先进手段深入探讨文中所述多因子对东亚前冬和后冬气候异常的协同影响机理是未来重要的研究方向。

致谢 感谢《大气科学》编辑部的约稿, 感谢编辑和匿名审稿人提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- An X D, Wang F, Sheng L F, Li C. 2022a. Pattern of Wintertime Southern Rainfall and Northern Pollution over Eastern China: The Role of the Strong Eastern Pacific El Niño [J]. *J. Climate*, 35: 7259–7273.
- An X D, Chen W, Fu S, Hu P, Li C, Sheng L F. 2022b. Possible dynamic mechanisms of high- and low-latitude wave trains over Eurasia and their impacts on air pollution over the North China Plain in early winter [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127: e2022JD036732.
- An X D, Chen W, Ma T J, Aru H, Cai Q Y, Li C, Sheng L F. 2023a. Key role of Arctic sea-ice in subseasonal reversal of early and late winter $\text{PM}_{2.5}$ concentration anomalies over the North China Plain [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 50: e2022GL101841.
- An X D, Chen W, Sheng L F, Li C, Ma T J. 2023b. Synergistic effect of El Niño and Arctic sea-ice increment on wintertime northeast Asian anomalous anticyclone and its corresponding $\text{PM}_{2.5}$ pollution [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 128: e2022JD037840.
- An X D, Chen W, Ma T J, Sheng L F. 2025a. Inconsistent ENSO teleconnections over East Asia in early and late winter: Role of Siberian land-atmosphere coupling [J]. *Environ. Res. Lett.*, 20: 119837.
- An X D, Chen W, Sheng L F, Ma T J. 2025b. Nonlinear effects of the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on ENSO modulating $\text{PM}_{2.5}$ over the North China Plain in early winter [J]. under review.
- Cai Q Y, Chen W, Chen S F, Ma T J, An X D, Li Z B. 2024. The Strengthened Linkage between ENSO and the Eurasian Pattern since the Late 1980s [J]. *J. Climate*, 37(24): 6491–6502.
- Chen Z-F, Sun Y, Zhang X B, Li T, Yu J-H. 2023. Role of anthropogenic forcing and atmospheric circulation in a low-temperature event in February 2022 in eastern China [J]. *Adv. Clim. Chang. Res.*, 14(6): 921–929.
- Geng X, Noh K-M, Kim K, Kug J-S. 2023. Midwinter breakdown of ENSO climate impacts in East Asia [J]. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 6: 155.
- Ma T J, Chen, W, Huangfu J L, Song L, Cai Q Y. 2021. The observed influence of the Quasi-

- Biennial Oscillation in the lower equatorial stratosphere on the East Asian winter monsoon during early boreal winter [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(14): 6254–6269.
- Ma T J, Chen W, Chen S F, Garfinkel C I, Ding S Y, Song L, Li Z B, Tang Y L, Huangfu J L, Gong H N, Zhao W. 2022. Different ENSO Teleconnections over East Asia in Early and Late Winter: Role of Precipitation Anomalies in the Tropical Indian Ocean and Far Western Pacific [J]. *J. Climate*, 35(24): 7919–7935.
- Shi J. 2021. Reexamining the decadal variation in the ENSO-East Asian winter monsoon relationship [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48: e2021GL094208.
- Zhao C-B, Li Q-Q, Nie Y, Wang F, Xie B, Dong L-L, Wu J. 2023. The reversal of surface air temperature anomalies in China between early and late winter 2021/2022: Observations and predictions [J]. *Adv. Clim. Chang. Res.*, 14(5): 660–670.
- Zhao W, Chen S F, Zhang H D, Wang J K, Chen W, Wu R G, Xing W Q, Wang Z B, Hu P, Piao J L, Ma T J. 2022. Distinct Impacts of ENSO on Haze Pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei Region between Early and Late Winters [J]. *J. Climate*, 35(2): 687–704.