

巩婷, 易笑园. 厄尔尼诺-南方涛动对华东地区春季降水影响的不对称性[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(3): 1-10.
GONG Ting, YI Xiaoyuan. Asymmetric effect of El Niño - Southern Oscillation on the spring precipitation over East China[J].
Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.005. (in Chinese)

厄尔尼诺-南方涛动对华东地区春季降水影响的不对称性

巩婷¹, 易笑园²

(1. 中国民用航空华北地区空中交通管理局天津分局, 天津 300399; 2. 天津市气象局, 天津 300074)

摘要: 利用 1958—2019 年的观测和再分析数据集, 对冷、暖两类厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño - Southern Oscillation, ENSO) 事件与后期华东地区春季降水之间的关系进行了分析。结果表明: (1) 在暖 ENSO 事件中, 华东春季降水量与前冬季 ENSO 海面温度异常存在较强的正相关关系。在冷 ENSO 事件中, 这种强正相关向内陆地区西移, 主要集中在江西和湖南。(2) 暖 ENSO 事件通常会导导致浙江、江苏和福建等沿海省份春季降水量过剩, 而冷 ENSO 事件往往导致江西和湖南降水偏少。这归因于 ENSO 对大气环流的非线性影响。(3) 与暖 ENSO 事件相比, 冷 ENSO 事件引起的海面温度异常中心明显西移, 造成异常低层大气环流的西移, 最终导致华东降水的西移效应。(4) 通过分析和发现, 强调了华东春季降水对 ENSO 的非线性响应, 这对华东地区的季节性气候预测具有重要意义。

关键词: 春季降水; 华东地区; 厄尔尼诺 (El Niño); 大气环流

中图分类号: P461.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)03-0000-00

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.000

Asymmetric effect of El Niño-Southern Oscillation on the spring precipitation over East China

GONG Ting¹, YI Xiaoyuan²

(1. Tianjin Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Tianjin 300399, China; 2. Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074, China)

Abstract: Using the observations and reanalysis datasets from 1958 to 2019, this study reveals an asymmetric effect of El Niño - Southern Oscillation (ENSO) on the following spring precipitation over East China. The results are listed as below. (1) During the years with positive ENSO phases, a strong positive correlation between the spring precipitation and the preceding winter ENSO sea surface temperature (SST) anomalies over Zhejiang and Jiangsu provinces. During the years with negative ENSO phases, such a strong positive correlation shifts westwards to inland areas, mainly in Jiangxi and Hunan provinces. (2) To be specific, the El Niño events usually result in a precipitation surplus in the decaying spring over Zhejiang, Jiangsu and Fujian provinces, while the La Niña events usually lead to a precipitation deficit in the decaying spring over Jiangxi and Hunan provinces. This is attributed to the nonlinear effects of ENSO on the atmospheric circulation. (3) Compared with El Niño, the abnormal center of SST anomalies induced by La Niña evidently extends westwards, inducing a westward movement

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41575049)

第一作者简介: 巩婷, 女, 工程师, 主要从事中短期天气预报及相关研究工作, 103129597@qq.com。

通信作者简介: 易笑园, 女, 正高级工程师, 主要从事天气预报及相关研究工作, yixy123@sina.com。

of the anomalous low-level atmospheric circulation, which eventually results in a westward-shifted effect on the following spring precipitation over East China. (4) The findings emphasize the nonlinear responses of the spring precipitation over East China to ENSO, which has important implications for the seasonal climate predictions over East China.

Keywords: spring precipitation; East China; El Niño; atmospheric circulation

引言

华东地区自然环境条件优越,人口密集,是我国重要的农业生产基地,也是中国经济文化最发达地区之一。已有的研究指出,随着全球气候变暖,华东地区降水量有增加的趋势,但是华东汛期降水过程推后,会造成春季雨量减少,导致春季干旱发生^[1-2]。2011年春季长江中下游地区发生严重干旱,且干旱维持时间长,波及范围广,使得该地区的农业和渔业遭受重创,造成了巨大经济损失^[3];而到了6月长江中下游地区降水量较常年同期明显偏多,使得长江流域发生旱涝急转^[4-5]。因此,研究华东地区春季降水异常的成因,对华东地区的民生和社会经济具有重要意义。

众所周知,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中最强的年际变化信号^[6-7],常会导致全球气候异常,也是导致东亚季风异常和我国旱涝发生的重要因素。ENSO以“遥相关”的方式通过大气环流作用于东亚季风系统的各个部分,影响天气气候异常^[8-9]。当El Niño达到冬季成熟期时,东亚冬季风被异常反气旋西北侧的西南风削弱,而夏季风则在次年夏季得到加强^[10]。在El Niño发展期,西太平洋副热带高压偏弱,西南气流北上偏弱,导致我国北方降水偏少^[11];在El Niño衰减期,我国江南北部等地区降水偏多,往往产生严重洪涝^[12-14]。另外,也有研究揭示了ENSO通过影响大气环流进而间接影响我国南方降水^[15-17]。

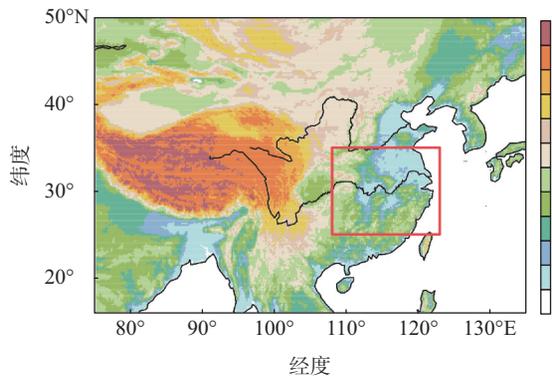
东亚季风降水与ENSO循环的各个阶段密切相关,许多研究分析了El Niño和拉尼娜(La Niña)信号对我国夏季降水的影响^[18]。金祖辉等^[19]指出,El Niño期间长江以南地区多雨,以北地区少雨;但是La Niña期间降水的异常特征不清楚。Zhang等^[20]发现,在冬季El Niño期间华南地区降水偏多,El Niño对东亚冬季风的影响显著,但是La Niña的影响不显著。综上所述,由于气候系统中存在的非线性变化特

征,El Niño和La Niña事件并非完全相反,而是表现出明显的不对称性^[21-22]。通常来说,厄尔尼诺的海面温度(以下简称“海温”)异常中心强度是高于拉尼娜的海温异常的^[23]。从空间结构上,与El Niño相比,La Niña现象成熟期的海温异常中心更偏向西。它们的持续时间甚至存在明显的不对称性:El Niño现象在其成熟阶段后的第2个夏季趋于迅速衰减,而La Niña海温异常通常持续更长时间^[24],这种不对称性还体现在对ENSO的气候响应上^[25]。例如,Li等^[26]最近研究了ENSO与中南半岛降水的联系,发现La Niña对春季降水的影响比El Niño的影响更强。因此,ENSO的非线性变化给区域气候预测带来了巨大挑战。本文根据1958—2019年华东地区气象观测站降水资料、海温资料以及日本55 a再分析(the Japanese 55-year Reanalysis, JRA-55)资料,分析了ENSO的非对称性效应对华东地区春季降水的影响,以为华东地区春季降水预测提供依据。

1 资料与方法

使用的资料包括:(1)降水资料来源于东英吉利大学气候研究中心(Climatic Research Unit at the University of East Anglia)提供的分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的逐月降水数据,相关数据取自https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.04;研究区域为华东地区 $107.5^\circ \sim 125.0^\circ \text{E}$, $25^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ (图1红色框范围)。(2)逐月海温数据来源于英国气象局哈德莱中心,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,相关数据取自<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html>。(3)日本气象厅提供的55 a再分析数据集,要素包括高度场、风场等,其分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$,相关数据取自https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html。(4)为了表述ENSO的不同阶段和强度,采用美国气候预测中心(Climate Prediction Center of the United States)提供的海洋尼诺指数(the Oceanic Niño Index, ONI),相关数据取自http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php。

ONI 是指 Niño3.4 地区(5°N~5°S, 120°W~170°W)海平面温度距平。ONI 的阈值是+0.5 °C 和-0.5 °C (连续 5 个月超过+0.5 °C 预示着 El Niño, 连续 5 个月低于-0.5 °C 预示着 La Niña)。文中, 春季所指为 1958—2019 年的 3—5 月。



红框—华东地区; 色阶—海拔高度, 单位: m。

图 1 中国东部地形分布

Fig.1 Topographic distribution in eastern China

研究中使用的方法包括相关分析、合成分析等常用统计方法和诊断分析方法, 使用的检验方法主要为 t 检验。本文的合成分析年份是根据 ONI 进行选择, 选取了 10 个最强的 El Niño 事件和 10 个最强 La Niña 事件 (ONI 的绝对值大于 1), 表 1 给出了相应的衰减年份。文中合成变量的异常值是通过距平场计算, 去除了 62 a 的平均状态。为了避免气候变化的可能影响, 如全球变暖, 统计计算中删除了所有数据的长期趋势。衰减年份的选择是基于前一个冬季的 ONI, 例如, 1958 年是根据 1957 年 12 月—1958 年 2 月的 ONI 选择结果。

表 1 合成分析中使用的 1958—2019 年期间 El Niño 和 La Niña 衰减年份列表

Table 1 List of the El Niño and La Niña decaying years during 1958–2019 used in the composite analysis

事件	衰减年份				
El Niño	1958	1964	1966	1973	1983
	1987	1992	1998	2010	2016
La Niña	1971	1974	1976	1985	1989
	1996	1999	2000	2008	2011

2 华东地区春季降水与 ENSO 的关系

为了分析华东春季降水和 ENSO 之间的关系, 将华东地区 (107.5°~125.0°E, 25°~35°N, 进行区域

平均, 来表征华东地区的春季降水变化。由 1958—2019 年华东地区春季降水时间序列 (图 2) 可以看出, 华东地区春季降水呈现出较为明显的年际变化, 但是在 20 世纪 90 年代后期, 春季降水呈现减少的趋势。有研究指出, 华东地区的降水可能和热带中、东太平洋海温的异常变化有关^[27-28]。由图 2 可知, 华东降水和 ONI 呈显著的正相关关系, 相关系数达到 0.48, 显著性水平超过了 0.001。

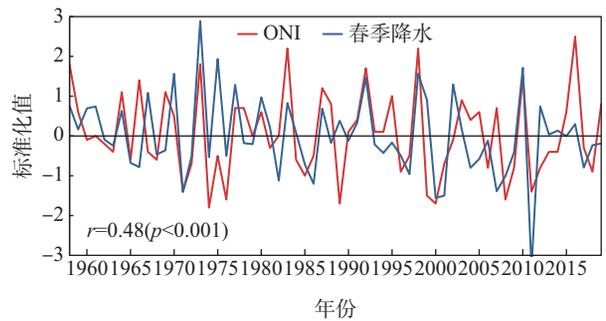


图 2 1958—2019 年华东地区春季降水、前冬 ONI 标准化时间序列

Fig.2 Normalized time series of spring precipitation over East China and the preceding winter ONI during 1958–2019

进一步验证华东春季降水与太平洋海温的关系, 给出了华东春季降水与太平洋前冬、春季海温的相关分布。由图 3 可知, 华东地区春季降水与前冬中东太平洋区域的海温存在显著正相关, 相关系数在 0.4 以上 (图 3a), 并且这种相关能够持续至春季 (图 3b), 但相关系数明显减弱。也就是说, ENSO 是影响华东春季降水的重要强迫信号, 暖 ENSO 事件衰减年, 春季华东地区降水偏多; 冷 ENSO 事件衰减年, 春季华东地区降水偏少。

值得注意的是, 华东春季降水与 ENSO 之间的关系表现出明显的不对称性。对于 ONI 大于 0 的年份, 即暖 ENSO 事件阶段, 冬季 ONI 主要与江苏、浙江和江西等省份的春季降水量呈显著正相关关系 (图 4a)。然而, 在 ONI 小于 0 的年份, 即冷 ENSO 事件阶段, 这种显著正相关向西转移到江西和湖南 (图 4b), 并且在江苏和浙江的正相关性明显减弱。这意味着, 与暖 ENSO 事件相比, 冷 ENSO 事件对华东春季降水的影响范围在向西移动。上述分析表明, ENSO 与华东春季降水存在密切联系, 但是降水对 ENSO 的响应存在非对称性, 这对华东地区的降水预测具有重要意义。

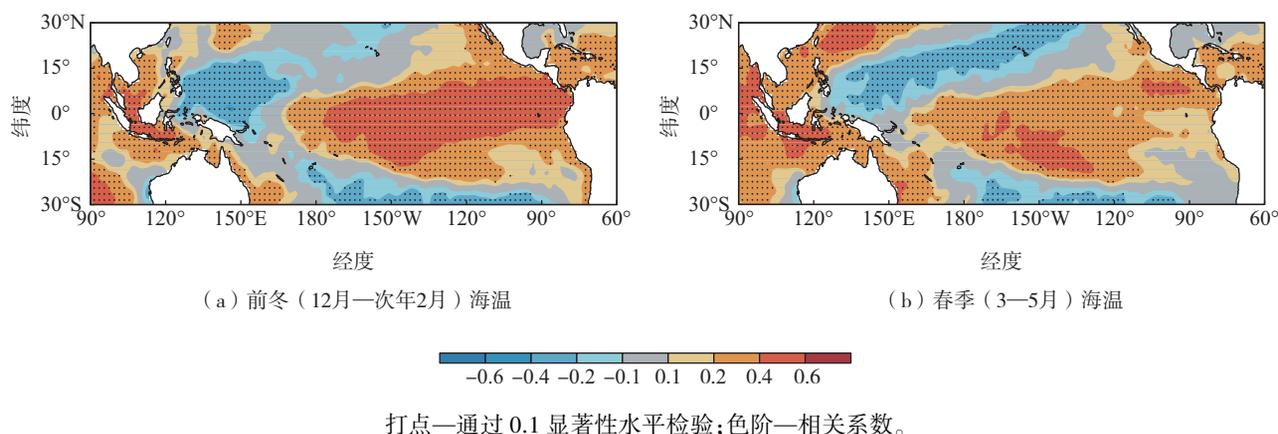


图3 华东春季降水量与海温的相关系数分布

Fig.3 Correlation coefficients between the spring precipitation and SST over East China

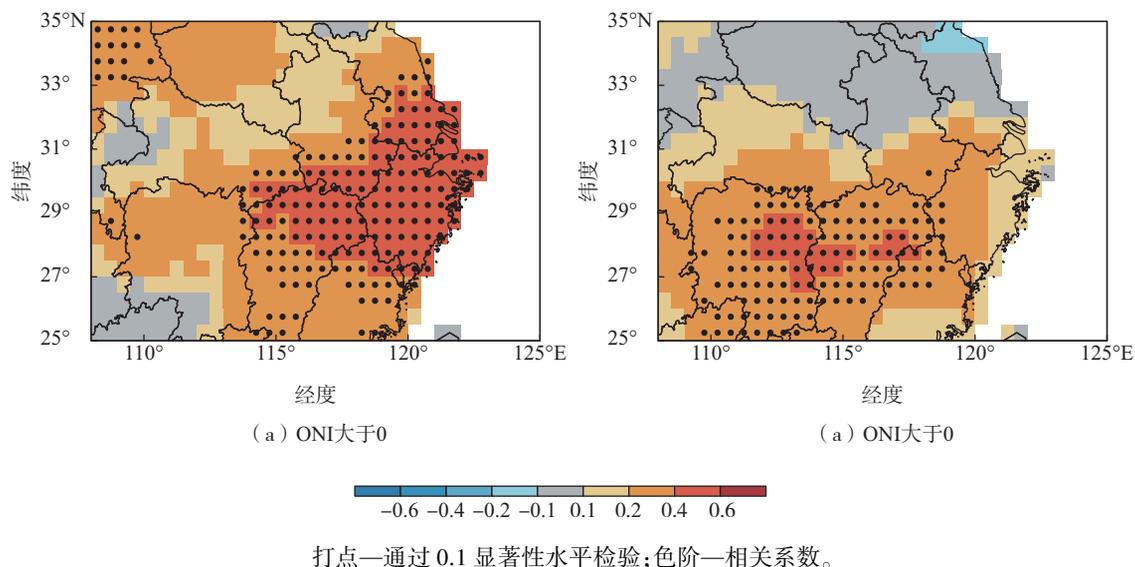


图4 春季降水量与前冬 ONI 之间的相关系数分布

Fig.4 Correlation coefficients between the spring precipitation anomalies and the preceding winter ONI

3 春季东亚大气环流对 ENSO 的响应

为了进一步探讨 ENSO 对春季降水影响的非对称效应,根据合成分析,对在春季衰减期冷、暖 ENSO 的分布特征进行检查。在暖 ENSO 事件中,正异常海温覆盖了热带东太平洋,并延伸到太平洋中部(图 5a)。相反,在冷 ENSO 事件中,负异常海温主要分布在热带中太平洋,甚至延伸到热带西太平洋(图 5b)。这意味着,与暖 ENSO 事件相比,冷 ENSO 春季衰退期间的 ENSO 海温异常中心是向西移动的。这种冷、暖两类 ENSO 事件成熟阶段的不对称性对气候的影响存在差异。例如:陈文^[29]指

出,La Niña 对东亚冬季风循环的影响与 El Niño 大致相反,但其影响不如 El Niño 的影响显著;李天然等^[30]认为,华南冬半年降水对 ENSO 信号存在不对称响应。

冷 ENSO 事件时,海温异常的西移表明:在冷 ENSO 衰变的春季,大气环流的响应可能向西移动。为了验证这一假设,图 6 给出了不同情况下 850 hPa 的流函数和旋转风异常分布情况。在暖 ENSO 春季衰退期,旋转风场在北太平洋西部表现出明显的异常低层反气旋,流函数异常中心位于菲律宾群岛以东(图 6a),华东处于异常西南风场的边缘。与此相反,在冷 ENSO 春季衰退期,北太平洋西部有一个强

烈的异常低层气旋(图 6b)。更重要的是,流函数异常中心向西移动,穿过菲律宾群岛,异常风场相应向

西延伸。在这种情况下,华东地区受到异常东北风的影响。

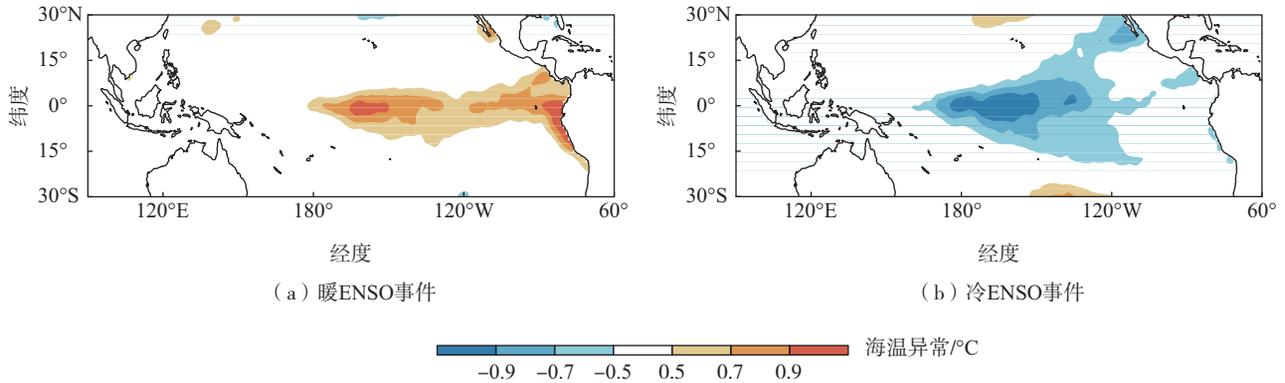
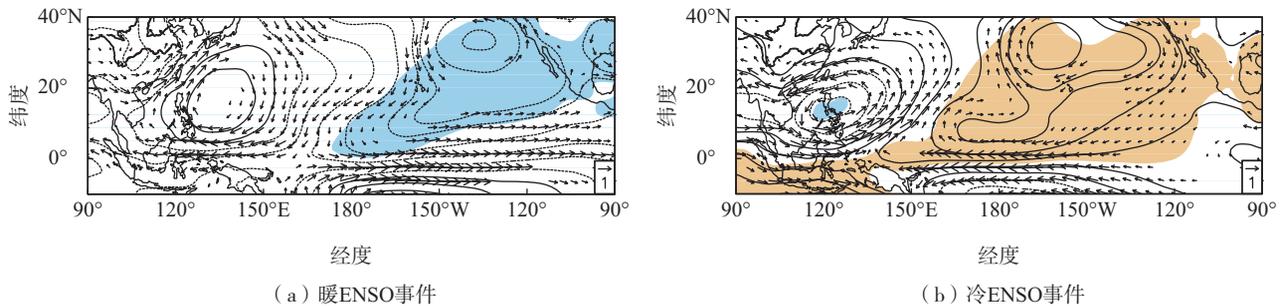


图5 春季海温异常的合成分析
Fig.5 Composite analysis of the spring SST anomalies



等值线—流函数,实线代表正值,虚线代表负值,间隔 0.4,单位: $m^2 \cdot s^{-1}$; 箭头—旋转风,单位: $m \cdot s^{-1}$, 箭头表示通过 0.1 显著性水平检验;色阶—通过 0.1 显著性水平检验,蓝色代表负值区,黄色代表正值区。

图6 850 hPa 春季流函数和旋转风的合成分析
Fig.6 Composite analysis of the spring stream function and cyclostrophic wind at 850 hPa

如前所述,低层大气的环流异常在水汽输送中起着决定性作用。在暖 ENSO 事件的春季衰退期,异常增强的西南风将过多的水分从南海输送到我国东南部(图 7a)。伴随着异常水汽通量,东海至我国东部地区出现明显的水汽辐合。由垂直运动分析(图 7a)可知,赤道东太平洋持续偏高的海温使得对流增强,加热异常会激发出罗斯贝波,使其西侧出现西北太平洋异常反气旋,而在我国华东地区呈现上升运动。结合图 7a 中西南风带来的水汽输送,对于华东地区,显著的水汽辐合从华南地区一直延伸至江苏南部,并且伴随上升运动,将有利于浙江、江苏和福建等沿海省份的春季降水发生。与之相反,在 ENSO 事件的春季衰退期,异常东北风阻碍了水汽向华东的输送(图 7b)。西北太平洋地区是显著的上升运动(图 8b),对比图 8a 来说,整个区域明显向西移动,而相应的我国东南部是下沉运动,并且下沉

区域西移。在这种情况下,与暖 ENSO 事件相比,异常水汽通量场以及下沉运动均表现出向西移动,显著的水汽辐散区主要位于浙江、江西和湖南等省份并伴随着下沉运动,将导致这些地区春季降水不足。

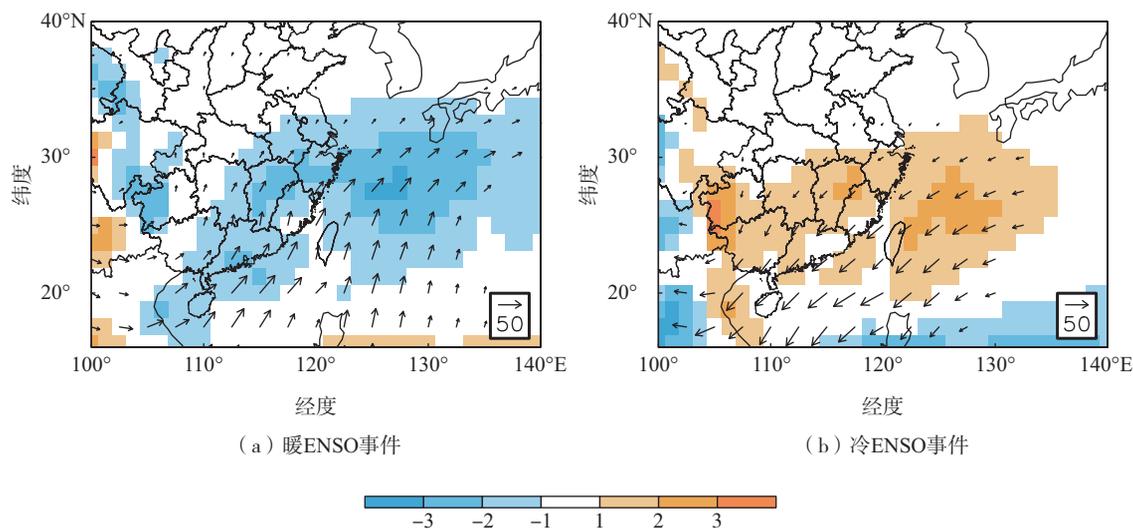
4 结论与讨论

在人口稠密、以农业为基础的华东地区,春季降水异常对当地人民的生计和社会经济至关重要。因此,本文主要研究华东春季降水及其对 ENSO 的非对称响应。总体而言,ENSO 在其春季衰变期与大气环流密切相关。例如,温暖的 ENSO 海温异常(即厄尔尼诺事件)在衰变的春季激发了北太平洋西部的异常低层反气旋,增强了西南风,反之亦然。因此,ENSO 对华东春季降水有明显影响。

然而,ENSO 事件中存在不对称,这将对大气造

成不对称影响。通常情况下,暖 ENSO 事件中的异常暖海温从发展期到衰退阶段都存在于热带东太平洋。在暖 ENSO 春季衰减期,北太平洋西部菲律宾群岛以东形成了一个异常的低层反气旋。增强的西南风在华东地区带来过多的水汽,导致江苏、浙江和江西北部出现异常水汽辐合。相反,冷 ENSO 事件中的异常冷海温略微向西延伸,特别是在衰减春季,海温异常中心明显向西移动。这导致异常低层气旋

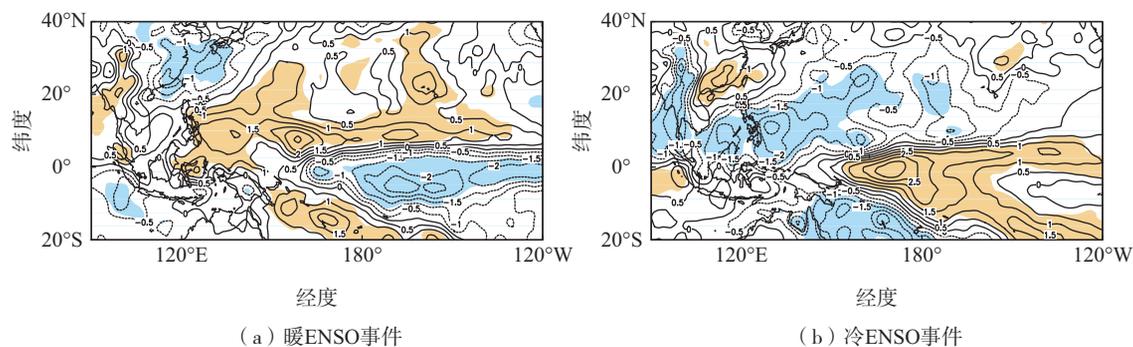
在北太平洋西部向西移动。由此产生的异常东北风场相应向西移动,造成江西、湖南春季出现异常水汽散度。因此,华东春季降水异常对于冷 ENSO 事件的响应,呈现向西移动。通过分析进一步证实,华东春季降水对 ENSO 的响应表现出明显的不对称性。具体而言,在暖 ENSO 事件衰退春季,江苏、浙江和江西北部降水偏多,而江西和湖南在冷 ENSO 事件衰退春季通常会出现降水偏少现象。



箭头—水汽通量,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,箭头表示通过 0.1 显著性水平检验;色阶—水汽通量散度,单位: $10^{-5}\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,色阶表示通过 0.1 显著性水平检验。

图 7 春季整层水汽通量及其散度的合成分析

Fig.7 Composite analysis of the spring water vapor flux integrated from 300 to 1000 hPa and its divergence



等值线—垂直运动场,实线代表正值,虚线代表负值,间隔 0.5,单位: $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$;色阶—通过 0.1 显著性水平检验,蓝色代表负值区,黄色代表正值区。

图 8 春季 500 hPa 垂直运动场的合成分析

Fig.8 Composite analysis of the spring vertical motion field at 500 hPa

在本研究中,强调了 ENSO 对华东春季降水的不对称影响,春季降水对暖、冷 ENSO 海温异常的响应存在明显差异,这对华东地区的季节性预测至关

重要。这些结果将有助于认识华东春季降水异常的规律,但对大气环流异常的机理研究尚不深入,今后需要继续开展研究,以便进一步揭示其变化规律和

物理机制。

参考文献:

- [1] 白爱娟,刘晓东.华东地区近50年降水量的变化特征及其与旱涝灾害的关系分析[J].热带气象学报,2010,26(2):194-200.
- [2] 金大超,管兆勇,蔡佳熙,等.近50年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关[J].大气科学,2010,34(5):947-961.
- [3] 国家气候中心.2011年5月全国气候影响评价[R].北京:国家气候中心.
- [4] 司东,柳艳菊,马丽娟,等.2011年初夏我国长江中下游降水的气候特征及成因[J].气象,2012,38(5):601-607.
- [5] 李勇.2011年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探[J].气象,2016,42(9):1114-1123.
- [6] WANG B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades[J]. J Climate, 1995, 8(2): 267-285.
- [7] 陈丽娟,袁媛,杨明珠,等.海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J].应用气象学报,2013,24(5):521-532.
- [8] 吴胜安,邢彩盈,朱晶晶.南海区域对流活动的气候特征及其与 ENSO 的关系[J].海洋气象学报,2019,39(4):75-82.
- [9] 李琳,李崇银,谭言科. ENSO 年冬季北半球平流层大气环流异常特征分析[J].气象科学,2008,28(4):355-362.
- [10] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: a diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events[J]. J Meteor Soc Japan, 1996, 74(1):49-62.
- [11] 张人禾,闵庆焯,苏京志.厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响:西北太平洋异常反气旋的作用[J].中国科学:地球科学,2017,47(5):544-553.
- [12] 赵树云,陈丽娟,崔童. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响[J].大气科学,2017,41(4):857-868.
- [13] 郭飞燕,左卫强,郭飞龙,等.伴随 IOD 型和独立型 ENSO 对山东气候年际变化的影响[J].海洋气象学报,2017,37(4):34-48.
- [14] WEN N, LI L, LUO J J. Direct impacts of different types of El Niño in developing summer on East Asian precipitation[J]. Climate Dyn, 2020, 55(5/6): 1087-1104.
- [15] 李锦,李春.中国东南春季降水异常特征及其与 ENSO 关系的年代际变化[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(9):1-8.
- [16] 李超,张庆云.春季长江中下游旱涝的环流特征及对前期海温异常的响应[J].气象学报,2013,71(3):452-461.
- [17] 吴珊珊,邹海波,胡菊芳. ENSO 对江西省春季降水的影响[J].气象与减灾研究,2010,33(3):16-21.
- [18] 王黎娟,蔡聪,张海燕.两类 ENSO 背景下中国东部夏季降水的环流特征及关键系统.大气科学学报,2020,43(4):617-629.
- [19] 金祖辉,陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究[J].大气科学,1999,23(6):663-672.
- [20] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. Adv Atmos Sci, 1999, 16(2): 229-241.
- [21] TIMMERMANN A, AN S I, KUG J S, et al. El Niño - southern oscillation complexity [J]. Nature, 2018, 559(7715):535-545.
- [22] 郑玉琼,陈文,陈尚锋. CMIP5 模式对春季北极涛动影响后期冬季 ENSO 不对称性的模拟能力分析[J].大气科学,2020,44(2):435-454.
- [23] AN S I, JIN F F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO [J]. J Climate, 2004, 17(12): 2399-2412.
- [24] OKUMURA Y M, DESER C. Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña [J]. J Climate, 2010, 23(21): 5826-5843.
- [25] CHOU C A, LO M H. Asymmetric responses of tropical precipitation during ENSO [J]. J Climate, 2007, 20(14): 3411-3433.
- [26] LI G, GAO C J, LU B, et al. Inter-annual variability of spring precipitation over the Indo-China Peninsula and its asymmetric relationship with El Niño-Southern Oscillation [J]. Climate Dyn, 2021, 56(7): 2651-2665.
- [27] 尹志聪,王亚非.江淮夏季降水季节内振荡和海气背景场的关系[J].大气科学,2011,35(3):495-505.
- [28] 陈兵,蒋元春,李栋梁,等.江淮梅雨对东亚副热带夏季风进程及海温异常的响应[J].气象科学,2020,40(5):669-678.
- [29] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J].大气科学,2002,26(5):595-610.
- [30] 李天然,张人禾,温敏. ENSO 对中国冬半年降水影响的不对称性及机制分析[J].热带气象学报,2017,33(1):1-10.