

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.117>



北太平洋急流对北美冬季温度偶极子的影响机制

戈 瑶^{1,2}, 罗德海³, 巫明娜⁴, 陈亚楠⁵

1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东济南 250031
2. 山东省气象台, 山东济南 250031
3. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029
4. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078
5. 山东省气象科学研究所, 山东济南 250031

摘 要: 为理解北美冬季“西暖-东冷”温度偶极子的成因, 基于再分析数据对影响北美温度的大气环流、西风急流和海温背景进行分析. 结果表明, 北美温度偶极子主要受正位相的太平洋北美遥相关(PNA⁺)环流影响, 弱的西风急流下北美温度偶极子最强. 此外, 北太平洋海温通过调制急流变化, 对 PNA⁺期间的北美温度偶极子结构和强度产生影响. 在正位相太平洋年代际振荡冬季, 中纬度西风急流偏南, PNA⁺环流在北美地区呈经向结构, 引起“西北暖-东南冷”温度异常. 而正位相维多利亚海温模态有利于中纬度西风急流减弱, 导致 PNA⁺在北美西部的高压系统向西移动, 同时东部低压持续存在, 形成水平波列结构, 进而加剧“西暖-东冷”温度偶极子异常.

关键词: 北美温度偶极子; 北太平洋西风急流; 太平洋北美遥相关; 太平洋年代际振荡; 维多利亚模态; 气候学; 极端天气.

中图分类号: P402

文章编号: 1000-2383(2025)09-3369-13

收稿日期: 2024-08-16

Mechanisms of North Pacific Jet on Winter North American Temperature Dipole

Ge Yao^{1,2}, Luo Dehai³, Wu Mingna⁴, Chen Yanan⁵

1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China
2. Meteorological Observatory of Shandong Province, Jinan 250031, China
3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
5. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China

Abstract: To understand the causes of extreme temperature dipoles in North America during winter, we analyse atmospheric circulation, the westerly jet stream, and the sea surface temperature (SST) background based on reanalysis data. Our study reveals the role of the positive Pacific-North American pattern (PNA⁺) in driving sub-seasonal temperature dipoles on North America. The results indicate that a weakened North Pacific jet favors the formation of the temperature dipole. Additionally, North Pacific SSTs can modulate the structure and strength of the temperature dipole by influencing the jet stream. Specifically, during the positive

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42305027); 重大天气复盘专项(No. FPZJ2024-073).

作者简介: 戈瑶(1996-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事大气遥相关和极端天气分析研究. ORCID: 0009-0001-6221-0260. E-mail: geyao19960114@163.com

引用格式: 戈瑶, 罗德海, 巫明娜, 陈亚楠, 2025. 北太平洋急流对北美冬季温度偶极子的影响机制. 地球科学, 50(9): 3369-3381.

Citation: Ge Yao, Luo Dehai, Wu Mingna, Chen Yanan, 2025. Mechanisms of North Pacific Jet on Winter North American Temperature Dipole. *Earth Science*, 50(9): 3369-3381.

phase of the Pacific decadal oscillation (PDO) in winter, a meridionally oriented wave train structure related to PNA^+ events is more easily formed, with the North Pacific westerly jet stream shifting southward. This structure contributes to a “warm northwest-cold southeast” temperature anomaly pattern on North America. Conversely, during the positive phase of the Victoria SST pattern, the mid-latitude jet stream is weakened. As a result, the high-pressure system associated with PNA^+ shifts westward, while the eastern low-pressure system persists. This forms a horizontal wave train structure, which strengthens the intensity of the “west warm-east cold” surface air temperature dipole anomaly on North America associated with PNA^+ .

Key words: North American temperature dipole; North Pacific jet; Pacific-North American pattern; Pacific decadal oscillation; Victoria mode; climatology; extreme weather.

0 引言

2013—2014 和 2014—2015 年冬季,北美爆发极端温度事件,西部温度异常偏高,加州持续干旱,同时东部暴风雪天气造成北美巨大经济损失和人员伤亡(Meehl *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2016; Swain *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014, 2015). 研究表明这类“西暖-东冷”温度偶极子型已成为北美温度变化的主模态,其形成机制和演变受到国内外科学家的广泛关注,成为极端天气研究的一个重要科学问题(Lee *et al.*, 2015; Yu and Zhang, 2015; Vigaud *et al.*, 2018).

有研究表明,中纬度大气环流是造成北美东西部温度差异的主要因素(Baxter and Nigam, 2015; Hartmann, 2015; Liu *et al.*, 2015; Xie and Zhang, 2017; Peng *et al.*, 2019). 太平洋北美遥相关(Pacific-North American pattern, 简称 PNA)是北半球大气环流变化的主要环流型之一,从太平洋到北美存在 4 个高低压中心,可以影响北美地区的行星波结构,从而导致北美东西部降水和温度的差异(Wallace and Gutzler, 1981; 黄荣辉, 1986; 李崇银和张勤, 1991; Franzke and Feldstein, 2005). Lin (2015) 指出北美次季节温度变化主要受 PNA 环流影响. 正位相的 PNA 环流型(简称 PNA^+)引导亚热带暖空气和北极冷空气到达北美,有利于加拿大和美国西部温度干燥,美国中东部变冷(Higgins, 2002; Jin *et al.*, 2006; Yu and Zwiers, 2007; Harnik *et al.*, 2016). 统计分析结果进一步表明,1950—2019 年冬季 PNA 和北美温度偶极子指数(简称 T_{WE} , 定义详见 1.2.3 节)存在显著正相关,相关系数达 0.71(图 1). 当北美“西暖-东冷”偶极子事件发生时,有 559 天 PNA 指数高于 0.5 倍标准差(近 66%),2013—2014 和 2014—2015 年冬季北美强“西暖东冷”模态主要受 PNA 环流调制(Ge and Luo, 2023),这表明冬季北美温度偶极子模态与 PNA^+ 环流密切相关.

不同形态的 PNA^+ 对北美温度影响存在差异,

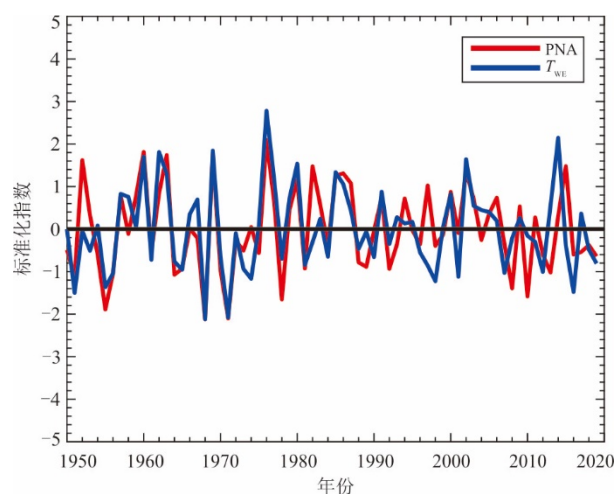


图 1 1950—2019 冬季 PNA 和 T_{WE} 指数标准化时间序列

Fig.1 Time series of the normalized PNA and T_{WE} index during 1950—2019 winters

其环流结构受到太平洋背景西风影响(Franzke *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2020). Ge and Luo (2023) 的研究指出,中部型 El Niño 可通过影响中纬度西风异常,改变 PNA^+ 结构造成强的北美温度偶极子异常. 值得注意的是,2013—2014 和 2014—2015 年冬季中纬度海温也存在明显的太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, 简称 PDO)和维多利亚模态(Victoria mode, 简称 VM)信号,但目前中纬度海温模态对北美温度偶极子的影响还不清晰. 此外,何种西风和海温条件有利于强的北美温度偶极子形成也尚不明确. 因此,有必要探究强北美次季节温度偶极子异常产生的西风和海温背景条件.

为揭示北太平洋西风急流对北美“西暖-东冷”极端温度偶极子的影响机制,本文首先探讨了太平洋中纬度西风急流的变化特征及其对 PNA^+ 环流和北美温度偶极子的影响. 进一步深入分析了与太平洋中纬度西风相关的海温模态,并在此基础上,分别研究了不同海温背景下北美次季节温度偶极子强度的变化.

1 资料和方法

1.1 数据

本文主要采用美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(简称NCEP-NCAR)提供的1950—2019年冬季 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率的大气再分析数据集(Kalnay *et al.*, 1996),包括500 hPa纬向风场(简称U500), 500 hPa位势高度(简称Z500)和表面温度(surface air temperature, 简称SAT). 海表面温度(sea surface temperature, 简称SST)数据来自英国气象局哈德莱中心海冰和海表面温度(Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature, 简称HadISST)数据集(Rayner *et al.*, 2003). PNA指数源于NOAA气候预测中心. 将当年12月到次年2月(December, January, and February, 简称DJF)定义为冬季. 变量异常值为原始数据去除季节循环和长期线性趋势的差值.

1.2 研究方法

1.2.1 PNA事件 定义日PNA指数大于1.25标准差且连续超过3天以上时,发生PNA⁺事件. 用滞后(Lag)天数表示PNA事件发展过程, PNA事件中PNA指数最大值时记为Lag 0天, 滞后(前)后 N 天表示为Lag(-) N 天. 此外,对于非单调的PNA事件,即两个事件Lag 0天之间少于10天时,这类PNA事件被剔除.

1.2.2 PDO和VM指数 定义1950—2019年冬季北太平洋($120^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$) SST异常EOF第一模态为PDO, 其时间系数(简称PC1)为PDO指数; EOF第二模态为VM, 其时间系数(简称PC2)为VM指数.

1.2.3 北美“西暖-东冷”温度偶极子 本文基于2013和2014年冬季北美地区的“西暖-东冷”温度偶极子型,选取北美西部($35^{\circ}\text{N} \sim 65^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{W} \sim 100^{\circ}\text{W}$)和东部($25^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{W} \sim 65^{\circ}\text{W}$)区域平均的SAT异常,两者差异定义为北美温度偶极子指数 $T_{\text{WE}} = T_{\text{W}} - T_{\text{E}}$, 这里 T_{W} 为北美西部区域平均的SAT异常, T_{E} 为东部区域平均的SAT异常(Ge and Luo, 2023). 当 $T_{\text{W}} > 0$, $T_{\text{E}} < 0$ 且 $T_{\text{WE}} > 1.0$ 标准差时,认为该天发生了北美“西暖-东冷”温度偶极子事件.

2 太平洋中纬度西风急流对北美温度偶极子的影响

2.1 太平洋中纬度西风急流变化

首先对北太平洋中纬度西风急流的变化特征进行研究. 对1950—2019年冬季北太平洋($120^{\circ}\text{E} \sim$

120°W , $10^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$) 500 hPa纬向风异常进行EOF分析,北太平洋中纬度西风场主要存在两种变化模态,累计解释方差为48.8%(图2). EOF第一模态存在两个西风异常中心, $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 西风增强, $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 西风减弱. 北太平洋中纬度急流轴位于两个西风异常值之间,该模态主要表现为太平洋中纬度地区西风急流的经向位置变化. 定义当PC1超过(低于)0.5标准差,为偏南(偏北)的西风急流冬季. 对于EOF第二模态,在 $25^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 存在显著的负西风异常,异常中心与气候态北太平洋中纬度急流轴位置接近,该模态主要表现为太平洋中纬度地区西风急流的强度变化. 定义当PC2超过(低于)0.5标准差,为偏弱(偏强)的西风急流冬季. 下面对不同西风背景下的PNA⁺环流及北美温度特征进行分析,以探讨北太平洋急流与北美温度偶极子的关系.

2.2 太平洋中纬度西风急流经向位置对北美温度偶极子的影响

基于2.1对太平洋中纬度U500异常的EOF分析,挑选偏南和偏北的中纬度西风急流冬季,对U500异常进行合成分析(图3a~3b). 对于中纬度西风急流偏南(偏北)的冬季,北太平洋 $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 区域存在正(负)西风异常, $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 区域存在负(正)西风异常. 图3c~3d为偏南(偏北)的北太平洋中纬度西风急流冬季下, PNA⁺事件时期(Lag-10~Lag 10天)的Z500和SAT异常合成场. 研究表明,当北太平洋中纬度西风急流偏南时, PNA⁺在北美区域的高度异常表现为“西北-东南”的经向结构,西北部高压异常输送中纬度暖空气至北美西岸,同时伴随异常强的向下长波辐射和感热通量,北美西北部异常增暖;另一方面,高低压环流引导高纬度冷空气到达北美东部,叠加辐射冷却作用,造成东南部异常变冷,形成“西北暖-东南冷”的温度异常模态. 从中高纬度($40^{\circ}\text{N} \sim 65^{\circ}\text{N}$)平均的Z500异常场可以看到, PNA⁺在北美上空($120^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$)正的位势高度异常保持准静止状态(120°W 附近),几乎不移动,北美西北部持续受高压异常控制. PNA⁺生命前期发展缓慢,到Lag 0天达到最大值,最后迅速消退,造成北美西部持续增暖(图3e). 另一方面,在西风急流偏北的冬季,环流场上北美西北部存在反气旋异常,但强度相对较弱,高压中心位置偏西(130°W 附近),引起加拿大西部小范围增暖,东部负位势高度异常较弱,无明显冷异常出现(图3d). 此时北美上空的正位势高度异常

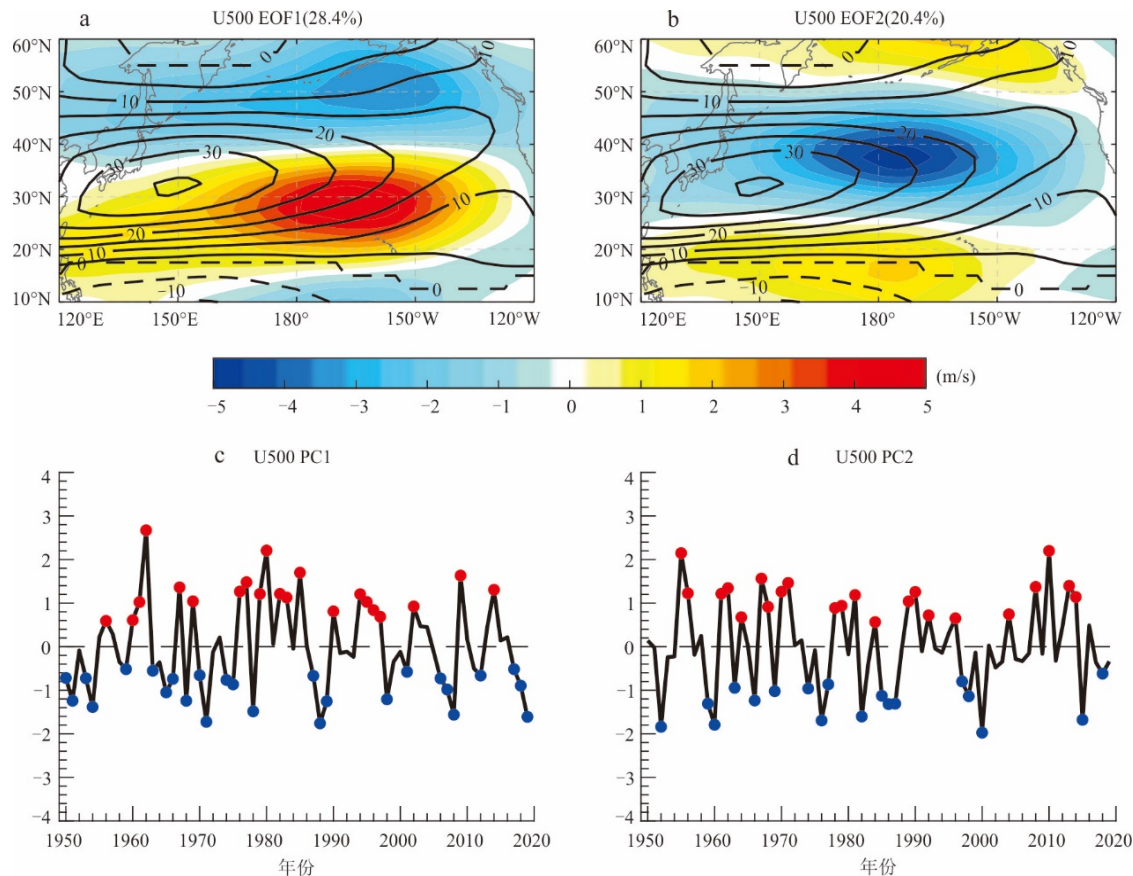


图2 1950—2019 冬季(120°E~120°W, 10°N~60°N)北太平洋 U500 距平场前两个 EOF 模态空间分布和标准化的主成分序列
Fig.2 Leading and second EOF (EOF1 and EOF2) modes (a, b) of the DJF-mean U500 anomaly over the North Pacific (120°E–120°W, 10°N–60°N) and their corresponding (c) PC1 and (d) PC2 time series during 1950–2019 winters
等值线代表 U500 气候态; 红色(蓝色)点代表大于(小于)0.5 标准差

由 150°W 向东移动至 120°W 左右(图 3f),这使得在 PNA⁺事件时期北美地区主要受高压控制,不利于东部低压的发展,冷异常较弱,无“西暖-东冷”偶极子模态.

2.3 太平洋中纬度西风急流强度对北美温度偶极子的影响

此节继续对中纬度西风急流强度与北美温度模态进行讨论.对于北太平洋中纬度西风急流偏弱的冬季(图 4a),PNA⁺在北美地区的高低压异常呈现东西向波列结构,北美出现强“西暖-东冷”温度偶极子模态(图 4c).中高纬度(40°N~65°N)平均的位势高度异常场表明,在弱中纬度北太平洋西风急流冬季,PNA⁺在北美西部的高压异常偏强(图 4e),太平洋水汽含量增加,造成异常强的向下长波辐射,有利于北美西部显著增温.同时,北美西高东低的异常环流结构,造成偏北风引导高纬地区冷空气到北美东部,配合辐射冷却作用,使北美东部异常偏冷,从而出现“西暖-东冷”温度偶极子模态.另一方面,当北太平洋中纬度西风急流偏强时,PNA⁺在

北美地区的高低压异常呈南北向波列结构,高压异常偏东,且随 PNA⁺发展东移,这造成北美北部持续受高压影响,辐射增温作用明显,北美 SAT 异常场上表现出“北暖南冷”温度模态.

上述研究已表明,PNA⁺在不同北太平洋中纬度西风急流背景下的结构存在差异,引起北美气温不同变化.为量化描述 PNA⁺事件在不同西风背景下对北美“西暖-东冷”温度偶极子的影响,图 5 分别计算了 4 种中纬度西风急流冬季(偏南、偏北、偏弱和偏强) T_{WE} 、 T_W 和 T_E 在 PNA⁺期间的变化曲线.研究表明,在 PNA⁺事件发展阶段(Lag-10~Lag-3 天),偏南西风急流背景下的温度偶极子 T_{WE} 指数最大,北美东西部温度差异最明显.这主要因为当西风急流偏南时,北美西部的高压异常较早出现,导致北美西部温度异常偏暖,相较于其他西风背景, T_W 较大(图 5b);此外北美东部温度 T_E 为负值,但冷异常相较急流偏弱时较小.随着 PNA⁺系统的发展,北美温度偶极子指数 T_{WE} 逐渐增大,到 PNA⁺事件成熟

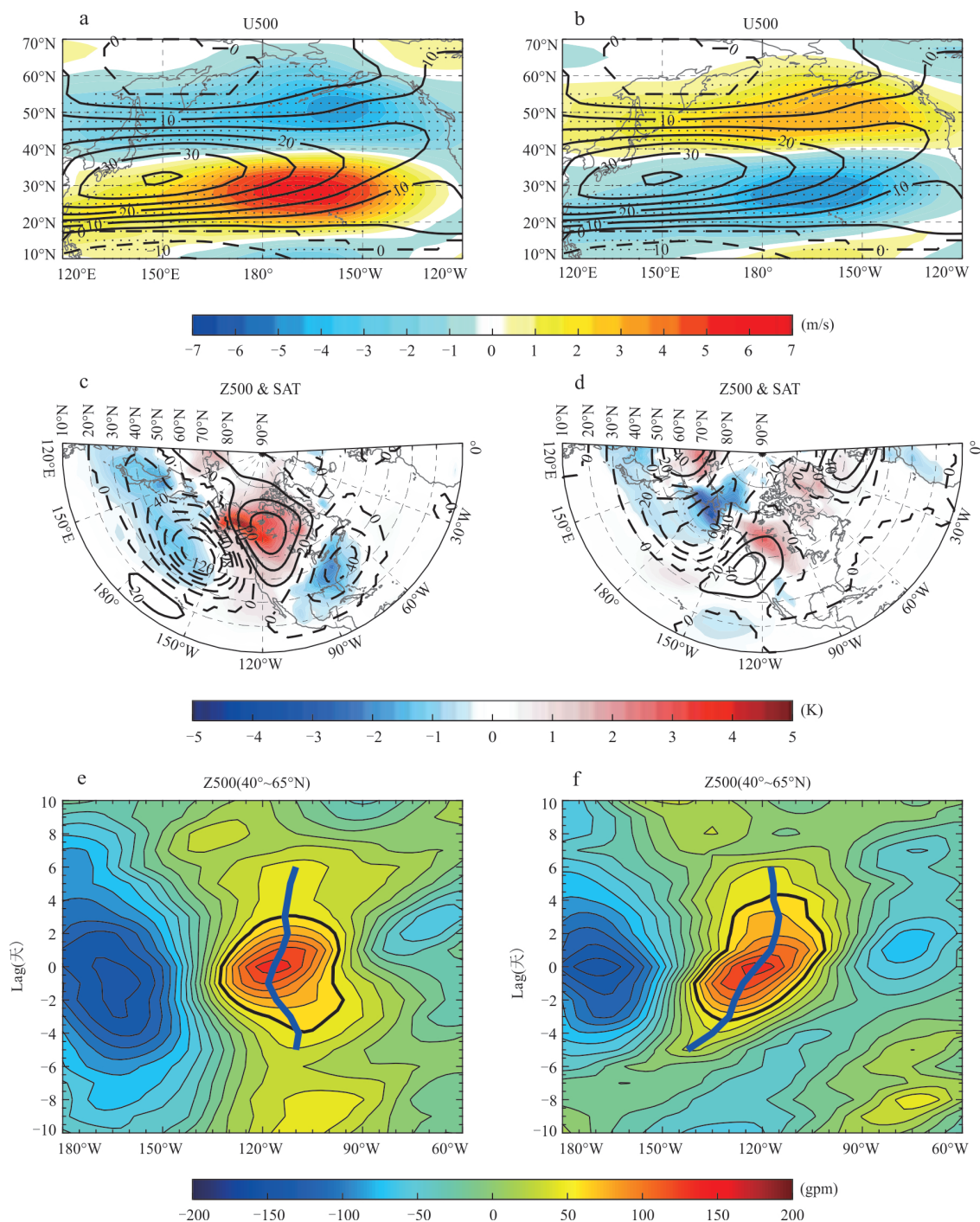


图3 1950–2019年太平洋中纬度西风急流偏南(a,c)和偏北(b,d)冬季合成的U500异常场及PNA⁺期间时间平均的(Lag-10~Lag 10天)SAT(填色,单位:K)和Z500(等值线,单位:gpm)异常场.PNA⁺的Lag-10~Lag 10天40°N~65°N经向平均的Z500异常变化场(e,f)

Fig.3 Composite DJF-mean U500 anomalies and time-mean composite daily Z500 (contours, unit: gpm) and SAT (colored shading, unit: K) anomalies averaged from Lag-10 to Lag 10 of PNA⁺ events for southward-shifted (a, c) and northward-shifted (b, d) North Pacific jet winters during 1950–2019. Time-longitude evolution (e, f) of the meridional mean (40°N–65°N) Z500 anomalies from Lag-10 to Lag 10 of PNA⁺

图e和f中蓝线代表最大值;打点区域表示合成结果通过0.05显著性水平的双边Student's *t*检验

阶段(Lag 1~Lag 2天)达到最强,而后随着PNA⁺的衰退而减小(图5a).对比分析表明,在PNA⁺成熟

和衰退期,偏弱的西风急流冬季下,北美温度偶极子指数 T_{WE} 最强,不同西风条件下 T_{WE} 的差异主要取

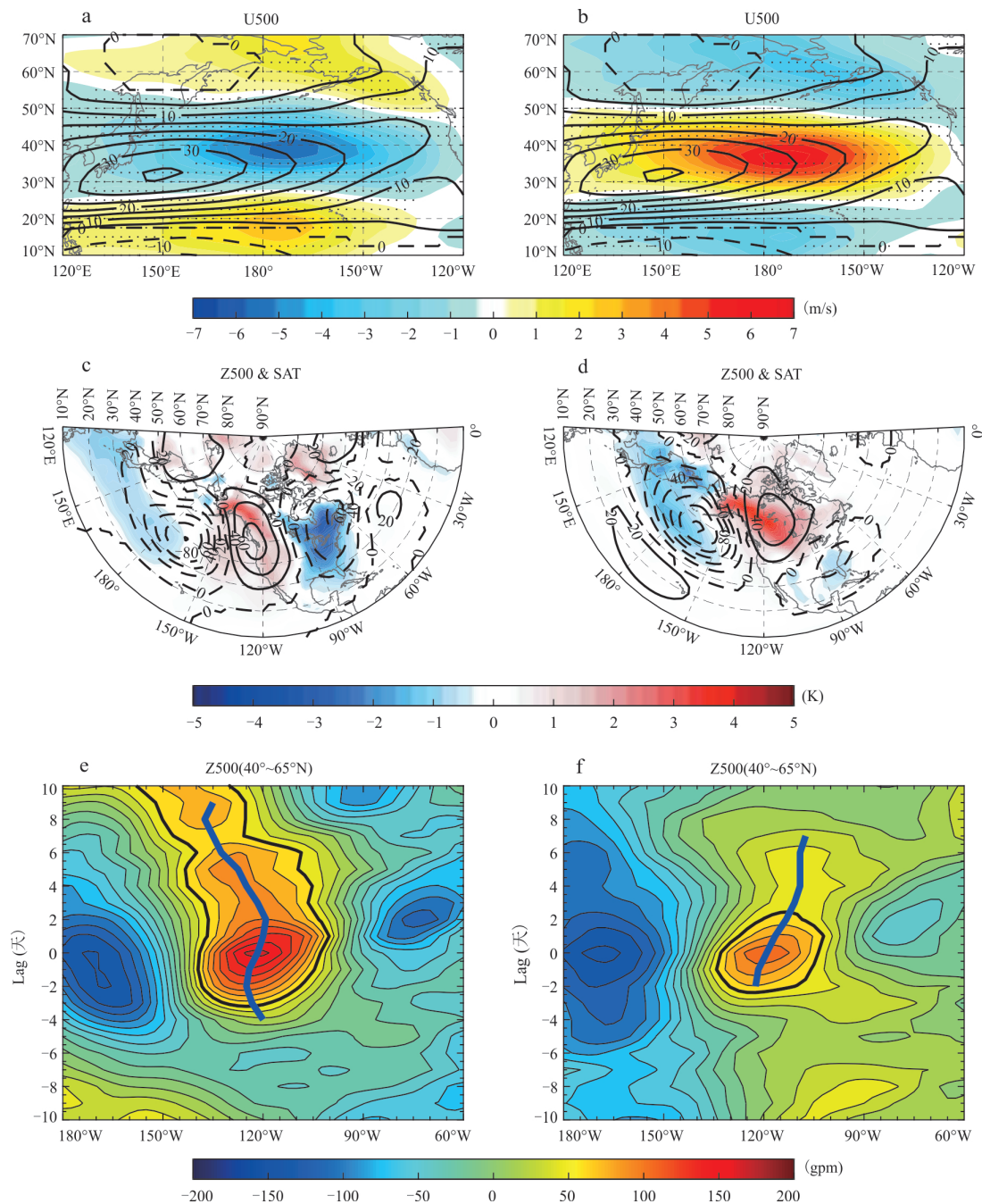


图4 同图3,但为太平洋中纬度西风急流偏弱(a、c、e)和偏强(b、d、f)的冬季

Fig.4 Same as Fig. 3, but for the weak (a, c, e) and strong (b, d, f) mid-latitude North Pacific jet winters

决于北美东部温度 T_E . 在偏弱的西风急流冬季, PNA^+ 持续造成北美东部冷异常. 但对于偏强、偏南和偏北的西风急流冬季下发生的 PNA^+ 事件, 北美上空高压东移衰退, 北美大陆主要受高压影响, 使得东部冷异常消失转为暖异常, T_E 由负转正, 造成 T_{WE} 指数较小.

综上所述, 北太平洋中纬度地区的西风急流变化可以影响 PNA^+ 事件的环流结构、强度和移动等特征, 进而对北美造成不同温度模式. 相较于西风急流经向位置变化, 急流强度对北美温度偶极子的

作用更加重要, 在偏弱的中纬度西风急流下, PNA^+ 可造成强的“西暖-东冷”温度偶极子异常.

3 影响太平洋中纬度西风变化的海温背景

研究表明, 北太平洋海温是影响中纬度西风急流变化的重要因素, 需对影响西风急流经向位置和强度变化的海温模态进行分析. 结果表明, 西风急流

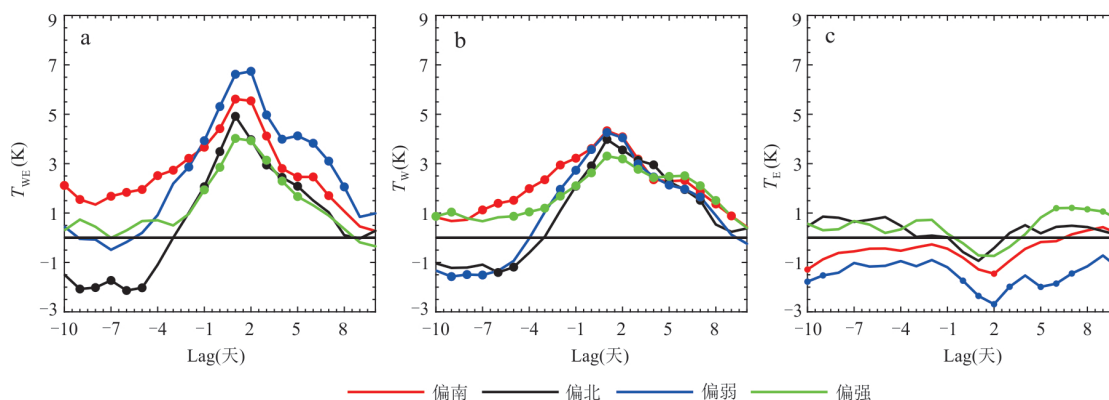


图5 偏南、偏北、偏弱和偏强的北太平洋中纬度西风急流在1950—2019年冬季发生的PNA⁺事件期间 T_{WE} (a)、 T_W (b)和 T_E (c)指数(单位:K)随时间变化

Fig.5 Temporal evolution of the composite daily T_{WE} (a), T_W (b), and T_E (c) index (unit: K) of PNA⁺ events for the southward-shifted, northward-shifted, weak and strong mid-latitude North Pacific jet winters during 1950—2019

圆点表示指数通过0.05显著性水平的双边Student's t 检验

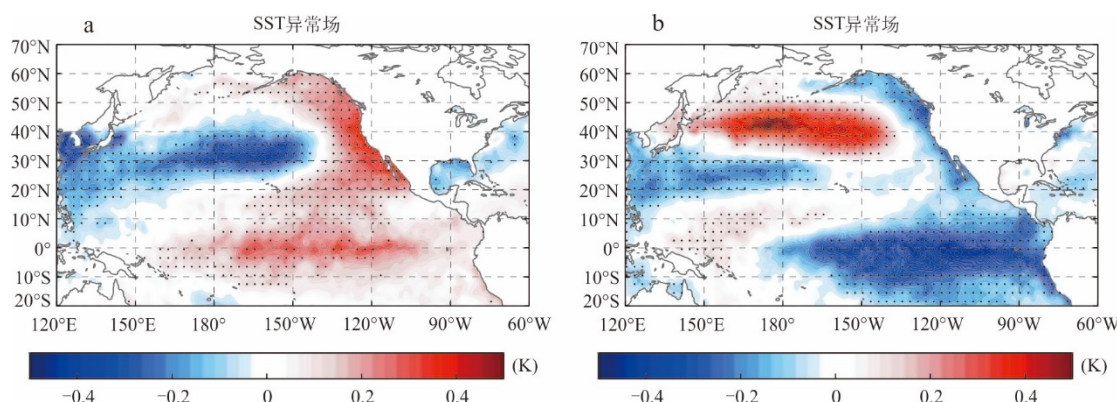


图6 1950—2019年冬季北太平洋地区U500异常前两个EOF时间系数回归得到的SST异常场(单位:K)

Fig.6 Regressed DJF-mean SST anomalies (unit: K) against the DJF-mean U500 PC1 and PC2 time series during 1950—2019

经向位置变化对应在北太平洋20°N~45°N附近出现SST冷异常中心,赤道太平洋到北美沿岸有SST暖异常(图6a),与PDO海温模态类似,PC1与PDO指数相关系数为0.45(表1).另一方面,对于中纬度西风急流强度变化,强的暖海温异常中心位于北太平洋30°N~50°N,同时在20°N~30°N有弱的冷海温异常,这种北太平洋南北型海温结构类似于VM模态(Ding *et al.*, 2015),PC2与VM系数有显著正相关($r=0.68$).

为进一步探究PDO和VM模态对北太平洋西风急流的作用,且消除PDO海温模态下年际信号的影响,笔者计算了1950—2019年冬季PDO(已进行9年低通滤波)和VM标准化指数(图7).将9年滤波的PDO指数和VM标准化指数大于等于0.5,定义为PDO⁺和VM⁺的冬季,合成SST和U500异常场.可以看到,在PDO⁺冬季下,中纬度北太平洋出现冷

表1 1950—2019年冬季北太平洋地区U500异常前两个EOF时间系数(PC1,PC2)与PDO、9年低通滤波PDO、VM之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient (Corr.) of the DJF-mean U500 PC1 and PC2 time series and oceanic variabilities (PDO, 9-yr low-pass PDO, VM) during 1950—2019

Corr.	PDO	PDO (9年低通滤波)	VM
U500 PC1	0.45**	0.34**	0.35**
U500 PC2	-0.44**	-0.13	0.68**

注:**代表相关系数通过0.05显著性水平的双边Student's t 检验.

海温异常,同时阿拉斯加湾至北美沿岸有强的暖海温异常信号(图7c).U500异常场上,20°N~40°N西风增强,40°N~60°N西风减弱,与北太平洋中纬度西风急流南移相一致(图3a).在VM⁺冬季,高纬度北太平洋有强的暖海温异常,同时北太平洋20°N~30°N存在冷异常海温信号,形成偶极子海温异常模

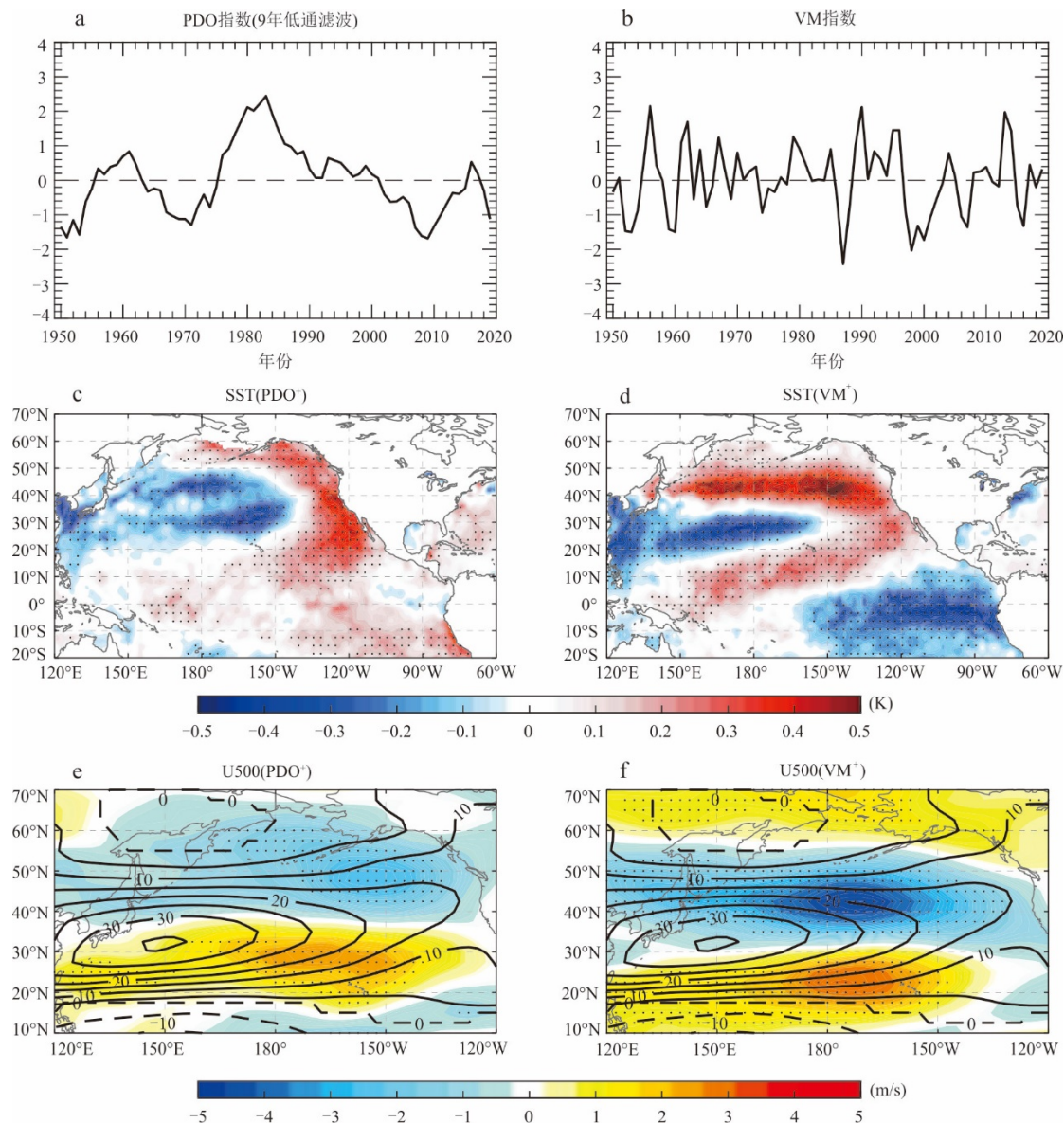


图 7 1950—2019 冬季 PDO(9 年低通滤波)(a) 和 VM 的标准化时间序列(b); PDO⁺ 和 VM⁺ 冬季合成的 SST(单位:K)(c,d) 和 U500(单位:m/s)异常场(e,f)

Fig.7 Time series of the normalized DJF-mean PDO (9-yr low pass filter) (a) and VM indices (b) during 1950—2019; DJF-mean SST anomalies (unit: K) (c, d) and U500 (unit: m/s) anomalies (e, f) for the PDO⁺ and VM⁺ winters

态(图7d),中纬度西风在北太平洋30°N~55°N显著减弱.

上述结果表明,PDO 和 VM 会影响太平洋中纬度地区的西风急流经向位置和强度,但其对北美温度的作用还需要进一步探究.

4 PDO 与 VM 对 PNA 影响北美温度偶极子的调制作用

对 PDO⁺ 和 VM⁺ 海温背景下 PNA⁺ 事件期间北美温度的变化进行分析.在 PDO⁺ 冬季,PNA⁺ 事件前期(Lag-8~Lag-4 天)北美东北部五大湖附近有

异常高压,但强度较弱,北美温度异常较小.随着 PNA⁺ 的发展,太平洋地区能量向下游频散,北美西部高压和东部异常发展,到 Lag-2~Lag 2 天达到最强,造成北美地区“西北暖-东南冷”的温度异常(图 8a),暖异常相较于冷异常偏强.PNA⁺ 衰退阶段,北美西部高压异常向东移动,低压快速减弱消失,北美大部区域变暖.相比之下,在 VM⁺ 冬季,PNA⁺ 事件前期北美主要为负的位势高度异常,东部有冷异常出现.Lag-4 天北美西部上空高压逐渐发展,同时东部低压逐渐增强,北太平洋到北美呈现“低压-高压-低压”的水平波列结构,北美“西暖-东冷”温度

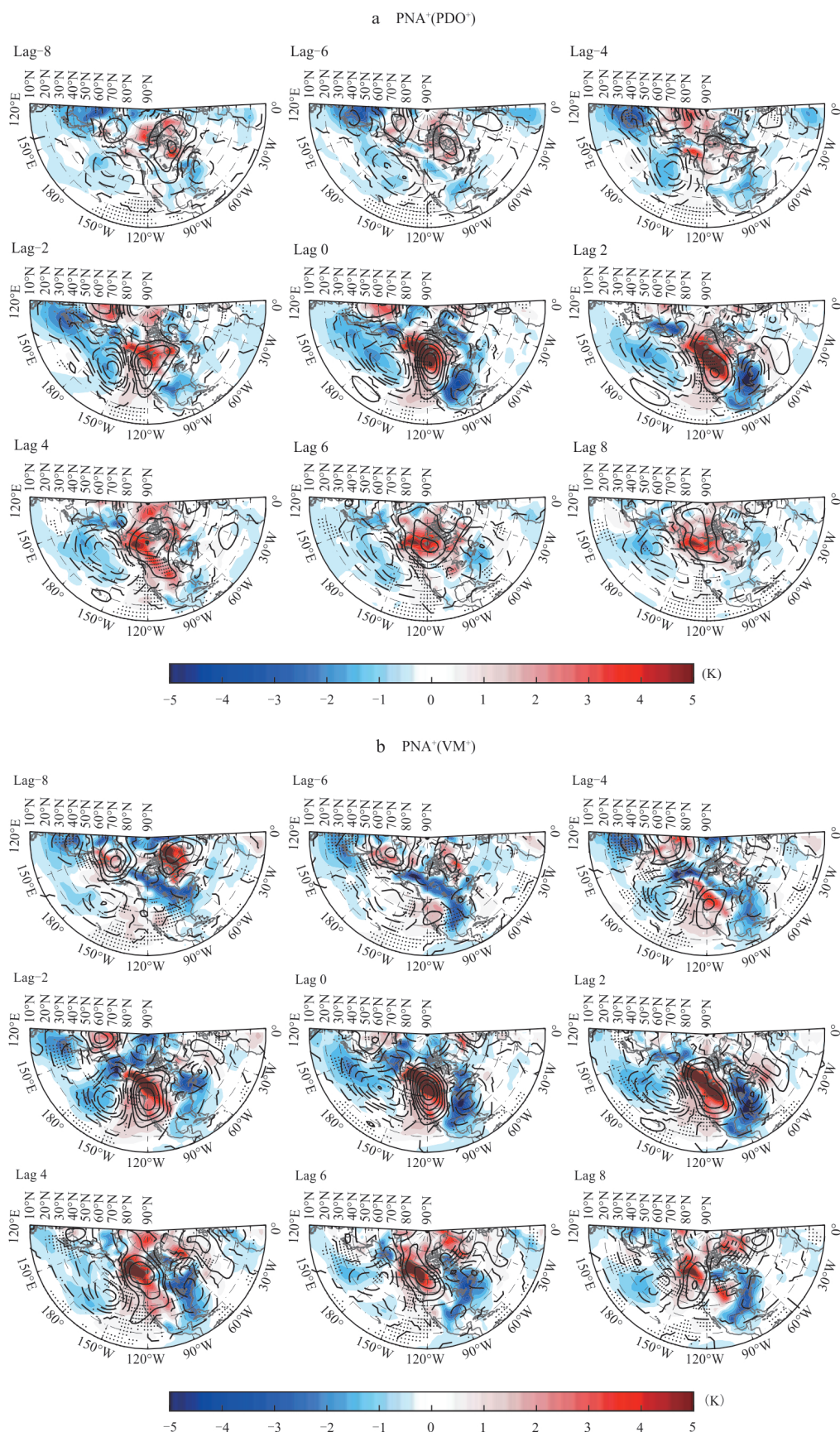


图8 PDO^+ (a)和 VM^+ (b)冬季发生的 PNA^+ 事件期间逐日Z500(等值线)和SAT(填色,单位:K)异常的演变场

Fig.8 The variation of daily Z500 (contours) and SAT (color shading, unit: K) anomalies from Lag-8 to Lag 8 days of the PNA^+ events and for the PDO^+ (a) and VM^+ (b) winters

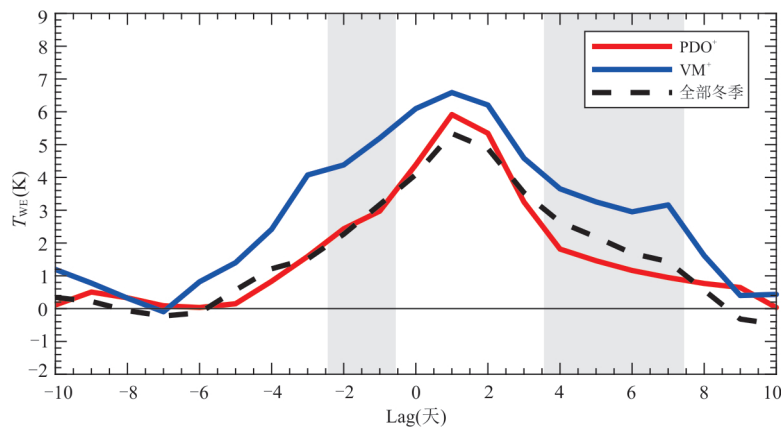


图9 PDO⁺冬季(红线)、VM⁺冬季(蓝线)和全部冬季(虚线)的PNA⁺事件期间 T_{WE} 指数(单位:K)变化曲线

Fig.9 Temporal evolution of the compo site daily T_{WE} index (unit: K) of PNA⁺ events for the PDO⁺ (red line) and VM⁺ (blue line) patterns

灰色区域代表红线和蓝线之间的差通过0.05显著性水平的MC检验

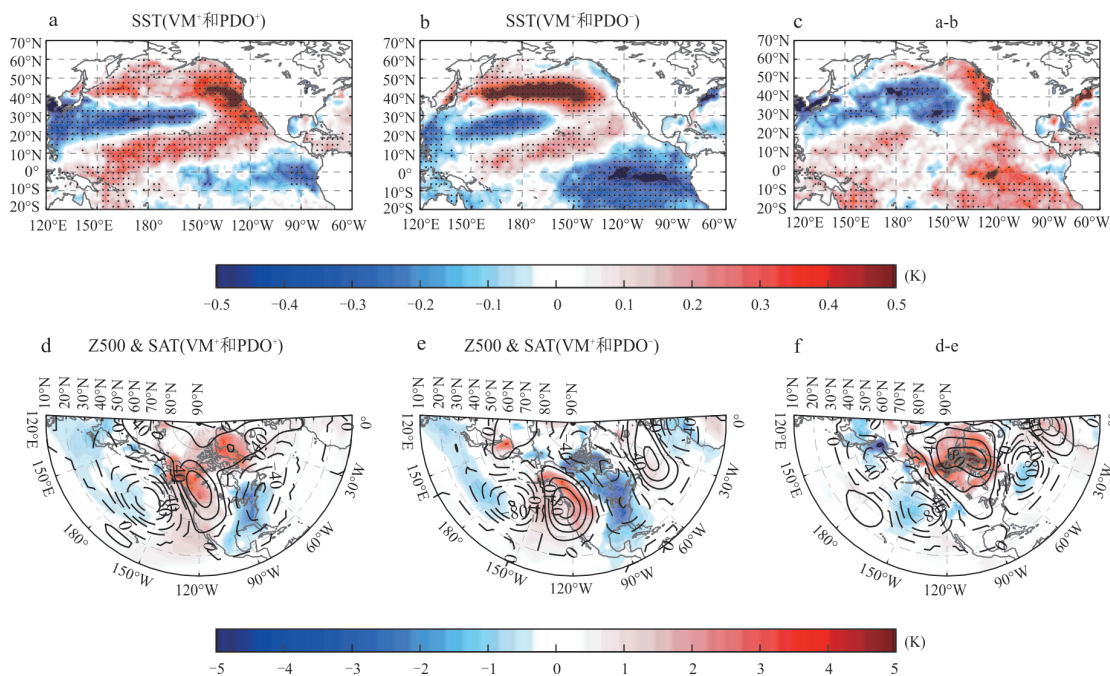


图10 PDO⁺和VM⁺,PDO⁻和VM⁺冬季下,DJF平均的SST异常场(单位:K)(a~c)及PNA⁺事件期间(Lag-10~Lag 10)时间平均的Z500(等值线,单位:gpm)和SAT(填色,单位:℃)异常场(d~f)

Fig.10 (a~c) Composite DJF- mean SST anomalies (unit: K) and (d~f) time-mean fields of composite daily Z500 (contours, unit: gpm) and SAT (color shading, unit: K) anomalies averaged from Lag-10 to Lag 10 days of PNA⁺ events for PDO⁺ and VM⁺ combination, PDO⁻ and VM⁺ combination and their difference

偶极子在第Lag 2天达到最强.较PDO⁺冬季不同的是,在VM⁺冬季,北美中纬度西风急流偏弱,有利于PNA⁺在北美上空的高压西移,东部低压长时间维持,使得北美东部冷异常持续存在,北美西部和东部的温度差始终为正(图8b).

为更好比较PDO⁺和VM⁺背景下北美地区“西暖-东冷”温度偶极子强度,笔者计算了PNA⁺期间

T_{WE} 变化.可以看到,随着PNA⁺事件发展,偶极子指数 T_{WE} 逐渐增大,Lag 1天出现最大值,随后PNA⁺在北美上空的高低压崩溃,温度异常减小,偶极子指数随之下降.相较于PDO⁺,PNA⁺在VM⁺冬季的 T_{WE} 更大,在PNA⁺的发展和衰退阶段两者差异超过95%显著性检验.此外,对比PDO⁺、VM⁺和所有冬季下PNA⁺期间北美温度偶极子指数 T_{WE} ,可以发现

与全部冬季相比, PDO^+ 海温背景下北美温度偶极子强度几乎无变化, 但 VM^+ 海温模态能够增强与 PNA^+ 相关的北美温度偶极子强度, 这与 VM^+ 海温下 PNA^+ 造成强的北美东部冷异常相关。

上述研究表明, 在 VM^+ 海温冬季下的北太平洋中纬度西风偏弱, PNA^+ 在北美上空的环流纬向特征明显, 加剧了北美温度偶极子强度。而 PDO^+ 海温冬季下, PNA^+ 在北美上空的环流偏“西北-东南”向, 温度异常中心出现在北美西北部, 冷异常相对较弱, 温度偶极子较小。此外, 有研究表明 PDO 可以调节年际尺度信号, 需进一步对 PDO 和 VM 协同影响 PNA^+ 及北美温度偶极子的过程进行探究。

将9年滤波的 PDO 指数大于0(小于0)且 VM 标准化指数大于等于0.5, 定义为 PDO^+ (PDO^-) 和 VM^+ 组合的冬季。不同位相 PDO 与 VM^+ 组合, 会影响北太平洋 SST 异常的位置和强度, 从而对上空的环境型产生影响。在 VM^+ 和 PDO^+ 海温冬季, 海温暖异常中心出现在北美西部沿岸, PNA^+ 在北美西部的高压偏向高纬度地区, 冷异常在北美东南中低纬度区域。与之对比, PDO^- 放大了 VM^+ 下北太平洋北部的暖海温异常, 北美西部上空高压中心纬度较低, 东部的 SAT 冷异常延伸至高纬地区, 北美地区出现“西暖-东冷”温度偶极子异常(图10e)。异常场结果(图10f)表明, PDO^+ 较 PDO^- 更容易在北大西洋上空强迫出“高压-低压”环流结构; 因此, 北美北部在 PDO^+ 冬季常出现高压异常, 使得北美冷异常难以向北延伸, 只能分布在东南部。

5 总结与讨论

基于 HadISST 海温和 NCEP 大气再分析数据, 本文探讨了北太平洋中纬度西风急流对北美“西暖-东冷”温度偶极子的影响, 并分析了影响西风急流变化的海温背景模态, 主要得出以下结论:

(1) 揭示了不同北太平洋中纬度西风急流变化下 PNA^+ 结构及北美温度变化特征。基于 EOF 对冬季北太平洋 500 hPa 西风场的强度和位置进行分类。研究表明, 当中纬度北太平洋西风急流偏弱时, 在北太平洋到北美上空 PNA^+ 环流呈现水平波列结构, 导致北美地区形成显著的“西暖-东冷”温度偶极子模态。此外西风急流偏南的冬季, PNA^+ 也可引起北美温度偶极子型, 但东部冷异常偏低纬度, 且强度较弱。而对于偏强和偏北的西风急流, PNA^+ 环流的高压中心东移并逐渐

减弱, 造成北美上空主要受高压异常影响, 冷异常较小, 未形成“西暖-东冷”偶极子异常。

(2) 建立了北太平洋海温模态与西风急流和北美温度偶极子的关系。回归和相关性分析表明, PDO^+ 影响西风急流的经向位置, 而强度变化则主要与 VM^+ 海温模态相关。此外, 研究进一步表明, 在 PDO^+ 海温冬季下, PNA^+ 成熟期可对北美造成“西北暖-东南冷”温度异常, 但与所有冬季发生的 PNA^+ 事件相比, 北美温度偶极子强度几乎不变。相比之下, VM^+ 能够加强 PNA^+ 事件期间北美温度偶极子异常。这主要是因为, 在 VM^+ 冬季西风急流偏弱, 有利于北美西部的高压向西移动, 从而使得北美东部冷异常稳定维持, 造成北美强“西暖-东冷”温度偶极子。

(3) 分析了 PDO 和 VM 对北美温度偶极子的协同作用。研究表明, PDO^+ 与 VM^+ 组合或 PDO^- 与 VM^+ 组合下, PNA^+ 都会导致北美地区温度偶极子异常。对比之下, PDO^+ 与 VM^+ 组合时, 冷异常主要集中在北美东南部; 而在 PDO^- 与 VM^+ 组合下, PNA^+ 会导致北美东部高纬度地区的冷异常, 这可能与 PDO^+ 背景下大西洋上空容易出现类似北大西洋涛动环流有关。

本文主要聚焦于北太平洋西风急流和北太平洋海温模态对北美极端温度的影响, 但值得注意的是, 北美大陆地处太平洋和大西洋之间, 受两个大洋环流的共同影响(刘辉和宫勋, 2024), 大西洋和上层环流对北美极端温度的调制也值得进一步探究。另一方面, 已有研究表明北极海冰的快速融化改变了中纬度大气环流, 增加了极端天气的发生频率(Mori *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2017; 武炳义, 2018)。因此, 北美温度偶极子的频繁发生是否与海冰加速融化相关, 也需要在未来的研究中深入探讨。

References

- Baxter, S., Nigam, S., 2015. Key Role of the North Pacific Oscillation-West Pacific Pattern in Generating the Extreme 2013/14 North American Winter. *Journal of Climate*, 28(20): 8109–8117. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00726.1>
- Ding, R., Li, J., Tseng, Y. H., et al., 2015. The Victoria Mode in the North Pacific Linking Extratropical Sea Level Pressure Variations to ENSO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(1): 27–45. <https://doi.org/10.1002/2014JD022221>

- Franzke, C., Feldstein, S. B., 2005. The Continuum and Dynamics of Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(9): 3250—3267. <https://doi.org/10.1175/jas3536.1>
- Franzke, C., Feldstein, S. B., Lee, S., 2011. Synoptic Analysis of the Pacific-North American Teleconnection Pattern. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(655): 329—346. <https://doi.org/10.1002/qj.768>
- Ge, Y., Luo, D. H., 2023. Impacts of the Different Types of El Niño and PDO on the Winter Sub-Seasonal North American Zonal Temperature Dipole via the Variability of Positive PNA Events. *Climate Dynamics*, 60(5): 1397—1413. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06393-z>
- Harnik, N., Messori, G., Caballero, R., et al., 2016. The Circumglobal North American Wave Pattern and Its Relation to Cold Events in Eastern North America. *Geophysical Research Letters*, 43(20): 11015—11023. <https://doi.org/10.1002/2016GL070760>
- Hartmann, D. L., 2015. Pacific Sea Surface Temperature and the Winter of 2014. *Geophysical Research Letters*, 42(6): 1894—1902. <https://doi.org/10.1002/2015GL063083>
- Higgins, R. W., Leetmaa, A., Kousky, V. E., 2002. Relationships between Climate Variability and Winter Temperature Extremes in the United States. *Journal of Climate*, 15(13): 1555—1572. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)0151555:rbcvaw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)0151555:rbcvaw>2.0.co;2)
- Huang, R. H., 1986. Physical Mechanisms of the impact of Winter Low-Latitude Heat Source Anomalies on Northern Hemisphere Atmospheric Circulation. *Science in China Series B-Chemistry Life Sciences & Earth Sciences*, 16(1): 91—103 (in Chinese).
- Jin, J. M., Miller, N. L., Sorooshian, S., et al., 2006. Relationship between Atmospheric Circulation and Snowpack in the Western USA. *Hydrological Processes*, 20(4): 753—767. <https://doi.org/10.1002/hyp.6126>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437—472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Lee, M. Y., Hong, C. C., Hsu, H. H., 2015. Compounding Effects of Warm Sea Surface Temperature and Reduced Sea Ice on the Extreme Circulation over the Extratropical North Pacific and North America during the 2013—2014 Boreal Winter. *Geophysical Research Letters*, 42(5): 1612—1618. <https://doi.org/10.1002/2014GL062956>
- Li, C. Y., Zhang, Q., 1991. Global Atmospheric Low-Frequency Teleconnection. 1(4): 330—334 (in Chinese).
- Lin, H., 2015. Subseasonal Variability of North American Wintertime Surface Air Temperature. *Climate Dynamics*, 45(5): 1137—1155. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2363-6>
- Liu, H., Gong, X., 2024. Revisiting North Pacific Intermediate Water in the Modern Ocean. *Earth Science*, 49(8): 2914—2924 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. F., Jian, Z. M., Yoshimura, K., et al., 2015. Recent Contrasting Winter Temperature Changes over North America Linked to Enhanced Positive Pacific-North American Pattern. *Geophysical Research Letters*, 42(18): 7750—7757. <https://doi.org/10.1002/2015GL065656>
- Luo, D. H., Ge, Y., Zhang, W. Q., et al., 2020. A Unified Nonlinear Multiscale Interaction Model of Pacific-North American Teleconnection Patterns. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(4): 1387—1414. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0312.1>
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Branstator, G., 2012. Mechanisms Contributing to the Warming Hole and the Consequent U. S. East-West Differential of Heat Extremes. *Journal of Climate*, 25(18): 6394—6408. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00655.1>
- Mori, M., Watanabe, M., Shioyama, H., et al., 2014. Robust Arctic Sea-Ice Influence on the Frequent Eurasian Cold Winters in Past Decades. *Nature Geoscience*, 7(12): 869—873. <https://doi.org/10.1038/ngeo2277>
- Peng, P. T., Kumar, A., Chen, M. Y., et al., 2019. Was the North American Extreme Climate in Winter 2013/14 a SST Forced Response? *Climate Dynamics*, 52(5): 3099—3110. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4314-0>
- 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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14): 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Singh, D., Swain, D. L., Mankin, J. S., et al., 2016. Recent Amplification of the North American Winter Temperature Dipole. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(17): 9911—9928. <https://doi.org/10.1002/2016JD025116>
- Swain, D. L., Tsiang, M., Haugen, M., et al., 2014. The

- Extraordinary California Drought of 2013/2014: Character, Context, and the Role of Climate Change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9): S3–S7.
- Vigaud, N., Robertson, A. W., Tippett, M. K., 2018. Predictability of Recurrent Weather Regimes over North America during Winter from Submonthly Reforecasts. *Monthly Weather Review*, 146(8): 2559–2577. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-18-0058.1>
- Wallace, J. M., Gutzler, D. S., 1981. Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, 109(4): 784–812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- Wang, S. S., Huang, W. R., Yoon, J. H., 2015. The North American Winter ‘Dipole’ and Extremes Activity: A CMIP5 Assessment. *Atmospheric Science Letters*, 16(3): 338–345. <https://doi.org/10.1002/asl2.565>
- Wang, S. Y., Hips, L., Gillies, R. R., et al., 2014. Probable Causes of the Abnormal Ridge Accompanying the 2013–2014 California drought: ENSO Precursor and Anthropogenic Warming Footprint. *Geophysical Research Letters*, 41(9): 3220–3226. <https://doi.org/10.1002/2014GL059748>
- Wu, B. Y., 2018. Progresses in the Impact Study of Arctic Sea Ice Loss on Wintertime Weather and Climate Variability over East Asia and Key Academic Disputes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(4): 786–805 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. B., Zhang, M. H., 2017. Role of Internal Atmospheric Variability in the 2015 Extreme Winter Climate over the North American Continent. *Geophysical Research Letters*, 44(5): 2464–2471. <https://doi.org/10.1002/2017GL072772>
- Yao, Y., Luo, D. H., Dai, A. G., et al., 2017. Increased Quasi Stationarity and Persistence of Winter Ural Blocking and Eurasian Extreme Cold Events in Response to Arctic Warming. Part I: Insights from Observational Analyses. *Journal of Climate*, 30(10): 3549–3568. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0261.1>
- Yu, B., Zhang, X. B., 2015. A Physical Analysis of the Severe 2013/2014 Cold Winter in North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(19): 10149–10165. <https://doi.org/10.1002/2015JD023116>
- Yu, B., Zwiers, F. W., 2007. The Impact of Combined ENSO and PDO on the PNA Climate: A 1, 000-Year Climate Modeling Study. *Climate Dynamics*, 29(7): 837–851. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0267-4>

中文参考文献

- 黄荣辉, 1986. 冬季低纬度热源异常对北半球大气环流影响的物理机制. *中国科学(B辑, 化学、生物学、农学、医学)*, 16(1): 91–103.
- 李崇银, 张勤, 1991. 全球大气低频遥相关. *自然科学进展*, 1(4): 330–334.
- 刘辉, 宫勋, 2024. 现代北太平洋中层水研究进展综述. *地球科学*, 49(8): 2914–2924.
- 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. *大气科学*, 42(4): 786–805.