doi:10.11676/qxxb2020.021

ENSO 对中国冬季天气尺度气温变率的影响及可能机理*

任曼琳　张文君　耿　新　刘　超
REN Manlin　ZHANG Wenjun　GENG Xin　LIU Chao

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京，210044

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education，Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change，Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters，Nanjing University of Information Science & Technology，Nanjing 210044，*China*

2019-05-15 收稿，2019-12-09 改回.

任曼琳，张文君，耿新，刘超. 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 Manlin，Zhang Wenjun，Geng Xin，Liu Chao. 2020. ENSO impact on the variability of wintertime synoptic-scale air temperature over China and possible mechanisms behind. ***Acta Meteorologica Sinica*****，78(2):199-209**

Abstract　The present study investigates ENSO impact on the variability of wintertime synoptic-scale air temperature over China based on daily averaged air temperature data collected at 753 stations and compiled by the National Meteorological Information Center, the NOAA reconstructed monthly sea surface temperature and the NCEP/NCAR reanalysis data from 1960 to 2017. The results show that ENSO is significantly positively correlated with wintertime synoptic-scale air temperature variability in a large area of eastern China. The fluctuation of temperature and synoptic-scale air temperature variability are usually stronger than normal during El Niño winters. In contrast, the synoptic-scale air temperature variability is weakened during La Niña winters. Further research finds that during El Niño winters, the meridional temperature gradient in the middle and high latitudes of Eurasia strengthens, leading to enhanced local atmospheric baroclinicity according to the thermal wind relationship and thus further increasing storm activities in the Siberian region and synoptic-scale variation of atmospheric circulation in East Asia region. Correspondingly, the synoptic-scale air temperature variability enhances in most areas of China. Roughly opposite mechanisms apply during La Niña winters.

Key words　ENSO，Air temperature variability，Synoptic-scale，Siberian storm track

摘　要　基于 1960—2017 年中国国家气象信息中心整编的 753 站逐日平均温度资料、美国国家海洋大气中心（NOAA）重建的逐月海表温度资料以及美国国家环境预测中心/国家大气研究中心（NCEP/NCAR）提供的再分析大气环流资料，分析了 ENSO 对中国冬季天气尺度气温变率的影响。结果表明，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，中国气温波动幅度增大，天气尺度气温变率明显较强；而拉尼娜年冬季，气温变化相对平稳，天气尺度温度变率较小。进一步研究发现，厄尔尼诺事件加强了冬季欧亚大陆中高纬度地区的经向温度梯度，根据热成风原理，局地大气斜压性增强，西伯利亚地区的风暴活动和下游东亚地区大气环流的天气尺度变异也随之加强，因而有利于中国大部分地区天气尺度温度变率的增大。拉尼娜年冬季，异常情况与之大致相反。

关键词　ENSO，气温变率，天气尺度，西伯利亚风暴轴

中图法分类号　P46

---

* 资助课题：国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项项目（2018YFC1506002）、国家自然科学基金项目（41675073）、全球变化与海气相互作用专项（GASI - IPOVAI-03）、南京信息工程大学人才启动基金资助（2018r066）。

作者简介：任曼琳，从事 ENSO 与海-气相互作用研究。E-mail：rmlzjx@163.com

通信作者：张文君，从事 ENSO 机理及海-陆-气相互作用等方面研究。E-mail：zhangwj@nuist.edu.cn

1 引 言

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋海-气耦合系统异常变化的主要模态,活动周期为2—7 a,虽然发生在热带太平洋,但ENSO事件出现之后往往伴随着全球范围的天气、气候异常(Bjerknes, 1969; Wallace, et al, 1998; Van Loon, et al, 1981; Trenberth, et al, 2000; Alexander, et al, 2002)。ENSO对热带外地区气候异常的影响主要通过大气遥相关实现,例如,太平洋-北美型(PNA)遥相关是ENSO影响北美地区天气、气候的主要途径(Wallace, et al, 1981; Hoskins, et al, 1981)。

众所周知,在季节—年际时间尺度上ENSO对中国冬季季风和气候异常也存在明显的调制作用。一般而言,厄尔尼诺年冬季热带西北太平洋上中低层存在显著的反气旋性环流异常(即菲律宾反气旋),其西侧来自热带海洋的暖湿空气源源不断地向东亚大陆输送,有利于东亚地区偏暖偏湿,东亚冬季风偏弱(Zhang, et al, 1996; Wang, et al, 2000; Yang, et al, 2007; Xie, et al, 2009)。拉尼娜年冬季情况则大致相反(赵振国, 1989; 李崇银, 1989; Li, 1990; Zhang, et al, 1996; 陶诗言等, 1998; Chen , et al, 1998, 2000; Wang, et al, 2000)。然而,ENSO对东亚冬季气候的影响存在明显的地区差异,相较于东部地区,中国东北和西南地区的气温对ENSO的响应较弱(韩文韬等, 2014);此外,受大西洋多年代尺度振荡(AMO)的非线性调控作用,ENSO与东亚冬季风的关系还存在着显著的年代际变化(Geng, et al, 2017a, 2018)。近几十年来,随着中部型厄尔尼诺概念的提出(Kao, et al, 2009; Yeh, et al, 2009; Ashok, et al, 2009; Shinoda, et al, 2011; 袁媛等, 2012; 王磊等, 2014; Zhang, et al, 2015a),人们开始认识到不同类型的ENSO事件造成的气候影响存在显著差异(Weng, et al, 2007; Zhang, et al, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b; Feng, et al, 2010, 2011; 汪子琪等, 2017)。例如,不同于传统厄尔尼诺有利于中国南方秋季降水增多,中部型厄尔尼诺发展年秋季,西北太平洋存在显著的气旋性环流,中国南方降水容易偏少(Zhang, et al, 2014)。由此可见,ENSO自身的多变性以及与热带外大气环流异常联系的复杂性使得以往基于传统ENSO的气候预测经验正面临严峻挑战。

除了季节—年际时间尺度之外,ENSO还能对中国次季节气候变率产生显著调制作用,这已在ENSO与年循环的非线性相互作用理论研究工作(Stuecker, et al, 2013, 2015)中得到证实。在具体观测研究方面,由于背景西北太平洋反气旋的季节变化,不同类型ENSO事件的不同季节,中国南方地区降水的10—30 d低频变率响应也完全不同(张文君等, 2018)。在超强厄尔尼诺的成熟期冬季,热带中东太平洋海温能通过与北太平洋急流季节性南移的相互作用使得北大西洋涛动在1月初发生位相急转,进而调控东亚地区的次季节气温变率(Geng, et al, 2017b)。天气尺度变率方面,已有研究(毕宝贵等, 2017; 刘明竑等, 2018)提出超强厄尔尼诺事件对中国极端降水及强对流天气的发生频次有显著的影响。而目前关于气温的研究相对较少,曾琮等(2003)和陈冰等(2013)对ENSO与广东区域寒潮的关系进行了统计分析,发现寒潮活跃的年份一般出现在厄尔尼诺事件期间,寒潮不活跃的年份经常出现在拉尼娜事件期间。Chen等(2004)研究指出,ENSO事件可以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的异常,该研究指出东亚寒潮的发生频次与Nino3.4指数存在高度的正相关,即厄尔尼诺年冬季,中国台湾地区的寒潮频次容易偏多。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,在1980年以前厄尔尼诺年寒潮并没有明显的变化,但在1980年后厄尔尼诺年该地区发生寒潮次数明显偏多,相比较而言,拉尼娜年寒潮频次没有明显的年代际变化。

总体而言,目前关于ENSO对中国天气尺度气温变率影响的研究工作较少,且已有的研究大多关注局地或者个别事件的影响,ENSO对中国大范围的冬季天气尺度气温变率影响的观测事实和物理过程尚未得到较系统的分析和探究。因此,本研究旨在分析ENSO对中国冬季天气尺度气温变率的影响,并探讨这种影响的可能机制,进而为短期气候预测提供科学依据。

2 资料与方法

资料包括:(1)中国国家气象信息中心整编的

753站1960—2017年逐日平均温度数据。为了保证资料的连续性和准确性，首先对每个台站的数据进行了质量控制，若某站点某年的缺测数据大于30个，则将该站剔除。筛选完毕后，剩余的温度缺测数据用前后2 d的平均进行插补，经过处理后，实际选用的站点共541个。(2)美国国家海洋大气中心(NOAA)重建逐月海表温度资料(SST V3b)，水平分辨率为2.0°×2.0°。(3)美国环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料，包括逐月的高度场、温度场、风场，逐日的风场、高度场水平分辨率为2.5°×2.5°。所有资料均取1960年1月—2017年12月。研究时段为1961—2017年冬季，文中冬季定义为从上一年11月1日至当年1月31日，如1961年冬季为1960年11月1日至1961年1月31日。也采用了传统的冬季(上一年12月—当年2月)定义方法进行了检验，发现其定性结果一致。

采用Nino3.4指数(即(5°N—5°S，120°—170°W)区域平均的海表温度距平序列)作为ENSO事件的监测指标。根据冬季Nino3.4指数选取ENSO事件，若该指数大于0.5℃(小于−0.5℃)，则将当年定义为厄尔尼诺(拉尼娜)年，由此定义出19次厄尔尼诺事件：1964、1966、1969、1970、1973、1977、1978、1983、1987、1988、1992、1995、1998、2003、2005、2007、2010、2015、2016年和21次拉尼娜事件：1963、1965、1968、1971、1972、1974、1975、1976、1984、1985、1989、1996、1999、2000、2001、2006、2008、2009、2011、2012、2017年。此外，也基于Ren等(2018)的厄尔尼诺/拉尼娜事件国标定义来对ENSO事件的判定结论进行了检验，所得结果基本一致。为了研究天气尺度的变率，文中采用傅里叶带通滤波从逐日温度场、风场及高度场资料中滤出2—8 d的天气尺度变量，而后取出冬季序列计算其方差，用来表示天气尺度的变率强弱。文中也采用了合成分析、一元线性回归等常用的气候诊断方法，利用双边t检验对统计结果进行显著性检验。

3 中国冬季天气尺度气温变率特征及与ENSO的联系

首先，利用经过傅里叶2—8 d带通滤波处理的温度资料，以随机挑选的1986年为例给出了当年中国平均的天气尺度气温的变化序列(图1)，发现中国天气尺度气温存在明显的波动，且变率冬季较大，夏季最小，这种天气尺度气温变化的季节性差异在其他年份同样存在。天气尺度气温变率不仅存在很强的季节性，其每年的情况也有很大不同，例如，1966年冬季中国天气尺度温度的方差为4.9(℃)^2，而2008年只有1.8(℃)^2(图2)，天气尺度气温的变率前者远大于后者，也就是说，中国冬季天气尺度气温变率具有显著的年际变化特征。为便于进一步研究，使用冬季天气尺度气温的方差($(T')^2$)来度量中国冬季天气尺度气温变率的强度，每个冬季的方差主要反映该冬季温度高频变化的强弱，即方差越大表示天气尺度温度的波动越大，冬季气温越不稳定；反之，则该冬季天气变化比较平稳，天气尺度温度波动比较小。

从中国541个站点冬季天气尺度气温变率的气候平均(图3a)可以看出，冬季天气尺度气温变率呈现北强南弱的分布。大值区主要位于新疆北

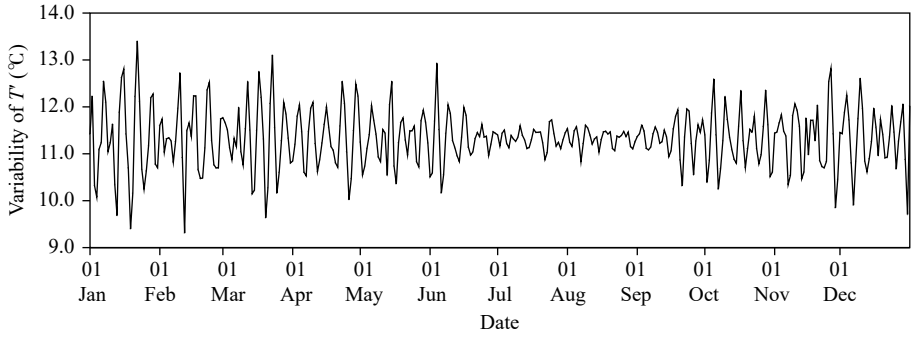


图1 1986年天气尺度气温的逐日变化

Fig. 1 Daily variation of synoptic-scale air temperature in 1986

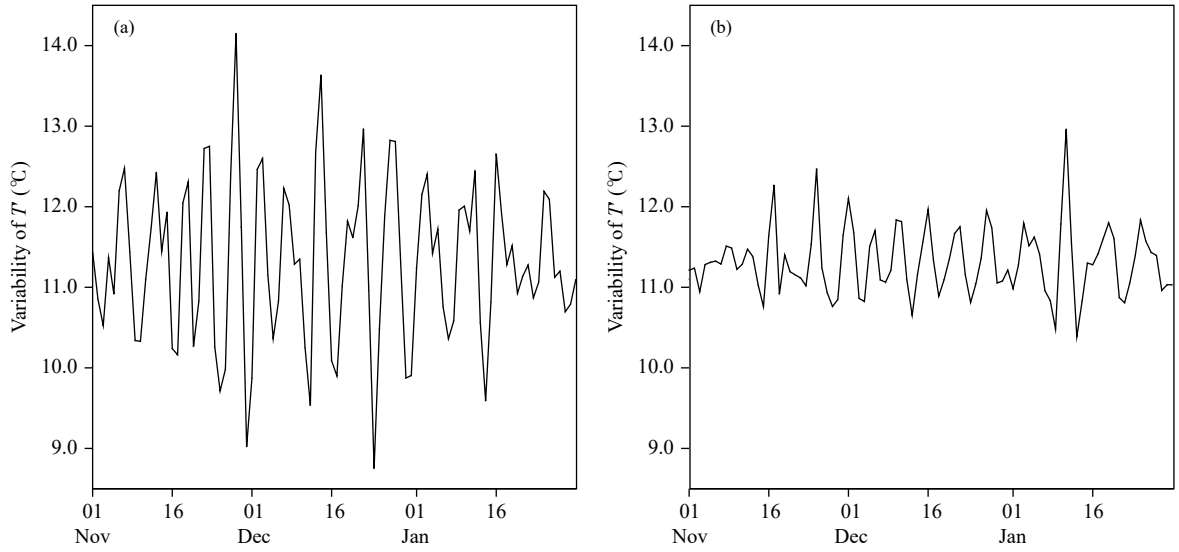


图 2 1966 年(a)和 2008 年(b)冬季天气尺度气温的逐日变化

Fig. 2 Daily variations of synoptic-scale air temperature in the winters of 1966(a) and 2008(b)

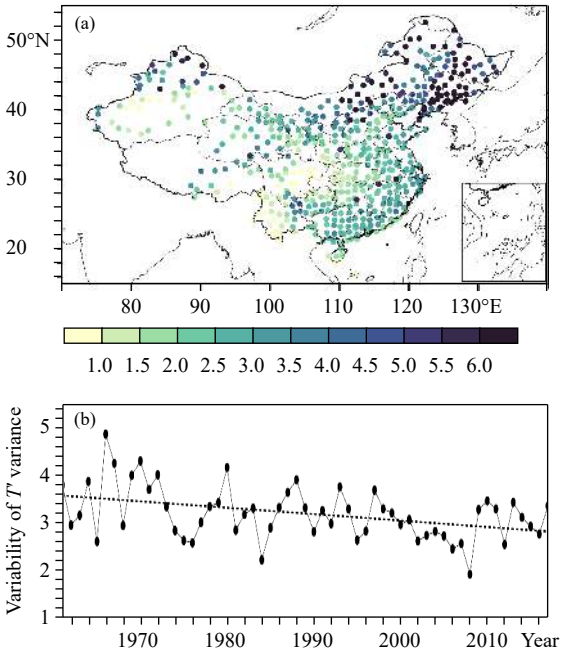


图 3 (a) 多年平均的天气尺度气温变率(单位:(℃)²),(b) 中国平均的天气尺度气温变率的年际变率(实线)(单位:(℃)²)及趋势(虚线)

Fig. 3 (a) Climatology of synoptic-scale air temperature variability (unit: (℃)²), (b) Interannual variation (solid line) (unit: (℃)²) and trend (dashed line) of synoptic-scale air temperature variability over China

部和东北地区,长江流域至南部沿海一带的气温变率也相对较大,3 个小值区分别位于四川盆地、云南西南部和新疆南部地区,这与已有研究的冷空气活动频次分布(王遵娅等, 2006; 康志明等, 2010)类似。从中国平均的冬季天气尺度气温变率逐年变化(图 3b)可以看出,中国冬季气温变率具有显著的年际变化特征,1966 年气温变率最大,而 2008 年的气温变率最小。此外,中国冬季气温变率还存在明显的线性趋势变化特征,线性趋势为(−0.13℃)²/(10 a),通过了 95% 的信度 t 检验,说明在全球变暖的背景下,中国冬季天气尺度气温变率明显减小,气温变化更为平稳。文中主要关注天气尺度气温变率的年际振荡,因此为了避免长期趋势的可能影响,在以下分析中去除了所有资料的长期变化趋势。

为了分析中国冬季天气尺度气温变率与 ENSO 的可能联系,给出了中国平均的冬季天气尺度气温变率与同期全球海温异常的相关系数空间分布(图 4a)。可见,中国天气尺度气温变率与中东太平洋、热带北印度洋和大西洋海表温度呈显著正相关,而与西太平洋存在显著负相关关系,总体呈现显著的类厄尔尼诺型海温分布。同时,还检查了中国平均的气温变率的逐年变化序列与同期 Nino3.4 指数的相关,相关系数为 0.36(通过了置信度为 0.1 的显著性 t 检验)。因此,即当中国天气尺度气温变率偏强(偏弱)时,热带太平洋对应厄尔尼诺(拉尼娜)事件。进一步,为了检查中国哪些区域的天气尺度气温变率与 ENSO 有显著关系,给出冬季 Nino3.4 指数回归的台站天气尺度气温变率异常

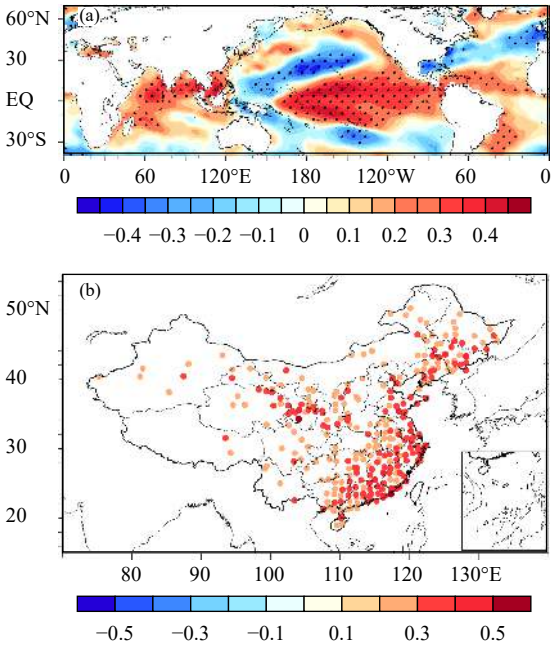


图 4 （a）中国平均的冬季天气尺度气温变率与同期全球海温异常相关系数的空间分布（黑点表示通过 90% 信度 *t* 检验），（b）冬季 Nino3.4 指数回归的冬季天气尺度气温变率异常（单位：(℃)²；未显示 *t* 检验显著性水平低于 90% 的站点）

Fig. 4 （a）Spatial distribution of correlation coefficient between global sea surface temperature anomalies and wintertime synoptic-scale air temperature variability over China（The black dots indicate values exceeding the 90% confidence level *t*-test），（b）Wintertime synoptic-scale air temperature variability anomalies regressed on the winter Niño3.4（unit：(℃)²；Values that do not exceed the 90% confidence level *t*-test are not shown）

（图 4b），可见，ENSO 与中国东部大范围地区的冬季天气尺度气温变率呈显著正相关，尤其是在东南部、东北的南部和甘肃、青海的交界区域。

考虑到 ENSO 自身海表温度及其大气响应的冷、暖位相非对称性，分别给出厄尔尼诺和拉尼娜年冬季合成的天气尺度气温变率（图 5）来检查这种关系的非线性。从图 5 可见，在厄尔尼诺年冬季，中国天气尺度气温变率异常几乎都偏强，变率较大的区域主要分布在中国的东南部、东北地区的南部，这与图 4b 基本一致。相比较而言，拉尼娜年中国冬季的天气尺度气温变率大部分区域均较小，异常较大的区域主要分布在东北的南部。尽管厄尔尼诺和拉尼娜影响的强度在某些区域存在一定的差异，例如，厄尔尼诺对中国东南部的影响强于拉尼娜，但它们对中国冬季天气尺度气温变率的影响大体上是对称的。

4 ENSO 影响中国冬季天气尺度气温变率的可能机制

上述的统计分析表明，ENSO 与中国冬季天气尺度气温变率在年际时间尺度上具有显著的联系，那么 ENSO 是如何调制冬季天气尺度气温变率的呢？受西伯利亚冷高压的影响，冬季中国除西南地区外皆盛行偏北风，因而呈现干燥低温的气候特征（图 6）。而在天气尺度上，一般而言，中国冬季的变温过程与北方冷空气的入侵有紧密的联系，当有冷空气南下时，中国大陆伴随着降温过程，而当冷空

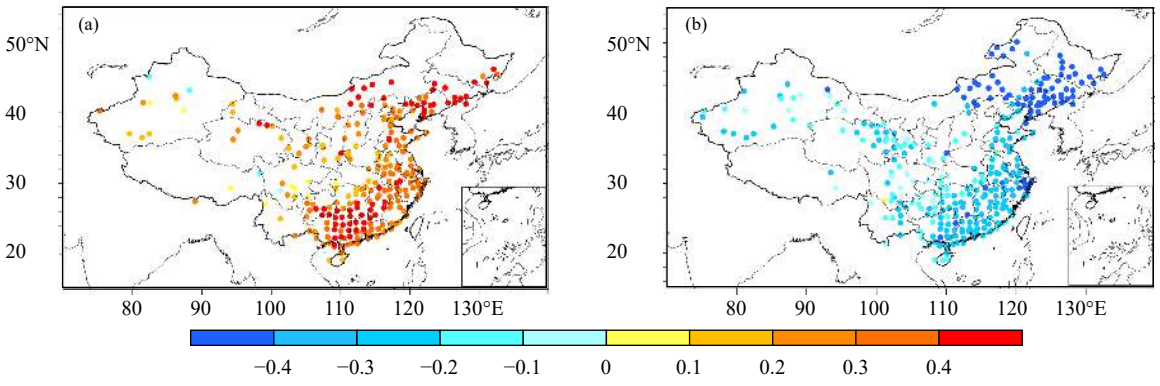


图 5 台站冬季天气尺度气温变率的异常合成场（a. 厄尔尼诺年，b. 拉尼娜年；单位：(℃)²；未显示 *t* 检验显著性水平低于 95% 的站点）

Fig. 5 Composite anomalies of wintertime synoptic-scale air temperature variability based on station observations for（a）El Niño years and（b）La Niña years（unit：(℃)²；Values that do not exceed the 95% confidence level *t*-test are not shown）

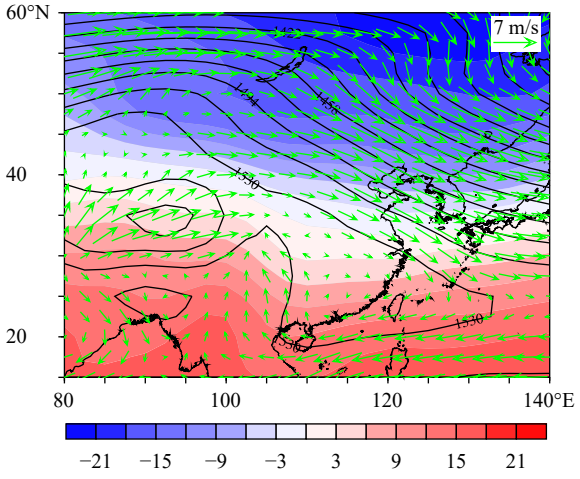


图 6 冬季平均的 850 hPa 风场（箭头）、温度场（阴影，单位：℃）及位势高度场（等值线，单位：gpm）

Fig. 6 Climatological means of wintertime 850 hPa winds (arrow), air temperature (shaded, unit: ℃) and geopotential height (contour, unit: gpm)

气消退时，中国大陆伴随着升温过程。为了分析与天气尺度气温变率相联系的大气环流场，对纬向风、经向风进行 2—8 d 的滤波处理后计算了冬季天气尺度纬向风变率（$(U')^2$）及天气尺度经向风变率（$(V')^2$）。从冬季 Nino3.4 指数回归的东亚地区天气尺度风场变率异常（图 7）可以看到，不论是经向风还是纬向风，中国东部大范围地区都存在显著的正异常信号，表明厄尔尼诺年对应着上述地区的天气尺度风场变率的增大。相比而言，中国区域 ENSO 相关的经向风变率明显强于纬向风变率，也与天气尺度温度变率对应较好，因此下面主要讨论经向风变率。为了进一步确认 ENSO 对应的天气尺度经向风变率，给出厄尔尼诺和拉尼娜年冬季合成的天气尺度经向风变率异常场（图 8），可以看出，厄尔尼诺年冬季，欧亚大陆 50°N 以南基本以正异常为主，说明天气尺度的经向风变率偏强，南北风变化活跃，异常中心位于中国的南方地区，异常增强的经向风变率表明天气过程活跃，由南北风所带来的冷暖平流不断交替会导致局地的温度波动变大，这与前述的天气尺度气温变率异常偏大现象一致。拉尼娜年冬季，情况大致与厄尔尼诺年相反，只不过中心不同。

那么，这种天气尺度经向风变率是如何产生的呢？中国冬季的冷空气活动主要与上游欧亚大陆上天气尺度瞬变涡动（又称风暴轴）有关，参照北大西洋和北太平洋风暴轴的定义（Blackmon, 1976; Blackmon, et al, 1977; Lau, 1978, 1979），用 500 hPa 位势高度场的滤波方差来表示天气尺度瞬变涡动的强弱（Blackmon, et al, 1977; Lau, 1978），图 9 中黑色实线为冬季平均的 500 hPa 位势高度滤波（2—8 d）方差场，从气候态来看，除太平洋风暴轴之外，位势高度滤波方差在西伯利亚上空的西风气流中也存在一个大值中心，对应着弱的槽前区域，略呈东北—西南走向。该西伯利亚地区的天气尺度瞬

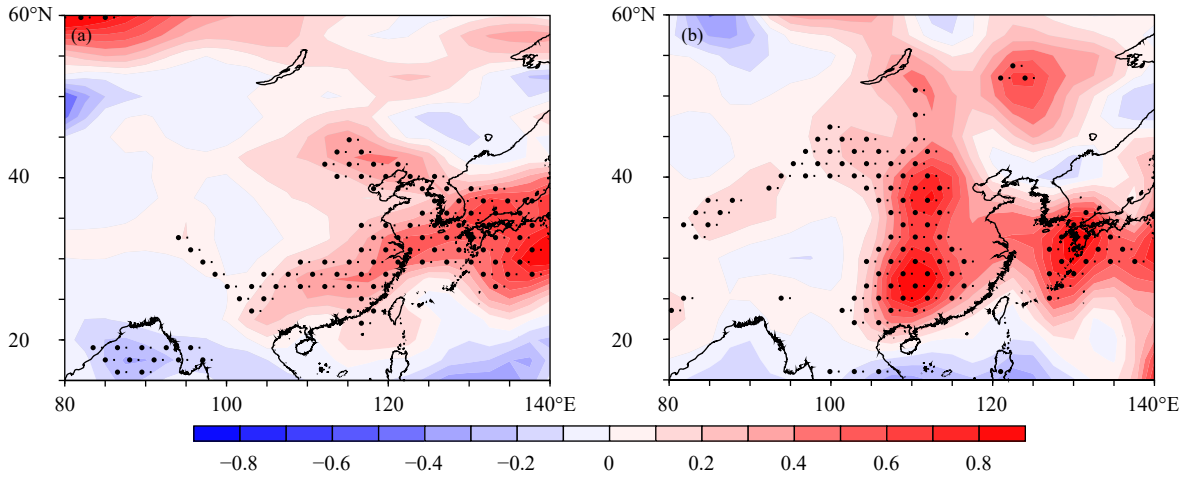


图 7 冬季 Nino3.4 指数回归的 850 hPa 天气尺度（a）纬向风变率异常和（b）经向风变率异常（单位：$(m/s)^2$；黑点区通过 90% 信度 t 检验）

Fig. 7 850 hPa synoptic-scale zonal (a) and meridional (b) wind variability anomalies (unit: $(m/s)^2$) regressed on the winter Nino3.4 index (The black dots indicate the values exceeding the 90% confidence level t-test)

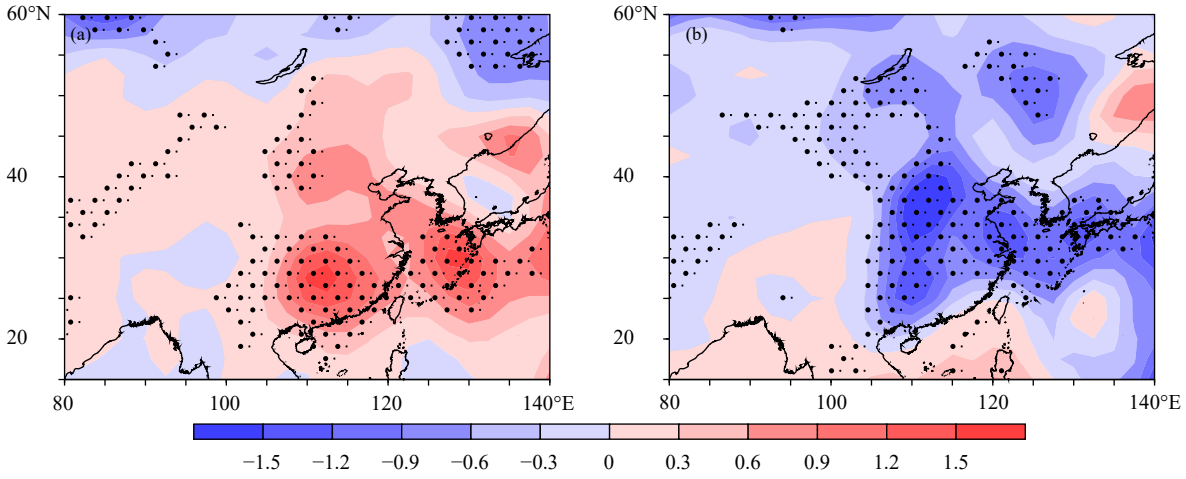


图 8　850 hPa 天气尺度经向风变率的异常合成场（a. 厄尔尼诺年，b. 拉尼娜年；单位：$(m/s)^2$；黑点区通过 95% 信度 t 检验）

Fig. 8　Composite anomalies of 850 hPa synoptic-scale meridional wind variability for (a) El Niño and (b) La Niña winters (unit: $(m/s)^2$; the black dots indicate the values exceeding the 95% confidence level t-test)

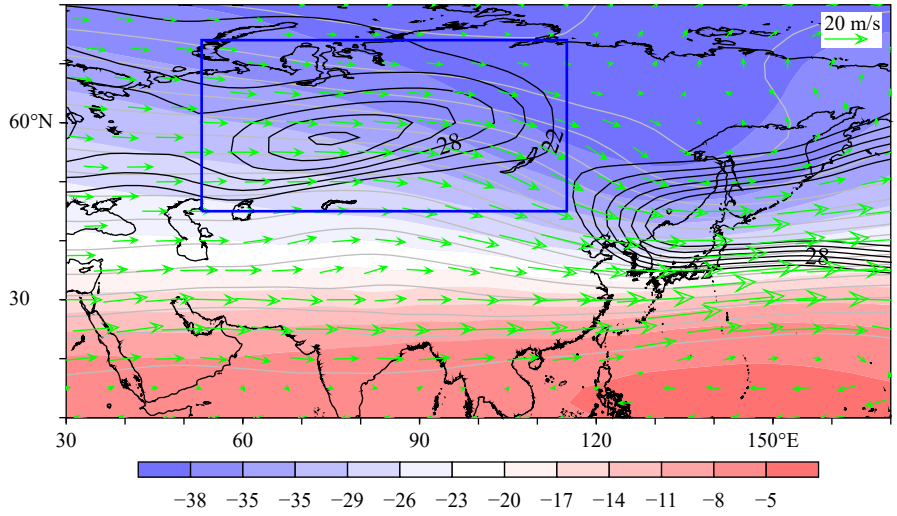


图 9　冬季平均的 500 hPa 风场（箭头）、温度场（色阶，单位：℃）、位势高度场（灰色等值线，单位：gpm）及风暴轴（黑色等值线，单位：$dagpm^2$，其气候主体区＞22 $dagpm^2$）

Fig. 9　Climatological means of wintertime 500 hPa winds (arrows), air temperature (shadings, unit: ℃), geopotential height (gray contours, unit: gpm) and storm track (black contours, unit: $dagpm^2$, climate subject area＞22 $dagpm^2$)

变扰动是北半球除了太平洋风暴轴和大西洋风暴轴外最活跃的地区，Hoskins 等（2002）将其称作西伯利亚风暴轴。它位于两大洋风暴轴之间，深处于欧亚大陆中部，具有更加复杂的地理环境，同时，这一地区被称为寒潮关键区，因此在西伯利亚上空的天气尺度瞬变涡动的异常活动会对中国冬季天气系统有显著的影响（马阳等，2017）。由此推测，ENSO 很可能是通过影响西伯利亚风暴轴来影响中国冬季天气尺度气温变率。从冬季 Nino3.4 指数回归的 500 hPa 位势高度滤波方差异常场（图 10）可以看到，西伯利亚地区及西西伯利亚的北部存在显著的异常信号，当厄尔尼诺（拉尼娜）事件发生时，西伯利亚地区风暴活动显著增强（减弱），表明 ENSO 对于天气尺度瞬变波的活动具有调制作用。通过 ENSO 冷暖位相的合成分析发现，尽管厄尔尼诺和拉尼娜对应的天气尺度瞬变波异常中心在强度和位置上存在一定差异，但这种差异很小，可认为它们的影响是准线性的（图 11）。具体而言，在厄尔尼诺（拉尼娜）年冬季，西伯利亚上空对应着位势高度场的负（正）异常及滤波方差场的显著正（负）

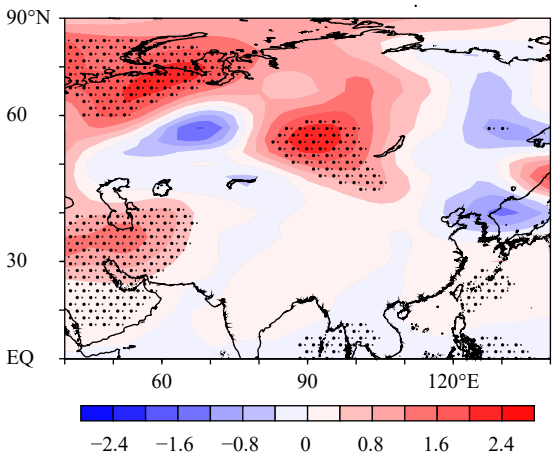


图 10 冬季 Nino3.4 指数回归的 500 hPa 位势高度滤波方差异常场（单位: dagpm²; 黑点表示通过 90% 信度 *t* 检验）

Fig. 10 500 hPa geopotential height filtered variance anomalies (unit: dagpm²) regressed on the winter Niño3.4 index (The black dots indicate the values exceeding the 90% confidence level *t*-test)

异常。根据 Lau(1988)的工作，负变高有利于风暴轴的活跃，对应西伯利亚上空的天气尺度瞬变涡动活动显著增强(图 11a)，天气尺度的气旋和反气旋会更加频繁交替，从而对东亚的冷暖空气输送也更活跃，可能导致天气尺度气温变率的显著增强。而拉尼娜年冬季，西伯利亚上空出现正变高，相应的天气尺度瞬变涡动活动异常减弱，中纬度天气过程活跃度减弱，因此中国大部分天气尺度的气温变率减小。

接下来的问题是，为什么 ENSO 不同位相导致的欧亚大陆位势高度和风暴轴变化却是相反的呢？前人的研究(Trenberth, et al, 1994; Zhang, et al, 1999; Chang, et al, 2002)已指出，在年际变化方面，北半球风暴轴与 ENSO 循环有着密切的关系。而与北半球两大洋风暴轴一样，西伯利亚风暴轴扰动动能主要来源也是斜压不稳定的能量转换(马阳等, 2017)，从冬季 Nino3.4 指数回归的风暴轴区域(60°—110°E)内纬向平均温度异常剖面(图 12a)可以看出，当冬季 Nino3.4 指数为正时，55°N 两侧的温度差异明显增大，即厄尔尼诺事件加强了冬季欧亚大陆中高纬度地区的经向温度梯度，根据热成风原理，局地大气斜压性也得到加强，有利于风暴轴的活动和下游东亚地区冬季气温的天气尺度波动的增强。图 12b 可更直观地看出风暴轴区域内的经向温度梯度明显增大，进一步佐证了上述研究结论。而在拉尼娜年冬季，上述变化基本相反。该结果与 Liess 等(2017)的研究结论一致。同时，还检查了厄尔尼诺年和拉尼娜年冬季合成的温度异常剖面(图略)，其结果定性一致。因此，ENSO 可能通过改变中纬度的经向温度梯度改变局地的大气斜压性，改变风暴轴的强度，进而影响中国天气尺度温度变率。

5 结论和讨论

基于 1960—2017 年中国国家气象信息中心整

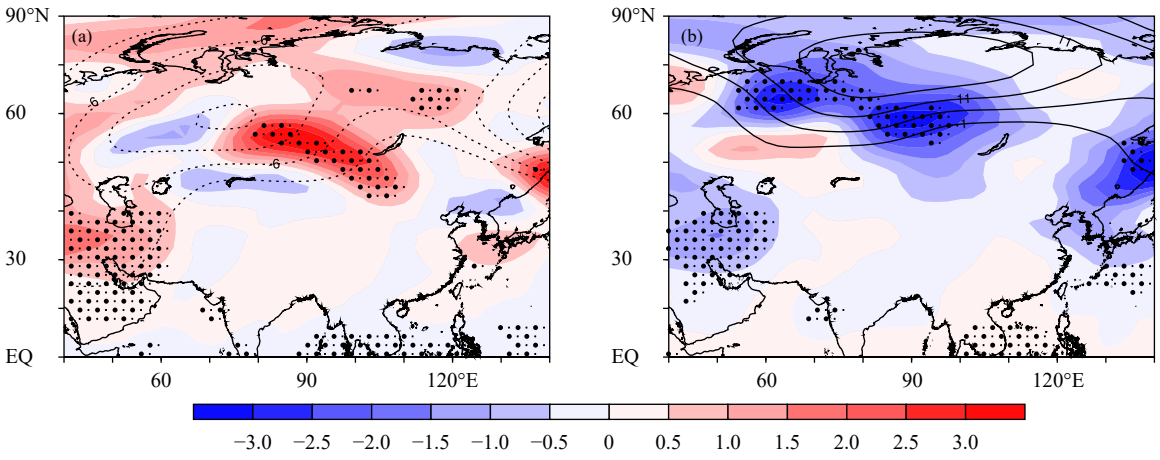


图 11 500 hPa 位势高度滤波方差场（色阶，单位: dagpm²; 黑点区通过 95% 信度 *t* 检验）及位势高度（等值线，虚线为负变高，实线为正变高，单位: gpm）的异常合成场（a. 厄尔尼诺年，b. 拉尼娜年）

Fig. 11 Composite anomalies of 500 hPa geopotential height filtered variance (shadings, unit: dagpm²; the black dots indicate values exceeding the 95% confidence level *t*-test) and geopotential height (contours, dashed line indicates negative high, solid line indicates positive high, unit: gpm) for (a) El Niño years and (b) La Niña years

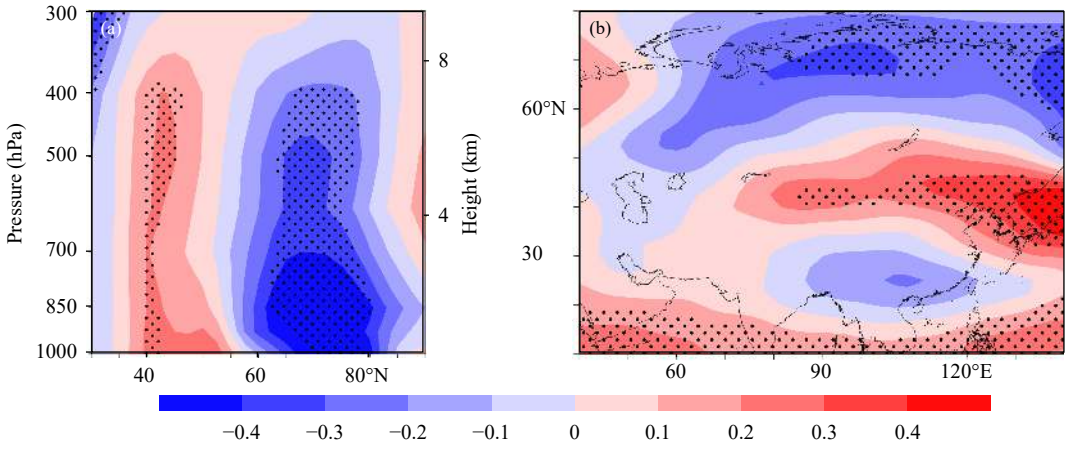


图 12　冬季 Nino3.4 指数回归的(a)欧亚大陆（60°—110°E）纬向平均的温度异常（单位：℃；黑点区通过 90% 信度 *t* 检验）和（b）500 hPa 水平温度异常（单位：℃；黑点表示通过 90% 信度 *t* 检验）

Fig. 12　(a) Eurasia (60°—110°E) zonal average temperature anomalies regressed on the winter Nino3.4 index (unit: ℃; the black dots indicate values exceeding the 90% confidence level *t*-test); (b) 500 hPa horizontal temperature anomalies regressed on the winter Nino3.4 index (unit: ℃; the black dots indicate values exceeding the 90% confidence level *t*-test)

编的 753 站逐日平均温度资料、美国国家海洋大气中心（NOAA）重建的逐月海表温度资料以及美国国家环境预测中心/国家大气研究中心（NCEP/NCAR）提供的再分析大气环流资料，分析了中国冬季天气尺度气温变率的时、空特征及其与 ENSO 事件的联系，并探讨了 ENSO 影响中国冬季天气尺度气温变率的可能物理机制。主要结论概括如下：

（1）中国冬季天气尺度气温变率具有显著的年际变化特征，1966 年气温变率最大，2008 年的气温变率最小。此外，这种气温变率还存在明显的线性变化趋势；中国冬季天气尺度气温变率呈现北强南弱分布，大值区主要位于新疆北部和东北地区，长江流域至南部沿海一带的气温变率也相对较大，3 个小值区分别位于四川盆地、云南西南部和新疆南部地区。

（2）中国冬季天气尺度气温变率的年际变化与 ENSO 存在密切的联系。ENSO 与中国东部大范围地区的冬季天气尺度气温变率呈显著正相关，在厄尔尼诺（拉尼娜）年冬季，中国气温变率主要在东北地区的南部、东南沿海大部分区域异常偏大（偏小），ENSO 对中国冬季天气尺度气温变率的影响在空间分布上是对称的。

（3）厄尔尼诺事件加强了冬季欧亚大陆中高纬度地区的经向温度梯度，根据热成风原理，局地大气斜压性得到增强，西伯利亚地区的风暴活动和下游东亚地区大气环流的天气尺度变异也随之加强，最终可能导致中国大部分地区天气尺度温度变率的显著增强；拉尼娜年冬季异常情况与之大致相反。

本研究的结果表明，ENSO 对中国高频（天气尺度）的温度变率有显著的调制作用，这将为中国的高频天气变率的季节预测提供新的参考依据。值得注意的是，尽管厄尔尼诺和拉尼娜在热带太平洋表现出了较强的非对称性，例如强度（Jin, et al, 2003；袁心仪等, 2017）和宽度（Zhang, et al, 2009, 2013），但是对于中国冬季的天气尺度气温变率以对称为主，其原因目前尚不清楚。关于 ENSO 如何导致西伯利亚风暴轴变化这一问题，鉴于其复杂性，具体的物理过程还待进一步研究。此外，气候系统中还存在着其他影响中国冬季气温变率的因子，例如天气尺度瞬变波（陈海山等, 2012）、北极海冰和欧亚大陆的积雪等，未来这方面的研究可以进一步加深对东亚天气变率的理解。

致　谢：感谢薛奥运博士对本文提出的很多宝贵意见，同时感谢南京信息工程大学气象台提供资料帮助。

参考文献

毕宝贵，张小玲，代刊. 2017. 2016 年超强厄尔尼诺背景下的强对流和极端降水天气特点. 科学通报, 62(9): 928-937. Bi B G, Zhang X L, Dai K. 2017. Characteristics of 2016 severe convective weather and extreme rainfalls under the background of super El Niño. Chinese Sci Bull, 62(9): 928-937 (in Chinese)

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)

陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系. 中国科学: 地球科学, 42(12): 1951-1965. Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity. Sci China: Earth Scie, 42(12): 1951-1965 (in Chinese)

韩文韬, 卫捷, 沈新勇. 2014. 近 50 年中国冬季气温对 ENSO 响应的时空稳定性分析研究. 气候与环境研究, 19(1): 97-106. Han W T, Wei J, Shen X Y. 2014. Stability analysis in space-time on the response of winter temperature in China to ENSO in the past 50 years. Climatic Environ Res, 19(1): 97-106 (in Chinese)

康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 2010. 1951—2006 年期间我国寒潮活动特征分析. 高原气象, 29(2): 420-428. Kang Z M, Jin R H, Bao Y Y. 2010. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951—2006. Plateau Meteor, 29(2): 420-428 (in Chinese)

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

刘明竑, 任宏利, 张文君等. 2018. 超强厄尔尼诺事件对中国东部春夏季极端降水频率的影响. 气象学报, 76(4): 539-553. Liu M H, Ren H L, Zhang W J, et al. 2018. Influence of super El Niño events on the frequency of spring and summer extreme precipitation over eastern China. Acta Meteor Sinica, 76(4): 539-553 (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)

陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气科学, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. Sci Atmos Sinica, 22(4): 399-407 (in Chinese)

王磊, 张文君, 祁莉等. 2014. 两类 La Niña 季节演变过程的海气耦合特征对比. 海洋学报, 36(1): 72-85. Wang L, Zhang W J, Qi L, et al. 2014. Contrasting air-sea features associated with two types of La Niña during the seasonal evolution. Acta Oceanol Sinica, 36(1): 72-85 (in Chinese)

王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因. 大气科学, 30(6): 1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 Years and the possible reasons. Chinese J Atmos Sci, 30(6): 1068-1076 (in Chinese)

汪子琪, 张文君, 耿新. 2017. 两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响. 气象学报, 75(4): 564-580. Wang Z Q, Zhang W J, Geng X. 2017. Different influences of two types of ENSO on winter temperature and cold extremes in northern China. Acta Meteor Sinica, 75(4): 564-580 (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)

袁心仪, 张文君, 耿新. 2017. ENSO 发展和衰亡阶段中非线性项的作用. 气象学报, 75(5): 784-796. Yuan X Y, Zhang W J, Geng X. 2017. Effects of nonlinear terms during ENSO developing and decaying phases. Acta Meteor Sinica, 75(5): 784-796 (in Chinese)

袁媛, 晏红明. 2012. 不同分布型 La Niña 事件及热带大气的响应特征对比. 科学通报, 57(34): 3312-3322. Yuan Y, Yan H M. 2013. Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere. Chinese Sci Bull, 58(3): 406-415

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)

张文君, 雷徐奔, 耿新等. 2018. ENSO 对中国南方降水低频变率的可能影响. 大气科学学报, 41(5): 585-595. Zhang W J, Lei X B, Geng X, et al. 2018. Possible impacts of ENSO on the intra-seasonal variability of precipitation over southern China. Trans Atmos Sci, 41(5): 585-595 (in Chinese)

赵振国. 1989. 厄尔尼诺现象与我国温度. 气象, 15(7): 26-30. Zhao Z G. 1989. El Niño and China's temperature. Meteor Mon, 15(7): 26-30 (in Chinese)

Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. J Climate, 15(16): 2205-2231

Ashok K, Yamagata T. 2009. Climate change: The El Niño with a difference. Nature, 461(7263): 481-484

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

Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. J Atmos Sci, 33(8): 1607-1623

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. 1998. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relationship to the global circulation. Max-Planck-Institute fur Meteorologic Report No. 250

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

Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on southeast Asian rainfall during boreal winter. J Geophys Res, 115(D24): D24122

Feng J, Li J P. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over

South China. J Geophys Res, 116(D13): D13102

Geng X, Zhang W J, Stuecker M F, et al. 2017a. Decadal modulation of the ENSO-East Asian winter monsoon relationship by the Atlantic Multidecadal 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

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

Hoskins B J, Hodges K I. 2002. New perspectives on the northern Hemisphere winter storm tracks. J Atmos Sci, 59(6): 1041-1061

Jin F F, An S I, Timmermann A, et al. 2003. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. Geophys Res Lett, 30(3): 1120

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

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

Lau N C. 1979. The observed structure of tropospheric stationary waves and the local balances of vorticity and heat. J Atmos Sci, 36(6): 996-1016

Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. J Atmos Sci, 45(19): 2718-2743

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, Agrawa S, Chatterjee S, et al. 2017. A Teleconnection between the West Siberian Plain and the ENSO region. J Climate, 30(1): 301-315

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

Shinoda T, Hurlburt H E, Metzger E J. 2011. Anomalous tropical ocean circulation associated with La Niña Modoki. J Geophys Res, 116(C12): C12001

Stuecker M F, Timmermann A, Jin F F, et al. 2013. A combination mode of the annual cycle and the El Niño/Southern Oscillation. Nat Geosci, 6(7): 540-544

Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. 2015. Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific Anticyclone. J Climate, 28(3): 1093-1111

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

Van Loon H, Madden R A. 1981. The Southern Oscillation. Part I: Global associations with pressure and temperature in northern winter. Mon Wea Rev, 109(6): 1150-1162

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, 103(C7): 14241-14259

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

Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. Climate Dyn, 29(2-3): 113-129

Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. J Climate, 22(3): 730-747

Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. Geophys Res Lett, 34(2): L02708

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, Li J P, Jin F F. 2009. Spatial and temporal features of ENSO meridional scales. Geophys Res Lett, 36(15): L15605

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, Jin F F, Turner A. 2014. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift. Geophys Res Lett, 41(11): 4020-4026

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