

东海模态调控全球冬季年代际气温变率

方克艳^{1*}, 吴昊^{1,2}, 林书恒¹, 程军³, 柳竞先^{1,4}, 陈德亮⁶, 李金豹⁷, Cesar AZORIN-MOLINA⁸, 赵正¹, Frode STORDAL⁹, 郝硕¹¹, Nicole DAVI^{12,10}, 欧廷海⁵, 邢行¹, 陈发虎¹⁰

1. 福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建省两岸融合发展研究院, 福州 350007
2. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 地下水污染成因与修复江西省重点实验室, 南昌 330013
3. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044
4. Department of Geography and Planning, University of Toronto, Toronto M5S 3G3, Canada
5. Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 460, Sweden
6. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084
7. 香港大学地理系, 香港 999077
8. Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE, CSIC-UV-Generalitat Valenciana), Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia 46113, Spain
9. Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo 0316, Norway
10. 中国科学院青藏高原研究所古生态与人类适应团队, 北京 100101
11. Tree Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, NY 10964, USA
12. Department of Environmental Science, William Paterson University, Wayne, NJ 07470, USA

* 通讯作者, E-mail: kfang@fjnu.edu.cn

2025-07-12收稿, 2026-04-24修回, 2026-06-02接受, 2026-07-16网络版发表

国家自然科学基金项目(41988101、42425101、42130507和42505021)、福建省海峡融合发展研究院项目(LARH24JBO7)和国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20250218)资助

摘要 全球冬季气温较其他季节表现出更为显著的年代际波动, 但其全球尺度的主要调制因子尚不明确。本研究通过消除厄尔尼诺-南方涛动驱动的高频信号, 增强了冬季气温的年代际波动信号。基于观测数据与模拟分析, 识别出东海海表温度异常是全球冬季气温年代际异常的关键驱动因素, 并据此将这种显著影响全球冬季气温的特定模态定义为东海模态(East China Sea Mode, ECSM)。东海紧邻东亚冬季风区, 是受该季风系统影响的关键海域。ECSM通过调节一些主导性年代际大气遥相关(位于遥相关波列的关键区域), 从而诱发全球冬季气温异常。值得注意的是, ECSM的影响范围超出了传统的太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的影响范围, ECSM与PDO的共同作用塑造了横跨欧亚大陆、北美及南半球部分地区的温度格局。本研究强调了东海海表温度在影响冬季气温波动中的关键作用, 拓展了以往主要聚焦于PDO所表征的太平洋东部区域的传统研究视角。

关键词 冬季气温, 冬季风, 厄尔尼诺-南方涛动, 东海, 东海模态

1 引言

在人为温室气体驱动的全球变暖背景下, 北半球冬季的增温最为显著(IPCC, 2021; Armstrong McKay等, 2022)。但在中欧亚等一些区域, 仍能观测到持续的年代

际至多年代际(10–60年)的冬季变冷现象(Blackport等, 2019; Cohen等, 2020; Smith等, 2022)。一些研究认为, 北极增暖加剧及其引发的海冰减少可能会削弱中纬度西风带, 导致冬季变冷(Mori等, 2014)。然而, 一些建模研究对这种关联的因果关系提出了质疑(McCusker

中文引用格式: 方克艳, 吴昊, 林书恒, 程军, 柳竞先, 陈德亮, 李金豹, Azorin-molina C, 赵正, Stordal F, 郝硕, Davi N, 欧廷海, 邢行, 陈发虎. 2026. 东海模态调控全球冬季年代际气温变率. 中国科学: 地球科学, 56(8): 2971–2980, doi: [10.1360/N072025-0372](https://doi.org/10.1360/N072025-0372)

英文引用格式: Fang K, Wu H, Lin S, Cheng J, Liu J, Chen D, Li J, Azorin-Molina C, Zhao Z, Stordal F, Hao S, Davi N, Ou T, Xing H, Chen F. 2026. Interdecadal winter temperature variability driven by the East China Sea Mode: A global perspective. Science China Earth Sciences, 69(8): 2927–2935, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1981-4>

等, 2016; Blackport等, 2019; Cohen等, 2020)。1995年至2013年间发生的冬季变冷事件, 凸显了在全球范围内研究冬季气温年代际至多年代际(10–60年)波动的必要性(He等, 2020; Yin等, 2023)。

全球气温表现出显著的年代际波动, 例如过去一个世纪中在1940–1975年和1998–2012年间观察到的增暖减缓(Kosaka和Xie, 2013; Dai等, 2015; Medhaug等, 2017)。大西洋和太平洋海表温度波动的主导模态, 包括大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)(Enfield等, 2001)和太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)(Mantua和Hare, 2002)或太平洋年代际振荡(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)(Hendley等, 2015), 被广泛认为是年代际尺度全球气温的关键驱动因子(Dai等, 2015; Steinman等, 2015; Wang等, 2017; Fang等, 2018; Mann等, 2021)。然而, 特定海域的海表温度(sea surface temperature, SST)异常, 特别是西北太平洋及其邻近海域, 对全球冬季年代际气温波动影响仍缺乏充分关注。此外, 东亚冬季气候受东亚冬季风、厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)及相关的海气相互作用影响强烈(Wang等, 2000; Kim等, 2017; Lin等, 2024)。然而, 自20世纪70年代中期以来, 东亚冬季风(East Asian Winter Monsoon, EAWM)年际变率降低, 其与ENSO的既有联系有所减弱(Wang和He, 2012)。这种联系的减弱表明, 替代性的海洋驱动因子, 特别是西北太平洋及其邻近海域的区域性海表温度异常, 在调制冬季气候变率中可能变得愈发重要。因此, 理解全球和区域冬季年代际气温波动的机制, 特别是与区域海表温度强迫相关的机制, 对于提高气候预测能力、支持社会经济规划及适应策略至关重要。

2 数据与方法

SST数据集使用了英国哈德莱中心的海冰与海表温度数据集(HadISST), 其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间范围自1870年至今(Rayner等, 2003)。为评估结果的稳健性, 另外使用了日本气象厅(JMA)提供的COBE-SST 2数据, 其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间范围覆盖1850年至今(Hirahara等, 2014)。在指数计算方面, 基于HadISST数据, 在去除线性增暖趋势后, 对北大西洋(0° – 70° N)SST异常进行区域平均得到AMO指数(Enfield等, 2001)。通过对北太平洋(20° N以北)去趋势SST场进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF), 并提取第一模态(EOF1)获得PDO指数(Mantua和Hare, 2002)。东亚冬季风指数定义为冬季(12–2月)300 hPa纬向风在两个区域(27.5° – 37.5° N, 110° – 170° E与 50° – 60° N, 80° – 140° E)平均

值之差(Jhun和Lee, 2004)。

为分析东海模态(East China Sea Mode, ECSM)及其他气候模态对区域气候的影响, 使用了英国东安格利亚大学气候研究中心CRU的TS4.06数据集的月气温和降水资料, 其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间范围自1901年至今(Harris等, 2020)。通过对网格按面积加权, 计算得到全球月平均地表气温。为了分析与ECSM及其他模态相关的大气环流特征, 基于20世纪再分析资料(Twentieth Century Reanalysis V3, 分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)计算了200和850 hPa的位势高度(Geopotential height, GPH)以及风场的相关性(Slivinski等, 2019)。同时, 利用该数据集中的感热通量(Sensible heat flux, SH)和潜热通量(Latent heat flux, LH)来探讨EAWM与ECSM之间的联系。该数据集时间跨度长(1836–2015年), 有助于识别周期大于8年稳健的长期气候模态。此外, 还分析了第六阶段耦合模式比较计划(CMIP6)多模式集合的月平均输出(网络版附表S1)(Eyring等, 2016), 包括历史试验(HIS, 1850–2014年)以及共享社会经济路径高排放情景(SSP585, 2015–2099年)。

对1874–2019年期间全球海洋冬季(12月至次年2月)的SST进行EOF分析(Lorenz, 1956), 提取年代际变率的主导模态及其相应的主成分(Principal component, PC)序列。在进行EOF分析之前, 首先利用8年Lanczos低通滤波器(Duchon, 1979)对SST进行滤波处理, 以抑制与ENSO主导的年际变率(其周期通常为2–7年)。为了研究多年代际尺度的变率, 通过二次多项式拟合去除最低频的变率(MacDonald和Case, 2005)。考虑到8年低通滤波后的序列会显著减少数据的自由度, 在基于Student's *t*检验计算相关或回归的显著性时, 引入有效自由度进行修正, 其定义为

$$N_e = \frac{N}{1 + 2 \sum_{i=1}^N r_a^* r_b} \quad (1)$$

其中, N_e 为有效自由度, N 为时间序列长度, r_a 和 r_b 分别是序列 a 和 b 的 i 阶自相关系数(Quenouille, 1952)。此外, 采用小波分析识别时频域中的周期性特征, 其显著性基于红噪声背景进行检验(Torrence和Compo, 1998), 并通过小波相干(Wavelet Coherence, WTC)分析(Grinsted等, 2004)评估不同时间尺度下的时变关系。

3 结果

3.1 东海模态

为突出年代际变率特征, 采用8年低通滤波后的SST数据, 以最大限度地减少ENSO主导的年际变化(其周期

为2–7年)(Timmermann等, 2018)。对滤波后的冬季SST场进行EOF分析, 其第一模态(EOF1)解释了26.2%的总方差, 并在东海区域呈现显著的高载荷中心(图1A), 据此将其定义为东海模态(ECSM)。ECSM在冬季表现尤为稳健且显著(网络版附图S1), 而在其他季节中并不存在(附图S2–S4), 表明该模态是一个发生在年代际尺度上的冬季特有模态。这一发现进一步印证了ENSO对东海海域影响有限, 因为ENSO所激发的遥相关波列通常向东北太平洋传播(Fang等, 2019; Cai等, 2023; Alizadeh, 2024), 且其影响主要局限于副热带地区(35°N以南)(Fang等, 2021; Alizadeh, 2024)。

选取110°–130°E, 15°–35°N的SST来表征ECSM, 其显示出的SST相关空间型与EOF1高度相似(附图S5)。作为对比, 解释了18.0%方差的EOF2在北太平洋中东部表现出载荷峰值(图1B), 这与PDO的特征一致(Mantua和Hare, 2002)。这两种模态在年代际尺度上均表现出强烈的波动(图1C和1D)。然而, ECSM的显著周期集中在7–8年及40–60年附近(附图S6A), 体现出其独特的时间演变特征。与PDO和AMO相比, ECSM表现出介于二者之间的多年代际时间尺度, 并在约40年以上尺度上与PDO保持持续相干, 但存在一定的位相差异(附图S6B和S6D)(Schlesinger和Ramankutty, 1994; Enfield等, 2001; Mantua和Hare, 2002; MacDonald和Case, 2005)。这些关系表明, 虽然ECSM并非完全独立于其他大尺度模态, 但它代表了一种以北太平洋西部为中心的、具有明显冬

季特征的独立年代际SST模态。

既有研究表明太平洋海盆中存在多个重要的区域性海温异常模态, 例如北太平洋环流振荡(Di Lorenzo等, 2008)、西太平洋暖池变率(Li等, 1999)以及黑潮延伸体(Qiu和Chen, 2005), 构成了太平洋气候系统的重要组成部分。然而, 从图1可以看出, 前两个EOF主模态中并未表现出与黑潮延伸体、西太平洋暖池及北太平洋环流振荡相关的显著SST异常信号。这表明, 在年代际时间尺度上, 相较于这些区域性模态, ECSM与PDO在塑造大尺度冬季SST变率方面可能发挥着更为关键的作用。

3.2 东亚冬季风对ECSM的显著影响

ECSM的正位相(即SST偏高)与东北亚地区从近地面到高空一致的东南风异常密切相关(图2A和2B), 这是EAWM减弱的典型特征(Jhun和Lee, 2004; Li和Yang, 2010; Ma和Chen, 2023)。EAWM的减弱通常伴随着阿留申低压的减弱(Dong等, 2023), 这一点可由北太平洋上空的反气旋式相关环流得到证实(图2A和2B)。相比之下, 与PDO相关的风场异常在北太平洋呈现气旋型结构(图2C和2D), 表明阿留申低压加强。该PDO相关环流主要局限于北太平洋东部, 其空间结构与ECSM相关的风场模式显著不同。上述对比进一步表明, ECSM在联系东亚冬季风与大尺度冬季大气环流方面具有独特的作用。

EAWM(Jhun和Lee, 2004)和ECSM指数之间强相关性($r=-0.67$, $p<0.001$)印证了EAWM对ECSM的影响(图

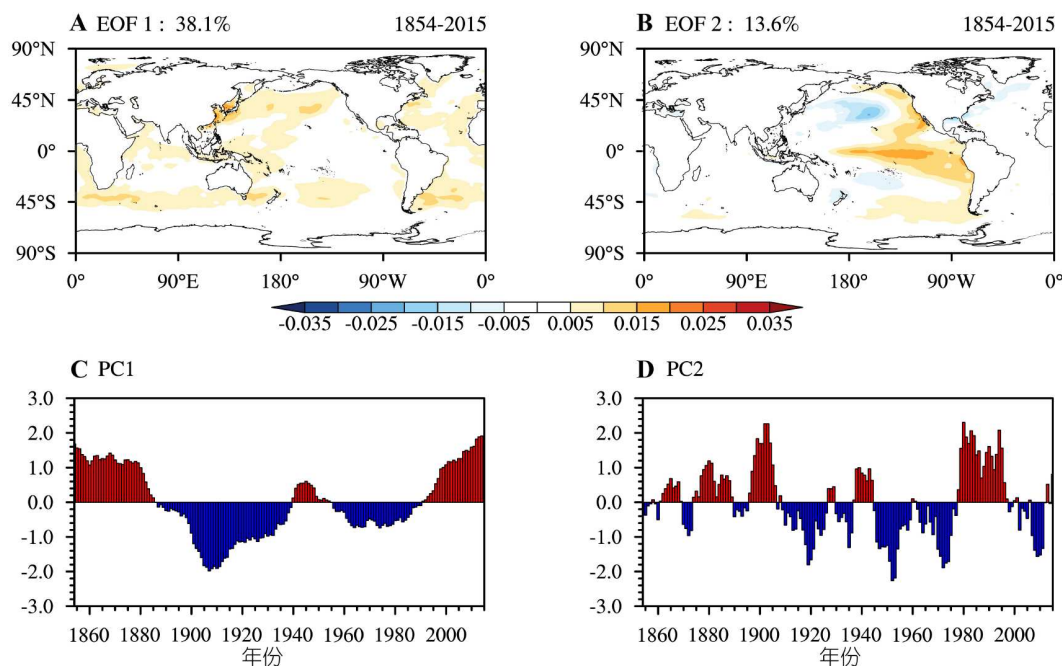


图1 年代际冬季海表温度(SST)的主导模态。(A、B) SST的前两个经验正交函数模态(EOF1和EOF2); (C、D) 相应的主成分序列(PC1和PC2)

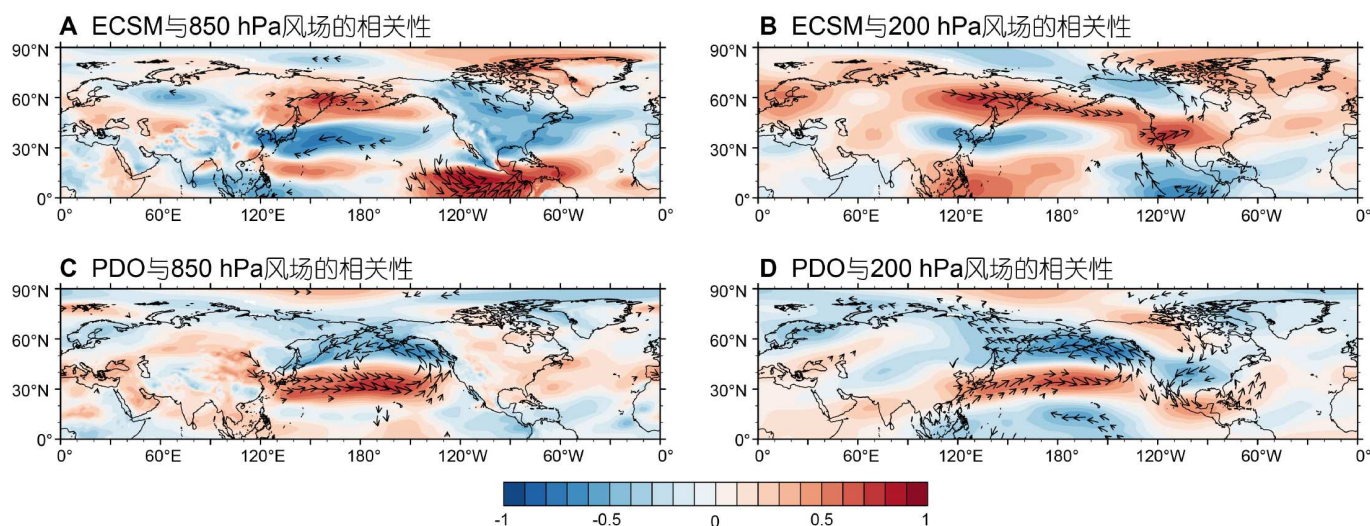


图2 与东海模态(ECSM)相关的风场特征。ECSM与(A)850 hPa和(B)200 hPa风场的相关性, 以及PDO与(C)850 hPa和(D)200 hPa风场的相关性。颜色表示相关系数, 风矢量长度表示风场强度。仅在通过Student's *t* 检验达到95%显著性水平的区域绘制风矢量, 所有数据均经过8年低通滤波及去趋势处理

3A)。此外, 在东海海域观察到SST与EAWM之间存在强相关(图3B), 这一分布与ECSM所影响的SST区域一致(图3C)。增强的EAWM可通过加强海洋向大气的向上感热通量, 将冷空气输送至东海, 从而降低海表温度(图3D)。此外, 增强的EAWM伴随着近地面偏北风增强, 通过提高近地面风速以及海洋与上方干冷大陆空气之间的湍流水分交换, 增加了蒸发, 从而增强了海面的潜热通量, 导致东海进一步降温(图3E)。由于ECSM受EAWM驱动, 它能有效地反映大尺度温度变化。由于ECSM受EAWM驱动, 而EAWM是北半球冬季最强的动力系统之一(Johnson等, 2018; Duan等, 2013), 也是冬季寒冷的重要来源(Shi等, 2023), 因此ECSM能够有效反映大尺度温度变化。

3.3 ECSM激发全球尺度年代际遥相关

ECSM正异常通过海气相互作用, 导致东北亚上空出现高于常年的位势高度异常(图4A)。东北亚上空的高位势异常是波列的一部分, 该波列向阿拉斯加、北美、欧洲、中亚以及印度次大陆传播(图4A)。这一波列结构代表了冬季年代际尺度上主要的遥相关型, 200 hPa位势高度场的第一模态经验正交函数(EOF1)证实了这一点(图4B)。这一主导全球年代际遥相关型总体上与以往在北半球识别出的模型一致(Ding和Wang, 2005; Yu等, 2024)。PDO与北太平洋和北美西部上空的位势高度表现出最强相关性(图4C), 其空间分布类似于太平洋—北美(Pacific-North America, PNA)遥相关型(Renwick和Wal-

lace, 1996; Dong等, 2024)。如位势高度的第二模态经验正交函数(EOF2)所示, 这种类PNA相关模式是第二主导遥相关模态的一部分(图4D)。这种遥相关型在空间上明显不同于与ECSM相关的遥相关型。类似地, 在年代际尺度上, AMO与冬季第三主导遥相关模式相关(图4E和4F), 其空间分布与ECSM的遥相关型相似。总体而言, ECSM激发了塑造全球气候的主要全球型年代际遥相关, 其型态与AMO相关的遥相关相似, 但不同于PDO相关的遥相关型。

4 讨论

4.1 ECSM与PDO对冬季气温的补偿效应

冬季气温与ECSM和PDO之间的相关性揭示了两者的独特又互补的区域模式(图5)。ECSM与亚洲东部和南部、欧洲中东部、北美东部、非洲中部以及澳大利亚东南部的气温呈显著正相关(图5A)。这些受ECSM驱动而出现温度正异常的区域通常与高压系统相关联(图4A), 高压有利于增强短波辐射, 从而导致更温暖的气候条件(图5A, 附图S7)。相比之下, PDO与亚洲中部、北美西北部、南部非洲副热带地区以及澳大利亚东北部等区域的气温呈显著正相关, 而这些区域与ECSM并不存在显著的相关性(图5B)。

由于ECSM与PDO之间存在互补作用, 两者结合的共同影响与气温表现出的显著相关性覆盖了比单一模态更广阔的区域(图5C)。ECSM与PDO共同作用下, 与气温

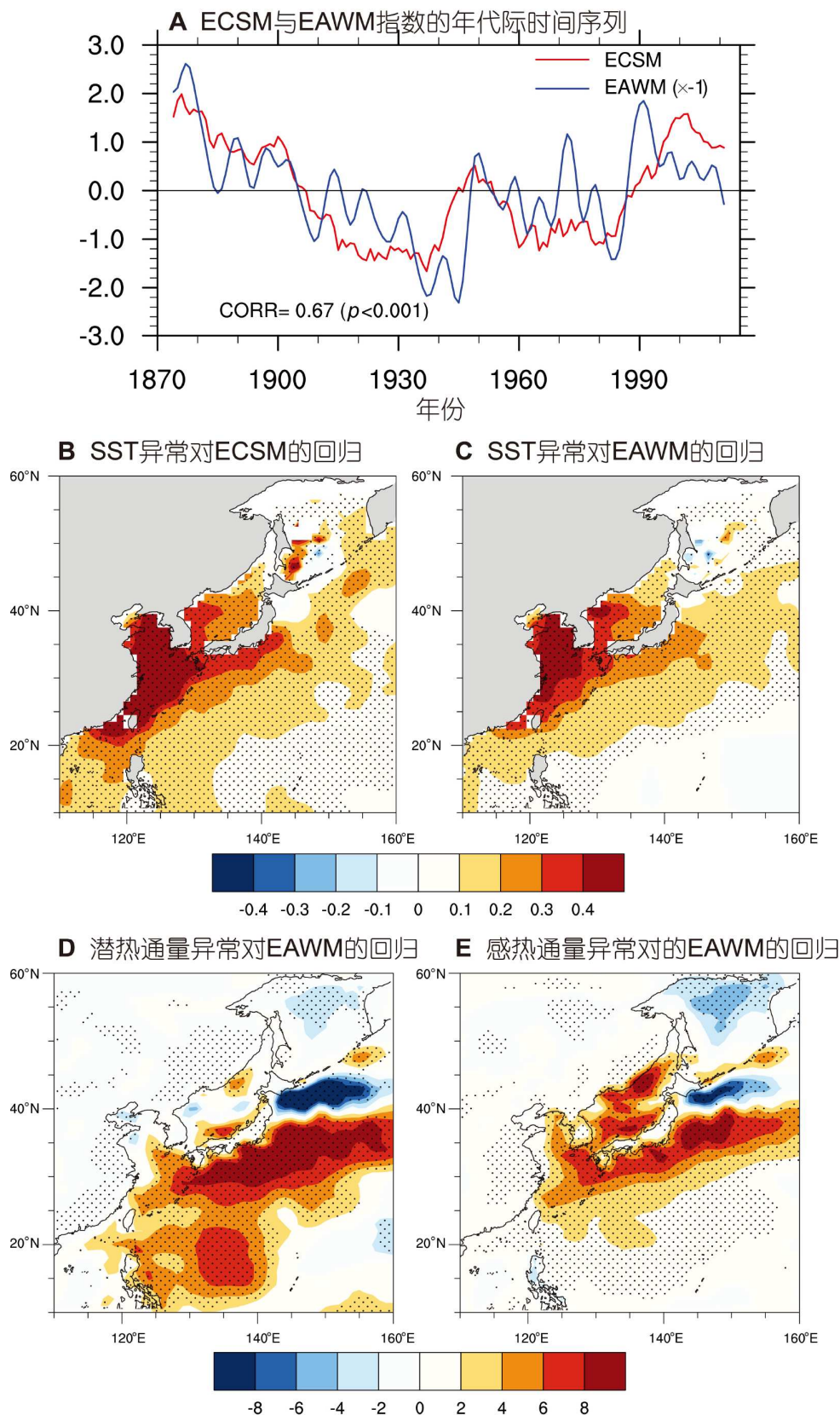


图3 东亚冬季风(EAWM)驱动东海模态(ECSM)。 (A) ECSM与EAWM指数。以下各项之间的回归分析: (B) EAWM与海表温度(SST)(阴影; $^{\circ}\text{C}$), (C) ECSM与SST(阴影; $^{\circ}\text{C}$), (D) EAWM与潜热通量(LH; 阴影; W m^{-2}), (E) EAWM与感热通量(SH; 阴影; W m^{-2})。感热和潜热通量的正异常表示向上通量(由海洋输送至大气)。图中打点区域为回归分析通过了Student's t 检验并在95%置信水平上显著的区域

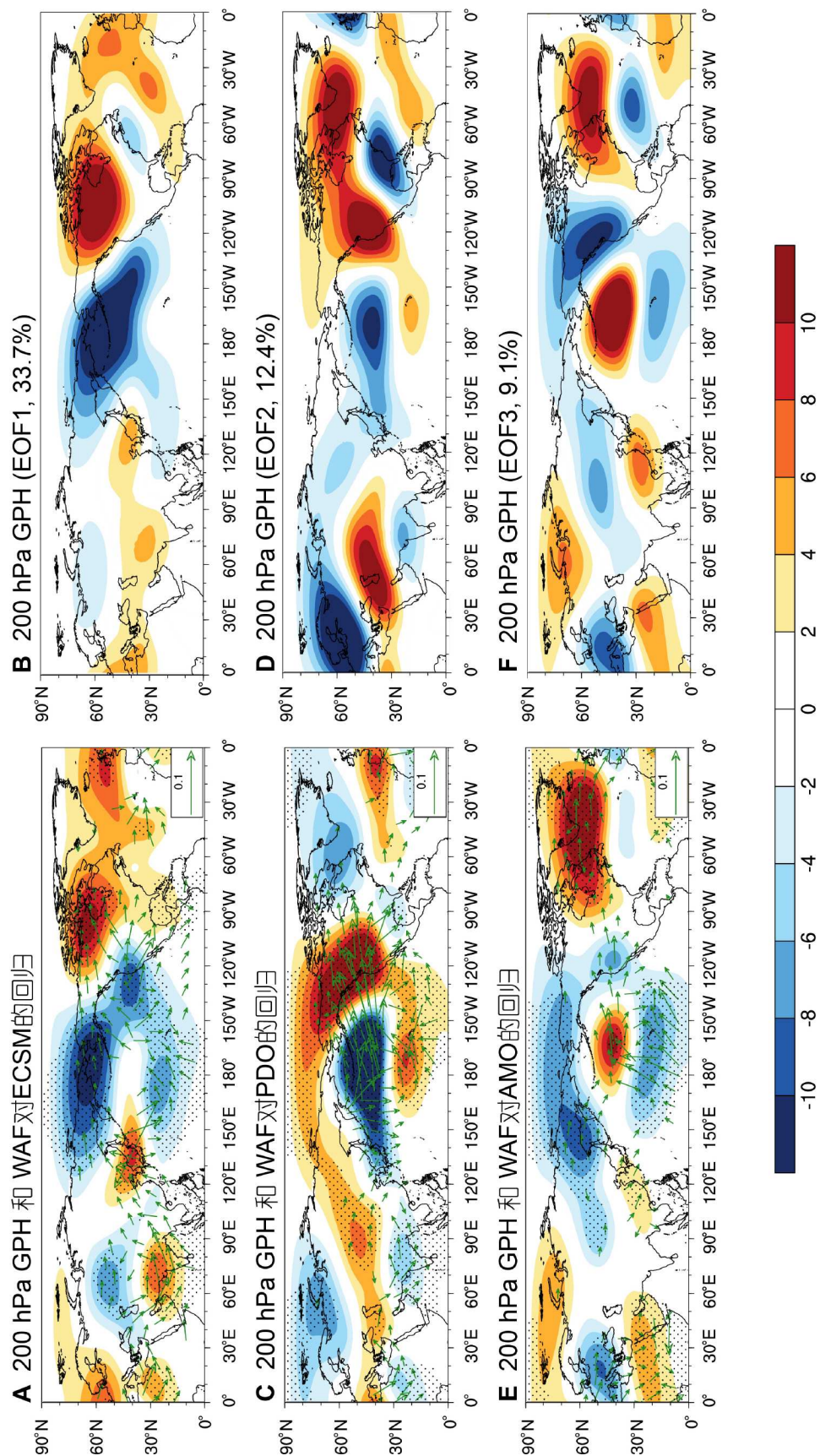


图4 气候模态驱动的大气遥相关。图中填色表示200 hPa位势高度(GPH, m)分别与以下各项的回归系数:(A)东海模态(ECSM)、(C)太平洋年代际涛动(PDO)以及(E)大西洋年代际振荡(AMO)。(B、D和F)分别为全球200 hPa位势高度的前三个经验正交函数(EOF1、EOF2和EOF3)空间型(阴影;m)。(A、C和E)中的箭头(阴影;m)。(A、C和E)中的箭头表示Plumb波活动通量(WAF)(Plumb, 1985),其方向表示波的传播方向。对东西向和南北向分量均小于 $0.015 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ 的未予显示,图中打点区域为回归分析通过Student's t 检验并在95%置信水平上显著的区域,所有数据均已去趋势并经过8年低通滤波处理

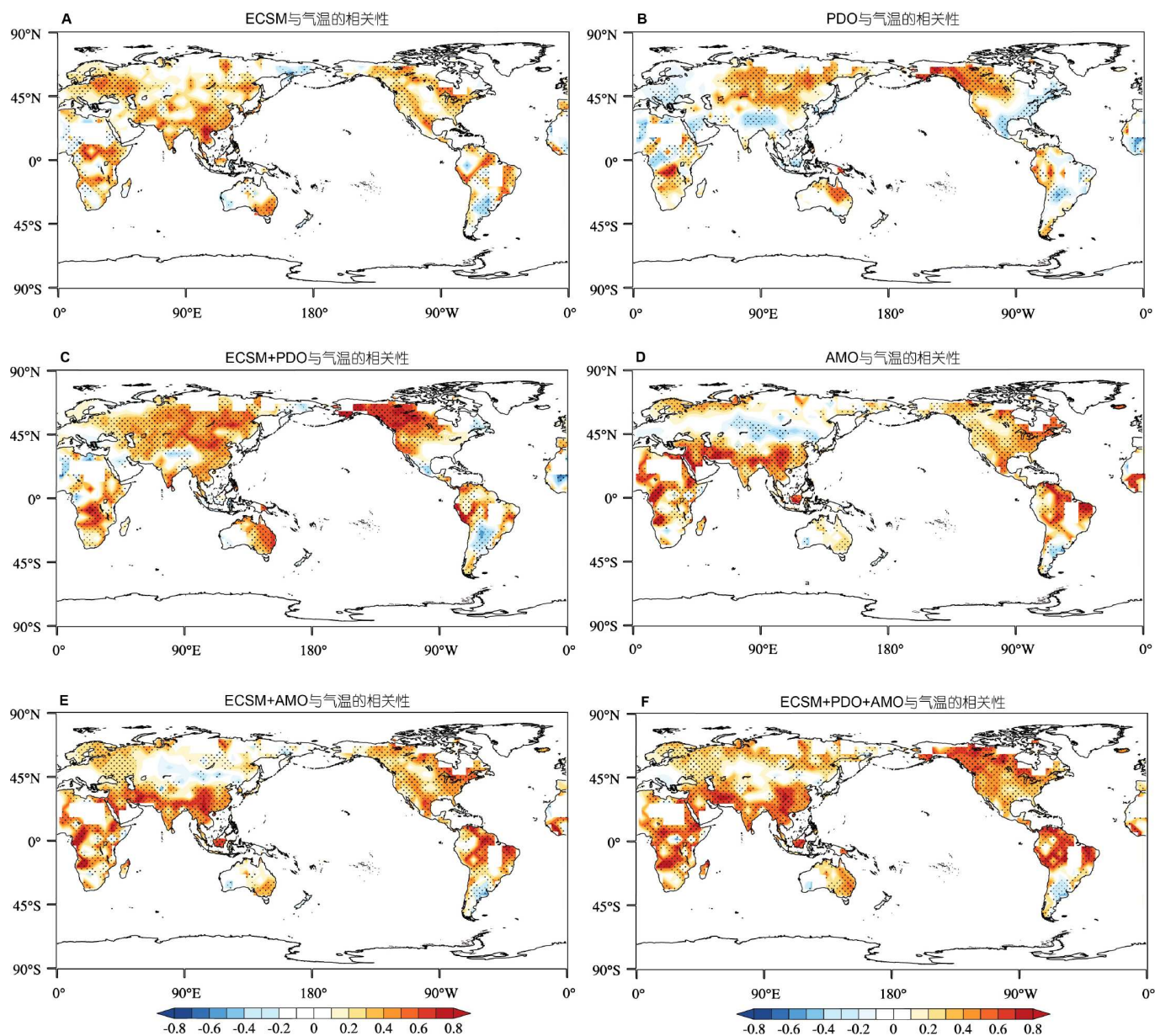


图5 气候模态与冬季(12月至次年2月)气温的关系。冬季气温分别与以下各项的空间相关模式：(A)东海模态(ECSM)、(B)太平洋年代际振荡(PDO)、(C)ECSM与PDO的结合、(D)大西洋年代际振荡(AMO)、(E)ECSM与AMO的结合，以及(F)ECSM、PDO与AMO的综合影响。所有数据均已去趋势并经过8年低通滤波处理，图中的打点区域为相关性通过Student's *t*检验并在95%置信水平上显著的区域

正相关区域扩展至亚洲东部和中部、北美西部、澳大利亚东部、非洲南部以及南美北部等地区(图5C)。ECSM与PDO在气温上的这种互补关系，反映了其遥相关型在空间结构上既具有差异性又具有互补性的特征(图4A–4D)。

4.2 ECSM增强AMO对冬季气温的影响

AMO与热带和副热带亚洲、欧洲北部、北美以及南美北部的气温呈显著正相关(图5D)。AMO影响的区域在

很大程度上与受ECSM影响的区域相重叠，这与其相似的大气遥相关模式一致(图4A、4B、4E和4F)。因此，在AMO影响较强的区域，ECSM与AMO的共同作用增强了与气温的相关强度，但并未将影响范围扩展至这两个独立模态所影响的区域之外(图5E)。如预期所示，气温与ECSM、PDO和AMO三者综合影响的相关性最高($r=0.76$, $p=0.02$)，且高相关区域覆盖了同时受这三种气候模态影响的区域(图5F)。

已有研究表明，AMO和PDO均可激发大气遥相关波

列,从而调制大尺度环流和气温分布。近期研究进一步指出,AMO对气温的影响可以通过大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)的变化来实现(Shi等, 2023)。AMO的准周期性被认为源于北大西洋涛动(NAO)与AMOC之间的滞后反馈,从而形成一个耦合的海-气耦合振荡器(Sun等, 2015)。通过大气遥相关,这些与AMO相关的环流异常能够影响中高纬及远地分支的冬季气温模式,从而为本文所识别出的具有统计稳健性的AMO-气温关系提供了物理机制基础。

4.3 未来情景中ECSM对气温影响增强

利用CMIP6框架下40个模式的模拟结果(附表1)(Eyring等, 2016),评估在未来情景中,ECSM是否会像观测时期一样在冬季气温变化中发挥主导作用。全球平均气温以及ECSM、PDO和AMO对应区域的平均SST均随温室气体持续增加而表现出强烈的上升趋势(图6A)。在去除线性趋势后,模拟结果能够较好地再现历史年代际冬季气温变化特征,包括20世纪30年代的增暖和70年代的降温(图6B)。值得注意的是,未来GMT的变化趋势与ECSM最为一致,尤其是在约2030年之后,ECSM呈现出明显的上升趋势,而PDO和AMO则未表现出类似变化(图6B)。

5 结论

本研究识别出一种冬季特有的SST模态——东海模态(ECSM)。观测与模拟结果均表明,ECSM是调制全球冬季气温的主导因子之一。一方面,ECSM受东亚冬季风调控,而东亚冬季风是全球冬季气温的敏感指标;另一方面,ECSM通过激发主要的全球年代际遥相关来影响全球冬季气温。ECSM与PDO在遥相关型及其对气温的影响上表现出互补特征,因此,二者的综合作用能够解释比单一模态更广泛的影响区域。相比之下,ECSM与AMO具有相似的遥相关模式并影响相似的区域,因此,其共同作用增强了对这些区域气温的影响。以往研究多关注太平洋东侧(PDO)对冬季气温的调制作用,而对西侧关注较少。本研究强调,同时考虑北太平洋东西两侧的情况,对于提高全球冬季气温预测的准确性具有重要意义。

除内部气候模态外,外强迫,尤其是大型火山喷发,也可引发持续数年的显著区域性降温,并可能与内部气候模态发生相互作用或调节其位相。近期研究表明,大规模火山喷发(如长白山千年大喷发)能够对东亚气候产生显著且空间上不均一的影响(Yang等, 2024)。尽管如此,本研究结果表明,ECSM及其与PDO和AMO的共同作用仍是主导冬季气温内部变率的关键模态。因此,火

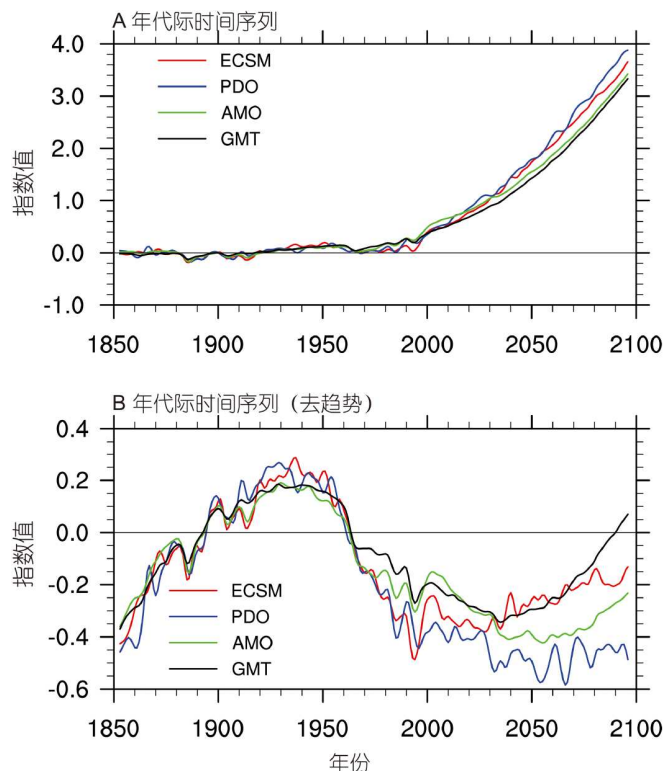


图6 气候模态对全球平均气温(GMT)影响的模拟分析。(A) 全球平均气温(GMT)以及定义东海模态(ECSM)、太平洋年代际涛动(PDO)和大西洋年代际振荡(AMO)的海表温度(SST)的年代际时间序列的多模式集合平均;(B) 对上述序列进行二次去趋势后的多模式集合平均。模拟数据基于CMIP6的40个模式的集合平均,涵盖1850年至2099年的历史模拟与未来情景

山喷发等外强迫更可能对本文识别的大尺度年代际格局起调节作用,而非决定性作用,其与内部气候模态之间的具体相互作用仍有待进一步研究。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责,详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- Alizadeh O. 2024. A review of ENSO teleconnections at present and under future global warming. *WIREs Clim Change*, 15: e861
- Armstrong McKay D I, Staal A, Abrams J F, et al. 2022. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377: eabn7950
- Blackport R, Screen J A, van der Wiel K, et al. 2019. Minimal influence of reduced Arctic sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nat Clim Chang*, 9: 697–704
- Cai W, Ng B, Geng T, et al. 2023. Anthropogenic impacts on twentieth-century ENSO variability changes. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 407–418
- Cohen J, Zhang X, Francis J, et al. 2020. Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nat Clim*

- Chang, 10: 20–29
- Dai A, Fyfe J C, Xie S P, et al. 2015. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability. *Nat Clim Change*, 5: 555–559
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys Res Lett*, 35: 2007GL032838
- Ding Q, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Clim*, 18: 3483–3505
- Dong W, Zhao M, Tan Z, et al. 2024. Atmospheric rivers over eastern US affected by Pacific/North America pattern. *Sci Adv*, 10: ead3325
- Dong Z, Wang L, Gui S, et al. 2023. Diminished impact of the East Asian winter monsoon on the Maritime Continent rainfall after the late-1990s tied to weakened Siberian High-Aleutian Low covariation. *J Geophys Res-Atmos*, 128: e2022JD037336
- Duan J, Zhang Q, Lv L X. 2013. Increased variability in cold-season temperature since the 1930s in subtropical China. *J Clim*, 26: 4749–4757
- Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions. *J Appl Meteorol*, 18: 1016–1022
- Enfield D B, Mestas-Núñez A M, Trimble P J. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys Res Lett*, 28: 2077–2080
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 9: 1937–1958
- Fang K, Cook E, Guo Z, et al. 2018. Synchronous multi-decadal climate variability of the whole Pacific areas revealed in tree rings since 1567. *Environ Res Lett*, 13: 024016
- Fang K, Chen D, Ilvonen L, et al. 2019. Oceanic and atmospheric modes in the Pacific and Atlantic Oceans since the little ice age (LIA): Towards a synthesis. *Quat Sci Rev*, 215: 293–307
- Fang K, Yao Q, Guo Z, et al. 2021. ENSO modulates wildfire activity in China. *Nat Commun*, 12: 1764
- Grimsted A, Moore J C, Jevrejeva S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Proc Geoph*, 11: 561–566
- Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 7: 109
- He S, Xu X, Furevik T, et al. 2020. Eurasian cooling linked to the vertical distribution of Arctic warming. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL087212
- Henley B J, Gergis J, Karoly D J, et al. 2015. A tripole index for the interdecadal Pacific oscillation. *Clim Dyn*, 45: 3077–3090
- Hirahara S, Ishii M, Fukuda Y. 2014. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J Clim*, 27: 57–75
- IPCC. 2021. Climate Change 2021—The Physical Science Basis. In: Masson Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., eds. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J Clim*, 17: 711–726
- Johnson N C, Xie S P, Kosaka Y, et al. 2018. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nat Commun*, 9: 1724
- Kim J W, An S I, Jun S Y, et al. 2017. ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone. *Clim Dyn*, 49: 1157–1179
- Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501: 403–407
- Li C, Mu M, Zhou G. 1999. The variation of warm pool in the equatorial western Pacific and its impacts on climate. *Adv Atmos Sci*, 16: 378–394
- Li Y, Yang S. 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon. *J Clim*, 23: 4255–4262
- Lin S, Dong B, Yang S, et al. 2024. Causes of diverse impacts of ENSO on the Southeast Asian summer monsoon among CMIP6 models. *J Clim*, 37: 419–438
- Lorenz E N. 1956. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. Technical Report. Department of Meteorology. Massachusetts Institute of Technology
- Ma T, Chen W. 2023. Recent progress in understanding the interaction between ENSO and the East Asian winter monsoon: A review. *Front Earth Sci*, 11: 1098517
- MacDonald G M, Case R A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophys Res Lett*, 32: L08703
- Mann M E, Steinman B A, Brouillette D J, et al. 2021. Multidecadal climate oscillations during the past millennium driven by volcanic forcing. *Science*, 371: 1014–1019
- Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation. *J Oceanogr*, 58: 35–44
- McCusker K E, Fyfe J C, Sigmond M. 2016. Twenty-five winters of unexpected Eurasian cooling unlikely due to Arctic sea-ice loss. *Nat Geosci*, 9: 838–842
- Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. 2017. Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus’. *Nature*, 545: 41–47
- Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat Geosci*, 7: 869–873
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J Atmos Sci*, 42: 217–229
- Qiu B, Chen S. 2005. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales. *J Phys Oceanogr*, 35: 2090–2103
- Quenouille M H. 1952. Associated Measurements. New York: Academic Press. 242
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108: 4407
- Renwick J A, Wallace J M. 1996. Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Niño, and the PNA pattern. *Mon Weather Rev*, 124: 2071–2076
- Schlesinger M E, Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367: 723–726
- Shi F, Ting M, Guo Z. 2023. Quantitative attribution of Northern Hemisphere temperatures over the past 2000 years. *Front Earth Sci*, 17: 632–641
- Shi Y, Xu X, Yang G, et al. 2023. High-resolution records of millennial-scale East Asian winter monsoon in the shelf sea of Eastern China. *Geophys Res Lett*, 50: e2022GL102302
- Slivinski L C, Compo G P, Whitaker J S, et al. 2019. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Q J R Meteorol Soc*, 145: 2876–2908
- Smith D M, Eade R, Andrews M B, et al. 2022. Robust but weak winter atmospheric circulation response to future Arctic sea ice loss. *Nat Commun*, 13: 727
- Steinman B A, Mann M E, Miller S K. 2015. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures. *Science*, 347: 988–991
- Sun C, Li J, Jin F F. 2015. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. *Clim Dyn*, 45: 2083–2099
- Timmermann A, An S I, Kug J S, et al. 2018. El Niño–Southern Oscillation complexity. *Nature*, 559: 535–545
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull*

- [Amer Meteorol Soc](#), 79: 61–78
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J Clim](#), 13: 1517–1536
- Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s. [Chin Sci Bull](#), 57: 3535–3540
- Wang J, Yang B, Ljungqvist F C, et al. 2017. Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate variability over the past 1,200 years. [Nat Geosci](#), 10: 512–517
- Yang Y Y, Shi F, Guo Z F, et al. 2024. Climate impacts of the Millennium eruption of Changbaishan volcano. [J Geophys Res-Atmos](#), 129: e2024JD040869
- Yin Z, Zhang Y, Zhou B, et al. 2023. Subseasonal variability and the “Arctic warming-Eurasia cooling” trend. [Sci Bull](#), 68: 528–535
- Yu H, Zhou T, He L. 2024. Indian summer monsoon precipitation dominates the reproduction of Circumglobal teleconnection pattern: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models. [J Clim](#), 37: 5009–5023

(责任编辑: 王会军)