

# ENSO组合模态可预测性的季节-年代际变化

徐怡然<sup>1,2</sup>, 郑飞<sup>2</sup>, 杨若文<sup>1\*</sup>

(1. 云南大学, 云南 昆明 650091; 2. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境研究中心, 北京 100029)

**摘要:** 厄尔尼诺-南方涛动组合模态(C-mode)是厄尔尼诺衰减期西北太平洋上空异常反气旋发展的主要驱动力,通常可以形成水汽输送通道,导致我国南部地区降水增多并发生严重的洪涝灾害,而在拉尼娜期间则情况相反。利用1981—2020年美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心再分析数据集的表面风场资料分析了C-mode可预测性的季节-年代际变化。结果表明:C-mode在2000年以后的可预测性明显下降,主要原因是其变率减小、强度减弱、信噪比降低等。在季节尺度上,C-mode存在“秋季预报障碍”,这与信号的季节循环密切关联,当C-mode在秋季进入衰退期时,信号强度最弱、变率最小,因此其秋季的可预测性降低。

**关键词:** ENSO组合模态; C-mode可预测性; 季节-年代际

**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0083-09

## 0 引言

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋区域最强的海气耦合振荡现象,是由于海洋热力与大尺度环流异常对全球气候和生态环境产生的显著影响<sup>[1-8]</sup>。ENSO的成熟期通常发生在冬季,伴随着东亚沿岸较弱的冬季季风<sup>[9-11]</sup>。因此,在ENSO发生的冬季和次年春季,中国东南部和韩国的气候比正常情况更温暖湿润<sup>[12-13]</sup>。在厄尔尼诺衰减期,我国长江流域多次发生严重的亚洲夏季季风洪水事件,在拉尼娜期间情况则相反<sup>[14]</sup>。许多研究表明,热带太平洋热状态的变化不但能影响热带地区的环流和天气,甚至能够影响全球的环流和天气。

HARRISON等<sup>[15]</sup>发现由厄尔尼诺引起的西北太平洋地区正的海平面气压异常可以从成熟年冬季一直维持到次年夏季,这是西北太平洋异常反气旋(Western North Pacific Anomalous Anticyclone, WNPAC)的一种体现。STUECKER等<sup>[16-17]</sup>对热带太

平洋(10°S~10°N, 100°E~60°W)表面风场进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解发现,第一模态(EOF1)空间场表现为沿赤道准对称的西风异常,是厄尔尼诺风场的主要特征,第一模态时间系数(PC1)呈现出明显的年际变化,正异常均对应一次厄尔尼诺事件,并且与Nino3.4指数变化高度一致,相关系数为0.86,因此,EOF1能够从空间和时间两个方面表征ENSO模态;第二模态(EOF2)空间场表现为WNPAC和赤道以南的异常气旋,呈现出径向反对称结构,第一模态时间系数(PC2)的功率谱峰值为 $1 \pm f_E$  ( $f_E$ 为ENSO的功率谱峰值),ENSO与暖池年循环的非线性相互作用可产生ENSO组合模态(Combination Mode, C-mode)。该组合模态的周期与WNPAC接近,并在空间场上产生西北太平洋反气旋式环流异常。目前针对WNPAC的形成和维持机制主要有以下4个观点:ZHANG等<sup>[9]</sup>提出西北太平洋区域由于降水减少,有利于对流冷却,从而促进了WNPAC的形成;WANG等<sup>[18]</sup>提出了风-蒸发-海温正反馈机制;YANG等<sup>[19]</sup>

收稿日期:2022-12-20。

基金项目: 云南大学研究生科研创新基金项目资助(2021Y349)。

作者简介: 徐怡然(1998-),女,硕士在读,主要从事海气相互作用方面的研究。E-mail: xuyiran@mail.ynu.edu.cn

\*通信作者: 杨若文(1982-),男,教授,博士,主要从事中国低纬高原气候时空变异及其机理研究。E-mail: yangruowen@ynu.edu.cn

和XIE等<sup>[20]</sup>提出印度洋电容器效应;WU等<sup>[21-22]</sup>在近年提出一种新的WNPAC的维持机制——风-湿焓平流强迫机制。在以上4个理论中,风-湿焓平流强迫机制不依赖于海气相互作用过程,而是一种纯粹的大气内部动力和热力过程,这便是基于STUECKER等<sup>[16-17]</sup>发现的如果只给定赤道中东太平洋的海温异常,仅仅通过大气环流模式也能模拟出WNPAC的理论而建立的。ENSO影响我国降水主要是通过WNPAC“大气桥”的作用,很多研究发现WNPAC的稳定存在会对东亚季风尤其是厄尔尼诺次年我国的降水造成重大影响,WNPAC西北侧的异常西南风促进了向北的暖湿水汽输送,使得中国东南部降水增加<sup>[23-24]</sup>。在厄尔尼诺衰减阶段,C-mode是西北太平洋异常低空反气旋维持的主要驱动力,它通常会向东亚输送更多的水分,从而导致中国南部降水增加<sup>[25]</sup>。目前已有研究证实C-mode和ENSO在冬春季分别对中国华南地区产生独立的影响,受ENSO影响的降水异常从20世纪80—90年代中国南方的冬季转移到2000年后的春季长江流域,受C-mode影响的降水异常主要集中在中国南方的春季<sup>[25-27]</sup>。

以上研究均发现了C-mode对东亚气候存在非常重要的影响,因此很多研究也评估了不同模式对C-mode的模拟情况<sup>[14,28-31]</sup>。李海燕等<sup>[28]</sup>认为只有在具有暖池年循环背景的大气环流模式(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)中可能发生赤道太平洋表面异常西风向南转移现象。ZHANG等<sup>[14]</sup>评估了5种动力学模式对C-mode的预测技巧,发现模式对C-mode的预测技巧不如对Nino3.4指数的好<sup>[29]</sup>。REN等<sup>[30]</sup>从国际耦合模式比较计划第五阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)中挑选了27个气候模式,检验了它们对C-mode特征的性能模拟。结果表明,CMIP5基本上可以模拟出C-mode表面风场的分布特征,但是,只有一半的模式能够模拟出C-mode在暖池年循环附近的功率谱峰值。YI等<sup>[31]</sup>使用600 a的长时间模拟结果评估了ECHAM5/MPI-OM气候模式模拟的C-mode对华南季节性降水存在的影响,结果表明ECHAM5/MPI-OM模式能够再现C-mode的时空特征以及热带海气对其的非对称响应,同时也能较好地抓住C-mode影响华南冬春季降水异常的时空结构。

鉴于C-mode对华南降水存在重要影响,并且也是该地区季节性降水的关键预报因子,因此C-mode的可预测性非常重要,但目前尚未有深入研究。本文以持续性预测为例,探究C-mode可预测性的季节-年代际变化。

## 1 资料和方法

### 1.1 数据说明

本文所采用的资料主要是美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)联合制作的NCEP/NCAR再分析数据集中1981—2020年的月平均风场数据,分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ <sup>[32]</sup>。

### 1.2 分析方法

由于ENSO在2000年左右存在显著的气候变化转折点<sup>[33-34]</sup>,同时研究也发现2000年以前与C-mode的特征是热带太平洋东南部的异常气旋和西北热带上空的异常反气旋,而2000年以后与C-mode相关的异常西风向西移动到太平洋中部,西北太平洋异常反气旋向西延伸并减弱<sup>[35]</sup>。这些不同的C-mode伴随着印度太平洋地区不同的气候影响,因此可分为三个时段进行研究:整段时间(1981—2020年)、时段I(1981—1999年)、时段II(2000—2020年)<sup>[27]</sup>。

本文采用的研究方法包括:①EOF,用以分解赤道太平洋( $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\text{E} \sim 60^{\circ}\text{W}$ )的表面风异常,从而得到表征EOF1和PC1以及EOF2和PC2<sup>[16]</sup>。这里的PC2即为C-mode指数,本文在后续计算中均使用该指数表征C-mode。②以持续性预测为例来研究C-mode指数的可预测性变化,持续性预测一般用于时间序列数据预测研究,其基本思路是利用先前( $t-1$ )时间序列的结果来预测当前( $t$ )时间的取值<sup>[36]</sup>。持续性预测假定未来的变化趋势与过去相似,因此可通过利用历史数据中的发展趋势外推未来的变化。这种预测方法适用于变化缓慢且趋势稳定的数据,例如股票价格、气象数据等。本文在进行C-mode指数持续性预测中分别使用相关分析和均方根误差方法来诊断C-mode的可预测性。③使

用高斯滤波方法过滤高频噪声,得到低频信号,从而计算得到C-mode的信噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SNR),用以探究年代际尺度中可预测性变化的原因。因为C-mode的周期为16 M左右,一个峰大致为8~9 M,为了更好地保留C-mode信号,采取了九点高斯滤波<sup>[16]</sup>。这里通过计算方差等方法得到C-mode的变率,用以解释可预测性变化的原因。④强厄尔尼诺往往伴随强C-mode信号<sup>[16]</sup>,这里根据Nino3.4指数连续6 M维持在 $0.5^{\circ}\text{C}$ 以上挑选出以下6个厄尔尼诺事件:1982/1983年、1991/1992年、1997/1998年、2002/2003年、2009/2010年和2015/2016年<sup>[25, 27]</sup>。本文将利用合成分析的方法探究C-mode的季节循环,从而解释其季节可预测性的变化原因。

## 2 C-mode可预测性的年代际变化

C-mode是ENSO和背景海温年循环的非线性相互作用的产物<sup>[16]</sup>。之前的研究表明,ENSO作为C-mode维持和发展的主要影响因子,其预测技巧在2000年左右开始下降<sup>[37, 38]</sup>。这引发了我们对于C-mode的可预测性是否存在类似的年代际变化的疑问,因此本文以2000年为节点分别进行持续性预测。从图1可以看出,C-mode具有一个不错的可持续性,在持续性预测的第三个月其相关系数仍然可以维持在0.5左右。对比发现,2000年之前C-mode持续性预测的相关系数比之后的更好;但2000年之前的均方根误差大于2000年之后。

为了进一步探究上述C-mode持续性预测的相关系数和均方根误差在时段I和时段II出现差异

的原因,本文分别从C-mode信号本身的强度和变率展开研究。从图2可以看到,两个时段EOF分解的PC2方差贡献率分别为14.7%和11.1%,其中时段II的方差贡献率低于时段I。在空间场上可以发现,2000年以前西北太平洋反气旋的强度显著强于2000年之后,且与时段I(1981—1999年)相比,时段II(2000—2020年)的西风异常向西移动约10个经度<sup>[27, 35]</sup>,这与2000年左右ENSO显著的年代际变化有关<sup>[39]</sup>。本文认为C-mode的信号强度在时段I比时段II更显著,是C-mode持续性预测的相关系数在2000年之前更高的主要原因。在时间维度上,两个时段PC2的方差分别为1.2和0.8,这表明时段I的C-mode变率大于时段II,是2000年之前持续性预测的均方根误差更大的主要原因。

除了对整体年份的C-mode做持续性预测外,本文还进行了11 a滑动窗口的持续性预测。从图3可以看出,在20世纪90年代和2002年之后,C-mode的持续性预测的相关系数较低,预测时效为1~3 M的均方根误差没有表现出显著的年际变化,但其余超前时间预测的均方根误差均在这两个时段较低、2010年以后又逐渐变大。为了探究以上可预测性的年代际变化原因,本文尝试从C-mode内部信号解释该现象,因此计算了信噪比。SNR方法已被广泛应用于气候的可预报性研究<sup>[40]</sup>。气候变量存在的年际变率可分为两部分:一部分是信号,主要来自大气的外部强迫如太阳辐射、雪盖、海冰、海温等,是可以被预报的;另一部分是噪声,主要来自天气扰动以及季节内振荡等,是不可以被预报的<sup>[41]</sup>。本文利用高斯九点滤波分离高频噪声和低频信号,这里的SNR取信号方差与噪声方差的比值。图3c

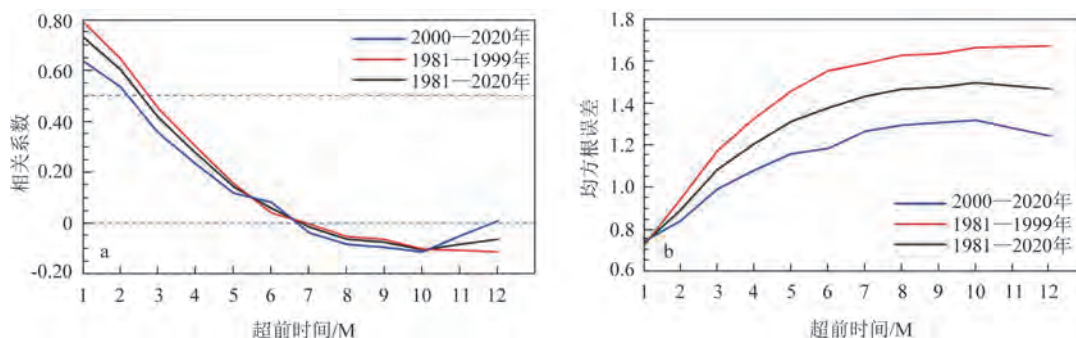


图1 C-mode持续性预测的相关系数(a)和均方根误差(b)

Fig.1 Correlation coefficient (a) and root mean square error (b) of C-mode persistence prediction



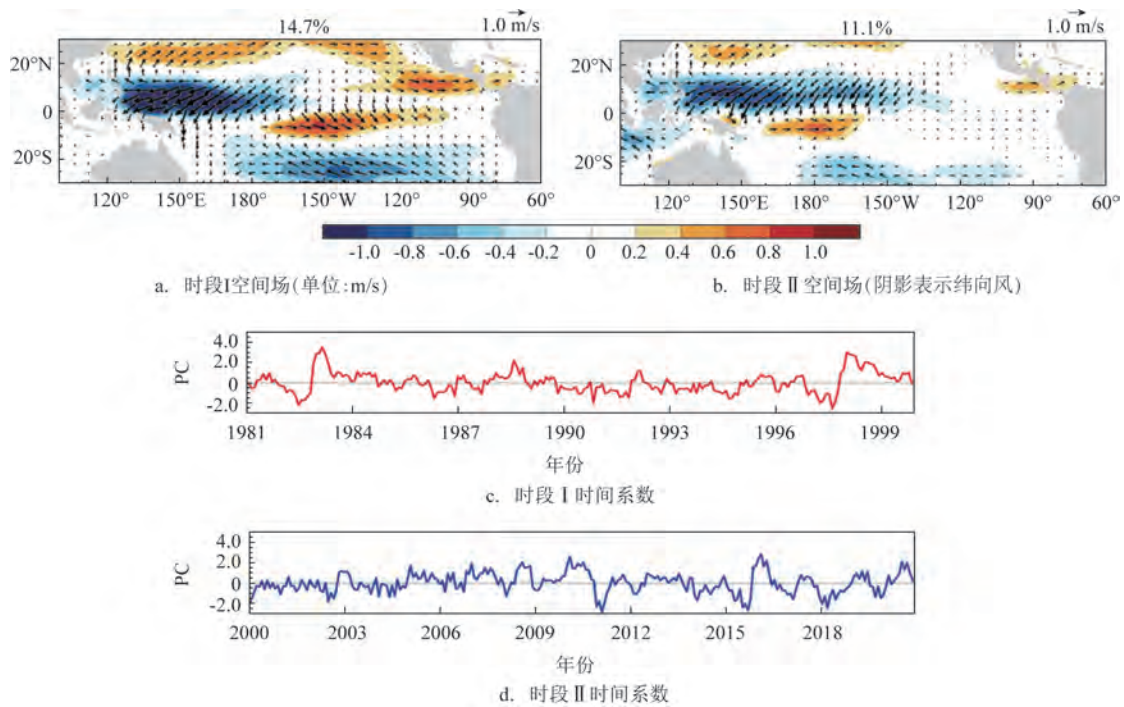


图2 太平洋地区表面风场经验正交函数分解第二模态的空间场和时间系数

Fig.2 The second EOF spatial patterns and their time series of surface wind anomalies

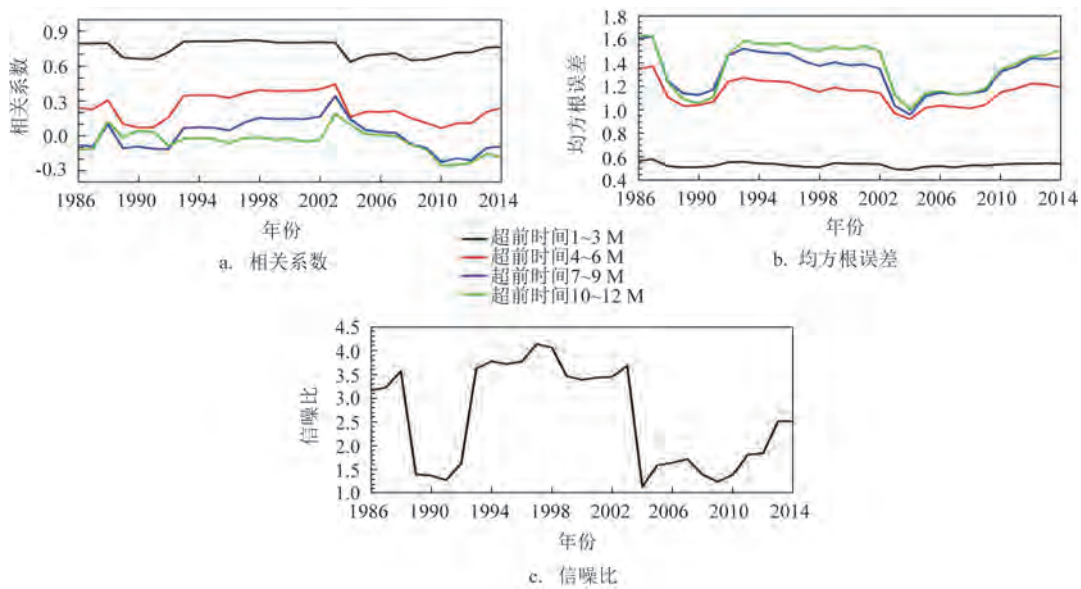


图3 1981—2020年11 a滑动窗口

Fig.3 11-year sliding window from 1981 to 2020

表明20世纪90年代和2002年之后C-mode的信噪比都处于较低水平,这两个时间段相关系数较低的主要原因是C-mode自身信号较弱、噪声较强从而使得可预测性下降;预测起报的1~3 M的相关系数均值与信噪比的相关性达到0.98,因此信噪比可

以很好地解释C-mode可预测性年际变化。综上所述,本文认为C-mode可预测性在2000年之后明显下降,主要原因是由于2000年之后C-mode的变率减小、强度减弱、信噪比降低。

### 3 C-mode 可预测性的季节变化

WEBSTER 等<sup>[42]</sup>最早发现 ENSO 存在“春季预报障碍”(Spring Predictability Barrier, SPB)。由于 ENSO 对 C-mode 有非常重要的影响<sup>[16-17]</sup>,那么在 C-mode 预测中是否也会出现类似的季节变化,本文做了季节性持续性预测以探究该问题。从图 4 可以发现,无论是整段时间(1981—2020 年)、时段 I (1981—1999 年)还是时段 II (2000—2020 年)均表现出“秋季预报障碍”,即 C-mode 的持续性预测相关系数在 10 月时处于最低值,整个秋季(9—11 月)的相关系数也较其他季节更低,且秋季的均方根误差达到最

大。综上,本文发现 C-mode 的可预测性在秋季显著变弱,呈现出“秋季预报障碍”的特征。ZHANG 等<sup>[14]</sup>定义了一个新的指数 Nino-A,实质是赤道地区海温异常的南北非对称性,该指数能够刻画 C-mode 的基本特征,同时 ZHANG 也最早发现 Nino-A 的可预测性存在秋季下降的现象,这与本文提出 C-mode “秋季预报障碍”相对应。在 ENSO 预报中,曾有人质疑 SPB 是否是 ENSO 预测的内在特征,WEBSTER 等<sup>[42]</sup>认为,造成 SPB 的一个可能原因是北方春季季风环流的快速季节转换,在东西向海温梯度最弱的时候扰动了太平洋的基本态;WEBSTER<sup>[43]</sup>还提出另一种解释,即 SPB 是由于东

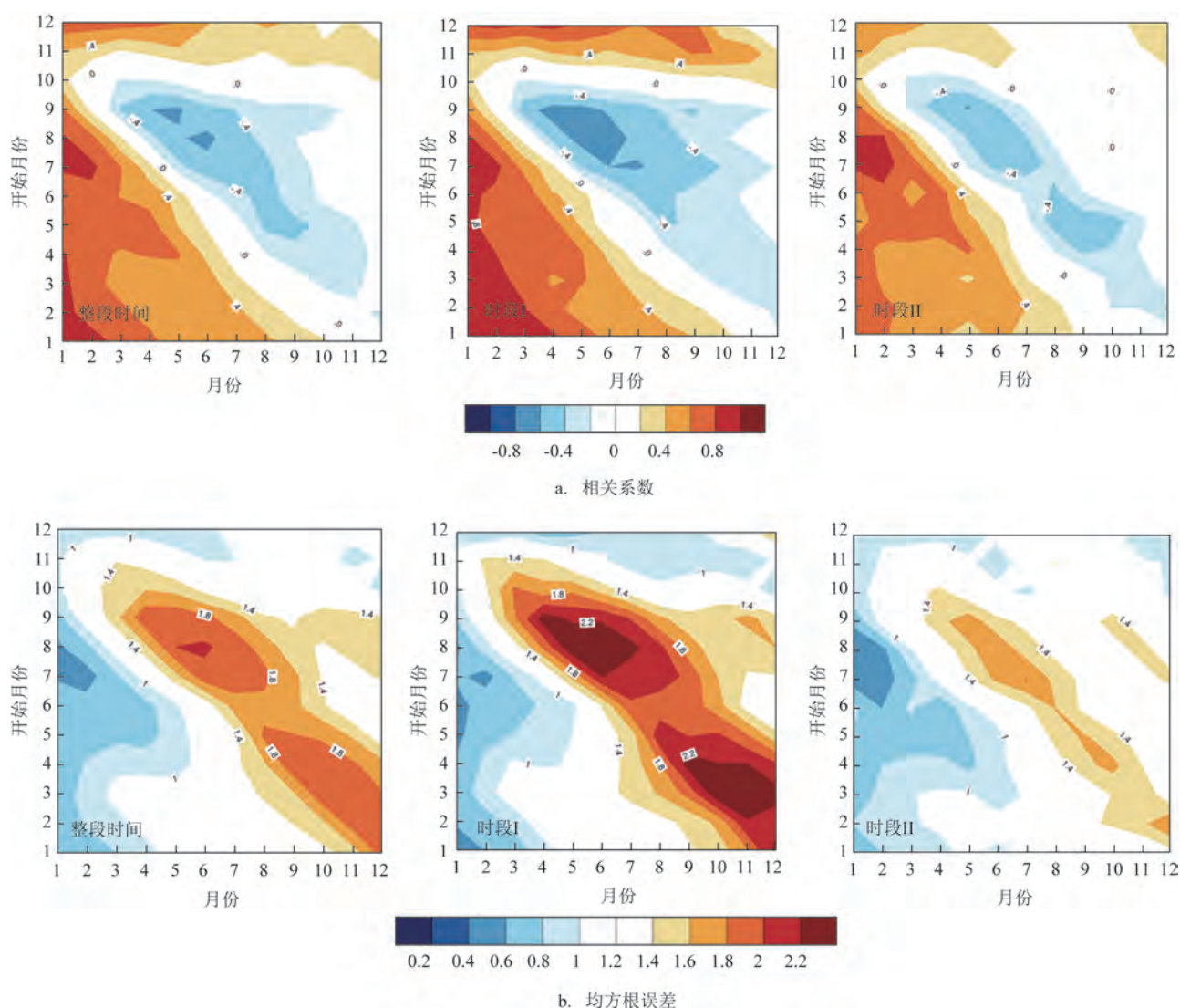


图4 C-mode 季节持续性预测的相关系数和均方根误差

Fig.4 Correlation coefficients and root mean square errors of C-mode seasonal persistence prediction

太平洋的海洋-大气耦合在春季时期较弱导致的。其他研究还认为,北方春季海温异常相对较小,在大气和海洋噪声存在的情况下,这些异常难以探测和预报<sup>[44-45]</sup>。这些理论表明,SPB产生的原因与ENSO固有的物理性质有关,即SPB可能是ENSO预报中固有的。接下来本文从C-mode信号本身的季节变率和强度变化探究出现“秋季预报障碍”的可能原因。

C-mode在所有时段的秋季均表现出较弱的变率(见图5),时段I中C-mode在春季的变率显著高于其他季节,而时段II中所有季节的变率均没有时段I的大,这可能与2000年之前东部型ENSO(EP-

ENSO)频发而2000年之后西部型ENSO(CP-ENSO)频发有一定关系。图6是厄尔尼诺事件合成的PC2,本文主要选取1982/1983年、1991/1992年、1997/1998年、2002/2003年、2009/2010年、2015/2016年进行合成分析,C-mode于厄尔尼诺年冬季开始发展,在次年春季达到峰值,一直维持到夏季和厄尔尼诺现象一起衰退<sup>[27]</sup>。春季C-mode信号显著,使得其可预测性最好,而秋季C-mode已经处于衰退,其强度很弱,因此可预测性较弱。本文认为C-mode出现“秋季预报障碍”和其内部的季节演变有着非常重要的关系。

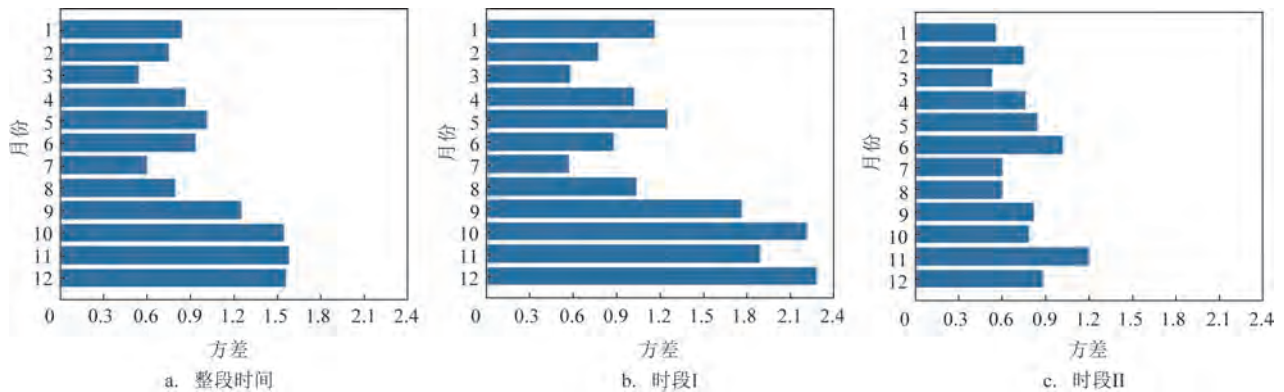
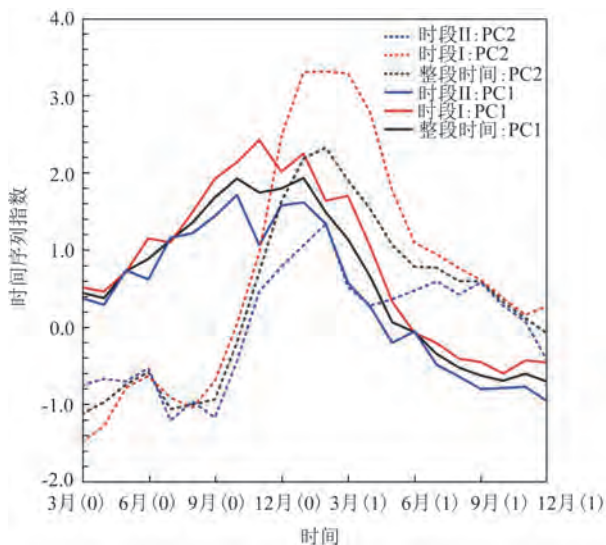


图5 C-mode的月方差

Fig.5 Monthly variance of C-mode



注:横坐标0和1分别指厄尔尼诺当年和次年

图6 厄尔尼诺事件合成的PC1和PC2的季节演变

Fig.6 Seasonal evolution of PC1 and PC2 composites of the El Niño events

## 4 结论

本文探究了1981—2020年C-mode可预测性的年代际和季节变化特征。结论如下:

①分别对整段时间、时段I、时段II的C-mode进行持续性预测,发现2000年以前预测的相关系数较高,2000年之后预测的均方根误差较小。分析认为2000年之后C-mode变率减小、信号强度相对较弱可能是这个时段C-mode预测的相关系数降低、均方根误差变小的主要因素。为了进一步探究C-mode可预测性的年代际变化,取1981—2020年进行了11 a滑动窗口持续性预测,发现在20世纪90年代左右和2000年之后表现为较低的相关系数和较低的均方根误差。计算C-mode信噪比发现,20世纪90年代左右和2000年之后C-mode信噪比较低,说明该时间段C-mode信号较弱、高频噪声较强。总结以上,本文认为C-mode年代际可预测性在



2000年之后明显下降,这主要是由C-mode内部信号的变率降低、强度减弱、信噪比降低造成的。

②分整段时间、时段Ⅰ、时段Ⅱ对1981—2020年进行C-mode季节持续性预测,在3个时段中均发现秋季其预测相关系数显著降低、均方根误差增大,因此认为C-mode在秋季的可预测性较低;进一步探究发现C-mode在秋季时变率最低、信号最弱。总结认为,本文发现的C-mode存在“秋季预报障碍”主要与其信号本身的季节循环相关。

本文主要以持续性预测为例,讨论了1981—2020年C-mode可预测性的季节-年代际变化,并探究了其变化的可能原因。C-mode作为华南冬春季降水的重要预报因子,其良好的预报结果非常重要,本文的结果有助于下一步更好地认识和预报C-mode。

#### 参考文献:

- [1] RASMUSSEN E M, WALLACE J M. Meteorological aspects of the El Niño / Southern Oscillation[J]. *Science*, 1983, 222(4629): 1195-1202.
- [2] BJERKNES J. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3): 163-172.
- [3] VAN LOON H, MADDEN R A. The Southern Oscillation. Part I: global associations with pressure and temperature in northern winter[J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(6): 1150-1162.
- [4] HOREL J D, WALLACE J M. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4): 813-829.
- [5] WALLACE J M, GUTZLER D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4): 784-812.
- [6] WALLACE J M, RASMUSSEN E M, MITCHELL T P, et al. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: lessons from TOGA[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7): 14241-14259.
- [7] TRENBERTH K E, CARON J M. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(24): 4358-4365.
- [8] ALEXANDER M A, BLADÉ I, NEWMAN M, et al. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(16): 2205-2231.
- [9] 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]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1996, 74(1): 49-62.
- [10] TOMITA T, YASUNARI T. Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO / monsoon system[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1996, 74(4): 399-413.
- [11] JI L R, SUN S Q, ARPE K, et al. Model study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(1): 1-22.
- [12] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 399-407.  
TAO S Y, ZHANG Q Y. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 399-407.
- [13] KANG I, JEONG Y. Association of interannual variations of temperature and precipitation in Seoul with principal modes of Pacific SST[J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 1996, 32: 339-345.
- [14] ZHANG W J, JIN F F, STUECKER M F, et al. Unraveling El Niño's impact on the East Asian monsoon and Yangtze River summer flooding[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(21): 11375-11382.
- [15] HARRISON D E, LARKIN N K. The COADS sea level pressure signal: a near-global El Niño composite and time series view, 1946-1993[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(12): 3025-3055.
- [16] STUECKER M F, TIMMERMAN A, JIN F F, et al. A combination mode of the annual cycle and the El Niño/Southern Oscillation[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(7): 540-544.
- [17] STUECKER M F, JIN F F, TIMMERMAN A, et al. Combination mode dynamics of the anomalous Northwest Pacific anticyclone[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(3): 1093-1111.
- [18] WANG B, WU R G, FU X H. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [19] YANG J L, LIU Q Y, XIE S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02708.
- [20] XIE S P, HU K M, HAFNER J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 730-747.
- [21] WU B, ZHOU T J, LI T. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part I: maintenance mechanisms[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(23): 9621-9635.
- [22] WU B, ZHOU T J, LI T. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: formation processes[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(23): 9637-9650.
- [23] WANG B, WU R G, LI T. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(8): 1195-1211.

- [24] LIN Z D, LU R Y. The ENSO's effect on eastern China rainfall in the following early summer[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(2): 333-342.
- [25] ZHANG W J, LI H Y, STUECKER M F, et al. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: dominance of the ENSO combination mode[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(12): 4347-4359.
- [26] 李海燕, 张文君, 何金海. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响[J]. *气象学报*, 2016, 74(3): 322-334.
- LI H Y, ZHANG W J, HE J H. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(3): 322-334.
- [27] ZHENG F, WANG H, LUO H, et al. Decadal change in ENSO related seasonal precipitation over southern China under influences of ENSO and its combination mode[J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(3-4): 1973-1986.
- [28] 李海燕, 张文君, 何金海, 等. SST 年循环对 El Niño 事件局地海气过程的影响[J]. *海洋学报*, 2016, 38(1): 56-68.
- LI H Y, ZHANG W J, HE J H, et al. Influence of SST annual cycle on local air-sea processes during El Niño events[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(1): 56-68.
- [29] WEISHEIMER A, DOBLAS-REYES F J, PALMER T N, et al. ENSEMBLES: a new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions-Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): L21711.
- [30] REN H L, ZUO J Q, JIN F F, et al. ENSO and annual cycle interaction: the combination mode representation in CMIP5 models[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(11-12): 3753-3765.
- [31] YI S J, ZHENG F, LUO H. ENSO combination mode and its influence on seasonal precipitation over southern China simulated by ECHAM5 / MPI-OM[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2019, 12(3): 184-191.
- [32] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLLEN J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *American Meteorological Society*, 2002, 83(11): 1631-1644.
- [33] KAO H Y, YU J Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 615-632.
- [34] KUG J S, JIN F F, AN S I. Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm Pool El Niño[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(6): 1499-1515.
- [35] JIANG F, ZHANG W J, STUECKER M F, et al. Decadal change of combination mode spatiotemporal characteristics due to an ENSO regime shift[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(12): 5239-5251.
- [36] HUANG J, VAN DEN DOOL H M, BARNSTON A G. Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normals[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 809-817.
- [37] BARNSTON A G, TIPPETT M K, L'HEUREUX M L. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-2011: is our capability increasing? [J] *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(5): 631-651.
- [38] XUE Y, CHEN M Y, KUMAR A, et al. Prediction skill and bias of tropical Pacific sea surface temperatures in the NCEP climate forecast system version 2[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5358-5378.
- [39] ZHENG F, FANG X H, YU J Y, et al. Asymmetry of the Bjerknes positive feedback between the two types of El Niño[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(21): 7651-7657.
- [40] TRENBERTH K E. Potential predictability of geopotential heights over the Southern Hemisphere[J]. *Monthly Weather Review*, 1985, 113(1): 54-64.
- [41] TRENBERTH K E. Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part II: potential predictability[J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(12): 2369-2379.
- [42] WEBSTER P J, YANG S. Monsoon and ENSO: selectively interactive systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1992, 118(507): 877-926.
- [43] WEBSTER P J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1995, 56(1-2): 33-55.
- [44] XUE Y, CANE M A, ZEBIAK S E, et al. On the prediction of ENSO: a study with a low-order Markov model[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1994, 46(4): 512-528.
- [45] CHEN D K, ZEBIAK S E, BUSALACCHI A J, et al. An improved procedure for El Niño forecasting: implications for predictability[J]. *Science*, 1995, 269(5231): 1699-1702.

## Seasonal-Decadal Variation in ENSO Combination Mode Predictability

XU Yiran<sup>1,2</sup>, ZHENG Fei<sup>2</sup>, YANG Ruowen<sup>1\*</sup>

(1. Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Existing researches have suggested that the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) combination mode



(C-mode) is the main driver of anomalous anticyclone development over the northwest Pacific Ocean during El Niño decay, which usually creates water vapor transport channels leading to increased precipitation in the southern China, and vice versa during La Niña. This paper uses surface wind field data during 1981—2020 from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research reanalysis dataset, to analyze seasonal-decadal variation in the C-mode predictability. The results show that the predictability of C-mode decreases significantly after 2000, and the main reasons for the decline of its predictability after 2000 include the decreasing variability, weakening intensity, and decreasing signal-to-noise ratio. On the seasonal scale, C-mode has an autumn predictability barrier, which is mainly related to the seasonal cycle of the signal, because when C-mode enters the recession period in autumn, its signal is the weakest and its variability is the smallest.

**Key words:** ENSO combination mode; C-mode; predictability; seasonal-decadal