

郝钰茜,梁茹雪,胡淑兰,等. 热带三大洋海温异常对陕西省夏季降水预测的影响[J]. 陕西气象, 2025(4):16-25.

文章编号:1006-4354(2025)04-0016-10

热带三大洋海温异常对陕西省夏季降水预测的影响

郝钰茜^{1,2}, 梁茹雪^{2,3}, 胡淑兰^{2,3}, 王娜³, 黄鹤¹

(1. 天津市气候中心, 天津 300074;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710014;

3. 陕西省气候中心, 西安 710014)

摘要:利用陕西省降水观测资料和英国哈德莱中心海温再分析资料,通过多变量季节经验正交分解(MV-SEOF)方法,分析热带印度洋、太平洋和大西洋(以下简称“三大洋”)前期海温异常与陕西省夏季降水异常的年际联合模态特征,并研究海温对降水预测的影响。结果表明:(1)热带三大洋前期海温季节演变与陕西省夏季降水异常关系密切。MV-SEOF1 模态,前冬热带太平洋上 El Niño 事件发展强盛,当年春季衰减,并伴随热带印度洋(TIO)和热带大西洋(TAT)滞后增暖时,陕西省夏季降水异常一致性偏多。MV-SEOF2 模态,前秋 El Niño 转为 La Niña, TIO 和 TAT 暖海温随之减弱,则关中东部降水异常偏多。MV-SEOF3 表明,前期出现太平洋经向模态(PMM)海温异常时,陕北南部到关中一带夏季降水异常偏少,其他地区偏多。MV-SEOF4 表明,前期热带北太平洋和 TAT 暖海温维持时,全省夏季降水异常自北向南呈现“多-少-多-少”的四极型分布。(2)合成和个例分析验证了各联合模态中前期海温异常与陕西省夏季降水异常的统计关系,其中 MV-SEOF1 和 MV-SEOF3 模态关系更为明确: MV-SEOF1 典型年合成海温和降水均与模态中相似,其中降水异常站点同号率达 88.14%;典型 PMM 海温异常的次年,出现 MV-SEOF3 型降水的年份占 87.5%。本文从多海域海温异常协同影响的角度,阐述了热带三大洋海温季节变化对陕西省夏季降水异常的影响,为陕西省短期气候预测提供科学参考。

关键词:三大洋;海温异常;夏季降水;气候预测;陕西省

中图分类号:P466;P426.6

文献标识码:A

陕西省年降水量集中在夏季(6—8月),夏季强降水、极端干旱等天气气候事件多发。因此,夏季降水预测成为陕西省短期气候领域的重点研究内容。近年来,伴随数值模式的发展和东亚气候变率机理研究的深入,东亚短期气候预测理论和方法不断完善,为陕西省短期气候预测提供了研究基础^[1-5]。目前,动力模式预测是季节降水预测的主要客观方法之一。然而,由于模式无法准确模拟外强迫变化及其影响,使得气候预测存在偏

差。与热带地区相比,动力模式对热带以外的地区,特别是我国西北和北方地区夏季降水的预测准确率偏低^[6]。上述动力模式预测方法的局限性促使学者深入研究海温、海冰和陆面外强迫因子对夏季降水异常的影响,根据诊断关系开发客观统计预测方法,成为短期气候预测的另一种重要手段^[7-9]。

热带海温异常及其海-气相互作用是区域气候变化的重要驱动力,相关理论和方法研究较多,特别是 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)的

收稿日期:2024-08-23

作者简介:郝钰茜(1991—),女,汉族,山东临沂人,博士,工程师,从事气候异常机理和预测研究。

通信作者:胡淑兰(1967—),女,满族,吉林松原人,学士,正研级高工,主要从事气候预测、气候变化与诊断分析等研究。

基金项目:中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-005);中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室开放课题(2024LASW-B17);秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023Y-21)

影响理论和体系已相对成熟^[10-11]。研究表明,中国西部山区夏季降水与前一年冬季 Nino3 区海温和春季西太平洋副热带高压(以下简称“西太副高”)强度呈显著正相关^[12]。赤道太平洋海温分布以及西太副高强度影响陕西夏季降水,上一年秋季赤道中东太平洋海温为正(负)增量分布时,当年夏季西太副高位置偏北、偏西(偏东),容易形成陕西夏季多雨(干旱少雨)的环流形势^[13]。El Nino 年,秦岭-淮河夏季极端降水偏少,特别是黄河下游、秦巴山地和关中平原极端降水呈下降趋势^[14]。前期 El Nino 事件衰减在一定程度上促进夏季东亚副热带季风区多雨和热带西北太平洋季风区干旱少雨^[15-16]。然而,当前研究主要集中在某一海洋或者使用其中一个表征指数,缺乏对全球热带海洋协同影响的认识。

热带太平洋、印度洋和大西洋(以下简称“热带三大洋”)通过海洋性大陆和海峡连接,海温异常的年际变率既有独特之处又存在协同变化^[17-19],热带三大洋海温配置及其纬向梯度对西太副高和东亚气候异常有重要影响^[20-21]。模拟研究表明,黄土高原湿季开始时间与冬春季三大洋海温模态的年代际变化相关^[22]。上述研究从大尺度热带海洋外强迫影响的角度,为夏季降水预测理论和方法构建提供了基础。那么,热带三大洋海温异常的协同变化与陕西省夏季气候异常有何关系?前期热带三大洋海温异常的变化对陕西省夏季降水异常是否具有指示性?针对以上科学问题,开展热带海温异常对陕西省夏季降水异常的影响研究,为提高该地区短期气候预测水平提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 数据

所用资料包括国家气象信息中心 1961—2012 年全国 2 479 站降水量逐日观测资料(其中陕西省代表站 101 站)和英国哈德莱中心 1960—2012 年全球海洋表面温度逐月再分析资料(<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html>),分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。文中热带范围为 $30^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{S}$ 的海洋地区。

1.2 研究方法

基于对热带三大洋主要海温异常型季节变化规律的认识,例如,东部型 ENSO 事件周期为 2~5 年,3~6 个季节长度上即看出 El Nino/La Nina 事件演变^[10-11];热带印度洋和热带大西洋通常在 ENSO 事件峰值之后的 3~6 个月出现增暖或变冷响应^[23-24],因而选择夏季之前的 6 个季节(即上两个冬季至当年春季, D(-2)JF(-1)-MAM(0))进行预测影响分析。例如,降水研究时段为 2018 年夏季时,则海温研究时段为 2016/2017 年冬季—2018 年春季。文中海温异常为距平,降水异常为距平百分率。进而去除线性趋势以消除年代际变化的影响,标准化处理以统一海温和降水异常的量纲。

本文采用多变量季节经验正交分解(Multi-variable Seasonal Empirical Orthogonal Function, MV-SEOF)方法,对夏季之前 6 个季节的热带三大洋海温异常和陕西省夏季降水异常进行分解,研究二者联合模态的特征和变化规律(图 1)。多变量经验正交分解(MV-EOF)是在传统经验正交分解(EOF)基础上增加变量数量,适用于研究某一气候现象中多个要素场时空变化特征^[25];MV-SEOF 在 MV-EOF 基础上考虑预测因子影响的持续性,可以提取前期多个季节的有效预测信息,在短期气候预测研究领域已有较多应用^[26]。第一到第四模态通过 North 显著性检验^[27],其空间模态由海温空间模态 EOF_{sst} 和降水空间模态 EOF_{pre} 组成,时间系数用 PC(Principal-Component)表示。

此外,文中采用回归、合成和 Morlet 小波变换方法^[28]进行特征和规律分析,使用空间相关系数(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)和空间距平同号率(Spatial Anomaly-symbolSkill, SAS)进行检验评估。其中,ACC 参考 Pearson 相关系数^[29]计算方法,SAS 为合成降水与模态降水异常的符号一致站占总站数的比率。参考气候业务中《月、季气候预测检验评分方法》相关规定,本文设置空间相关系数 ≥ 0.60 并且空间距平同号率 $\geq 70\%$ 时预测与实况空间相似度较高。

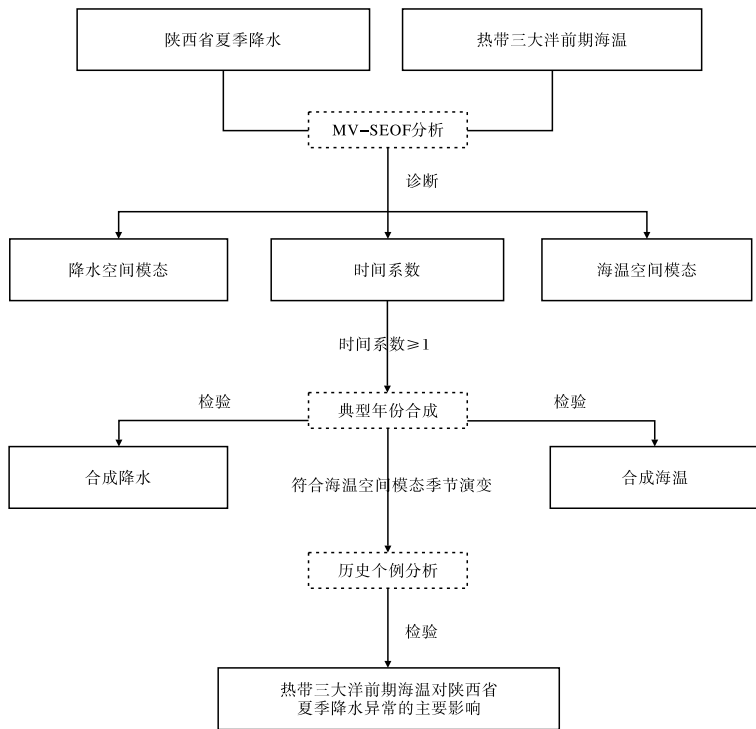


图1 热带三大洋海温和陕西省夏季降水异常 MV-SEOF 联合模态的构建及应用

2 前期热带三大洋海温与陕西省夏季降水异常的联合模态

2.1 联合模态特征分析

前期热带三大洋海温异常与陕西省夏季降水异常的 MV-SEOF 分析结果表明,前四个模态通过显著性检验,累计解释方差 52.7%。MV-SEOF1 模态(解释方差 25.9%)表明,自上两年冬季开始,热带中东太平洋上暖水逐渐聚集,上一年春季发展为 El Niño 事件, Niño3.4 区(30°N~30°S, 170°W~120°W)平均海温为 0.9℃, El Niño 持续发展并在前冬达到鼎盛,此时 Niño3.4 区平均海温为 2.8℃,当年春季增暖逐渐减弱(图 2a-g),热带印度洋和热带大西洋增暖滞后一个季节,当年春季增暖分别达到 0.6℃和 0.32℃(图 2d-g)。这种现象与 El Niño 事件大气桥作用(亦称海洋桥或海洋通道)^[10-11,18]的观点一致。在这种海温演变情况下, EOF_{pre}1 显示陕西省夏季降水异常偏多,偏多中心在关中地区,相比于气候态偏多 18.5%(图 2h)。

MV-SEOF2 模态(解释方差 15.1%)同样为 ENSO 事件的影响模态,但与 MV-SEOF1 模态相比存在 ENSO 冷暖事件的转换。上两年冬季,

热带中东太平洋 El Niño 事件发展强盛, Niño3.4 区平均海温达 2.5℃,春季快速衰减为 1.3℃(图 3a-b,g);热带印度洋和热带大西洋暖海温距平分别为 0.5℃和 0.2℃,随着 El Niño 事件迅速衰减至中性,二者增温大幅回落(图 3a-d,g);前一年夏季,热带中东太平洋海温转冷,前秋达到 La Niña 事件标准并持续发展,前冬 Niño3.4 区平均海温 -0.7℃,这一过程中热带印度洋和热带大西洋没有显著海温异常(图 3c-g)。与这种海温季节演变对应的,全省大部地区降水异常偏多,其中关中东部偏多的信号最显著(图 3h)。

此外, MV-SEOF3 模态(解释方差 6.5%)为太平洋经向模态(Pacific meridional mode, PMM)影响模态,此时热带印度洋和热带大西洋海温变化特征不显著(图 4)。PMM 是太平洋最强盛的热带外海-气相互作用之一,为热带太平洋海温年际变化的一种典型模态,特点是赤道东太平洋和副热带北太平洋海温异常的反位相振荡,对 ENSO 发生发展有重要调控作用^[30-31],近年来 PMM 呈现增强趋势^[32]。前期热带中东太平洋上出现 PMM 型海温分布梯度时,即热带北太平洋海温偏暖、赤道东太平洋偏冷时(图 4a-g), EOF_{pre}3 中

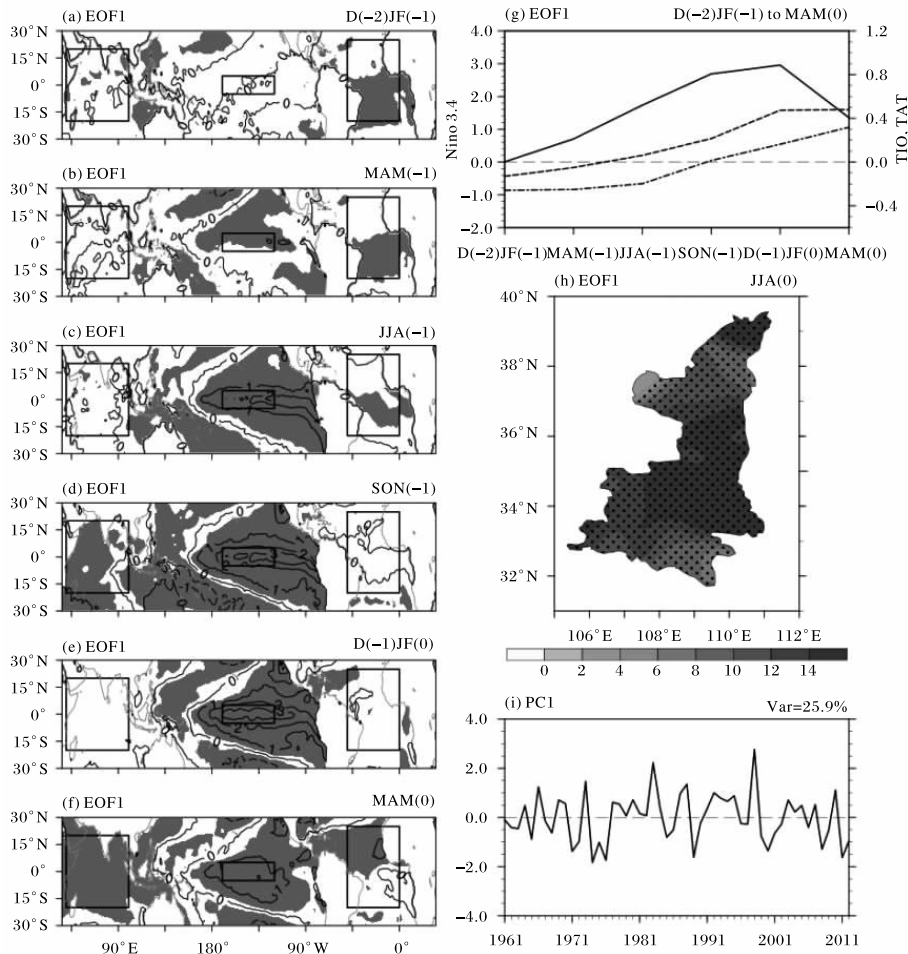


图2 热带三大洋海温异常前期季节演变和陕西省夏季降水异常对PC1的回归系数分布以及PC1的逐年变化(a-f 热带三大洋海温异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)的季节变化;g Nino3.4(实线)、热带印度洋(虚线)和热带大西洋(点虚线)区域平均海温异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)的季节变化,区域范围如a中框线所示;h 陕西省夏季降水距平百分率(单位: %);i PC1)(a-f 阴影和h 打点表示通过0.10信度的 t 检验)

全省自北向南呈现“+ - +”型,即陕北北部偏多,陕北南部-关中夏季降水异常偏少(该地区最小值为 -12.6%),陕南南部异常偏多(该地区最大值为 7.5%)(图4h)。

MV-SEOF4模态(解释方差 5.2%)中,前期热带北太平洋和热带大西洋维持暖海温异常时(图5a-g),EOF_{pre}4夏季全省自北向南呈现“+ - + -”分布,其中陕南南部夏季降水异常偏少、陕北北部异常偏多的态势,偏少中心 -12.2% ,偏多中心 17.3% (图5h)。EOF_{sst}4的海温异常型态与大西洋多年代际振荡(Atlantic multidecadal oscillation, AMO)的暖位相一致^[33]。AMO是热带海温年代际异常的强信号,对东亚夏季风和夏季降水年代际变率有深刻影响^[34-36]。PC4与冬季

AMO指数年际变化有高相关性(相关系数为0.51,通过0.01信度的 t 检验),并且MV-SEOF4联合模态存在显著的年代际振荡特征,即1960s—1990s初期减弱、1990s初期—2010s增强(图5i),与AMO的年代际转折特征(图略)一致。

因此,在热带三大洋海温异常影响方面,(1)MV-SEOF1和MV-SEOF2为ENSO事件发展演变主导的协同影响模态,主要为年际时间尺度的振荡,以2~5年周期最显著(图6a,b),与ENSO事件振荡特征吻合;受“大气桥”作用影响,热带印度洋和热带大西洋滞后El Niño事件一个季节增暖或者降温,因而为间接影响作用。(2)MV-SEOF3为热带太平洋的单独影响模态,有明显的

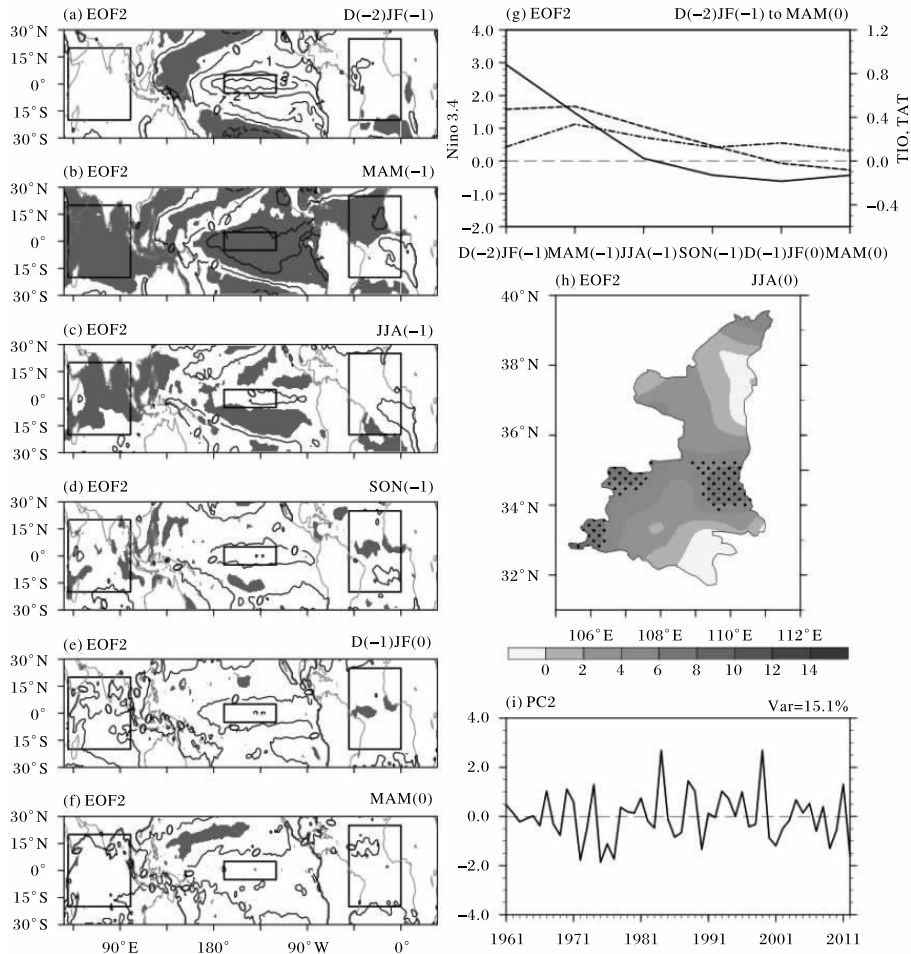


图3 热带三大洋海温异常前期季节演变和陕西省夏季降水异常对PC2的回归系数分布以及PC2的逐年变化(a-f 热带三大洋海温异常(单位:℃)的季节变化;g Nino3.4(实线)、热带印度洋(虚线)和热带大西洋(点虚线)区域平均海温异常(单位:℃)的季节变化,区域范围如a中框线所示;h 陕西省夏季降水距平百分率(单位:%);i PC2)(a-f 阴影和h 打点表示通过0.10信度的t检验)

年代际振荡特征,以10~15年振荡周期最显著(图6c);此时,热带印度洋和热带大西洋没有显著作用。(3)MV-SEOF4为热带太平洋-热带大西洋二者的协同影响模态,并且有1990s前减弱、之后增强的年代际转折特征,2000s之后进入热带太平洋-热带大西洋增暖协同影响的关键期(图5i)。总之,热带海温异常的关键影响区和季节演变型态不同,对应的陕西省夏季降水异常分布型也存在差异。但从降水异常的显著性来看,MV-SEOF1和MV-SEOF3模态的影响最为典型。

2.2 典型年份合成检验

为验证前期热带三大洋海温异常与陕西省夏

季降水异常的关系,按照时间系数 ≥ 1.0 ,分别选取MV-SEOF1-4模态的典型特征年份(表1),并对前期海温演变和当年陕西省夏季降水进行合成分析(图略)。然而,由于EOF方法本身和合成年份选择的局限性,不同模态的典型特征年份可能存在交叉,即可能同时表现为两种甚至多种海温异常场的共同影响,与实际情况相符。因此,本文在不影响文中不同模态“海温-降水”统计关系的基础上分析和讨论。

MV-SEOF1模态的典型年合成中,El Niño先发展、后衰减,热带印度洋和热带太平洋滞后增暖,与EOF_{sst1}模态情况类似(图2a-g),合成降水Comp_{pre1}与模态降水EOF_{pre1}异常“一致性偏多”

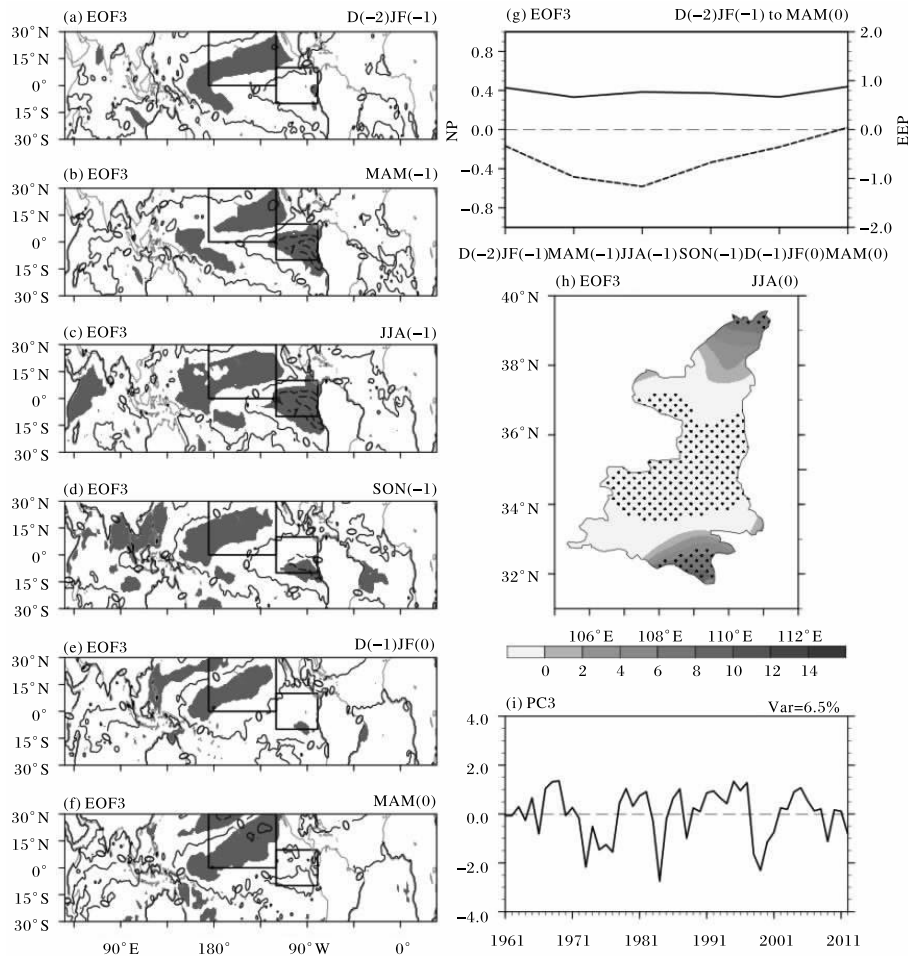


图 4 热带三大洋海温异常前期季节演变和陕西省夏季降水异常对 PC3 的回归系数分布以及 PC3 的逐年变化(a-f 热带三大洋海温异常(单位:℃)的季节变化;g 热带北太平洋 NP(实线)和赤道东太平洋 EEP(虚线)区域平均海温异常(单位:℃)的季节变化,区域范围如 a 中框线所示;h 陕西省夏季降水距平百分率(单位:%);i PC3)(a-f 阴影和 h 打点表示通过 0.10 信度的 t 检验)

的特征一致(图 2h),两者 ACC 和 SAS 分别高达 0.60 和 88.14%(表 1)。MV-SEOF2 模态典型年海温演变为 El Niño 转为 La Niña,热带印度洋和热带大西洋随之降温,符合 EOF_{sst}2 演变特点

(图 3g),但是合成降水Comp_{pre}2 无法准确模拟出模态降水 EOF_{pre}2 的旱涝空间分布(图 3h),两者 ACC 和 SAS 较 MV-SEOF1 模态的结果降低(表 1)。

表 1 MV-SEOF1-4 模态典型年中合成降水场Comp_{pre}和模态降水场EOF_{pre}的比较

联合模态	典型年	ACC	SAS/%
MV-SEOF1	1966,1973,1983,1988,1992,1998,2010	0.60	88.14
MV-SEOF2	1967,1970,1974,1984,1988,1989,1993,1996,1999,2011	0.38	44.55
MV-SEOF3	1967,1968,1969,1979,1987,1995,1997,2005	0.69	79.21
MV-SEOF4	1961,1962,1963,1964,1969,1970,2007,2010	0.54	69.29

注:典型年选取标准为时间系数 ≥ 1.0 ,ACC 为空间相关系数,SAS 为距平同号率。加粗的 ACC 和 SAS 表示通过显著性检验。

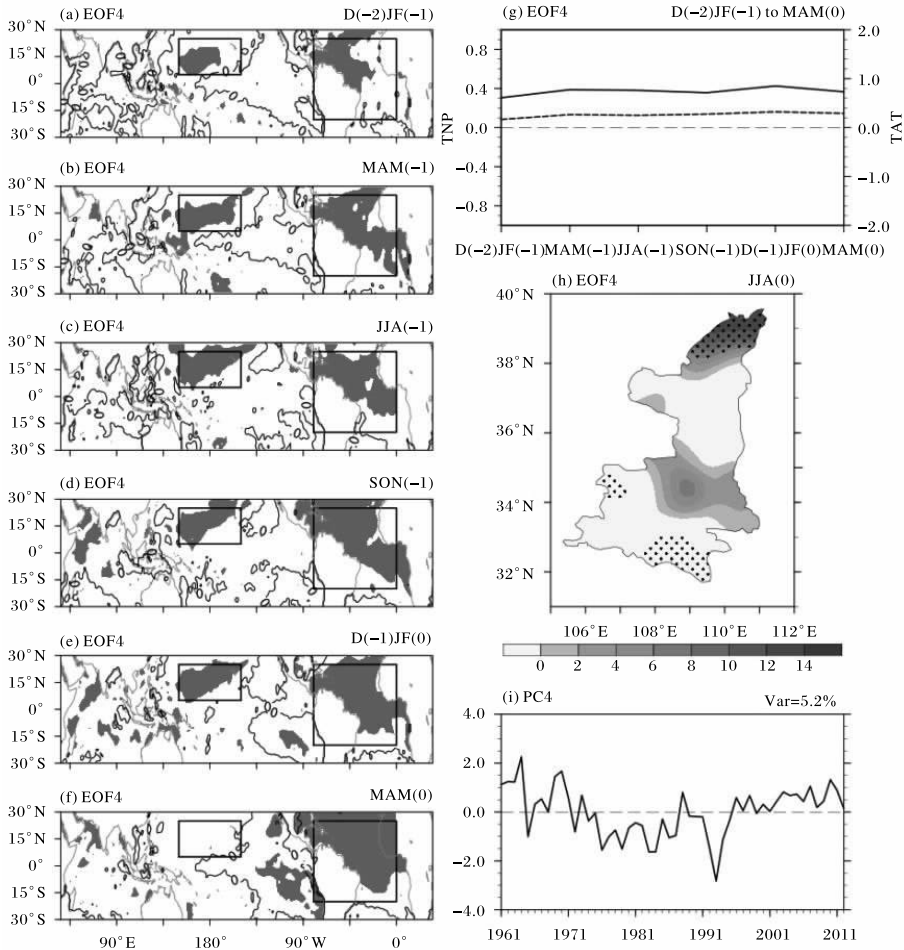


图 5 热带三大洋海温异常前期季节演变和陕西省夏季降水异常对 PC4 的回归系数分布以及 PC4 的逐年变化(a-f 热带三大洋海温异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)的季节变化;g 热带北太平洋 TNP(实线)和热带大西洋 TAT(虚线)区域平均海温异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)的季节变化,区域范围如 a 中框线所示;h 陕西省夏季降水距平百分率(单位: %);i PC4)(a-f 阴影和 h 打点表示通过 0.10 信度的 t 检验)(文见第 19 页)

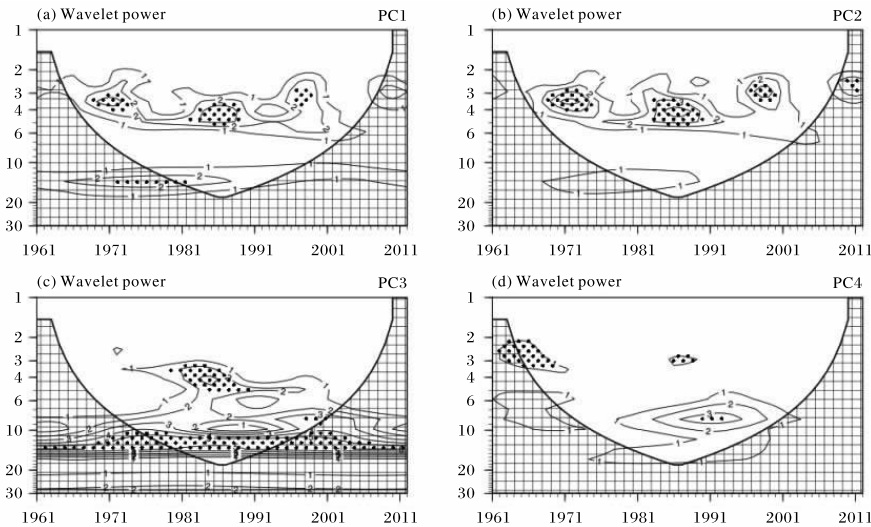


图 6 MV-SEOF 联合模态时间系数 PC1-4 的小波变换系数分布(打点表示通过 0.10 信度的 t 检验)(文见第 19 页)

MV-SEOF3 模态典型年合成表明,前期热带中东太平洋维持 PMM 型海温经向梯度时(图 4g),陕北高原南部-关中一带夏季降水异常偏少,与统计关系较为一致(图 4h)。两者 ACC 和 SAS 均通过检验(表 1),空间相似度较高。此外, MV-SEOF4 模态中,合成海温能够看到热带西北太平洋和热带大西洋的增暖,与 EOF_{sst}4 结果一致(图 5g),并且合成降水 Comp_{pre}4 与模态降水 EOF_{pre}2 同为陕北异常偏多和大巴山异常偏少格局(图 5h),但两者 ACC 和 SAS 没有通过显著性检验(表 1)。可能原因是 MV-SEOF4 模态解释方差较小(5.2%),热带海温异常影响作用偏弱,海冰、陆面等外强迫因子,山脉大地形以及中高纬度大气内部变率可能影响更强,降低了该模态统计关系的稳定性。

2.3 历史个例分析

基于 MV-SEOF 联合模态关系,利用前期热

带三大洋海温数据,分析 1960—2020 年不同的热带海温季节演变情况下陕西省夏季降水异常特征。结果表明, MV-SEOF1 和 MV-SEOF2 模态最显著特征为 ENSO 事件,分别为“El Niño 先发展、后衰减”和“El Niño 向 La Niña 转变”。1960—2020 年中有 16 年海温异常演变表现为“El Niño 先发展后衰减”,符合夏季降水异常一致性偏多的年份占比超过 65%;12 年为“El Niño 向 La Niña 转变”,但符合关中东部偏多的年份占比低于 65%。因此, MV-SEOF1 和 MV-SEOF2 模态虽然同样是 ENSO 事件为主要影响因子,但是 MV-SEOF1 模态中“El Niño 前冬发展强盛、当年春季开始衰减”的特征对陕西省夏季降水异常预测更有指示性意义,通常指示当年夏季降水异常为一致性偏多(表 2)。

MV-SEOF3 为前期热带太平洋上 PMM 的影响模态,对应的陕西省当年夏季降水为关中异

表 2 不同热带海温季节演变情况下陕西省夏季降水异常典型特征

海温演变	典型个例年	降水异常	一致年份占比
El Niño 衰减	1963/64, 1965/66, 1969/70, 1972/73, 1976/78, 1979/80,	偏多	68.75%
	1982/83, 1986/87, 1987/88, 1991/92, 1994/95, 1997/98, 2002/03, 2004/05, 2006/07, 2009/10, 2015/16, 2018/19		
El Niño 转 La Niña	1964/65, 1970/71, 1973/74, 1978/79, 1983/84, 1988/89, 1998/99, 2005/06, 2007/08, 2010/11, 2016/17, 2019/20	关中东部偏多	41.67%
PMM	1966/67, 1967/68, 1968/69, 1978/79, 1986/87, 1994/95, 1996/97, 2004/05	陕北南部- 关中偏少	87.5%
TNP 和 TAT 增暖	1960/61, 1961/62, 1962/63, 1963/64, 1968/69, 1969/70, 2006/07, 2009/10	陕北北部偏多, 陕南南部偏少	37.5%

注:1963/64 表示跨越 1963—1964 年的冬季,加粗表示通过显著性检验。

常偏少,历史符合年份占比 87.5%,预测指示性较高;而 MV-SEOF4 为热带太平洋-热带大西洋增暖协同影响模态,对应于陕西省当年夏季降水异常为陕北偏多、陕南南部偏少,但是符合年份占比偏低,预测指示性较其他模态也偏低。

历史个例合成分析再次验证了“MV-SEOF1 和 MV-SEOF3 模态中‘前期海温演变-夏季降水异常’统计关系更为明确”的结论。因此,在陕西省汛期气候预测实践中,可以将热带中东太平

洋上前冬 El Niño 达到鼎盛(EOF_{sst}1)和前期持续 3~6 个季节的 PMM 型(EOF_{sst}3)作为热带海温异常强迫的典型预测因子,分别指示陕西省夏季降水异常一致性偏多(EOF_{pre}1)和陕北南部-关中一带异常偏少(EOF_{pre}3)。

3 结论

本文阐述了 1961—2012 年热带三大洋海温异常对陕西省夏季降水异常的影响,为陕西省短期气候预测提供了新的科学参考依据。主要结论

如下。

(1)若前冬热带太平洋上 El Niño 事件达到鼎盛、且春季开始衰减,并伴随 TAT 和 TIO 的滞后增暖时,陕西省夏季降水异常一致性偏多;若前秋 El Niño 转为 La Niña 事件,随后 TAT 和 TIO 暖海温退去,则陕西省夏季异常降水以偏多为主,其中关中东部异常偏多最为显著。

(2)如果前期太平洋出现 PMM 型海温异常,则全省自北向南表现为“多-少-多”型分布,即陕南北部-关中一带夏季降水异常偏少,其它地区偏多;如果前期热带北太平洋和 TAT 暖海温维持,则全省夏季降水呈南北向四极型分布,其中陕西北部异常偏多,陕南南部异常偏少。

(3)合成和个例分析验证了 MV-SEOF1-4 联合模态中前期热带三大洋海温异常与陕西省夏季降水异常的联系,其中以 MV-SEOF1 和 MV-SEOF3 模态中的统计关系更为显著,提高了热带海温异常影响陕西省汛期降水异常的可信度。

(4)考虑到每年影响我国汛期降水异常的关键预测因子不同,并且同一预测因子的气候效应也在变化^[37-38],同时本文个例分析中发现同一预测因子下降水异常差异较大的情况,与已有研究结论一致。因而,针对气候影响的差异表现和原因有待进一步分析。

参考文献:

- [1] 王会军. 来自大气内部的季节气候可预测性初探[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 64-70.
- [2] 李维京, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的研究[J]. 气象学报, 1999, 57(3): 339-345.
- [3] 李明娟, 赵奎锋. PRECIS 模式对陕西气候模拟能力验证[J]. 陕西气象, 2010(3): 1-5.
- [4] 丁一汇, 刘一鸣, 宋永加, 等. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及实验[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 237-246.
- [5] 王越, 胡淑兰, 肖科丽. 陕西秋季区域旱涝异常强信号及预测研究[J]. 陕西气象, 2015(2): 11-14.
- [6] WANG B, LEE J Y, KANG I S, et al. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004) [J]. Climate Dynamics, 2009, 33: 93-117.
- [7] 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): 375-382.
- [8] 高辉, 高晶. 黑潮冬季海温对我国东北地区夏季降水预测信号的增强[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 27-33.
- [9] 冯蕾, 魏凤英, 朱艳峰. 基于前春对流层温度和北大西洋涛动的中国夏季降水统计预测模型[J]. 大气科学, 2011, 35(5): 963-976.
- [10] MCPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H. ENSO as an integrating concept in Earth science [J]. Science, 2006, 314(5806): 1740-1745.
- [11] WALLACE J M, RASMUSSEN E M, MITCHELL T P, et al. On the structure and evolution climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C7): 14241-14259.
- [12] 胡轶佳, 吴欣原, 李荔珊, 等. 基于年际增量法的中国西部山区夏季降水统计预测研究[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(3): 161-169.
- [13] 肖科丽, 赵国令, 方建刚, 等. 影响陕西夏季降水主要因子及增量预测方法[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 458-469.
- [14] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮河北极降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363.
- [15] HAO Y Q, LIU B Q, ZHU C W, et al. The interannual dominant co-variation of boreal summer monsoon rainfall during 1979-2014[J]. Journal of Climate, 2018, 31(11): 4193-4212.
- [16] HAO Y Q, LIU B Q, ZHU C W, et al. Asymmetry in the dominant co-variation mode of boreal summer monsoon rainfall regulated by the ENSO evolution [J]. Climate Dynamics, 2019, 53: 6379-6396.
- [17] 吴国雄. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件: I. 资料分析[J]. 大气科学, 1998, 24(4): 15-25.
- [18] WANG C Z. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective[J]. Climate Dynamics, 2019, 53: 5119-5136.

- [19] FAN H J, WANG C Z, YANG S, et al. Coupling is key for the tropical Indian and Atlantic oceans to boost super El Niño[J]. *Science Advances*, 2024, 2281(10):1-8.
- [20] 应明, 孙淑清. 西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究[J]. *大气科学*, 2000, 24(2):193-206.
- [21] 陈烈庭. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用[J]. *大气科学*, 1982, 6(2):148-156.
- [22] 魏娜. 1960-2018年黄土高原地区干湿季转换时间变化及其影响机制研究[D]. 西安:西北大学, 2022:82-83.
- [23] ALEXANDER M A, BLADE 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: 2205-2231.
- [24] KLEIN S A, SODEN B J, LAU N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12:917-932.
- [25] WANG B. The vertical structure and development of the ENSO anomaly mode during 1979-1989[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 49(8):698-712.
- [26] 郝钰茜, 郝立生, 何丽烨, 等. 热带印-太海温与海河流域夏季降水的联合模态及降水预测应用[J]. *地球物理学报*, 2024, 67(6):2069-2084.
- [27] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7):699-706.
- [28] CHUI C K. An introduction to wavelets[M]. Academic Press, 1992, 24-29.
- [29] PEARSON K. Contributions to the mathematical theory of evolution[J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1895, 60, 489-498.
- [30] YU J Y, KIM S T. Relationships between extratropical sea level pressure variations and the central Pacific and eastern Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(3):708-720.
- [31] CHIANG J C H, VIMONT D J. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(21):4143-4158.
- [32] FAN H J, YANG S, WANG C Z et al. Strengthening amplitude and impact of the Pacific meridional mode on ENSO in the warming climate depicted by CMIP6 models[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(15):5195-5213.
- [33] DELWORTH T L, MANN M E. Observed and simulated multi-decadal variability in the Northern hemisphere[J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16: 661-671.
- [34] YANG Q, MA Z G, FAN X G, et al. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(17):7017-7033.
- [35] 杨韵, 李建平, 谢飞, 等. 热带北大西洋模态年际变率的研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(8):808-817.
- [36] 姜大膀, 司东, 缪家鹏. 大西洋年代际振荡对东亚气候影响的综述[J]. *大气科学*, 2024, 48(1): 261-272.
- [37] 高辉, 王永光. ENSO对中国夏季降水可预测性变化的研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(1):131-137.
- [38] ZUO Z Y, ZHANG R H. Influence of soil moisture in eastern China on the East Asian summer monsoon[J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2016, 33(2):151-163.