doi:10.11676/qxxb2023.20220186 气象学报

ENSO对中国东部前后冬天气尺度气温变率的不同影响及其可能机制*

吴 迪[1,2] 张文君[1] 耿 新[1] 薛奥运[1] 胡苏琼[1]
WU Di[1,2] ZHANG Wenjun[1] GENG Xin[1] XUE Aoyun[1] HU Suqiong[1]

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京，210044
2. 许昌市气象局，许昌，461000
1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*，*Nanjing University of Information Science and Technology*，*Nanjing* 210044，*China*
2. *Xuchang Meteorological Service*，*Xuchang* 461000，*China*
2022-11-01 收稿，2023-05-22 改回.

吴迪，张文君，耿新，薛奥运，胡苏琼. 2023. ENSO对中国东部前后冬天气尺度气温变率的不同影响及其可能机制. 气象学报，81(5)：717-726
Wu Di, Zhang Wenjun, Geng Xin, Xue Aoyun, Hu Suqiong. 2023. Different ENSO impacts on early and late winter synoptic-scale air temperature variability over eastern China and possible mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica*, 81(5):717-726

Abstract Based on daily mean air temperature data from the first-generation global atmosphere reanalysis product (CRA) of China, the reconstructed monthly sea surface temperature data from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), and the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) atmospheric circulation reanalysis data, the present study investigates influences of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on the early and late winter synoptic-scale air temperature variability over eastern China and possible mechanisms. It is revealed that the ENSO impacts differ remarkably between early and late winter. That is, the synoptic-scale air temperature response to ENSO over eastern China is weak in early winter but strong in late winter. In late winter, there is a significant positive correlation between ENSO and the synoptic temperature variability in the middle and lower reaches of the Yangtze river of eastern China. It suggests that the synoptic-scale air temperature variability and temperature fluctuation in late winters of El Niño (La Niña) years are usually stronger (weaker) than that in normal years. In late winter, ENSO can modulate the atmospheric baroclinicity by changing the meridional temperature gradient in the middle and high latitudes of Eurasia, which affects the synoptic-scale variation of atmospheric circulation in East Asia and subsequently affects the synoptic-scale air temperature variability over eastern China. Specifically, in late winters of El Niño years, the north-south temperature gradient is larger and the corresponding atmospheric baroclinicity is stronger, which could lead to more active meridional wind activities and more frequent cold air activities. Roughly opposite mechanisms apply during late winters of La Niña years. However, in early winter, ENSO has a weak influence on the meridional temperature gradient in the middle and high latitudes of Eurasia, and thus exhibits minor effects on the synoptic-scale temperature variability over eastern China. The results can enrich our understanding of the ENSO impact on air temperature variability in China, and provide references for improving seasonal prediction of wintertime air temperature over China.

Key words ENSO， Synoptic-scale air temperature variability， Early winter， Late winter

摘 要 基于中国国家气象信息中心提供的中国第一代全球大气和陆面再分析产品(CRA)的逐日气温资料、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)重建的逐月海表温度资料以及美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的大气环流再

* 资助课题：国家自然科学基金项目(42125501)。
作者简介：吴迪，从事海-气相互作用研究。E-mail：376995408@qq.com
通信作者：张文君，从事ENSO机理及海-气相互作用等研究。E-mail：zhangwj@nuist.edu.cn

分析资料，研究了厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）对中国东部前、后冬天气尺度气温变率的影响及其物理机制。结果表明，ENSO 对中国东部天气尺度气温变率的影响在前、后冬存在显著差异。ENSO 对前冬中国东部天气尺度气温变率影响较弱，后冬则显著增强。后冬时期，ENSO 与长江中下游地区天气尺度气温变率呈现显著正相关，即厄尔尼诺年后冬天气尺度气温变率增强，气温波动幅度增大；拉尼娜年后冬天气尺度气温变率减弱，气温变化较为平缓。ENSO 在后冬可通过影响与欧亚大陆上空南北温度梯度相关的大气斜压性调节下游东亚地区大气环流的天气尺度变率，进而影响天气尺度气温变率。厄尔尼诺年后冬，南北温度梯度大，大气斜压性较强，经向风活跃，冷空气活动较为频繁，天气尺度气温变率增大；拉尼娜年后冬，异常情况与之大致相反。在前冬 ENSO 对欧亚大陆上空南北梯度即大气斜压性影响较小，因而对中国东部天气尺度气温变率的影响也较弱。本研究的成果丰富了对 ENSO 影响中国气温变率的理解，有利于中国冬季气温季节预测水平的提升。

关键词 ENSO，天气尺度气温变率，前冬，后冬

中图法分类号 P46

1 引 言

厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation, ENSO）是热带太平洋海-气耦合系统年际尺度上的最强信号，其发生往往伴随着全球范围的天气、气候异常（Bjerknes, 1969; Latif, et al, 1998; Wallace, et al, 1998; Trenberth, et al, 2000; McPhaden, et al, 2006）。ENSO 对热带外地区天气、气候异常的影响主要通过大气遥相关实现，例如，ENSO 可通过激发太平洋-北美型（PNA）遥相关波列影响北太平洋及北美地区的天气、气候（Hoskins, et al, 1981; Wallace, et al, 1981）。东亚地区濒临热带西太平洋，其天气、气候与 ENSO存在紧密联系（Huang, et al, 1989; Zhang, et al, 1996; Wang, et al, 2000, 2003; Wu, et al, 2003）。ENSO 可以通过引起西北太平洋异常反气旋、气旋进而对东亚地区天气及气候尺度的气温、降水等造成重要影响（Zhang, et al, 1996; Wang, et al, 2000, 2002）。其中对于气温而言，当冬季冷空气来袭时大范围且剧烈的气温变化会对农业、社会经济和人民健康造成巨大影响（Peng, et al, 2011; Zhang, et al, 2011）。因此理解 ENSO 对于东亚冬季气温的影响对于东亚地区的防灾、减灾具有重要的指示意义。

在季节至年际尺度上，ENSO 可以通过影响西北太平洋中、低层反气旋性环流异常来调制东亚冬季风的变率，进而影响东亚地区的气温异常（李崇银，1989; Li, 1990; Chen, et al, 2000; Wang, et al, 2000）。在厄尔尼诺年冬季，西北太平洋上空通常出现异常的反气旋性环流，减弱东亚冬季风，使得东亚地区冬季平均气温偏高；而在拉尼娜年冬季，西北太平洋上空则通常出现异常的气旋性环流，增强东亚冬季风，使得东亚地区冬季平均气温降低。已有研究（Zhou, et al, 2007; 王会军等, 2012; Li, et al, 2012; He, et al, 2013）指出，ENSO 与东亚冬季风的关系存在着明显的年代际变化，与大西洋多年代尺度振荡（AMO）有关（Geng, et al, 2017a, 2018）。并且 AMO 的调控主要是体现在对拉尼娜位相的影响上，即 AMO 处于正（负）位相时，拉尼娜年对应偏强（偏弱）的东亚冬季风，东亚地区平均气温升高（降低）。此外，受 ENSO 与年循环以及 10—30 d 大气季节内振荡等多尺度的非线性相互作用，ENSO 对中国次季节尺度气温变率也存在显著影响。例如，在超强厄尔尼诺的成熟期冬季，热带中东太平洋海温可以通过与北半球副热带急流季节性南移的相互作用，引起北大西洋涛动（NAO）在 1 月中、上旬发生次季节位相反转，进而导致东亚地区气温的次季节变化（Geng, et al, 2017b）。

除了年际、年代际以及次季节尺度外，中国冬季气温还存在天气尺度（2—8 d）变率。对 ENSO 与中国天气尺度气温变率（例如，寒潮的发生频次）已做了大量研究。ENSO 与中国东部冬季寒潮的统计关系结果表明，寒潮活跃年份一般出现在厄尔尼诺事件期间，不活跃年份经常出现在拉尼娜事件期间（曾琮等, 2003; 陈冰等, 2013）。该结论也被区域研究所证实，如台湾地区寒潮的发生频次与 ENSO 存在显著正相关（Chen, et al, 2004），ENSO 事件通过调控北太平洋天气尺度短波槽、脊，引起中国台湾地区寒潮活动异常。然而，这种关系在一些区域上表现出一定的年代际变化特征，例如，叶更新等（2010）利用吉林省通化市单站温度资料分析了该区域冬季寒潮爆发频数与 ENSO 的联系，1980 年以前厄尔尼诺年该地区寒潮并不存在明显异常，但 1980 年后厄尔尼诺年该地区发生寒潮次数明显偏多；相比而言，拉尼娜年寒潮频次没有明显的年代

际变化。ENSO对寒潮的影响也适用于天气尺度气温变率，最近的一项研究（任曼琳等，2020）表明，ENSO与中国东部大部分地区的冬季天气尺度气温变率呈显著正相关，即厄尔尼诺年冬季，中国气温波动幅度大，天气尺度气温变率明显偏强；拉尼娜冬季，气温变化相对平缓，天气尺度温度变率偏弱。

关于ENSO对冬季气温变率影响的研究（丁一汇，1990；康丽华等，2006，2009；Wang, et al, 2010；Huang, et al, 2012）大多基于传统的冬季3个月平均（12月至次年2月）或延长期冬季5个月平均（11月至次年3月）。但一些研究发现，中国冬季气温变率具有明显的季内变化（Hu, et al, 2005；黄嘉佑等，2006；韦玮等，2014），特别是在研究年际变率和长期趋势时，前冬和后冬气温的变化可能存在很大差异（韦玮等，2014）。例如在2007/2008年，前冬气温偏高，后冬出现5℃异常的持续低温天气；2008/2009年则情况相反，前冬气温偏低，后冬偏高。黄嘉佑等（2006）指出中国冬季的前冬和后冬的环流系统及近地面气温年际和年代际变化是不一致的。冬季早期，欧亚大陆靠近北极地区的海平面气压升高，较低纬度的地区则降低；冬季晚期，欧亚大陆靠近北极的气压降低，而在较低纬度的地区气压则升高。有研究（韦玮等，2014；贾丹等，2015；李一玲等，2018）认为，中国及欧亚大陆的气温变率存在显著的季内转变，并且中国气温的主要年际变化与欧亚大陆更大范围的高中低纬度气温的反相变化有关。如果对于气温的研究仅仅考虑传统的冬季季节平均，则会掩盖掉其中的次季节变化信号。

当前对于ENSO与前、后冬气温变率之间的联系及机理分析研究较少。为了更深入地认识ENSO对中国冬季气温变化的影响，本研究将前冬和后冬进行区分来分析ENSO对中国东部地区天气尺度气温变率的调制作用，并探讨其中的物理过程。这一研究将会加深对ENSO影响中国气温变率的理解，对中国冬季气温的精准预测具有一定的指导意义。

2　资料和方法

研究所使用的资料包括：（1）中国国家气象信息中心提供的中国第一代全球大气和陆面再分析产品（CRA）中的1979—2020年逐日平均气温（http://data.cma.cn/CRA），水平分辨率为1.0°×1.0°；（2）美国国家海洋和大气管理局（NOAA）重建的逐月海表温度资料（SST V5），时段为1979—2020年，水平分辨率为2.0°×2.0°；（3）美国环境预报中心/美国大气研究中心（NCEP/NCAR）提供的全球逐月与逐日的再分析资料，包括高度场（Z）、温度场（T）、风场（V），水平分辨率为2.5°×2.5°。

使用Nino3.4指数即Nino3.4区域（5°S—5°N，120°—170°W）平均的海表温度距平时间序列作为ENSO事件的监测指标（Ren, et al, 2018）。文中根据冬季（DJF）Nino3.4指数的1倍标准差来选取ENSO事件进行研究，当Nino3.4指数大于1（小于−1），则将当年定义为厄尔尼诺（拉尼娜）年（利用其他的阈值定义ENSO事件，如标准差取0.8、0.9等，定性结论一致）。由此定义出6次厄尔尼诺事件（1982/1983、1986/1987、1991/1992、1997/1998、2009/2010、2015/2016年）和6次拉尼娜事件（1988/1989、1998/1999、1999/2000、2007/2008、2010/2011、2017/2018年）。尝试采用2—8 d傅里叶带通滤波方法从逐日的气温场、风场以及高度场等变量场中提取天气尺度波动信号，进而通过计算滤波场的方差来表征天气尺度变率（任曼琳等，2020）。天气尺度气温方差越大，表明气温波动越大，气温越不稳定；天气尺度气温方差较小，气温波动较小，气温较为稳定。此外，文中对所有的资料进行了去趋势处理，还使用了相关分析、合成分析以及一元线性回归等常用的气象诊断分析方法，利用双边t检验对统计结果进行显著性检验。定义11月—次年3月为整个冬季，11—12月为前冬，次年1—3月为后冬。

3　ENSO对中国前、后冬天气尺度气温变率的不同影响

首先分析中国东部整个冬季（11月—次年3月）天气尺度气温变率与ENSO的可能联系。图1给出了中国东部地区区域（20°—45°N，110°—120°E）平均的天气尺度气温变率与同期海温的相关系数空间分布，可以看到，中国东部冬季天气尺度气温变率与热带中东太平洋及热带印度洋上的海温存在显著的正相关。相关系数空间分布呈现出典型的ENSO型相关海温分布，表明ENSO对中国东部

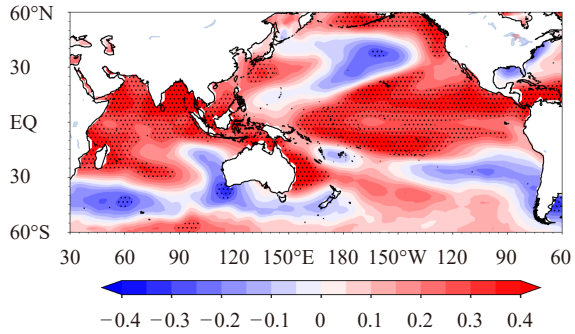


图 1 中国东部地区(20°—45°N, 110°—120°E)区域平均的冬季天气尺度气温变率与同期海温相关系数空间分布(黑点表示通过 90% 信度的检验)

Fig. 1 Spatial distribution of the correlation coefficient between sea surface temperature anomalies and the area-averaged winter synoptic-scale air temperature variability over eastern China(20°—45°N, 110°—120°E)(black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

冬季天气尺度气温变率有显著影响。厄尔尼诺事件发生时,中国东部冬季天气尺度气温变率增强,气温波动较大;拉尼娜事件发生时,气温变率减小,气温较为稳定。通过冬季 Nino3.4 指数回归的中国天气尺度气温变率异常(图 2)可以看到,ENSO 主要与长江中下游地区以及河套地区天气尺度气温变率存在显著正相关。

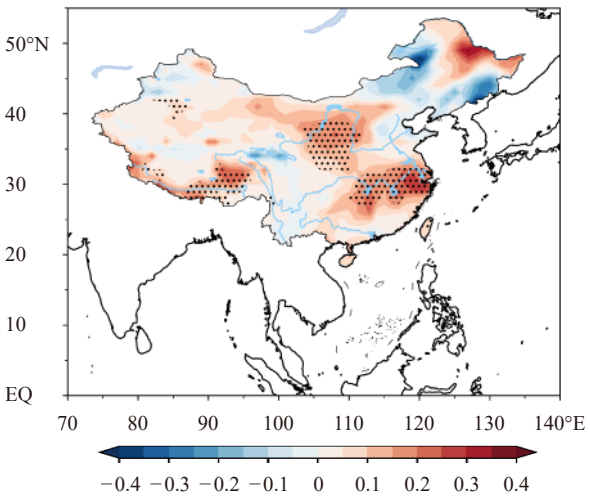


图 2 Nino3.4 指数回归的中国冬季天气尺度气温变率异常(单位:(℃)²,黑点表示通过 90% 信度的检验)

Fig. 2 Winter synoptic-scale air temperature variability anomalies regressed onto the winter Nino3.4 index (unit: (℃)², black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

研究(Livezey, et al, 1997; Mariotti, et al, 2002; Moron, et al, 2003; Gill, et al, 2015)发现,ENSO 对全球多地大气环流的影响在前冬(11—12 月)和后冬(次年 1—3 月)存在显著差异,使用整个冬季平均可能会掩盖 ENSO 气候影响中重要的次季节变化特征。鉴于此,本研究分析 ENSO 对中国东部前、后冬天气尺度气温变率影响的差异。分别对挑选出的 6 次典型厄尔尼诺和拉尼娜事件前、后冬 ENSO 冷、暖位相下天气尺度气温变率异常合成的差值场进行分析。如图 3a 所示,在 ENSO 年的前冬,几乎没有观测到显著的天气尺度气温变率异常,表明 ENSO 对前冬天气尺度气温变率影响较弱。ENSO 年的后冬(图 3b),长江中下游地区天气尺度气温变率呈现显著的正异常;河套地区通过显著性检验的区域大幅度减小,表明该区域天气尺度气温变率与 ENSO 的关系存在一定的不确定性。因此,ENSO 主要影响区域集中在长江中下游地区。为了进一步探讨 ENSO 与天气尺度气温变率的年际关系,分析了前、后冬 Nino3.4 指数与长江中下游地区(25°—35°N, 110°—120°E)区域平均的天气尺度气温变率时间序列(图 4)。可以看到前冬二者相关系数几乎为 0,二者相关较弱(图 4a);后冬二者相关系数大于 0.35,存在显著正相关(图 4b),通过了 90% 信度的显著性检验。

4 ENSO 影响中国前、后冬天气尺度气温变率差异的可能机制

通常而言,中国冬季气温的高、低起伏与北半球中、高纬度冷空气入侵有密切联系,当中、高纬度地区冷空气向南入侵时,中国东部地区会发生降温事件,冷空气消退时,伴随着升温过程。因此,造成中国冬季天气尺度气温波动最为直接的现象是中、高纬度大气环流异常尤其是伴随着的经向风异常,即 ENSO 对中国冬季天气尺度气温变率的影响一般是通过调制欧亚大陆上空经向风的天气尺度变率而实现的。文中对 500 hPa 经向风异常(v')进行 2—8 d 滤波处理后计算冬季天气尺度经向风变率(v'^2)。从 Nino3.4 指数回归的中国东部前、后冬天气尺度经向风变率异常可以看出,在前冬(图 5a),ENSO 相关的天气尺度经向风变率几乎没有区域通过显著性检验,说明前冬 ENSO 对中国东部天气尺度槽脊变率的影响较弱,导致南下入侵的冷空气不够活跃,进而对天气尺度气温变率影响较弱。相比而言,在后冬(图 5b)可以看到长江中下游地区呈现

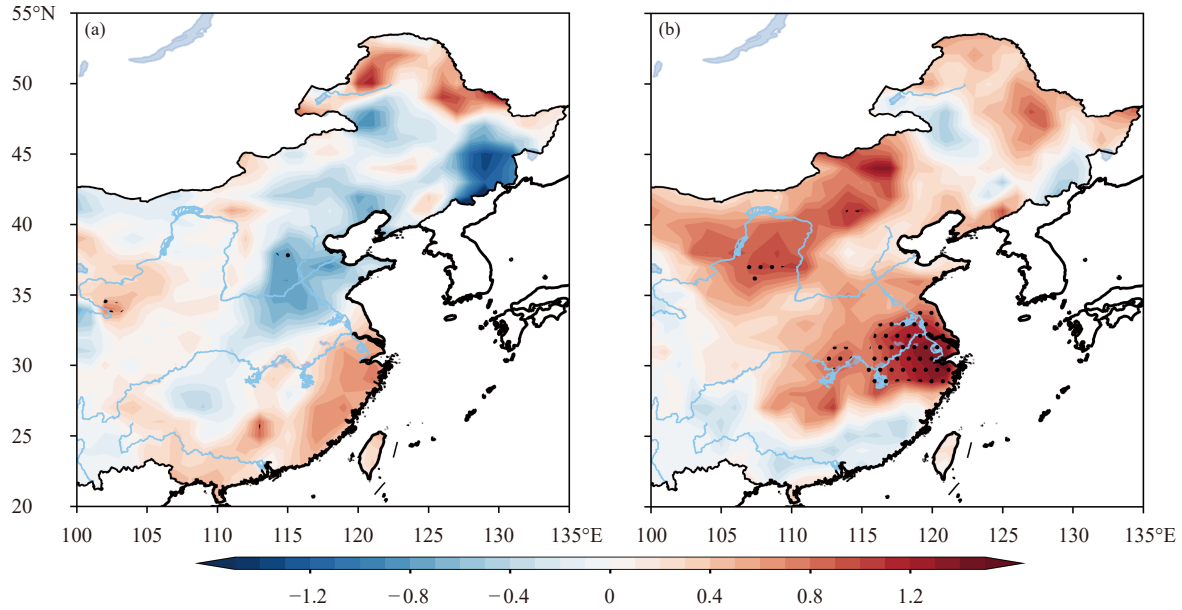


图 3　前（a）、后（b）冬 ENSO 冷、暖位相下天气尺度气温变率的异常合成差值场（厄尔尼诺减去拉尼娜）（单位：（℃）²，黑点区表示通过 90% 信度检验）

Fig. 3　Differences between composite anomalies of synoptic-scale air temperature variability during（a）early winters and（b）late winters of El Niño and La Niña years（El Niño minus La Niña）（unit:（℃）², black dots indicate values exceeding the 90% confidence level）

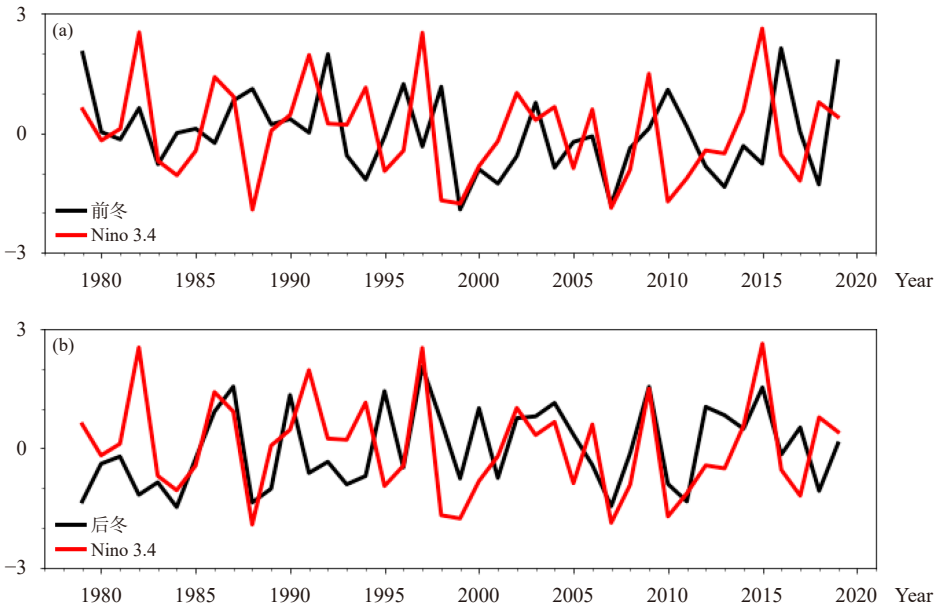


图 4　前（a）、后（b）冬中国东部地区（25°—35°N，110°—120°E）区域平均天气尺度气温变率与 Nino3.4 指数的时间序列

Fig. 4　Time series of area-averaged synoptic-scale air temperature variability over eastern China（25°—35°N，110°—120°E）and the Nino3.4 index during（a）early and（b）late winter

显著的经向风变率正异常。表明在厄尔尼诺年后冬，天气尺度经向风变率偏强，天气波活动剧烈，南北风所带来的冷暖平流不断交替导致局地气温波动变大，因而天气尺度气温变率增强。拉尼娜年后冬天气尺度经向风变率偏弱，从而导致局地天气尺度气温变率减小，气温变化较为平稳。

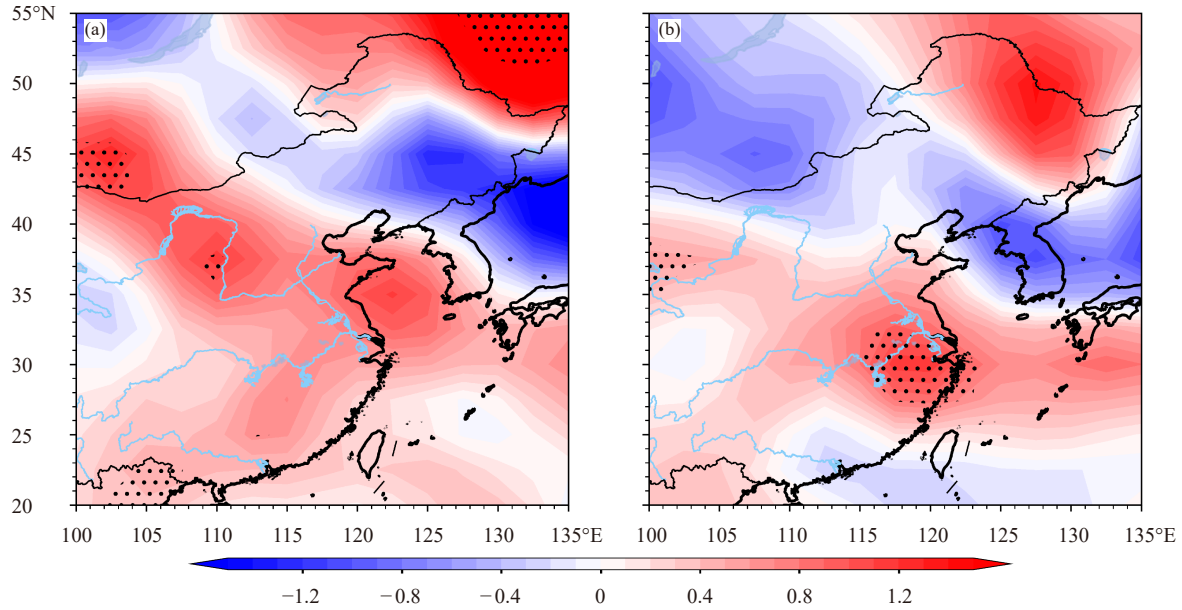


图 5 前（a）、后（b）冬时期 Nino3.4 指数回归的中国东部地区 500 hPa 天气尺度经向风变率异常（单位：(m/s)²，黑点区表示通过 90% 信度检验）

Fig. 5 500 hPa synoptic-scale meridional wind variability anomalies regressed onto the winter Nino3.4 index over eastern China during (a) early winter and (b) late winter (unit: (m/s)², black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

已有研究指出 ENSO 可以通过影响欧亚大陆上空大气斜压性调控天气尺度瞬变涡动活动，进而影响中国冬季天气尺度气温变率。文中使用 200 hPa 位势高度场的滤波方差来表征急流附近天气尺度瞬变涡动活动（Blackmon, et al, 1977; Lau, 1978）。分别将 Nino3.4 指数回归到前、后冬 200 hPa 位势高度天气尺度方差异常场上（图 6），在前冬，ENSO 相关的天气尺度瞬变涡动异常在中、高纬度区域并未通过显著性检验（图 6a），表明在前冬 ENSO 对于中、高纬度地区天气尺度波动影响较弱。后冬，欧亚大陆上空的天气波活动存在显著信号，当厄尔尼诺（拉尼娜）事件发生时，西伯利亚地区天气尺度瞬变涡动显著加强（减弱），从而使得中国东部地区天气尺度气温变率增强（减弱）（图 6b）。

对于 ENSO 如何调制天气尺度瞬变波活动的物理过程做了许多研究（Trenberth, et al, 1994;

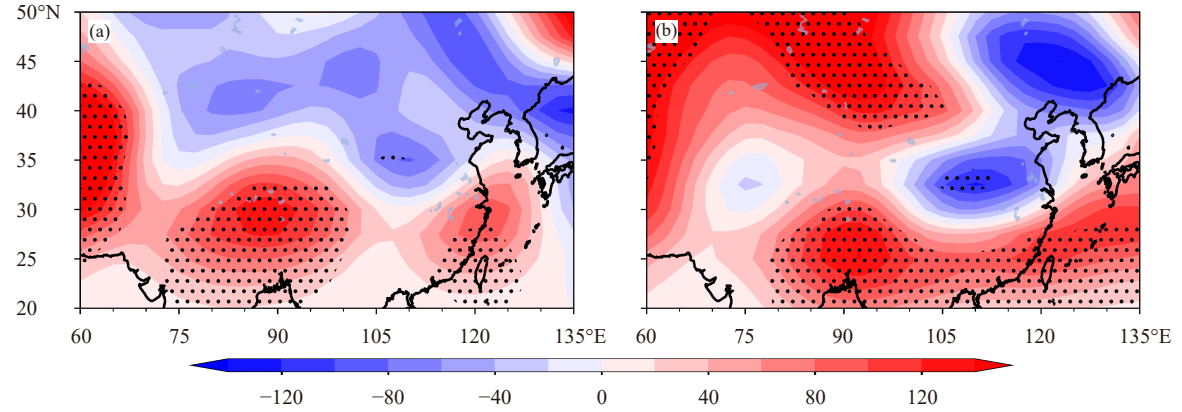


图 6 前（a）、后（b）冬 Nino3.4 指数回归的 200 hPa 天气尺度位势高度变率异常（单位：dagpm²，黑点区表示通过 90% 信度检验）

Fig. 6 200 hPa synoptic-scale geopotential height variance anomalies regrssed onto the winter Nino3.4 index during (a) early winter and (b) late winter (unit: dagpm², black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

Zhang, et al, 1999; Chang, et al, 2002)，一般而言，ENSO可以通过影响大气环流调控欧亚大陆上南北向温度分布，进而调制与温度梯度直接相关的斜压不稳定能量转换来影响天气尺度气温与风场的变率(马阳等，2017; Liess, et al, 2017)。任曼琳等(2020)研究表明，厄尔尼诺冬季欧亚大陆中、高纬度经向温度梯度增强，局地大气斜压性得到加强，有利于天气尺度瞬变涡动活动和下游东亚地区冬季气温的天气尺度波动增强，拉尼娜年则基本相反。图7给出了ENSO对应的前、后冬中、高纬度欧亚大陆地区南北温度异常，可以看到二者存在较大差异。如图7a所示，ENSO年前冬，中纬度地区(30°—40°N)气温明显升高，在20°N附近的低纬度地区气温则显著降低，并且最大正异常出现在对流层中上层。为了进一步理解ENSO在前、后冬经向温度梯度的差异，给出了冬季Nino3.4指数回归的700 hPa天气尺度温度异常(图8)。前冬，ENSO对中、高纬度欧亚大陆地区温度异常的影响以东西向为主；后冬，则转变为南北向。也就是说，ENSO可以改变欧亚大陆上空尤其是对流层中上层的南北温度梯度，厄尔尼诺年一般对应南北温度梯度增大，拉尼娜年则对应南北温度梯度减小。值得注意的是，前冬，在35°N附近显著的暖异常只出现在中上层(600 hPa以上)，并不能延伸到下层，其对地表温度的影响可能较弱。相比而言，在后冬，ENSO对温度异常的影响与前冬类似，但是强度明显增强，温度梯度变化幅度是前冬的2倍左右，而且异常能够影响到对流层中下层。这种前、后冬环流和温度场的差异可能与热带对流或海温响应次季节变化所驱动的北半球大气环流响应季内调整有关(Kim, et al, 2018; Ma, et al, 2022)，也可能来自变化的大气环流基本态对ENSO遥相关的调制作用(Geng, et al, 2017b)。因此，后冬ENSO可通过对中纬度经向温度梯度的强烈调制作用影响到局地大气的斜压性，从而改变天气尺度波动的活跃程度，最终影响中国东部天气尺度气温变率，而前冬ENSO相关的南北温度梯度异常较弱，对大气斜压性以及天气尺度瞬变波活动的影响较弱，因而对中国东部天气尺度气温变率影响也较小。

5　结论和讨论

中国冬季气温存在显著的天气尺度(2—8 d)变率，针对其异常变化的研究有利于中国冬季气温季节预测准确率的提高。本研究基于观测和再分析

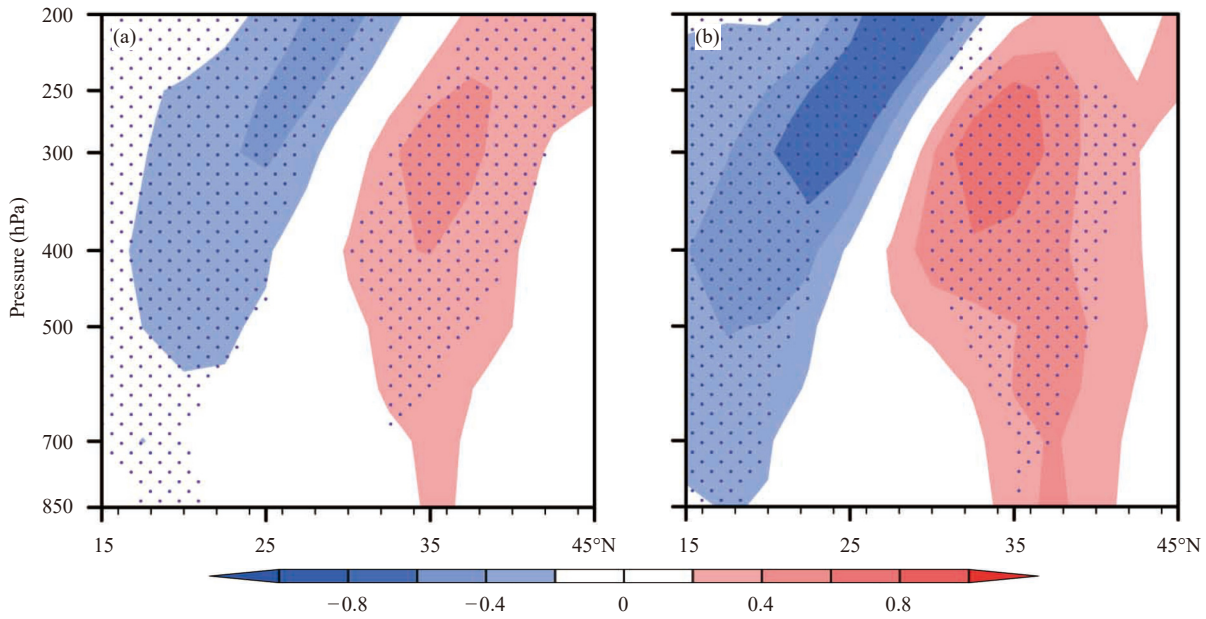


图7　Nino3.4指数回归的前(a)、后(b)冬欧亚大陆(80°—110°E)纬向平均的温度异常(单位：℃，黑点区表示通过90%信度检验)

Fig. 7　Zonal mean temperature anomalies (80°—110°E) regressed onto the winter Nino3.4 index over Eurasia during (a) early winter and (b) late winter (unit: ℃, black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

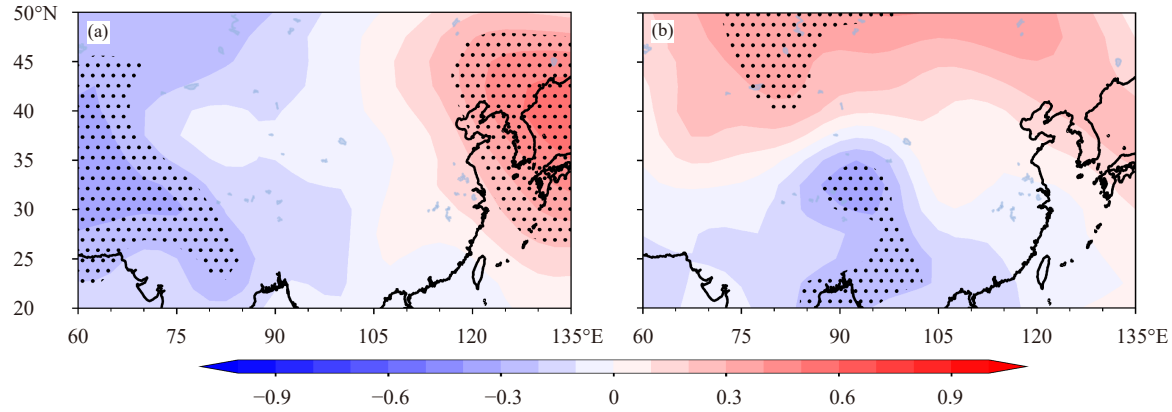


图 8 前(a)、后(b)冬 Nino3.4 指数回归的 700 hPa 天气尺度温度异常(单位:℃,黑点区表示通过 90% 信度检验)

Fig. 8 700 hPa horizontal temperature anomalies regressed onto the winter Nino3.4 index during (a) early winter and (b) late winter (unit: ℃, black dots indicate values exceeding the 90% confidence level)

资料研究了 ENSO 影响的次季节变化,发现了 ENSO 对中国东部前、后冬天气尺度气温变率影响的差异,并探讨了其可能的物理机制。主要结论如下:

(1)ENSO 对中国东部天气尺度气温变率的影响在前、后冬存在很大差异。前冬 ENSO 几乎没有影响;后冬 ENSO 对长江中下游地区有显著影响,即在厄尔尼诺年后冬,该区域天气尺度气温变率偏大,南、北风活动强烈,冷空气活动频繁,气温不稳定;在拉尼娜年后冬,该区域天气尺度气温变率较小,南、北风活动较弱,气温变化较为平稳。

(2)后冬,ENSO 主要通过改变与欧亚大陆上空南北温度梯度相关的大气斜压性,调节下游东亚地区大气环流天气尺度变率,进而影响中国东部地区天气尺度气温变率。在厄尔尼诺年后冬,南、北温度梯度大,大气斜压性较强,经向风活跃,冷空气活动频繁,天气尺度气温变率大;拉尼娜年后冬,异常情况与厄尔尼诺年相反。前冬 ENSO 对欧亚大陆上空温度梯度影响较小,因而对中国东部天气尺度气温变率的影响也较弱。

本研究的结果表明,ENSO 主要在后冬对中国天气尺度的温度变率有显著调制作用,这对天气尺度气温变率的季节预测以及防灾、减灾具有重要的科学意义和应用价值。值得注意的是,ENSO 事件存在着一定的时、空复杂性。一方面 ENSO 在振幅上存在一定的非对称性,即厄尔尼诺的强度一般大于拉尼娜。另一方面 ENSO 在最近 20 年表现出空间多样性,不同于传统的东部型事件,中部型 ENSO 事件对应的海温中心在太平洋中部(Kao, et al, 2009; Kug, et al, 2009; Yeh, et al, 2009),其气候影响也相对复杂(Zhang, et al, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b)。因此 ENSO 的强度和类型对中国东部地区天气尺度气温变率的影响也值得进一步开展研究。同时中国东部天气尺度气温变率还可能受到许多其他因子,如北极海冰、欧亚大陆雪盖以及青藏高原热源等的影响,也需要对这些因子进行综合分析来提高天气尺度气温变率的可预报水平。

致 谢:感谢席乐提出的宝贵建议,感谢国家气象信息中心提供资料帮助。

参考文献

陈冰, 梁越, 马路金等. 2013. 影响化州的寒潮强冷空气特征及其与 ENSO 事件的关系. 气象研究与应用, 34(4): 18-21. Chen B, Liang Y, Ma L J, et al. 2013. Characteristics of cold wave strong air and its relationship with ENSO events in Huazhou. J Meteor Res Appl, 34(4): 18-21 (in Chinese)

丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究. 热带气象, 6(2): 119-128. Ding Y H. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia. J Trop Meteor, 6(2): 119-128 (in Chinese)

黄嘉佑, 胡永云. 2006. 中国冬季气温变化的趋向性研究. 气象学报, 64(5): 614-621. Huang J Y, Hu Y Y. 2006. Trends of winter temperatures in China. Acta Meteor Sinica, 64(5): 614-621 (in Chinese)

贾丹, 简茂球. 2015. 中国冬季月地面气温的年际变化. 气候与环境研究, 20(4): 454-464. Jia D, Jian M Q. 2015. Interannual variability of wintertime monthly surface air temperature in China. Climatic Environ Res, 20(4): 454-464 (in Chinese)

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. 气候与环境研究, 11(3): 330-339. Kang L H, Chen W, Wei K. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation.

Climatic Environ Res, 11(3): 330-339 (in Chinese)

康丽华, 陈文, 王林等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系. 气候与环境研究, 14(1): 45-53. Kang L H, Chen W, Wang L, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature. Climatic Environ Res, 14(1): 45-53 (in Chinese)

李崇银. 1989. El Niño事件与中国东部气温异常. 热带气象, 5(3): 210-219. Li C Y. 1989. El Niño event and the temperature anomalies in eastern China. J Trop Meteor, 5(3): 210-219 (in Chinese)

李一玲, 王澄海, 张飞民. 2018. 欧亚大陆冬季地表温度南北反相变化的年代际特征及机理. 气候与环境研究, 23(2): 161-175. Li Y L, Wang C H, Zhang F M. 2018. Interdecadal variations and mechanisms of the seesaw pattern for winter surface temperature between northern and southern Eurasia. Climatic Environ Res, 23(2): 161-175 (in Chinese)

马阳, 朱伟军, 李天宇等. 2017. 西伯利亚风暴轴的气候特征及其可能维持机制. 气象科学, 37(5): 587-597. Ma Y, Zhu W J, Li T Y, et al. 2017. The climatic characteristics of Siberian storm track and its possible maintenance mechanism. J Meteor Sci, 37(5): 587-597 (in Chinese)

任曼琳, 张文君, 耿新等. 2020. ENSO对中国冬季天气尺度气温变率的影响及可能机理. 气象学报, 78(2): 199-209. Ren M L, Zhang W J, Geng X, et al. 2020. ENSO impact on the variability of wintertime synoptic-scale air temperature over China and possible mechanisms behind. Acta Meteor Sinica, 78(2): 199-209 (in Chinese)

王会军, 贺圣平. 2012. ENSO和东亚冬季风之关系在20世纪70年代中期之后的减弱. 科学通报, 57(19): 1713-1718. Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian Winter Monsoon and ENSO after mid-1970s. Chinese Sci Bull, 57(27): 3535-3540.

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. 大气科学, 38(3): 524-536. Wei W, Wang L, Chen Q L, et al. 2014. Interannual variations of early and late winter temperatures in China and their linkage. Chinese J Atmos Sci, 38(3): 524-536 (in Chinese)

叶更新, 王智宇. 2010. 冬季寒潮爆发频数与ENSO的联系. 吉林气象, (2): 2-7. Ye G X, Wang Z Y. 2010. The relationship between winter cold wave frequency and ENSO. Jilin Meteor, (2): 2-7 (in Chinese)

曾琮, 谢炯光. 2003. 广东省寒潮、强冷空气的气候特征及与ENSO的关系. 广东气象, (1): 7-9. Zeng C, Xie J G. 2003. The relation between ENSO and cold wave & strong cold air in Guangdong. Guangdong Meteor, (1): 7-9 (in Chinese)

Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Wea Rev, 97(3): 163-172

Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the northern Hemisphere wintertime circulation. J Atmos Sci, 34(7): 1040-1053

Chang E K M, Lee S, Swanson K L. 2002. Storm track dynamics. J Climate, 15(16): 2163-2183

Chen T C, Huang W R, Yoon J H. 2004. Interannual variation of the East Asian cold surge activity. J Climate, 17(2): 401-413

Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. Adv Atmos Sci, 17(1): 48-60

Geng X, Zhang W J, Stuecker M F, et al. 2017a. Decadal modulation of the ENSO-East Asian winter monsoon relationship by the Atlantic Multi-decadal Oscillation. Climate Dyn, 49(7-8): 2531-2544

Geng X, Zhang W J, Stuecker M F, et al. 2017b. Strong sub-seasonal wintertime cooling over East Asia and northern Europe associated with super El Niño events. Sci Rep, 7(1): 3770

Geng X, Zhang W J, Jin F F, et al. 2018. A new method for interpreting nonstationary running correlations and its application to the ENSO-EAWM relationship. Geophys Res Lett, 45(1): 327-334

Gill E C, Rajagopalan B, Molnar P. 2015. Subseasonal variations in spatial signatures of ENSO on the Indian summer monsoon from 1901 to 2009. J Geophys Res: Atmos, 120(16): 8165-8185

He S P, Wang H J. 2013. Oscillating relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO. J Climate, 26(24): 9819-9838

Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. J Atmos Sci, 38(6): 1179-1196

Hu Y Y, Tung K K, Liu J P. 2005. A closer comparison of early and late-winter atmospheric trends in the Northern Hemisphere. J Climate, 18(16): 3204-3216

Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. Adv Atmos Sci, 6(1): 21-32

Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system. Adv Atmos Sci, 29(5): 910-942

Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-pacific and central-pacific types of Enso. J Climate, 22(3): 615-632

Kim S, Son H Y, Kug J S. 2018. Relative roles of equatorial central Pacific and western North Pacific precipitation anomalies in ENSO teleconnection over the North Pacific. Climate Dyn, 51(11-12): 4345-4355

Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. J Climate, 22(6): 1499-1515

Latif M, Anderson D, Barnett T, et al. 1998. A review of the predictability and prediction of ENSO. J Geophys Res: Oceans, 103(C7): 14375-14393

Lau N C. 1978. On the three-dimensional structure of the observed transient eddy statistics of the Northern Hemisphere wintertime circulation. J Atmos Sci, 35(10): 1900-1923

Li C, Ma H. 2012. Relationship between ENSO and winter rainfall over southeast China and its decadal variability. Adv Atmos Sci, 29(6): 1129-1141

Li C Y. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. Adv Atmos Sci, 7(1): 36-46

Liess S, Agrawal S, Chatterjee S, et al. 2017. A teleconnection between the

West Siberian Plain and the ENSO region. J Climate, 30(1): 301-315

Livezey R E, Masutani M, Leetmaa A, et al. 1997. Teleconnective response of the Pacific—North American region atmosphere to large central equatorial pacific SST anomalies. J Climate, 10(8): 1787-1820

Ma T J, Chen W, Chen S F, et al. 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 Climate, 35(24): 7919-7935

Mariotti A, Zeng N, Lau K M. 2002. Euro-Mediterranean rainfall and ENSO: A seasonally varying relationship. Geophys Res Lett, 29(12): 1621

McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. 2006. ENSO as an integrating concept in earth science. Science, 314(5806): 1740-1745

Moron V, Gouirand I. 2003. Seasonal modulation of the El Niño-southern oscillation relationship with sea level pressure anomalies over the North Atlantic in October—March 1873—1996. Int J Climatol, 23(2): 143-155

Peng J B, Cholaw B. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China. Atmos Oceanic Sci Lett, 4(5): 281-286

Ren H L, Lu B, Wan J H, et al. 2018. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction in China. J Meteor Res, 32(6): 923-936

Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Climate Dyn, 9(6): 303-319

Trenberth K E, Caron J M. 2000. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. J Climate, 13(24): 4358-4365

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 109(4): 784-812

Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. J Geophys Res: Oceans, 103(C7): 14241-14259

Wang B, Wu R G, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate?. J Climate, 13(9): 1517-1536

Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part Ⅱ: How the Philippine sea anomalous anticyclone is established during El Niño development. J Climate, 15(22): 3252-3265

Wang B, Wu R G, Li T. 2003. Atmosphere-Warm Ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. J Climate, 16(8): 1195-1211

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 Climate, 23(6): 1495-1512

Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. J Climate, 16(22): 3742-3758

Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. Nature, 461(7263): 511-514

Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. J Meteor Soc Japan, 74(1): 49-62

Zhang W J, Jin F F, Li J P, et al. 2011. Contrasting impacts of two-type El Niño over the western North Pacific during boreal autumn. J Meteor Soc Japan, 89(5): 563-569

Zhang W J, Jin F F, Ren H L, et al. 2012. Differences in teleconnection over the North Pacific and rainfall shift over the USA associated with two types of El Niño during boreal autumn. J Meteor Soc Japan, 90(4): 535-552

Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China. J Climate, 26(21): 8392-8405

Zhang W J, Wang L, Xiang B Q, et al. 2015a. Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. Climate Dyn, 44(5-6): 1351-1366

Zhang W J, Wang Y L, Jin F F, et al. 2015b. Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship. Geophys Res Lett, 42(20): 8570-8576

Zhang Y Q, Held I M. 1999. A linear stochastic model of a GCM's Midlatitude storm tracks. J Atmos Sci, 56(19): 3416-3435

Zhou W, Wang X, Zhou T J, et al. 2007. Interdecadal variability of the relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO. Meteor Atmos Phys, 98(3-4): 283-293