

北太平洋维多利亚模态对西太平洋暖池面积和东边界的影响研究

史良¹, 丁瑞强², 巢婧华³

(1. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 3. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225)

摘 要: 利用 HadISST 再分析资料和 IAP 次表层海温资料, 分析了维多利亚模态 (VM) 对西太平洋暖池面积 (WPA) 范围的扩展和东边界 (WPEB) 纬向运移的影响。结果表明: 春季 VM 的强度对当年夏季至次年夏季的 WPA 有很强影响, 同时也对 WPEB 东西方向的移动位置起着十分重要的作用。当春季 VM 为正位相时, 会在随后的夏季引起赤道太平洋中部海表温度 SST 异常变暖, 同时西赤道太平洋会产生异常西风, 从而加强了赤道东传 Kelvin 波, 使赤道海洋表层暖水向东传播, WPEB 向东移, WPA 范围扩大。相反, 当春季 VM 为负位相时, WPA 的范围的扩展会被抑制而缩小, 同时也会影响 WPEB 向西运移; 其次, VM 也可以通过影响赤道西太平洋次表层海温来进一步影响 WPA 的扩展和 WPEB 的纬向运移。另外, 结论还表明 VM 与 WPEB 的相关关系超前 VM 与 WPA 关系一个季度左右, 且前者相关系数更高。同时春季 VM 指数可以超前 1 a 左右对 WPA 的变化趋势和 WPEB 的位置进行有效的预测。

关键词: 西太平洋暖池; 暖池面积; 暖池边界; 维多利亚模态

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)06-0031-13

1 前言

西太平洋暖池 (Western Pacific Warm Pool, WP) 是全球大洋表层水温最高的海域, 其海表温度常年维持在 28 °C 以上, 是全球大气运动最主要的热源地。该区域的海温异常变化对全球天气和气候有重要的作用^[1-5], 因此对于 WP 的研究一直都是大气科学界的重要课题。通过近几十年来的研究, 学界对 WP 的认识已经取得了很大的进步。例如: 有学者研究了影响 WP 季节变化的动力机制, 他们指出大气季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, MJO)、西太平洋短波辐射和潜热通量、海表面风场等是 WP 季节内变化的主要驱动机制^[6-7]。同时, 也有一些学者针对 WP 的季节变化对天气和气候带来

的影响展开了研究。他们认为 WP 在维持暖异常状态的同时随季节的向东扩展, 以及暖池次表层海温暖 (冷) 异常和海表面风应力的相互作用是导致厄尔尼诺与南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 发生和发展的一个必不可少的条件^[8-11]。另外, 有学者分别对 ENSO 不同位相时期的西太暖池重心位置及偏移也做了定量研究, 指出 El Niño 时期, 西太平洋暖池重心偏东; 而 La Niña 时期, 重心则偏西, 其南北差异并不明显^[12]。除此之外, WP 也对中国华南前汛期降水、东亚夏季风和副热带高压有重要的影响^[13-17]。

因为 WP 的季节内变化会对天气和气候产生重要影响, 那么, 提供可靠的前期信号来预测西太平洋暖池面积 (Western Pacific Area, WPA) 的范围变

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-02-30。

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项 (GASI-IPOVAI-03)。

作者简介: 史良 (1989-), 男, 硕士, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: shiliang_job@163.com

通讯作者: 丁瑞强 (1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事海气相互作用、非线性误差及大气可预报性研究。E-mail: drq@bnu.edu.cn

化趋势和东边界(Western Pacific Eastern Boundary, WPEB)位置的变化,对于政府制定相应的预防政策就显得格外重要。最近有研究指出,北太平洋维多利亚模态(Victoria Mode, VM)^[18,19]是海洋对前冬北太平洋涛动(North Pacific Oscillation, NPO)^[20]强迫的海温延迟响应,其强度在北半球春季达到最大。VM还充当了海洋桥的作用,通过季节足迹机制(Seasonal Footprinting Mechanism, SFM)^[21]、风-蒸发-海表温度反馈机制(Wind-Evaporation-Sea Surface Temperature, WES)^[22]以及纬向风充电机制(Trade-Wind Charging, TWC)^[23]在夏季赤道中太平洋产生异常暖海温,同时在西赤道太平洋激发西风异常,进而影响接下来冬季ENSO的发生和发展。VM对ENSO的前期影响主要集中在赤道太平洋西部和中部,而中西赤道太平洋正是WP的主要区域,因此我们猜想:VM是否会对WPA的扩展以及WPEB的纬向运移产生影响?如果有,那具体影响过程是怎样?造成这种影响的主要物理机制又是什么?

本文针对近69 a(1950—2018年)VM对WP表层暖水($\geq 28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)面积的扩展和边界的纬向运移的影响进行研究,尝试揭示出VM在WPA的扩展和WPEB位置的变化过程中扮演的角色和所起的作用。这些结果将有助于提升人们对WP的了解,以及对其影响的预估。

2 数据和方法

2.1 数据介绍

本文所用观测资料时段为1950—2018年,共69 a。主要包括以下几部分:

(1)海表温度资料为英国气象局哈德莱中心(Hadley Centre)的HadISST资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ^[24];

(2)中国科学院大气物理研究所(Institute of Atmospheric Physics, IAP)提供的次表层海温资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,海温要素在垂直高度从1~2 000 m共分41层^[25];

(3)美国大气研究中心/美国国家环境预报中心(Nation Center for Atmospheric Research/National Centers for Environmental Prediction, NCAR/NCEP)逐月表面风场资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ^[26]。

2.2 西太平洋暖池指数

参考前人的研究,本文定义在 $120^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\text{S} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 区域范围内, $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等值线所包围的面积作为WPA(单位为: 10^6 km^2)的范围,并且在计算过程中考虑了权重因素^[2,8-11,17,27]。为了避免由于季节变动对暖池带来的影响,本文选取赤道太平洋海域($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$)内各经线上的平均SST,确定WPEB的表层经度位置,从而计算得到WPEB的时间序列^[11]。文中计算的WPA指数和WPEB指数均去除长期趋势。

图1所示是气候态(1981—2010年)WP的季节演化过程,结果表明WP拥有明显的季节性变化。在春季(2—4月,FMA,见图1a)与冬季(11—1月,NDJ,见图1d),WP的空间纬向位置基本维持在 $15^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 之间摆动。在经向上,WP春季的跨度大于冬季的跨度,WPEB位置更偏东一些。在夏季(5—7月,MJJ,见图1b)和秋季(8—10月,ASO,见图1c),WP位置出现北移,经向基本在 $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,WPEB偏西,尤其是ASO季节。这些结论与前人的研究结果一致^[2,8-11,17,24,27]。

2.3 VM指数

根据Bond等^[18]和Ding等^[19]的研究,本文采用经验正交分解方法(Empirical Orthogonal Function, EOF),将北太平洋($124.5^{\circ}\text{E} \sim 100.5^{\circ}\text{W}$, $20.5^{\circ} \sim 65.5^{\circ}\text{N}$)异常海表温度分解得到前两个模态。第一模态(EOF1)为太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO,见图2a),解释方差为24.7%,对应的时间系数(PC1)为PDO指数(见图2c);第二模态(EOF2)定义为维多利亚模态(见图2b),解释方差为12.2%。VM的空间结构主要是东北-西南方向的偶极子结构,且其对应的时间系数(PC2)定义为VM指数(Victoria Mode Index, VMI,见图2d)。PCs的时间序列在本文研究中均做了标准化处理。为了研究VM对WP的具体影响,本文将VM事件按照FMA 3 M的平均指数(FMA VMI)的大小进行分类(见表1):春季3 M平均的VMI ≥ 1 倍标准差的年份定义为强VM年,将 $0.5 \leq \text{VMI} < 1$ 和 $-1 < \text{VMI} \leq -0.5$ 的年份定义为弱VM年, $-0.5 < \text{VMI} < 0.5$ 的年份定义为中性年。

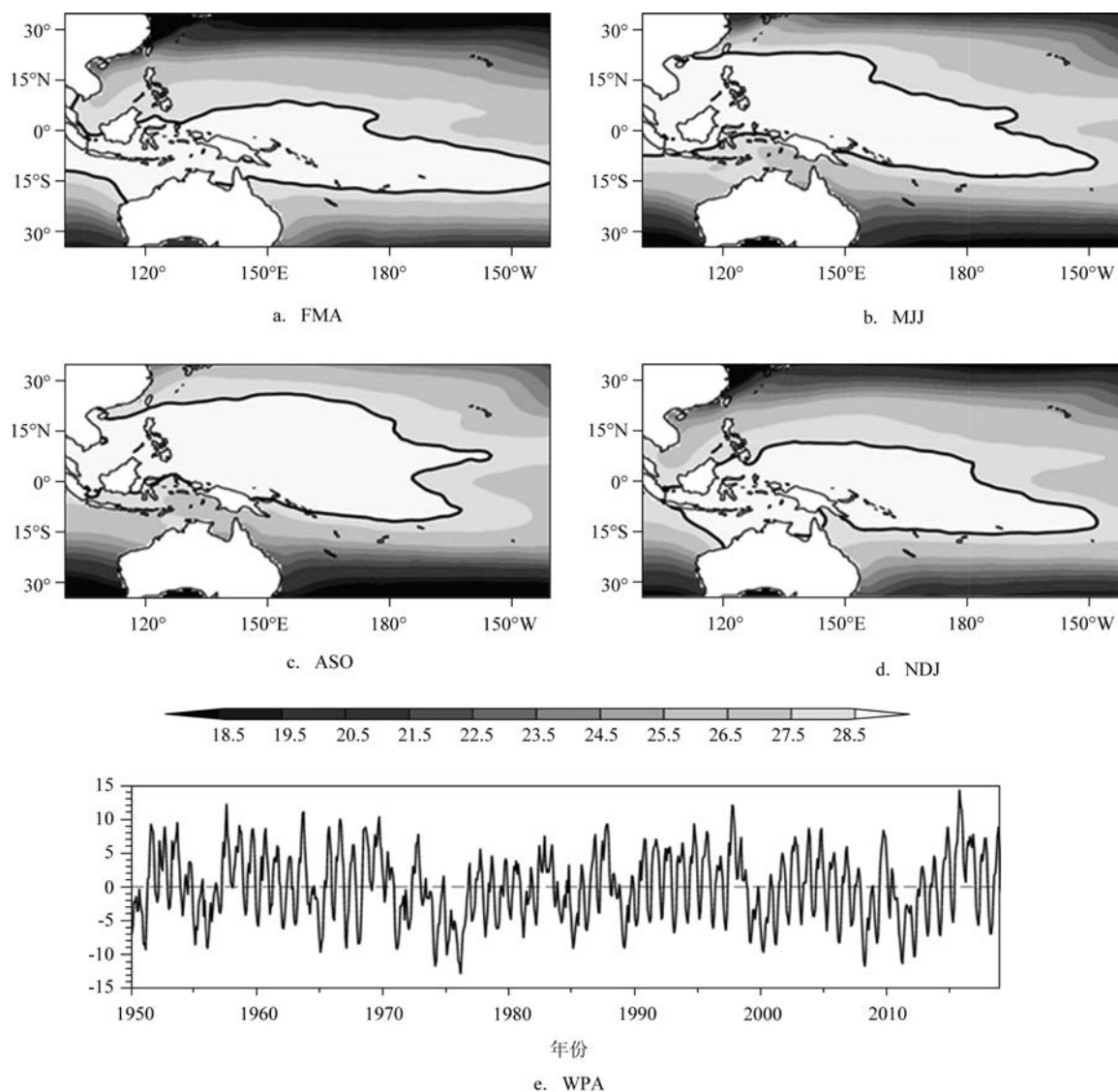


图1 西太平洋暖池气候态(单位:℃,1981—2010年)的季节演化过程和WPA指数(去除长期趋势,单位:10⁶km³)

表1 VM事件年分类

VM	强VM年	弱VM年	中性年
正位相	1957、1962、1963、1965、1968、1986、1991、 1996、1997、2014、2015	1950、1956、1958、1959、1971、1974、 1982、1992、1993、1994、2005	1951、1955、1964、1967、1972、1978、 1980、1981、1984、1985、1995
负位相	1953、1961、1969、1988、1998、1999、 2000、2001、2002、2007、2008、2010、2012	1960、1973、1975、1983、1987、2006、 2009、2013、2016、2017	1952、1954、1966、1970、1976、1977、 1979、1989、1990、2003、2004、2011

根据VM事件年的分类(见表1),并结合相关分析、合成分析和线性回归等统计方法进行分析。文中采用T检验法检验计算得到的相关系数的显著性,采用交叉检验法(留一法)检查建立预测线性模型的稳定性。

3 结果分析

3.1 VM与西太平洋暖池范围演化关系

根据表1对VM事件的分类,将SST再分析资

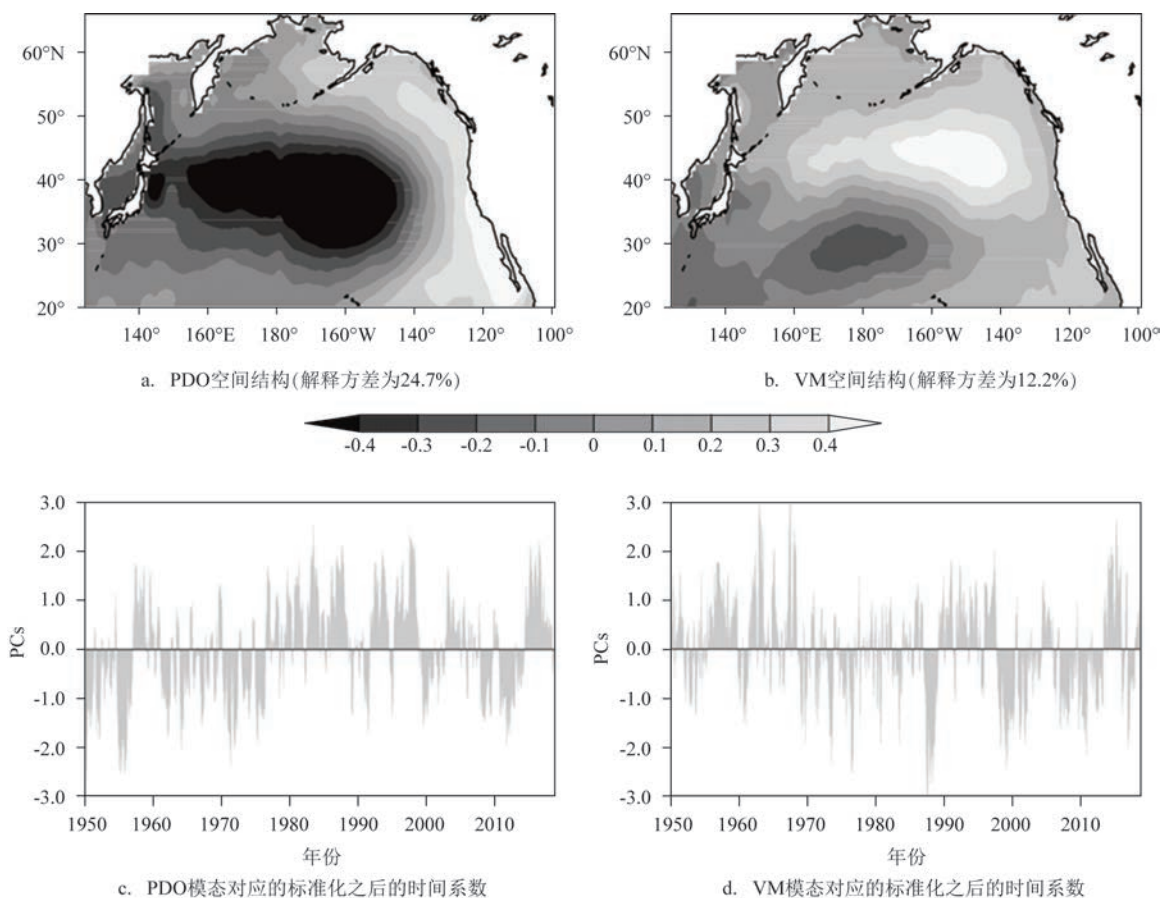


图2 EOF分解北太平洋SSTA逐月资料得到的前两个模式

料进行合成分析,结果如图3所示。正位相且强度较强的VM发生时,FMA时期WP范围相对同期气候态偏小;随着季节的演化,WP的范围逐渐扩大且大于同期气候态的情况,并在ASO时期范围达到最大,同时WPEB纬向运移到140°W附近;冬季(10—12月,OND;12—2月,DJF)WP范围相较ASO开始逐渐缩小,但依旧大于同期气候态的范围。相反,负位相且强度较强的VM发生时,FMA时期WP的范围大于同期气候态情况,但随着季节演化,WP的范围相比同期气候态范围都偏小,WPEB的位置跟同期气候态相比更偏西。

为了进一步了解VM事件对WP范围扩展和WPEB纬向运移的影响,图4给出了不同VM事件发生情况下,西太平洋次表层海温纬向平均(5°S~5°N)后合成分析得到的结果。结果表明:强的正位相VM事件发生时,FMA期间28.5℃等温线在145°~170°E范围内低于同期气候态的深度,也就

是说其范围较气候态偏大;但随着季节的演化,28.5℃等温线在西太平洋逐渐开始抬升,同时向东运移,在OND东移范围达到最大,至160°W附近;之后,28.5℃等温线在DJF开始回撤,向西传输。反之,强的负位相VM发生时,FMA时期28.5℃等温线在西太平洋深层位置相对于同期气候态的情况偏深,东侧等温线与同期气候态位置基本一致;随着季节演化,西太平洋深层位置的28.5℃等温线开始下沉,深度低于同期气候态的情况,其东边界也随着西侧等温线的下沉开始逐渐向西运移,并在ASO范围达到最大,之后开始逐渐缩小。基于上述分析,我们发现WP对不同情况下的VM有不同的响应;且WP的响应拥有不对称性的关系。以上分析只介绍了VM强度较强时WP的变化特征,本文同时也分析了在VM事件强度较弱和中性时WP范围和WPEB变化特征,这里并未用图说明,详细内容在章节3.2中介绍。

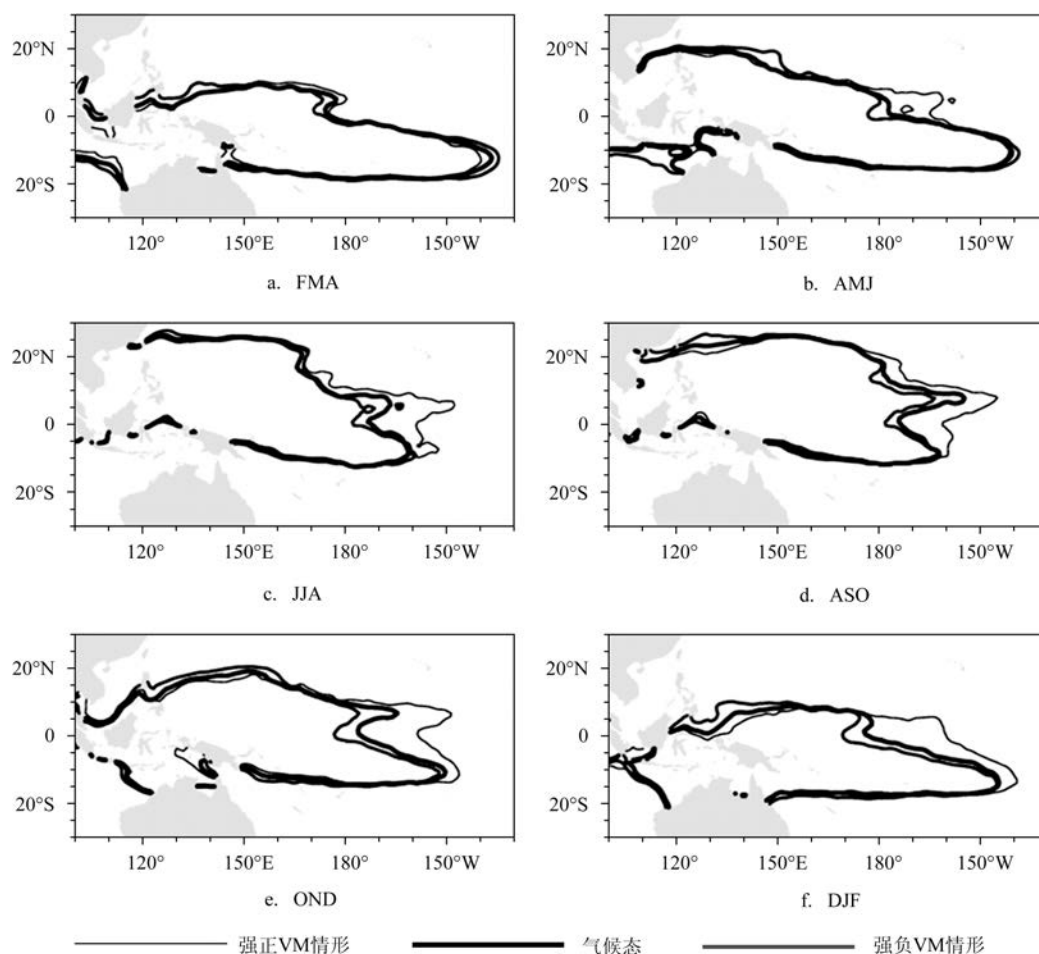


图3 不同位相且强度较强的VM事件下表层海温WP范围(28.5 °C等温线)的季节演化过程

3.2 不同强度的VM对WPA和WPEB的影响

上述合成分析结果表明,WP的范围和WPEB的位置对不同强度和位相的VM事件会产生不同的响应。为了量化分析WP不同的响应程度,我们将FMA VMI和WPA/WPEB 3M的滑动平均指数进行了滑动相关分析。图5可以看出,FMA VMI与WPA指数在FMA有负相关,但相关系数并不高,这与图3得到的同期范围相对于气候态偏小的结果一致。从AMJ开始,两个序列的相关关系逐渐增强($R=0.21$, 90%的显著性水平),这种相关关系随着超前时间的前移,一直处于增强阶段,在DJF(+1)前基本处于0.4以上(99%显著性水平);到次年FMA、AMJ时,相关系数达到最高($R=0.53$; 99%显著性水平),且这种强的正相关关系可以持续到次年ASO($R=0.35$, 99%显著性水平)。另外,VM与WPEB也拥

有很强的超前相关关系,这种高的相关关系可以从JJA(0)一直持续到JJA(+1),且相关关系在此期间均超过99%显著性水平。同时,FMA VMI与WPEB的相关系数高于FMA VMI与WPA的相关系数。值得注意的是,FMA VMI与WPEB的相关在DJF和JFM期间达到最大($R=0.57$, 99%的显著性水平),达到最高的相关时间超前VM与WPA一个季度左右。因此我们可以得出结论,从FMA VMI与WPEB的位置关系可以超前一个季度判断WPA范围变化趋势。这些结果进一步证明了图1和图2中分析得到的结果的正确性。这种超前的相关关系表明,可以通过FMA VMI提前3~10 M对WPA/WPEB的变化趋势进行有效预测(详见3.4节),而对WPA大小的有效预测将会为因WPA变化而导致的影响的预估提供理论依据。另外,因为VM与WPEB的峰值相关关系超前VM与WPA的峰值相

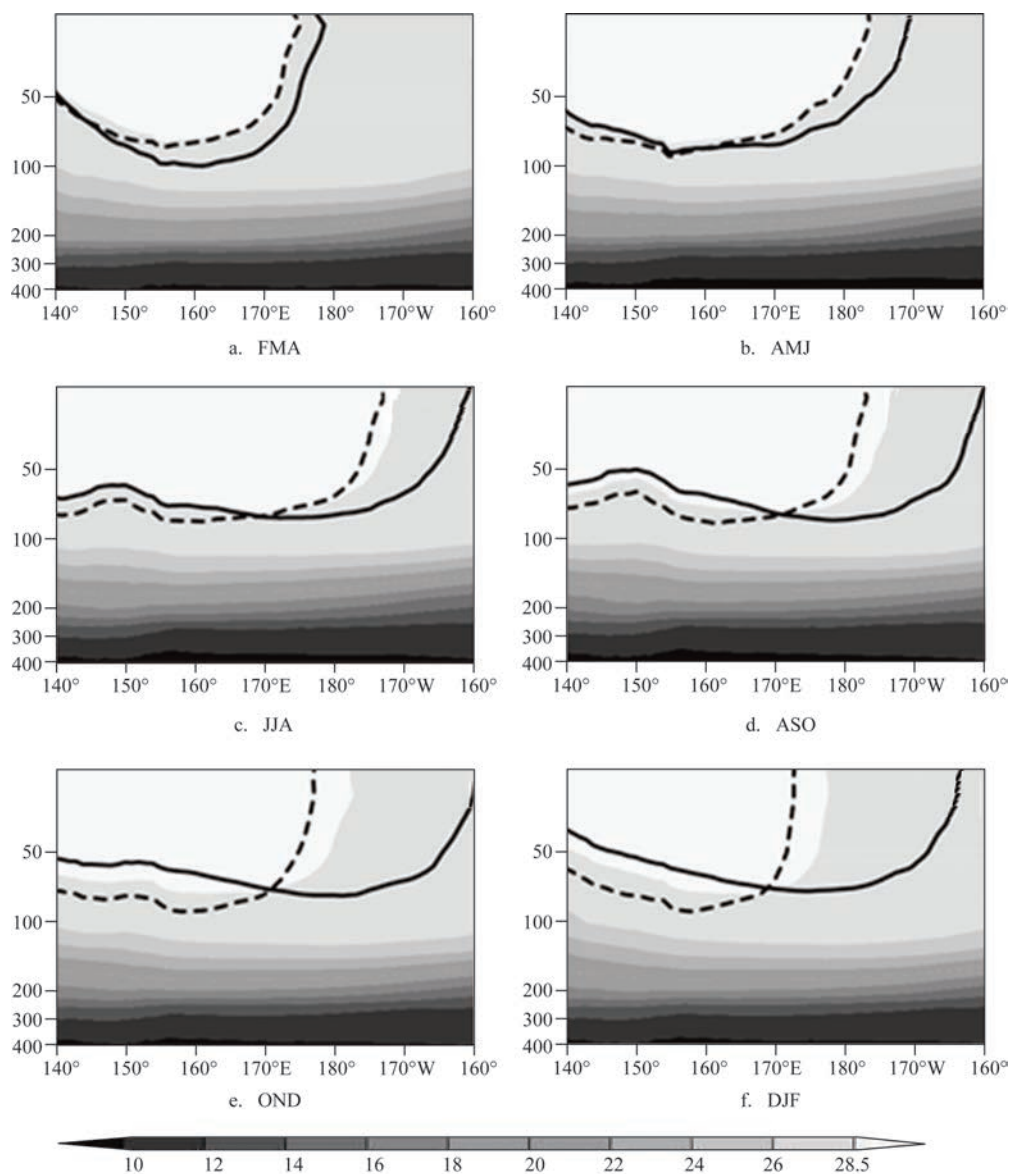


图4 不同位相且强度较强的VM事件情况下次表层海温WP范围(28.5℃等温线)的季节演化过程(实线和虚线分别为23℃和28.5℃等温线)

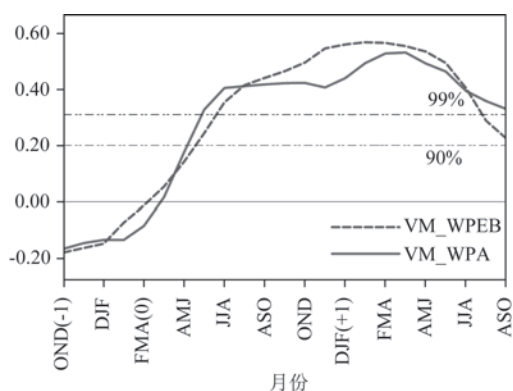


图5 FMA VMI与WPA/WPEB 3M平均指数滑动相关的相关系数(横虚线分别代表90%和99%的显著性水平)

关系,且相关性更高,因此也可以通过VM与WPEB的关系更早地判断WPA范围扩展的变化情况。

为了更详细的了解不同情况下VM对WP和WPEB的影响的不对称性,我们对VM不同强度和位相情况下,WPA和WPEB去除长期趋势后的指数变化进行了3 M的滑动平均并进行比较。结果显示在强VM事件下(见图6a),VM正位相时,WPA在4月后出现正异常,即大于同期气候态的面积水平;随着季节的变化,WPA在处于正异常的同时一直增长,并在季节ASO达到异常最大($7.58 \times 10^6 \text{ km}^2$);

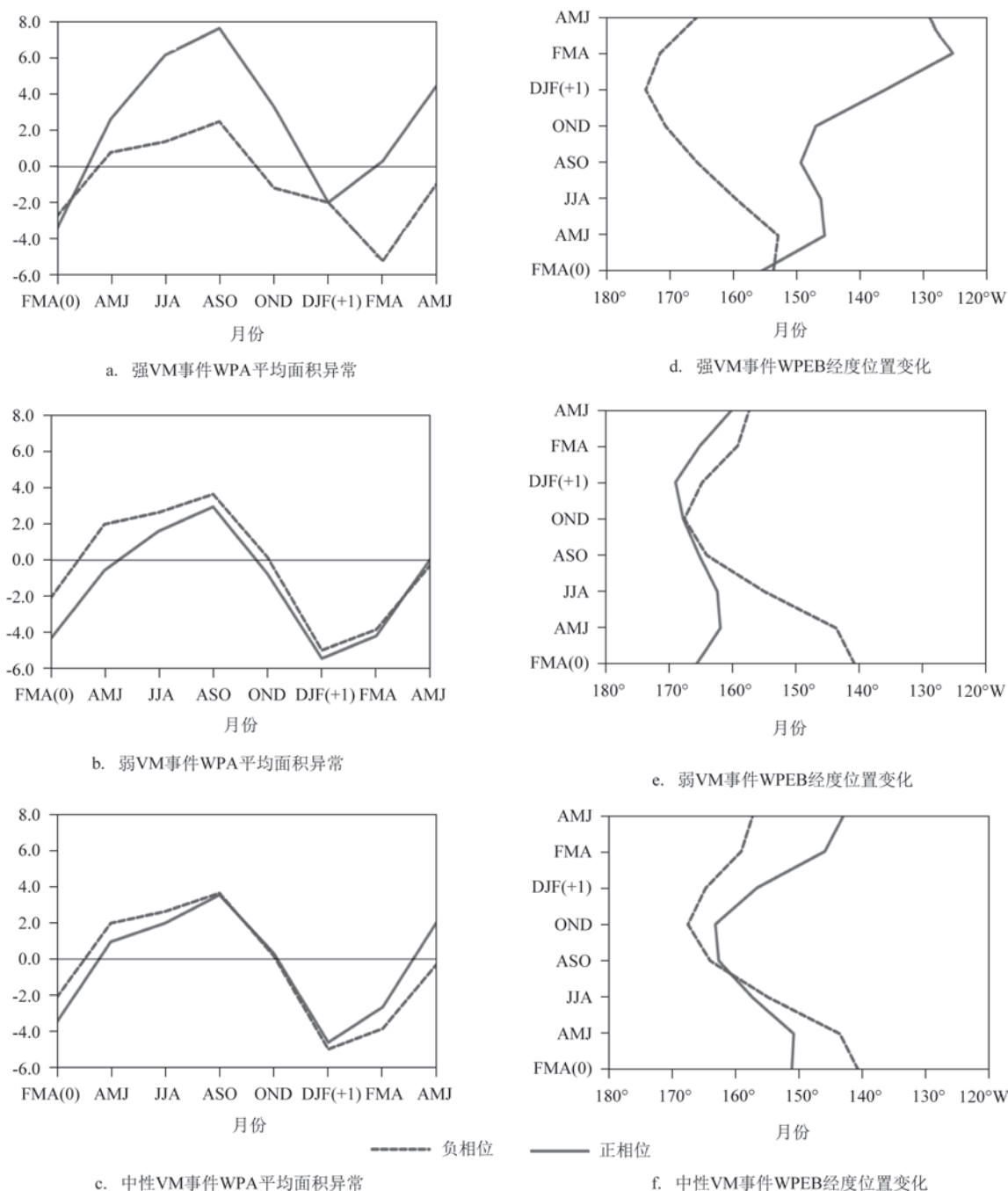


图6 VM不同强度不同位相情况下WPA和WPEB 3M平均面积异常和经度位置变化

之后开始慢慢缩减,到冬季DJF(+1),出现大约2 M的负异常(即:小于同期气候态的面积水平)之后,重新回到正异常。而在VM负位相时,WPA在季节AMJ—SON(9—11月)期间,面积大于同期气候态,之后便开始减小,在次年FMA时,异常缩减至最小值($-3.51 \times 10^6 \text{ km}^2$)。我们还发现当VM事件强度为弱时(见图6b),在北半球的夏季和秋季,WPA

异常在VM暖位相时($2.93 \times 10^6 \text{ km}^2$)小于VM冷位相($3.62 \times 10^6 \text{ km}^2$);而在春季和冬季WPA的异常值为暖位相大于冷位相(见图6b)。在VM强度为中性时(见图6c),WPA的异常值变化相对不大。不过值得注意的是,在VM强度较弱和中性时,WPA异常值的演化趋势基本保持一致。

图6d—f分别表示了不同VM强度和位相情况

下 WPEB 的经度位置。从图 6d 中可以看出,正位相且强度较强的 VM 年发生时,WPEB 的位置除了在 JJA—ASO 期间出现相对西传的现象之外,其余季节均处于东传,并在 FMA(+1) 时可以向东运移到 150°W 。VM 负位相时,WPEB 的运移与正位相时相反并显示出不对称性,在 DJF(+1) 向西运移到 175°W ,之后开始东传。值得注意的是,在弱 VM 事件情况下(见图 6e),WPEB 的位置在 VM 负位相时较 VM 正位相更偏东。VM 强度为中性时,WPEB 的位置在 VM 正位相时纬向运移的范围($163^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)比 VM 负位相时($167^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)偏小。但这两种情况下 WPEB 随季节变化的趋势基本保持一致,WPEB 的位置变化也与 WPA 的变化相一致。本文只分析 VM 对 WPA 和 WPEB 的影响结果,而造成 WPEB 纬向运移不对称性的原因将会在后续的工作中进行研究,这里不做讨论。

3.3 VM 影响 WP 的机制探讨

不同强度和不同位相的 VM 模态会对 WPA 的扩展和 WPEB 的纬向运移产生不同的影响,而这种不同的影响导致的气候变化和异常也会不同。接下来我们通过 FMA VMI、SST 以及表面风场异常值的 3M 平均数据的超前滞后空间相关来分析产生这种结果的原因。图 7 显示,FMA VMI 与 WP 区域前冬 OND(-1) 表面异常海温(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTa)有明显的正相关关系,这种正相关范围在 AMJ(0) 时覆盖整个中赤道太平洋。而这种正相关表明 VM 会使此处产生异常暖海温,进而加深赤道 SST 纬向梯度,增强纬向风应力异常,从而加强对流,推动 WP 扩展。随着海温的季节演化,由于异常暖海温向东传播,西太平洋产生异常冷海温,进一步增强这种海温梯度的正反馈作用,从而使 WPA 范围继续扩大,而 WPEB 更加东移。最终导致接下来的冬季 DJF(+1) 产生 El Niño 事件。同样我们从春季 VMI 与表面风场的空间相关也可以得出同样的结果,春季 VM 会在前冬 DJF(0) 的 WP 区域引起纬向异常西风,而这种纬向异常西风的产生又会增强赤道东传 Kelvin 波,提高 Bjerknes 正反馈^[28]的作用,进一步促进表层异常暖水向东传播,使 WP 范围扩大,东边界向东运移。

为了进一步了解 VM 对 WPA 范围扩展和

WPEB 纬向运移的机制,将春季的 VMI 与纬向($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$)平均之后的次表层异常海温做了 3 M 滑动相关分析,如图 8 所示。从图中我们可以看到,前冬 OND(-1) 时两者在西太平洋次表层有明显的正相关;在 FMA 时这种正相关随着季节演化由弱变强,范围也由深层扩展到表层。在赤道表层异常风应力的作用下,西太平洋温跃层抬升,暖水沿着温跃层移动,由次表层海温逐渐向表层传播,这种次表层异常暖水由深层向表层传输的充电过程^[29],进一步增加了 WPA 范围的扩大和 WPEB 在纬向东移,从而为形成 El Niño 提供良好的条件。因此,VM 影响 WPA 范围的扩展和 WPEB 的纬向运移主要分两个方面:(1) 春季 VM 会影响西赤道太平洋纬向风应力,从而产生异常西风,并通过季节足迹机制在夏季使赤道中太平洋产生异常暖海温,增加纬向 SST 梯度,促进暖水随着海洋 Kelvin 波向东传播,进而使 WPA 范围扩大和 WPEB 东移;(2) 春季 VM 会促进西太平洋次表层暖水随着季节的演化由次表层传向表层,从而使太平洋表层海温升高,增加 WPA 范围,并使 WPEB 更加向东运移。

3.4 预测模型

上述分析得到 FMA VMI 与 MAM(+1, 3—5 月) WPA 指数以及 JFM(+1, 1—3 月) WPEB 指数都有很好的相关关系。考虑到这种紧密相关关系,本节通过利用 FMA VMI 建立线性回归统计模型来对 MAM(+1) WPA 和 JFM(+1) WPEB 指数进行预测,具体如下:

$$WPA_{MAM(+1)} = a_1 * VMI_{FMA} \quad (1)$$

$$WPEB_{JFM(+1)} = a_2 * VMI_{FMA} \quad (2)$$

式中: a_1 、 a_2 分别是最小二乘法系数。为了检验上述两个预测模型的预测技巧,我们分别将模型回报与预测的结果同观测值进行相关分析。其中模型(1)用 FMA VMI 建模的回报和预测 MAM(+1) WPA 指数与观测值的相关系数分别为 0.52 和 0.59,且都通过 99% 的显著性水平检验(见图 9a),表明模型具有比较高的预测技巧。同样,模型(2)的回归和预测 JFM(+1) WPEB 指数与观测值的相关系数分别为 0.57 和 0.59,且都通过 99% 的显著性水平检验(见图 9b)。这些都证明我们建立的预测模型能

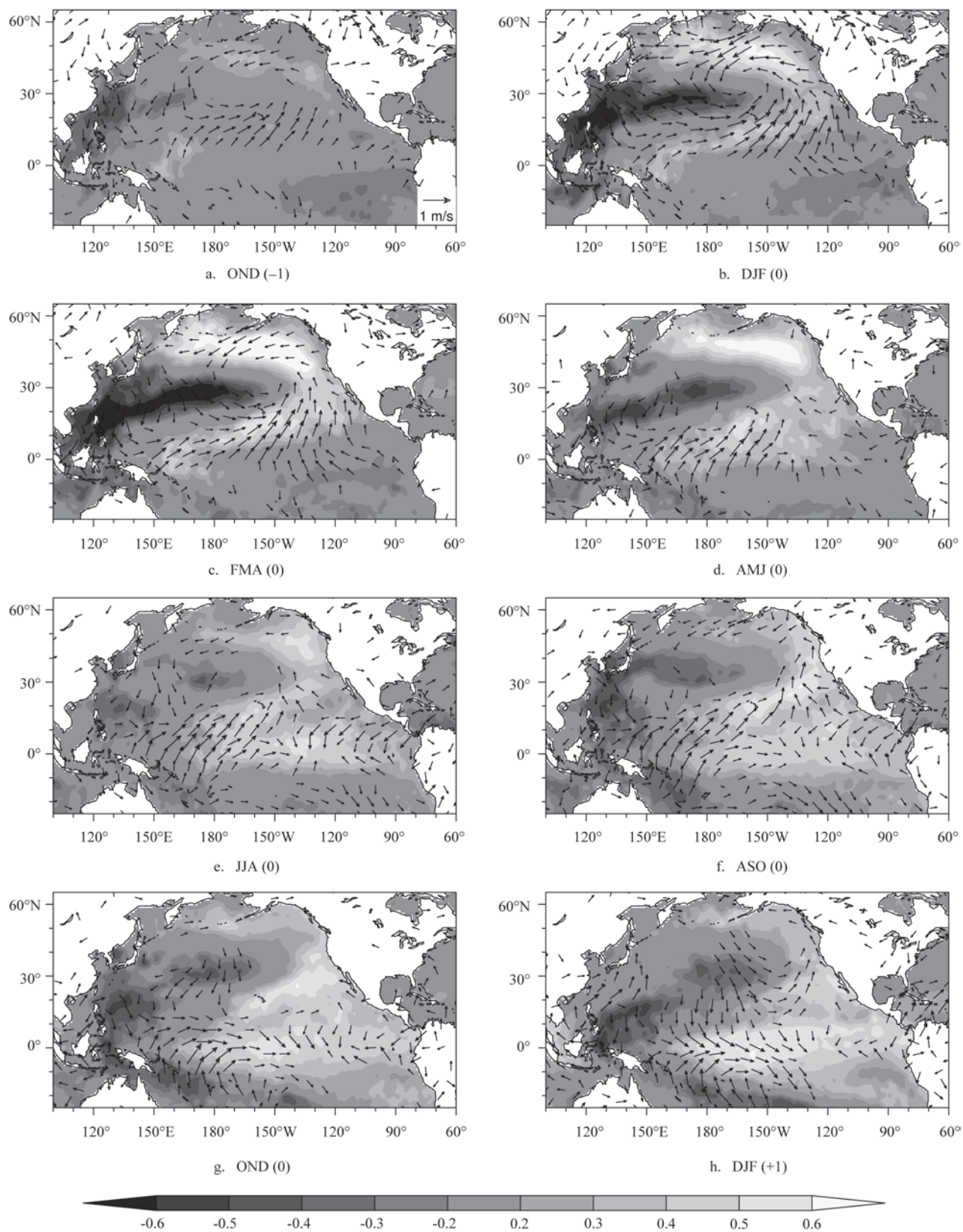


图7 去除前冬DJF(-1)平均的Niño34指数的FMA(0)VMI分别与3M平均的SST(填色)和U/V风场(矢量图)的超前滞后的相关空间图(超过95%的显著性水平检验)

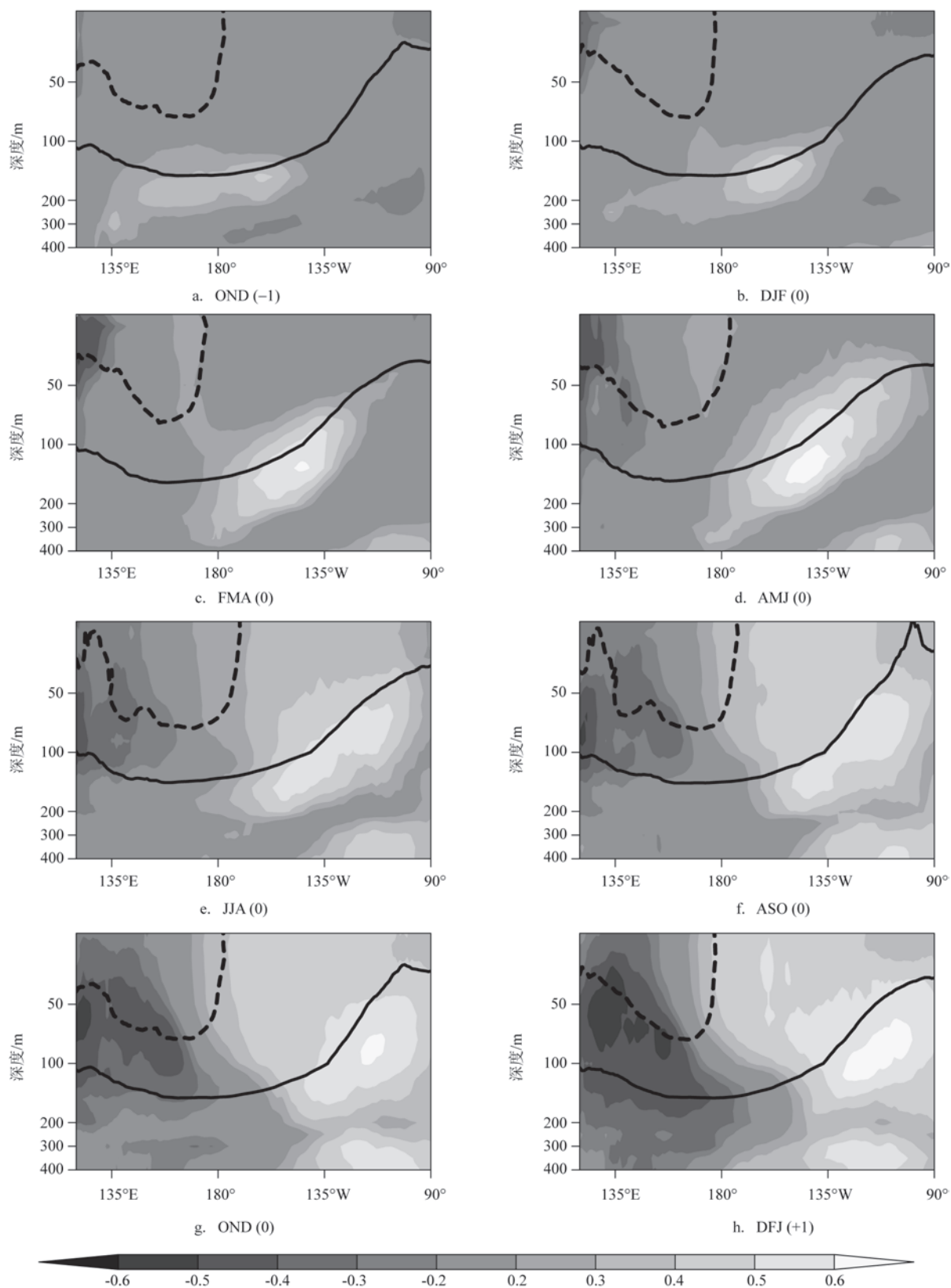


图8 去除前冬DJF(-1)平均的Niño34指数的春季FMA(0)平均VM指数分别与3M平均的次表层海温(填色,超过95%的显著性水平检验)的超前滞后相关空间图(实线和虚线分别为23°和28.5°等温线)

够超前1 a左右对WPA和WPEB的变化趋势进行预测并拥有很好的预测技巧。

我们采用了交叉检验法(留一法)对模型的稳定性进行评估。结果显示(见图10),用FMA VMI

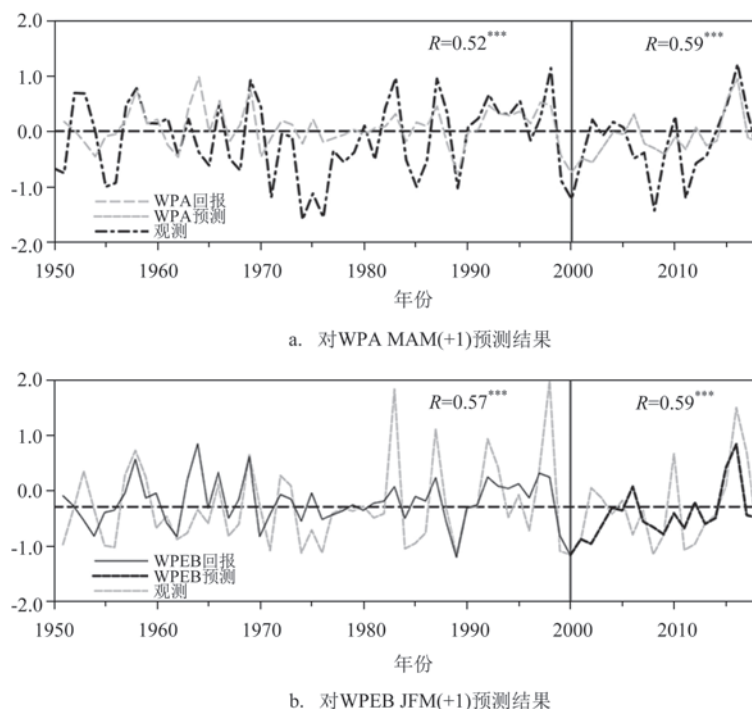


图9 FMA VMI线性回归统计模型指数预测的时间序列(回归建模时间段为1950—2000年,预测时间段为2000—2018年,***代表通过99%的显著性检验水平)

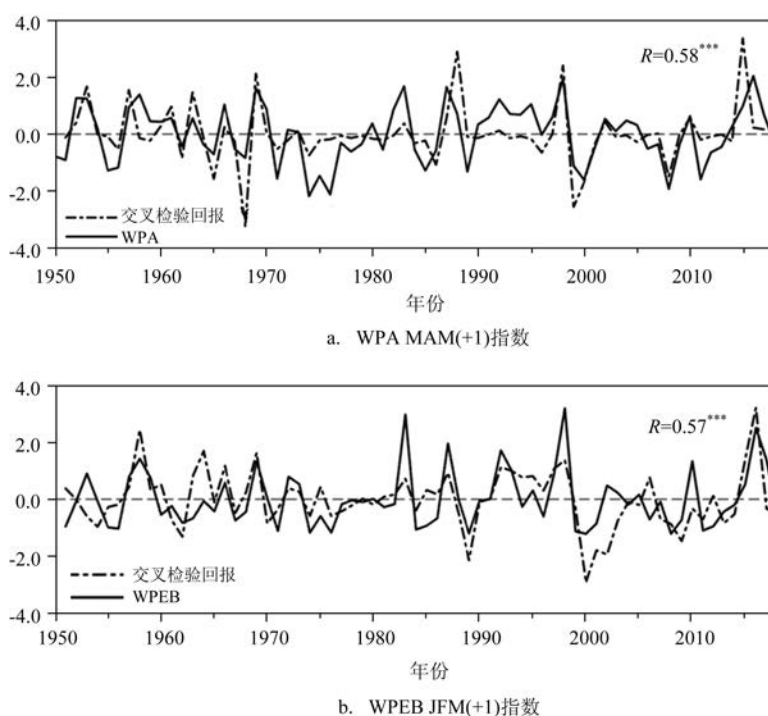


图10 用FMA VMI(0)指数进行交叉检验回报指数与观测时间序列(***代表通过99%的显著性检验水平)

进行交叉检验后的指数与WPA和WPEB的观测值的相关系数分别为0.58和0.57,且都通过99%的显著性检验水平。这些结果表明本文建立的预测模型具有很好的稳定性,对气象学界针对WPA和WPEB的预测有很好的帮助。

4 结论

本文利用1950—2018年HadISST资料和IAP次表层海温资料,分析了不同强度和不同位相的VM对WPA范围的扩展和WPEB纬向运移的影响。结果表明:

(1)VM对WPA的扩展和WPEB的东移在AMJ(0)—AMJ(+1)都有很强的正相关关系,并在MAM(+1)相关达到最高。对WPEB的影响主要是纬向运移,而非经向摆动。

(2)VM与WPEB的峰值相关系数在数值上高于VM与WPA的峰值相关系数,且VM与WPEB相关系数的峰值时间超前VM与WPA相关系数的峰值一个季度左右。因此,通过VM与WPEB的关系可以进一步预测WPA范围变化的趋势。

(3)随着VM位相和强度的变化,其对WPA和WPEB的影响拥有不对称性。当VM处于正位相且强度较强时,对WPA范围的扩展有明显的促进作用,并在ASO达到面积最大,同时对WPEB的东移有正反馈的作用;当VM处于正位相但强度较弱或中性状态时,WPA和WPEB的演化特征与气候态的情况保持一致。反之,当VM处于负位相且强度较强时,会抑制WPEB向东扩展而反向运移,从而导致暖池面积小于同期气候态的情况;当VM处于负位相但强度较弱或中性状态时,对WPA面积和WPEB纬向扩展影响不明显,但相较VM正位相时,WPA范围略大、WPEB位置偏东。

(4)VM可以通过引起赤道中太平洋异常暖海温和西赤道太平洋异常西风、加大赤道SST梯度、增强赤道对流、促进Bjerknes正反馈,从而使WPA范围扩大,WPEB位置东移。

(5)通过FMA VMI指数建立的对WPA和WPEB的预测模型具有很好的稳定性和高相关性,同时还可以提前1a左右对这两个变量的变化趋势进行有效预测。

参考文献:

- [1] 胡石建,胡敦欣.西太平洋暖池研究综述[J].海洋科学集刊,2016(1):37-48.
- [2] 陈锦年,王宏娜.西太平洋暖池热状况变化特征及其东传过程[J].海洋与湖沼,2009,40(6):669-673.
- [3] 李崇银,穆明权.厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常[J].大气科学,1999,23(5):513-521.
- [4] 穆明权,李崇银.西太平洋暖池次表层海温异常与ENSO循环的相互作用[J].大气科学,2000,24(4):447-460.
- [5] 齐庆华,侯一筠,张启龙.赤道太平洋纬向风和流异常与西太平洋暖池纬向运移[J].海洋与湖沼,2010,41(3):469-476.
- [6] Kutsuwada K, McPhaden M. Intraseasonal variations in the upper equatorial Pacific Ocean prior to and during the 1997-98 El Niño [J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(4): 1133-1149.
- [7] Sato N, Yoneyama K, Takayabu Y N, et al. Variability of the oceanic surface and subsurface layers in the warm pool associated with the atmospheric northward-propagating intraseasonal variability[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(13-14): 1201-1211.
- [8] Fu C B, Diaz H F, Fletcher J O. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the southern oscillation[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(9): 1716-1739.
- [9] 杨宇星,黄菲,王东晓.印度洋-太平洋暖池的变异研究[J].海洋与湖沼,2007,38(4):296-303.
- [10] 赵永平,吴爱明,陈永利,等.西太平洋暖池的跃变及其气候效应[J].热带气象学报,2002,18(4):317-326.
- [11] 张启龙,翁学传,侯一筠,等.西太平洋暖池表层暖水的纬向运移[J].海洋学报,2004,26(1):33-39.
- [12] 傅方奇,王彰贵,潘丰,等.西太平洋暖池重心的时空变化特征分析[J].海洋预报,2014,31(1):9-14.
- [13] 姚睿,郑小童,蒋灏,等. ENSO非对称性对热带降水的影响研究[J].海洋预报,2019,36(1):59-68.
- [14] 陈艺敏,钱永甫.西太平洋暖池海温对华南前汛期降水影响的数值试验[J].热带气象学报,2005,21(1):13-23.
- [15] 翁学传,张启龙,颜廷壮.热带西太平洋暖池及其与南方涛动和副热带高压关系[J].海洋科学集刊,1998(1):35-41.
- [16] 金祖辉,陈隽.西太平洋暖池区海表水温异常对东亚夏季风影响的研究[J].大气科学,2002,26(1):57-68.
- [17] White W B, Meyers G A, Donguy J R, et al. Short-term climatic variability in the thermal structure of the Pacific Ocean during 1979-82[J]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15(7): 917-935.
- [18] Bond N A, Overland J E, Spillane E, et al. Recent shifts in the state of the North Pacific[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(23): 2183.
- [19] Ding R Q, Li J P, Tseng Y H, et al. The Victoria mode in the North

- Pacific linking extratropical sea level pressure variations to ENSO [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 27-45.
- [20] Walker G T, Bliss E W. World weather V[J]. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 1932, 4: 53-84.
- [21] Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C. The seasonal footprinting mechanism in the csiro general circulation models[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(16): 2653-2667.
- [22] Xie S P, Philander S G H. A coupled ocean - atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific[J]. *Tellus A*, 1994, 46(4): 340-350.
- [23] Anderson B T, Perez R C, Karspeck A. Triggering of El Nino onset through trade wind-induced charging of the equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1212-1216.
- [24] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [25] Cheng L J, Trenberth K E, Fasullo J, et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015[J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1601545.
- [26] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 4407.
- [27] Webster P J, Lukas R. TOGA COARE: the coupled ocean-atmosphere response experiment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(9): 1377-1416.
- [28] Bjerknes J A. Atmospheric teleconnections from the equatorial PACIFIC1[J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3): 163.
- [29] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54(7): 811-829.

The Influence of North Pacific Victoria Mode on the area and eastern boundary of the Western Pacific warm pool

SHI Liang¹, DING Rui-qiang², CHAO Jing-hua³

(1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875 China; 3. School of Atmospheric science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225 China)

Abstract: In this paper, we analyze the influence of Victoria mode (VM) on the expansion of the western Pacific warm pool area (WPA) and the position of the western Pacific warm pool eastern boundary (WPEB) using HadISST reanalysis data and Institute of Atmospheric Physics (IAP) subsurface SST data. The results show that the intensity of the VM during spring (Feb-Apr) has a strong impact on the WPA between the following two summers. Meanwhile, it also plays a very important role in the meridional position of WPEB. In positive VM cases, the SST in the central equatorial Pacific will be abnormally warmer in the subsequent summer and westerly anomalies will occur in the western equatorial Pacific, which strengthens the eastward equatorial Kelvin wave and results in the eastward migration of WPEB and a wider WPA. In negative VM cases, the extension of WPA will be suppressed and reduced, and the WPEB tends to move westward. Furthermore, VM could affect the expansion of WPA and zonal migration of WPEB by its influence on the subsurface ocean temperature in the western equatorial Pacific. The results also show that the VM index can be used to effectively predict the trend of WPA and the location of WPEB one year in advance.

Key words: Western Pacific warm pool; warm pool area; warm pool boundary; Victoria Mode