

# 西南雨季降水变化与海温的关系

钟欣悦<sup>1</sup>, 毛文书<sup>1</sup>, 沈恒<sup>1</sup>, 彭育云<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

<sup>2</sup>简阳市雷家学校, 四川 成都

收稿日期: 2024年7月10日; 录用日期: 2024年9月4日; 发布日期: 2024年9月12日

## 摘要

为了研究中国西南雨季降水变化和海温的关系, 利用西南地区1960~2022年81站共63年的逐日气象观测降水量资料、同期英国哈德莱中心月平均海表温度(SST)资料(格点分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )、欧洲气象资料中心(ERA-interim)的月平均降水再分析资料(格点分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ )。通过相关分析、经验正交函数分解(EOF)和奇异值分解(SVD)等方法, 对西南雨季降水变化与全球SST之间的关系进行了研究分析, 结果表明: 1) 西南地区63年的雨季降水空间分布不均, 呈现东多西少, 南多北少的态势, 同时, 其与前冬、春季澳大利亚东北部太平洋, 夏、秋季北印度洋和同期5~10月份的北印度洋海温呈现显著负相关关系, 即关键区海温异常偏暖(冷), 西南雨季降水偏少(多)。2) EOF分析表明: 在第1模态下, 前一年冬季和当年春季关键区海域海温的分布形式多呈现出西高东低的形式, 包括了东太平洋冷舌和西太平洋暖池形态, 并且在千禧年之前大部分都是海温多为偏冷状态; 而千禧年之后关键区海温由偏冷转为偏暖状态。而当年夏秋季和雨季同期关键区海域海温呈现出全区一致偏暖状态, 并且在90年代之后海温从偏冷转变为偏暖状态, 其第2空间模态为印度洋正偶极子分布形式。3) SVD分解表明: 关键区海温与川西高原地区雨季降水存在正相关关系, 而与川东、黔南和云南呈现出一个显著的负相关性, 不同季节的海温关键区影响的降水大值区域可能略有不同, 但总体来说, 当关键区海温异常偏高(低), 川西高原的雨季降水异常偏多(少), 而其余大部分地区降水异常偏少(多); 其分解结果与相关系数的分析结果基本一致并且近年来西南地区的雨季降水呈现出逐年减少的态势。

## 关键词

西南雨季, 海表温度, EOF分解, SVD分解, 合成分析

# Relationship between Southwest Monsoon Rainfall Variability and Sea Surface Temperatures

Xinyue Zhong<sup>1</sup>, Wenshu Mao<sup>1</sup>, Heng Shen<sup>1</sup>, Yuyun Peng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>LeiJia School of Jianyang, Chengdu Sichuan

## Abstract

In order to study the relationship between precipitation change and sea surface temperature in the rainy season in southwest China, the daily meteorological observations of 81 stations in Southwest China from 1960 to 2022 for a total of 63 years were used measured precipitation data, the monthly mean sea surface temperature (SST) data of the Hadley Center in the United Kingdom (grid resolution of  $1^\circ \times 1^\circ$ ) and the monthly mean precipitation reanalysis data of the European Meteorological Data Center (ERA-interim) (grid resolution of  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ). The relationship between precipitation change in the rainy season in southwest China and global SST was analyzed by correlation analysis, empirical orthogonal function decomposition (EOF) and singular value decomposition (SVD). The results shows: 1) The spatial distribution of rainy season precipitation in southwest China in 63 years was uneven, showing a trend of more precipitation in the east and less in the west, and more in the south and less in the north, and at the same time, it was significantly negatively correlated with the sea surface temperature in the Pacific Ocean in northeast Australia in the early winter and spring, the northern Indian Ocean in summer and autumn, and the northern Indian Ocean in May and October in the same period, that is, the SST in the key areas was abnormally warm (cold), and the precipitation in the southwest rainy season was less (more). 2) EOF analysis shows that in the first mode, the distribution of sea surface temperature in the key areas in the winter and spring of the previous year mostly shows the form of high in the west and low in the east, including the cold tongue of the eastern Pacific and the warm pool of the western Pacific, and most of the SST is in a cold state before the millennium. After the turn of the millennium, the sea surface temperature in key areas changed from cold to warm. However, the SST in the key areas of the key area in the same period of summer, autumn and rainy season showed a uniform warming state in the whole region, and after the 90s, the SST changed from cold to warm, and the second spatial mode was the normal dipole distribution of the Indian Ocean. 3) SVD decomposition showed that the sea surface temperature in the key area and the rainy season in the western Sichuan Plateau. There is a positive correlation with precipitation, and there is a significant negative correlation with eastern Sichuan, southern Guizhou and Yunnan, and the influence of key areas of SST in different seasons is positive. The precipitation area may be slightly different, but in general, when the sea surface temperature in the key area is abnormally high (low), the rainy season precipitation in the western Sichuan Plateau is abnormally biased more (less), while most of the rest of the precipitation is abnormally low (more). The decomposition results are basically consistent with the analysis results of the correlation coefficient and in recent years. The rainy season precipitation in southwest China shows a decreasing trend year by year.

## Keywords

Southwest Rainy Season, SST, Empirical Orthogonal Function, Singular Value Decomposition, Synthetic Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,在全球变暖的背景下,洪涝、干旱等气候现象越来越严重,全球极端气候现象频发,对人类的生产、生活、经济发展等方面都带来了极大的影响。我国西南地区,其不仅气温稳定在  $10^\circ\text{C}$  以上的

天数和积温持续增加[1], 并且区域的气候条件发生了改变[2], 是雨季旱涝发生频率较高的地区。研究表明海温是引起全球气候变化的重要因素之一, 其变化对全球气候有着重要影响。因此深入研究西南雨季降水变化与海温的关系具有重要的现实意义。

迄今为止, 国内外学者在海温和降水关系的研究领域取得了丰厚的成果, 大量文献从不同方面揭示了各自特点。例如, 胡豪然等[3]认为西南地区降水场展现出明显的空间特征差异, 呈现出东西和南北向的不同。王瑞英等[4]指出, 西南地区近 40 年以来, 雨季降水量长期处于下降的趋势, 降水异常少年出现的频率也在增加, 但不是所有区域都呈现出相同干旱的趋势。王昊等[5]发现在云南、贵州等西南低海拔地区雨季降水减少, 而高海拔地区变得更加湿润且以中小雨降水为主。李希夷[6]指出, 印度洋海表面温度存在明显的年代际变化, 变率最大的季节为北半球夏季, 其年代际空间变化特征主要以全海盆一致变化为主。陈锦年等[7]称热带西太平洋暖池平均深度可达 130 m 左右, 呈现出西浅东深的耳状分布特征, 在冬春季节南北窄东西宽, 呈纬向带状分布; 在夏秋季节, 暖池明显向北扩展。平均深度最大中心位于(5°S, 180°)附近。2023 年 Kim 等人[8]指出在过去 20 年中, 印度洋 - 太平洋暖池海温增加, IPWP 地区对流层上层变得更加稳定。并且 Takahashi 等[9]声称海温对降水的影响在不同时间尺度上存在差异, 如果需要了解海温对降水的详细影响, 除了年际时间尺度外, 还应研究较短的季节内时间尺度。赵永晶等[10]通过对全球海温距平场进行 EOF、SVD 分析, 发现北太平洋、印度洋和我国南海以及赤道中东太平洋是影响我国降水的关键区域。这些海域的海温异常对我国降水的影响稳定且一致。余锦华等[11]提出赤道西太平洋海洋大陆区域降水增加, 使孟加拉湾低槽增强, 同时西南地区南侧的偏南气流加强了向西南地区的水汽输送, 将导致西南地区春季降水增多。刘扬等[12]认为南印度洋偶极子对中国西南地区初秋降水也有重要影响, 黄天赐等[13]于 2020 年提出其影响路径主要是通过将孟加拉湾水汽向该地区输送, 当赤道东太平洋为暖海温异常, 热带印度洋为西正东负的偶极子型海温异常时, 分别激发出西北太平洋反气旋和孟加拉反气旋, 共同向西南东部输送水汽, 造成西南东部降水偏多。对于西南汛期降水, 晏红明等[14]认为其地域差异显著, 与印度洋海温变化有关, 特定的印度洋海温分布可以作为西南汛期旱涝预报的信号因子。

研究西南雨季降水变化与全球海温的关系不仅有助于我们更好地理解气候系统中的相互作用[15]-[17], 还能为预测西南雨季的变化趋势提供关键线索, 从而帮助采取更有效的应对措施应对气候变化带来的影响, 同时可以为雨季降水的预测提供依据, 有助于农业生产、水资源管理以及灾害预警和应对工作并且为生态环境保护和恢复提供科学支持, 减少气候变化带来的不确定性和风险。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料概况

一、中国气象局现有的 1960 至 2022 年共 63 年西南地区 81 个气象观测站点的逐日气象观测降水量资料。二、英国的 Hadley 气候预测和研究中心提供的 1960 年~2022 年的月平均海表温度资料, 格点分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。三、ECMWF (欧洲中期天气预报中心)提供的 1960~2022 年的月平均降水资料, 格点分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

### 2.2. 研究方法

研究方法包含有: 皮尔逊相关系数、经验正交函数分析(Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF 分析)、合成分析(Composite Analysis)、奇异值分解(Singular Value Decomposition, 简称 SVD 分解)。

#### 2.2.1. EOF 分析[18] [19]

经验正交函数分析方法(Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF 分析)在地球环境科学中经常被使

用,主要目标是将时空数据集转化为物理量的空间模态和与之相关的时间上的投影(时间序列),来简化对于该时空数据集的掌握。其能够把随时间变化的气象要素场分解为空间函数部分和时间函数部分,空间函数部分不随时间变化,概括地域分布特点,时间函数部分由空间点的线性组合构成,称为主分量,研究总方差里头几个占比很大的主分量随时间变化的规律就可以大致掌握随时间变化的研究;其具体计算方法参考[18],这里不再赘述。

由于所有空间模态(或时间系数)对应的方差贡献率之和为 1,因此当最高的几个方差贡献率累加后得到的累计方差贡献率较大时,这些空间模态(或时间系数)就能够有效地表示原始数据的主要特征。而至于分析对象的选用而言,如果想较多的定性反映空间相关结构,则可使用标准化距平场为分析对象[19]。

### 2.2.2. SVD 分解[19]-[22]

奇异值分解(Singular Value Decomposition, 简称 SVD 分解)是一种线性代数的方法,可以将一个矩阵分解成三个矩阵相乘。这三个矩阵分别代表了原始矩阵的结构、奇异值以及特征向量。在气象学中,已广泛应用于气候诊断分析中,通常用于分析两个气象要素场的时空变化的联系和相互作用[20]-[22],其具体计算过程为[19]:设有两个气象要素场  $X$  和  $Y$ , 空间点数分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 时间点数为  $t$ , 计算  $X$  和  $Y$  的交叉协方差矩阵:

$$C_{m_1 \times m_2} = \frac{1}{n} (X_{m_1 \times n} Y_{n \times m_2}^T) \quad (4)$$

此时  $X$  被称为左场,  $Y$  称为右场, 再对协方差阵  $C$  进行 SVD 分解:

$$\begin{aligned} C_{m_1 \times m_2} &= U_{m_1 \times m_1} \begin{pmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_{m_1 \times m_2} V_{m_2 \times m_2}^T \\ U_{m_1 \times m_1} &= [u_1, u_2, \dots, u_{m_1}] \\ V_{m_2 \times m_2} &= [v_1, v_2, \dots, v_{m_2}] \end{aligned} \quad (5)$$

$U$  和  $V$  的每一列都是一个空间分布函数, 每个场内部的空间型相互正交, 左奇异向量  $u_j$  和右奇异向量  $v_j$  分别表示第  $j$  个模态下左右场的空间分布。协方差阵  $C$  的所有元素平方和就是总的协方差平方和 (Squared Covariance), 可以表示两个场的整体相关程度。

## 3. 西南地区雨季降水特征

### 3.1. 研究区概况

我国西南地区地势西北高、东南低, 海拔由西向东逐渐降低。四川盆地西部存在山地地形, 东部有着平原和丘陵地带, 平均海拔约为 500~1000 m; 云南东北部为高原和山地, 海拔普遍在 1500~3000 m; 贵州则以喀斯特地貌为主, 海拔多在 1000~2000 m 左右; 整体而言, 西南地区地势复杂多变, 海拔高度从数百米至数千米不等, 形成了丰富多样的地理景观。并且, 西南地区处于东亚季风和印度季风的交汇区, 这种独特的地理位置造就了复杂的气候格局, 表现为明显的干湿分异特征。

### 3.2. 西南雨季降水的空间特征

对于西南地区雨季时间划分的问题, 本文参考晏红明等人[23]的结论, 选取 5~10 月为西南雨季范围。由图 1 知道, 西南雨季降水在空间分布上具有不均匀性, 南部云贵高原降水多, 西北部高山地区降水少, 四川盆地内部降水量分布不均, 总体呈现出由东向西逐渐减少的趋势。降水大值区位于云南省南部, 以思茅、江城、澜沧几个站点为主, 最大已超过 1500 mm; 同时四川西南部也存在一降水较多的区域, 雅

安、乐山、峨眉几个站点的降水较多, 达到 1200 mm 以上。川西高原靠近横断山脉的区域降水明显低于西南地区大部, 甘孜站的降水量在 350 mm 左右, 降水的低值中心以香格里拉、康定、小金一带为分界线, 降水量由西向东递增, 贵州区域降水分布得比较均匀。这样的降水分布可能与地形因素有关。

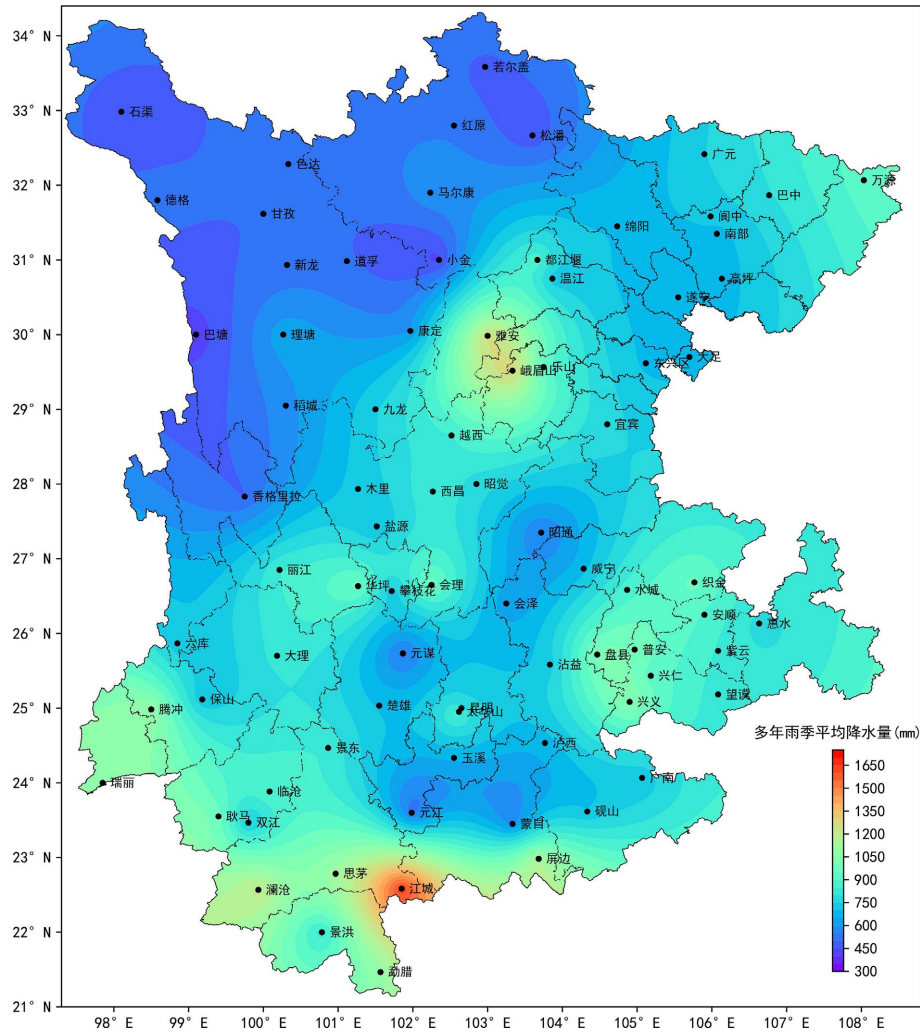


Figure 1. Spatial distribution of cumulative precipitation in the rainy season in Southwest China from 1960~2022

图 1. 1960~2022 年西南雨季累计降水空间分布图

## 4. 西南雨季降水量与全球海表温度的相关分析

### 4.1. 西南雨季降水与逐月 SST 的相关分析

为寻找西南雨季降水和全球海温的显著相关区域, 我们选取 1960~2022 年的西南雨季多年平均降水的年际序列资料和 1960~2022 年的全球海温资料, 分别求前一年 12 月到当年 11 月的月相关和季节相关, 以便更加精确找出相关效果显著的关键海域, 再进行相关性的研究, 结果如下(图略): 全球大部分海域冬季三个月平均海温与西南地区雨季降水呈现出负相关性, 正相关区出现在南北半球高纬度海域和南美洲附近的太平洋海域中。其中相关系数达 0.3 以上且通过 90% 的置信水平检验、范围较大的负相关海域有四处: 一、赤道东太平洋海域(35°S~15°S, 90°W~180°); 二、赤道大西洋海域(0°~25°N, 10°W~60°W); 三、

南半球印度洋海域( $50^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ,  $45^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$ ); 四、澳大利亚东北部太平洋海域( $30^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $125^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ ), 并且第四处海域不仅相关性好, 且随时间的变化也最小。而全球范围内的春季海温的相关系数分布较前三月而言没有明显变化, 在大西洋海域有正相关海域扩大负相关海域缩小的态势, 相关性并不显著。其中相关系数达 0.3 以上且通过 90% 的置信水平检验、范围较大的负相关海域较冬季而言, 减少了第二处赤道大西洋海域, 而第三处南半球印度洋海域( $50^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}$ ,  $40^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )和第四处澳大利亚东北部太平洋海域( $25^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ )范围也略有改变, 但总体而言, 第四处海域变化最小。对于夏季海温的相关系数分布而言, 上文负相关系数分布范围较大且显著的赤道东太平洋海域随时间面积逐渐缩小, 而大西洋海域负相关海域略有增大。其中相关系数达 0.3 以上且通过 90% 的置信水平检验、范围较大的负相关海域有两处: 一、印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域( $20^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $35^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ); 二、澳大利亚东部太平洋海域( $30^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ ), 此时印度洋北部海域的相关性范围最大, 且随时间的增长, 改变的程度也较小。在秋季, 印度洋大部分海域随着时间的变化, 不仅相关性有所提高, 并且显著区域也有进一步的扩大趋势, 而白令海峡区域也与印度洋海域有着类似情况。大西洋海域较夏季而言负相关海域有进一步的增大。其中相关系数达 0.3 以上且通过 90% 的置信水平检验、范围较大的负相关海域有三处: 一、印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域( $20^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $35^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ); 二、澳大利亚西部印度洋海域( $60^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ); 三、白令海域附近( $30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ ), 其依旧在印度洋北部区域有最好的相关性。

## 4.2. 西南雨季降水与各季节和同期 SST 的相关分析

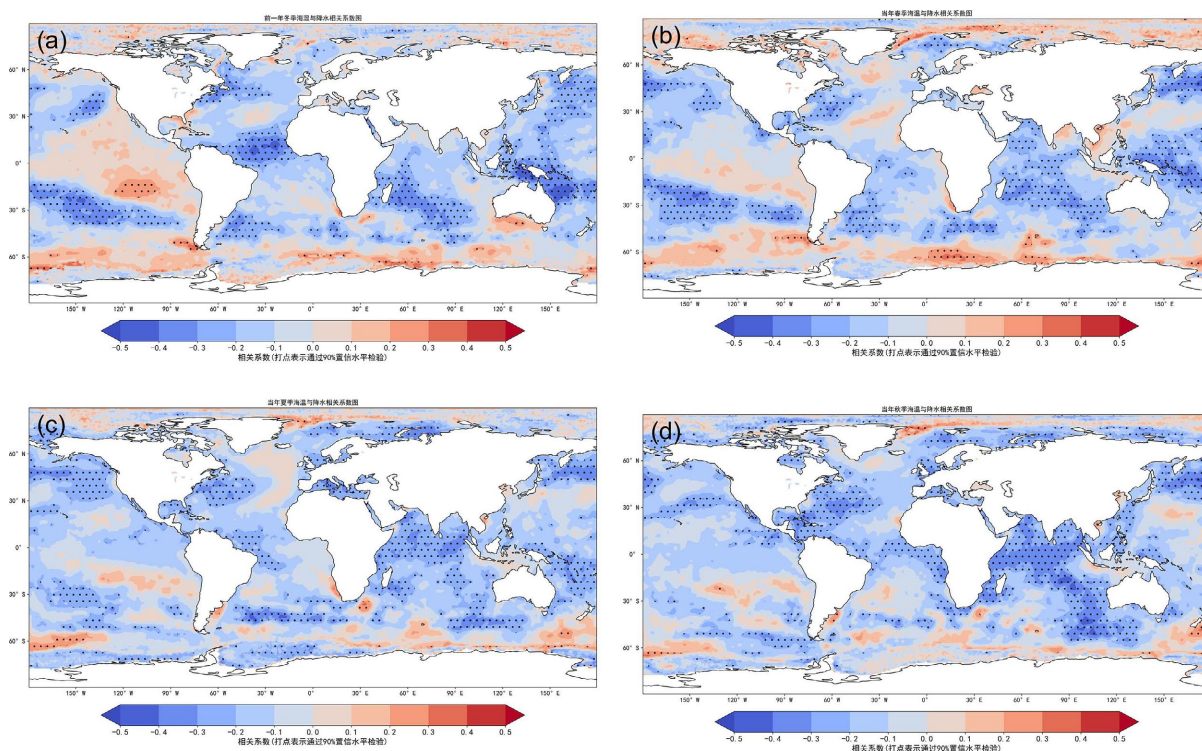
### 4.2.1. 西南雨季降水与四季 SST 的相关分析

如图 2 所示, (a)图前冬季平均海温的相关系数图结合上文 12~1 月的数据结果而言, 本文将选取四个海域中相关性最好的澳大利亚东北部太平洋海域( $30^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $125^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ )作为将影响西南雨季降水量的前一年冬季的海温关键区。对于澳大利亚东北部太平洋海域而言, 其位于西太副高的控制下。在春、冬两季, 太平洋副热带高压通常会向北移动伴随强度减弱, 导致副高西侧的西南季风活动减弱, 使得其路径偏离西南地区, 导致地区内降水减少。而当赤道中东太平洋海温为正距平、西太平洋及中东太平洋副热带地区为负距平(即正海温异常型)西太副高较常年强度较强, 位置偏北偏西, 对降水产生影响[24]。(b)图春季平均海温的相关系数图其结合上文春季结果而言, 仍选取三个海域中相关性最好的澳大利亚附近海域( $25^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ )作为影响西南地区雨季降水量的当年春季的海温关键区。而就(c)图夏季平均海温的相关系数图来说, 选取两个海域中相关性最好的印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域( $20^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $35^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ )作为将影响西南雨季降水量的当年夏季关键区。目前已经有很多研究表明北印度洋海域和我国西南地区降水联系紧密, 通常情况下, 我国西南地区的水汽主要来自印度洋和西太平洋。不同季节, 水汽来源有所不同。春季和秋季, 水汽主要来自印度洋和西太平洋, 而在夏季, 印度洋成为主要的水汽来源[25], 在这个季节, 受到暖湿的东南季风影响, 暖湿的气流从印度洋流向东北方向移动。当这些气流上升时, 形成大量的降水, 最终影响到我国西南地区的雨季降水。(d)图秋季平均海温的相关系数图结合上文秋季的相关系数分析结果, 选取相关性最好的印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域( $20^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $35^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ )作为影响西南雨季降水量的当年秋季海温关键区。

### 4.2.2. 西南雨季降水与西南雨季同期 SST 的相关分析

同样的, 5~10 月的同期平均海温与西南地区多年雨季降水平均值时间序列的相关性较上文没有明显变化, 较为显著的相关性高的区域依旧分布在北美东部大西洋海域、印度洋大部分海域、澳大利亚东部太平洋海域以及白令海附近(图略), 因此, 本文仍然选取相关性最好的印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域( $20^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $35^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$ )作为影响西南雨季降水量的当年同期的海温关键区。从上文分析可以知道澳大

利亚东北部太平洋海域和印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域的海温与西南雨季降水具有一定的负相关性, 相关系数大小达到 0.3 及以上且相关性显著。这表明了当澳大利亚东北部太平洋海域和印度洋北部阿拉伯海和孟加拉湾海域的海温出现异常之后, 可能会引起全球大气环流的异常情况, 进而对我国西南地区的雨季降水产生影响, 具有一定的遥相关效应。



**Figure 2.** Correlation coefficient plot of SST and precipitation for four seasons (dotted representation passes 90% significance test) ((a) the winter of the previous year, (b) the spring of the current year, (c) the summer of the current year, (d) the autumn of the same year)

**图 2.** 四季 SST 和降水相关系数图(打点表示通过 90% 的显著性检验)((a) 前一年冬季, (b) 当年春季, (c) 当年夏季, (d) 当年秋季)

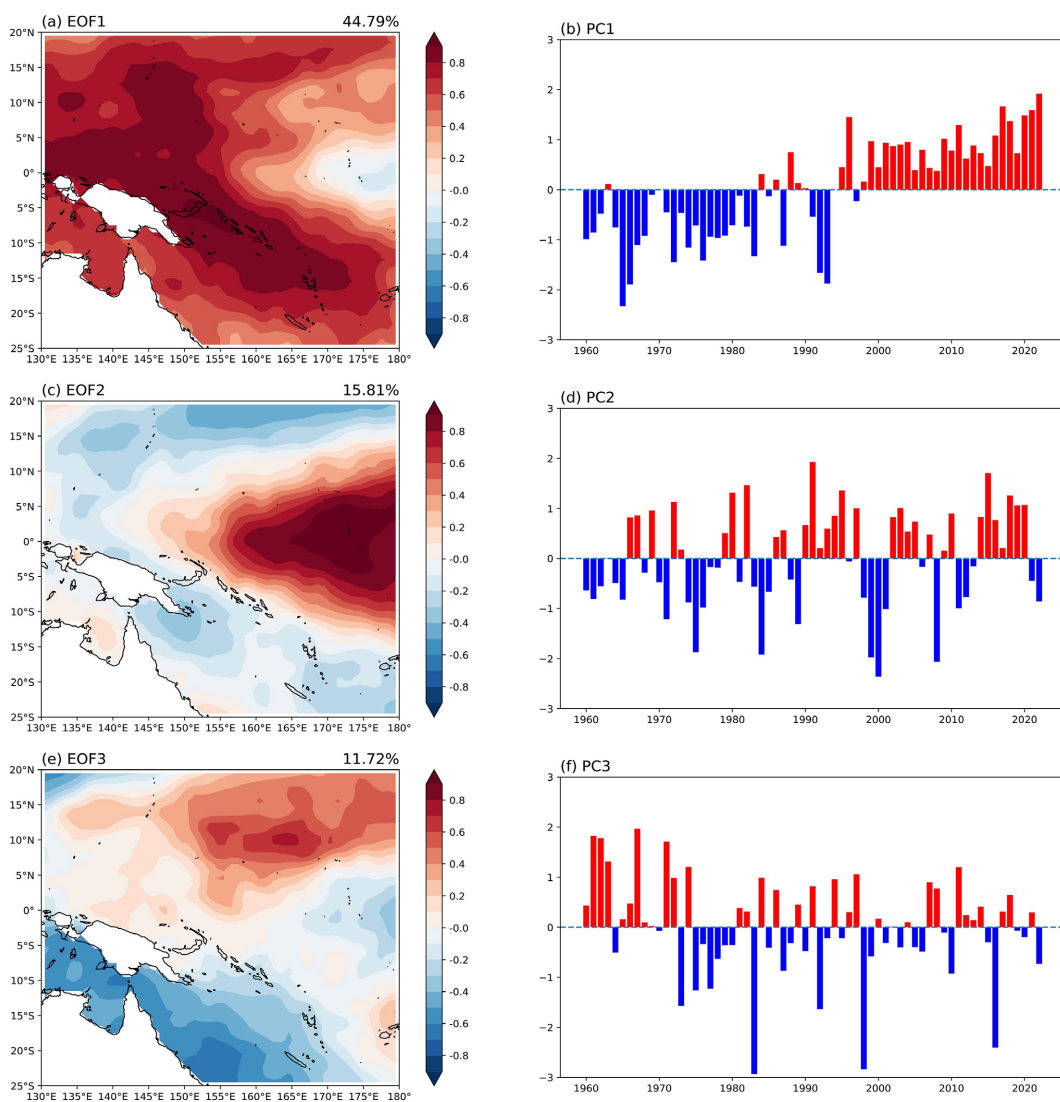
## 5. 西南雨季降水与关键区海温的 EOF 分解

### 5.1. 春季关键区海温 EOF 分解

为了进一步探求关键区海温场与西南雨季降水的联系, 我们将利用 Hadley 关键区海温资料进行 EOF 分析, 以求得主导西南雨季降水的海温时空模态:

如图 3 所示, (a)、(c)和(e)前三个模态的贡献率分别为 44.79%、15.81%和 11.72%, 总贡献率达到 72.32%, 贡献率较高, 且均通过显著性检验[26], 因此选取 EOF 分析的前三个模态以及对应的时间序列作为对于春季澳大利亚东北部太平洋海域海温分布情况的分析。在第 1 模态下, 由空间分布图(a)可以看出, 澳大利亚东北部太平洋海域除了在斐济群岛北部地区有 0.2 左右大小的负值区外, 其余海温区均为正值, 尤其是在新几内亚岛海域中, 有最大正值, 这说明该区域海温在斐济北部异常偏低之外, 其余地区都呈现出异常偏高的状态, 并且程度由东向西逐渐增大, 在新几内亚岛海域附近表现的最为明显。前人研究指出, 这种明显的从西向东的温度梯度结构特征, 包括了东太平洋冷舌和西太平洋暖池形态, 空间分布为 El Niño 型海温[27]。从时间序列图(b)可以看出在千禧年之前大部分都是负值, 关键区海温除斐

济群岛外, 基本为偏冷状态; 而千禧年之后大部分为正值, 关键区海温由偏冷转为偏暖状态。在第 2 模态下, 由空间分布图(c)可以看出, 关键区海温大致呈现出东西正负反位像变化, 东侧斐济群岛北部区域海温异常偏高, 在赤道海域附近异常程度最高, 而西侧南北区域海温均异常偏低。从时间序列图(d)可以看出在 20 世纪 90 年代前后, 海温的状态明显不同, 在年代前, 除 70 年代前几年及 80 年代后几年有年际变化之外, 大部分以负值为主, 而在年代以后, 又以正值为主; 其与第一模态结合分析而言, 澳大利亚东北部太平洋海域海温仍主要呈现出一个西高东低的分布形式。在第 3 模态下, 由空间分布图(e)可以看出关键区海温依旧呈现反位相变化的形势, 在东北处有一正变温中心, 而与之对应的则是西南海域的负变温中心, 变温程度较前两个模态而言有所降低。从时间序列图(f)可以看出在 1960~1970 年前后以正值为主, 而在 1970~1980 年前后变为以负值为主, 存在一个周期为 10 年左右的年代际变化, 而从 1980 年后起, 以年际变化为主, 1~2 年为一周期进行海温的转变。



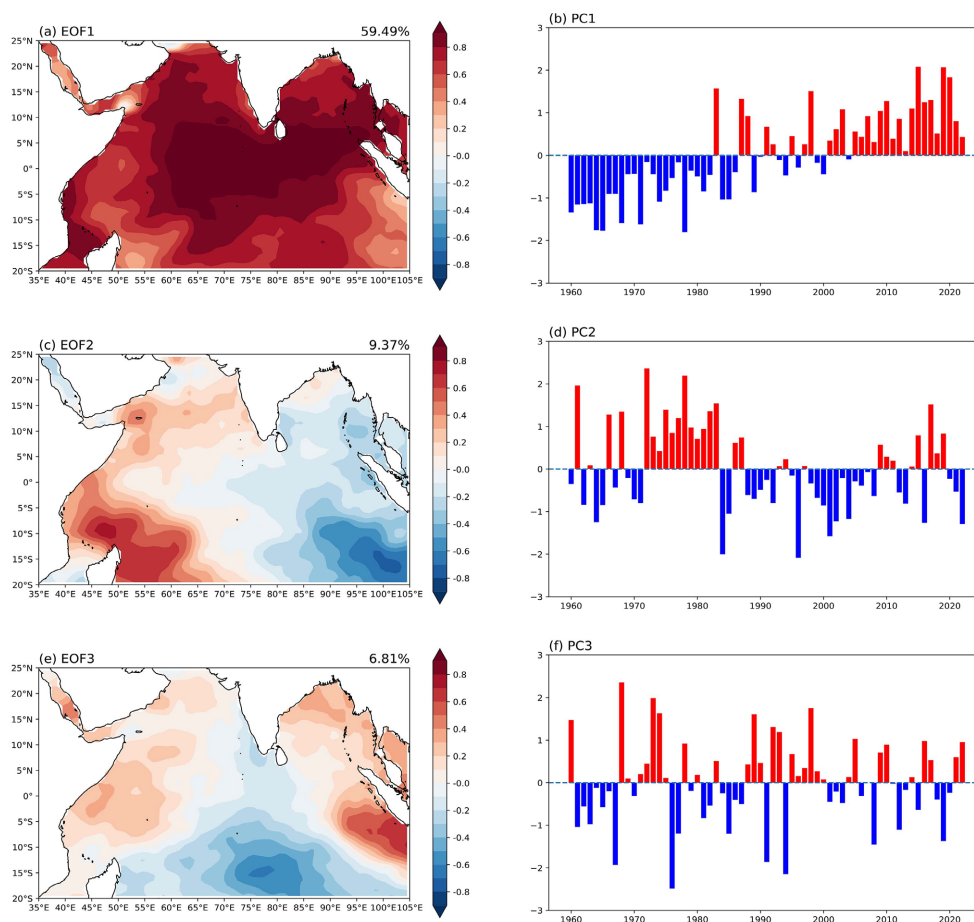
**Figure 3.** The results of EOF decomposition of standardized SST anomalies in key areas in spring of that year ((a) mode 1, (b) mode 1 time coefficient, and (c) 2 modal, (d) modal time factor 2, (e) modal 3, (f) modal 3 time factor)

**图 3.** 当年春季关键区海温标准化异常 EOF 分解结果((a) 第 1 模态, (b) 第 1 模态时间系数, (c) 第 2 模态, (d) 第 2 模态时间系数, (e) 第 3 模态, (f) 第 3 模态时间系数)



## 5.2. 夏季关键区海温 EOF 分解

如图 4 所示, (a)、(c)和(e)前三个模态的贡献率分别为 59.49%、9.37%和 6.81%, 总贡献率达到 75.67%, 贡献率较高, 且均通过显著性检验, 尤其是第 1 模态的贡献率已经基本达到 60%左右, 对区域海温贡献最大, 因此选取 EOF 分析的前三个模态以及对应的时间序列作为对于夏季印度洋北部海域海温的分析。在第 1 模态下, 由空间分布图(a)可以看出, 印度洋北部海域海温区均为正值, 整个地区都呈现出异常偏高的状态, 并且程度由四周向中心逐渐增大。从时间序列图(b)可以看出在 90 年之前大部分都是负值, 关键区基本为偏冷状态; 而 90 年之后大部分为正值, 关键区海温转为偏暖状态。在第 2 模态下, 由空间分布图(c)可以看出, 关键区海温呈现出东西正反位相变化, 东侧区域海温从时间序列图(d)可以看出在 1970 年代以前海温变化以年际变化为主, 而之后直到 2010 年前后, 都是年代际变化, 前十二年为正而后基本为负, 海温状态稳定, 而 2010 年之后又以两三年为一周期进行变化。在第 3 模态下, 由空间分布图(e)可以看出关键区海温呈现出正负正的位相变化的形势, 在中间处有一负变温中心, 而两边是正变温中心, 右边的正变温程度在三个变温中心里达到最大。从时间序列图(f)可以看出在 75 年以前以 7 年为一周期进行海温状态的转变, 而从 75 年至千禧年前后, 在 90 年代以前多以负值为主, 而 90 年代之后以正值为主, 而千禧年后, 海温以年际变化为主, 基本 2~3 年就会进行一次转变。

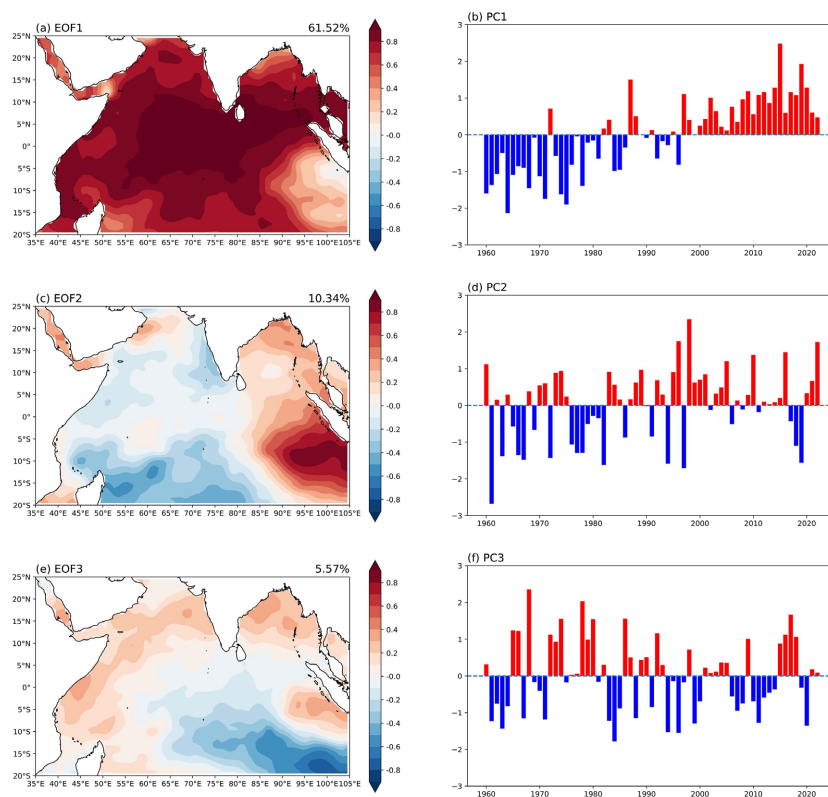


**Figure 4.** The results of EOF decomposition of standardized SST anomalies in key areas in summer of that year ((a) mode 1, (b) mode 1 time coefficient, and (c) 2 modal, (d) modal time factor 2, (e) modal 3, (f) modal 3 time factor)

**图 4.** 当年夏季关键区海温标准化异常 EOF 分解结果((a) 第 1 模态, (b) 第 1 模态时间系数, (c) 第 2 模态, (d) 第 2 模态时间系数, (e) 第 3 模态, (f) 第 3 模态时间系数)

### 5.3. 秋季关键区海温 EOF 分解

如图 5 所示, (a)、(c)和(e)前三个模态的贡献率分别为 61.52%、10.34%和 5.57%, 总贡献率达到 77.43%, 尤其是第 1 模态的贡献率已经超过 60%, 对区域海温的贡献最大, 且三个模态均通过显著性检验, 因此选取 EOF 分析的前三个模态以及对应的时间序列作为对于秋季印度洋北部海域海温的分析。在第 1 模态下, 由空间分布图(a)可以看出, 印度洋北部海域海温区均呈现出异常偏高的状态, 程度由四周向中心逐渐增大。从时间序列图(b)可以看出在 90 年之前关键区基本为偏冷状态; 而 90 年之后转为偏暖状态。在第 2 模态下, 由空间分布图(c)可以看出, 关键区海温呈现出东西正负反位像变化, 西侧负海温区域范围较大而变化程度小, 东侧正海温区域范围较小而变化程度大。从时间序列图(d)可以看出在 1975 年以前海温以年际变化为主, 而之后到 80 年代前后, 基本为负, 再之后直到千禧年大部分都是正值, 海温状态比较稳定, 而在千禧年之后呈现出一个以 4-6 年为一周期的状态转变, 前人研究指出, 印度洋偶极子模态的强弱存在明显年代差异, 其在 20 世纪 80 年代较弱, 而 90 年代较强[28]。黄鹏飞等人[29]研究指出, 对于表面海温距平而言, 热带印度洋海水温度距平 EOF 分解所得第 1 模态为全海盆一致增暖变化, 第 2 模态为偶极子变化, 与本文研究结果一致, 这也侧面说明了对于 EOF 海温场分析而言, 得到的空间型是固定的, 只有当时间系数改变时, EOF 所表示出的 SSTA 强度才发生变化[30]。在第 3 模态下, 由空间分布图(e)可以看出关键区海温呈现出上正下负, 两边正中间负的位相变化的形势, 为中部型的印度洋偶极子分布形式, 变化程度比较缓和。从时间序列图(f)可以看出该模态下并没有时间较长的年代际变化, 基本都是 2-4 年为一周期进行的海温状态的改变。

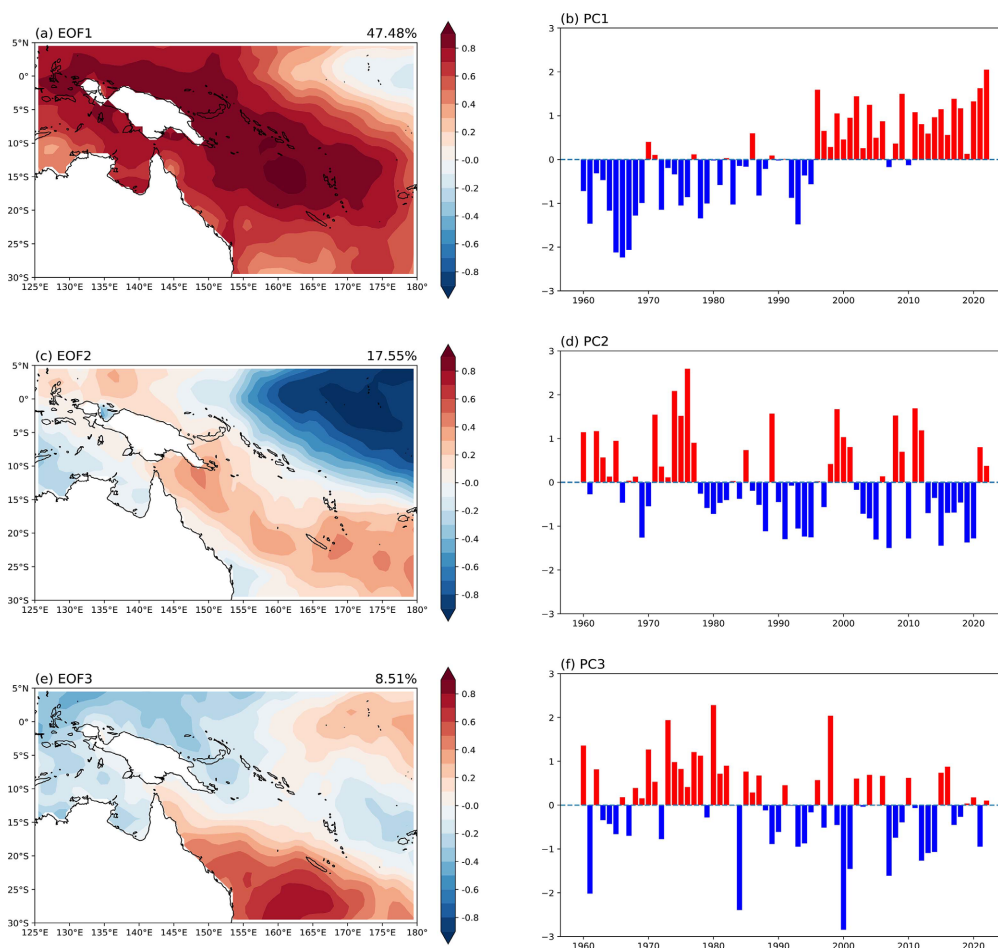


**Figure 5.** The results of EOF decomposition of standardized SST anomalies in key areas in autumn of that year ((a) mode 1, (b) mode 1 time coefficient, and (c) 2 modal, (d) modal time factor 2, (e) modal 3, (f) modal 3 time factor)

**图 5.** 当年秋季关键区海温标准化异常 EOF 分解结果((a) 第 1 模态, (b) 第 1 模态时间系数, (c) 第 2 模态, (d) 第 2 模态时间系数, (e) 第 3 模态, (f) 第 3 模态时间系数)

#### 5.4. 前冬季关键区海温 EOF 分解

如图 6 所示, (a)、(c)和(e)前三个模态的贡献率分别为 47.48%、17.55%和 8.51%, 总贡献率达到 73.44%, 贡献率较高, 且均通过显著性检验, 因此选取 EOF 分析的前三个模态以及对应的时间序列作为对于前一年冬季澳大利亚东北部太平洋海域海温的分析。在第 1 模态下, 由空间分布图(a)可以看出, 澳大利亚东北部太平洋海域除了在西侧  $0^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{N}$  存在有一小块负值区外, 其余海温区均为正值, 程度由东向西逐渐增大, 在新几内亚岛海域附近达到最大。从时间序列图(b)可以看出在 1995 年之前大部分都是负值, 关键区海温基本为偏冷状态; 而之后关键区海温偏暖状态。在第 2 模态下, 由空间分布图(c)可以看出, 关键区海温大致呈现出东西正负反位像变化, 东侧斐济群岛北部区域海温异常偏低, 变化程度较大, 而西侧东南方向海域海温异常偏高。从时间序列图(d)可以看出该模态下基本都是年代际变化, 在千禧年以前以 20 年左右为一周期进行了一次海温状态的改变, 而千禧年以后也基本以负值为主, 状态比较稳定。在第 3 模态下, 由空间分布图(e)可以看出关键区海温沿西南东北方向呈现出一个正负正的位相变化的形势, 其中西南处的正变温中心变化程度较其他两处而言更为明显。从时间序列图(f)可以看出在 1985 年前以正值为主, 而在之后基本以 1~3 年为一周期进行海温的转变。

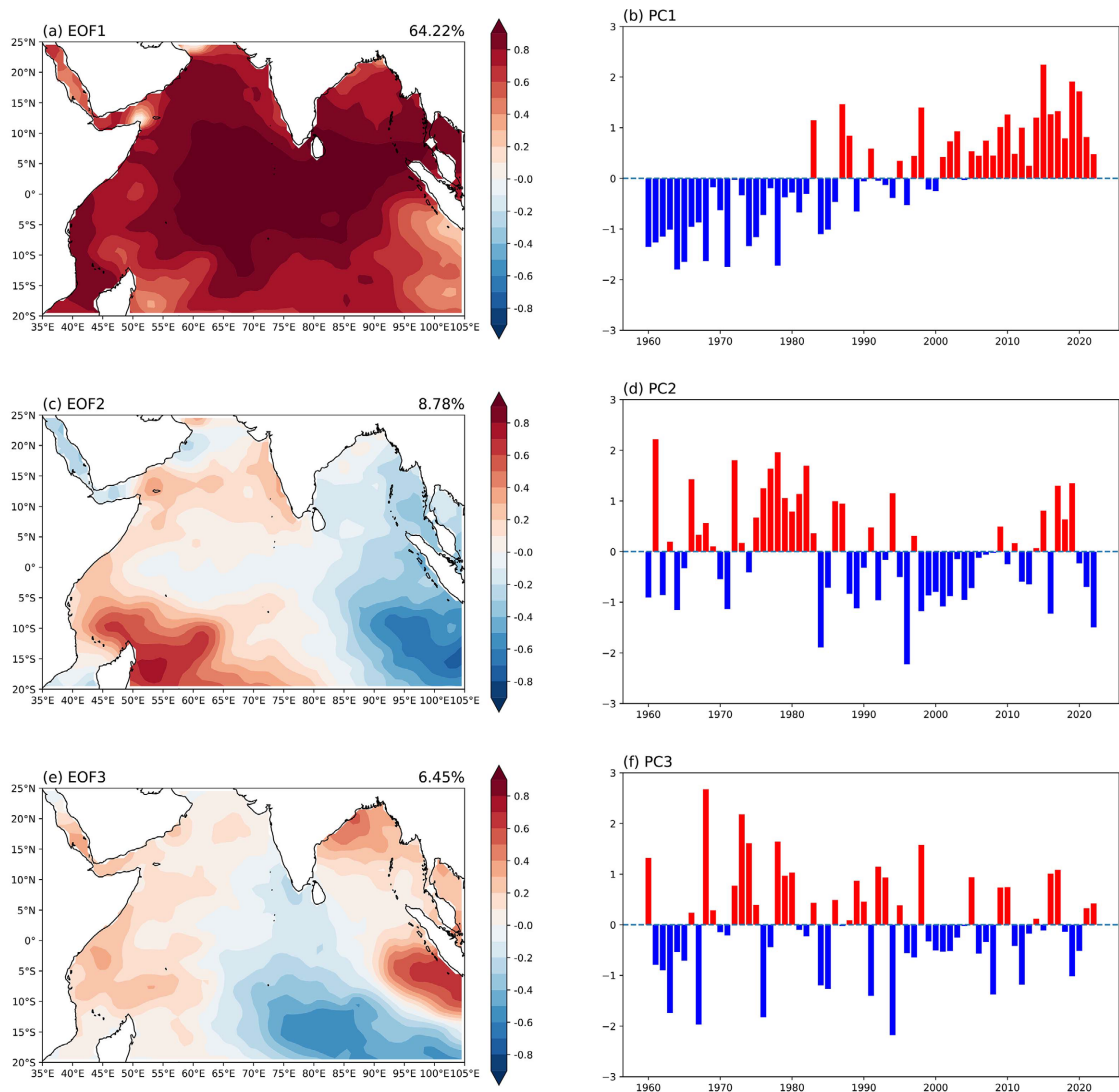


**Figure 6.** The results of EOF decomposition of normalized anomalies in sea surface temperature in key areas in the winter of the previous year ((a) mode 1, (b) mode 1 time coefficient, and (c) 2 modal, (d) modal time factor 2, (e) modal 3, (f) modal 3 time factor)

**图 6.** 前一年冬季关键区海温标准化异常 EOF 分解结果((a) 第 1 模态, (b) 第 1 模态时间系数, (c) 第 2 模态, (d) 第 2 模态时间系数, (e) 第 3 模态, (f) 第 3 模态时间系数)

### 5.5. 西南雨季同期关键区海温 EOF 分解

如图 7 所示, 在第 1 模态下, 由空间分布图(a)可以看出, 印度洋北部海域海温区均呈现出异常偏高的状态。从时间序列图(b)可以看出以 90 年代为一转折点, 之前基本为偏冷状态; 之后转为偏暖。在第 2 模态下, 由空间分布图(c)可以看出, 关键区海温呈现出东西正反位相变化, 两侧中心变化程度基本相当。从时间序列图(d)可以看出在 1974 年以前海温以年际变化为主, 而之后 12 年除开个别年份以外, 基本为正值, 而之后直到 2010 左右又以负值为主, 海温状态比较稳定, 10 年之后呈现出一个以 1~3 年为一周期的状态转变。在第 3 模态下, 由空间分布图(e)可以看出关键区海温呈现两边正中中间负的位相变化的形势。从时间序列图(f)可以看出该模态下除开在 1970 年以前和千禧年前后有一段时间的稳定负值以外, 并没有时间较长的年代际变化周期, 多以 2~4 年为一周期长度。



**Figure 7.** Decomposition results of normalized anomaly EOF of sea surface temperature in key areas during the same period in the rainy season in southwest China ((a) mode 1, (b) mode 1 time coefficient, and (c) 2 modal, (d) modal time factor 2, (e) modal 3, (f) modal 3 time factor)

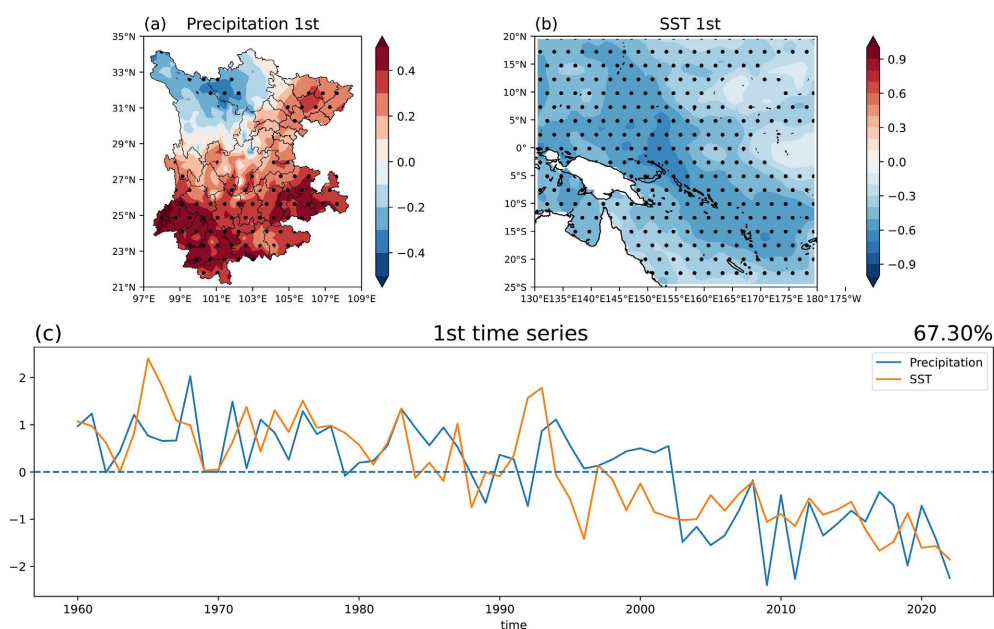
**图 7.** 西南雨季同期关键区海温标准化异常 EOF 分解结果((a) 第 1 模态, (b) 第 1 模态时间系数, (c) 第 2 模态, (d)第 2 模态时间系数, (e) 第 3 模态, (f) 第 3 模态时间系数)

## 6. 西南雨季降水与关键区海温的 SVD 分解

李丽平等[30]曾提出,相较于 MEOF 分析而言,SVD 方法是揭示两要素之间耦合关系的更好方法,因此为了更好地探究西南雨季降水和四季与雨季同期关键区海温的统计相关性,我们将分别对于 1960~2022 年的四季以及同期关键区海温和西南地区多年雨季平均降水的标准化距平值进行 SVD 分解,进一步理解关键区海温与降水的相关关系:

### 6.1. 西南雨季降水与春季关键区海温的 SVD 分析

将春季太平洋关键区海温和西南雨季降水做了 SVD 分解后,前三个模态的解释方差分别为:79.72%、8.46%、3.88%,有且只有第 1 模态通过 North 检验,可以被显著分离[31],因此本文着重分析第 1 模态的情况。从图 8(a)中可以观察到,雨季降水异性相关系数除了在川西北部地区为较大的负相关区域以外,其他地区均为正值,且云南和贵州南部的相关性要明显好于川东地区,且基本通过 95%的水平置信检验。从图 8(b)中我们也可以发现,整个澳大利亚东北部太平洋春季关键区海温除了在东北小部分海域呈现出一个弱 0.1 左右的负相关以外,其余地区除了在南部海域以外基本都达到了 0.5 左右大小的负相关且均通过 0.05 的显著性检验,这表明西南雨季降水与春季澳大利亚东北部关键区海温具有强烈的遥相关,除川西北地区以外,基本表现为一相反变化的关系。而图 8(c)也可看出,两者随着时间变化的趋势也大致相同,模态相关为 0.67,通过了 95%的水平置信检验,这表明这对空间分布型有密切的关系,在 1995 年前后发生转折,在这之前,西南雨季降水基本处于一个南多北少的态势,而之后随着春季关键区海温的逐渐升高,这种态势有所逆转;海温越高,对云南、贵州南部的雨季降水影响也越大,川东次之,而川西部青高地区,降水有所增加。此外,1960 年~2022 年来西南雨季降水量在(c)图可以比较明确看出呈现出一个逐渐减少的趋势。

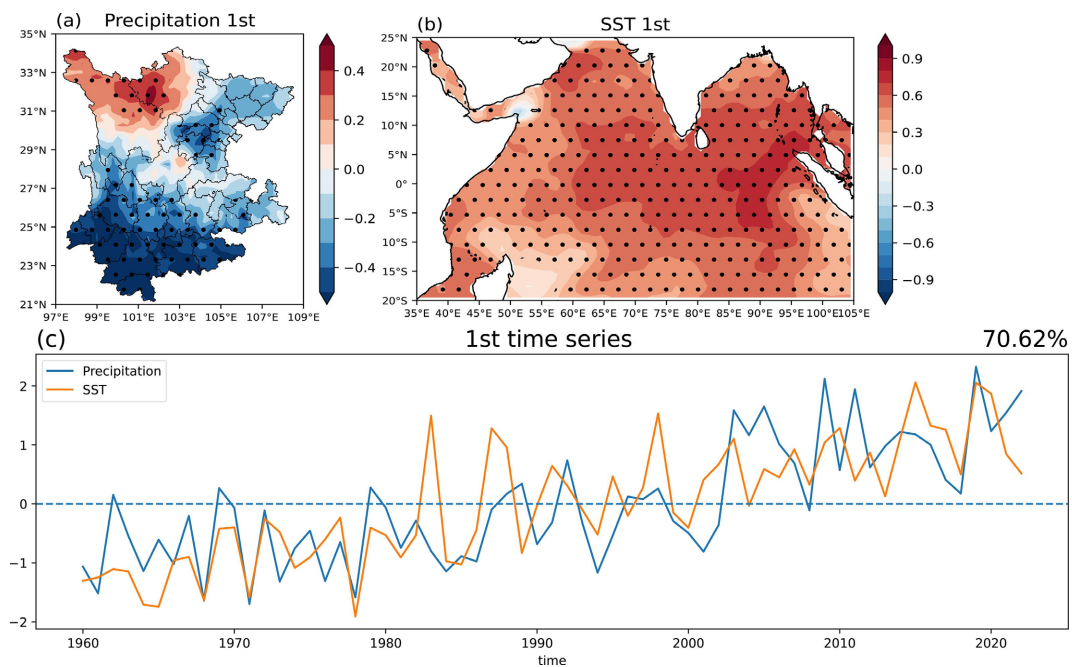


**Figure 8.** Anisotropy correlation coefficient between southwest rainy season precipitation and SVD decomposition mode 1 of spring SSTA in the Pacific Ocean (dotted is passed 95% confidence test) and the corresponding time coefficients (a) precipitation in the southwest rainy season, (b) spring sea surface temperature in the Pacific Ocean, and (c) time coefficients

**图 8.** 西南雨季降水量与太平洋春季 SSTA 的 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数(打点表示通过 95%的置信检验)及相应的时间系数(a) 西南雨季降水量, (b) 太平洋春季海温, (c) 时间系数

## 6.2. 西南雨季降水与夏季关键区海温的 SVD 分析

将夏季印度洋关键区海温和西南雨季降水做了 SVD 分解后,前三个模态的解释方差分别为:87.62%、5.17%、2.37%,有且只有第 1 模态通过 North 检验,可以被显著分离,因此着重分析第 1 模态的情况。从图 9(a)中可以观察到,其分布形势与 8(a)类似,雨季降水异性相关系数在川西北部地区为正,其他地区为负,呈现出相反关系,依旧以云南西南部的相关性为最好,川东次之,且云南地区由南向北,越往南,相关性越强。从图 9(b)中我们也可以发现,整个印度洋北部夏季关键区海温异性相关系数呈现出正相关且除开马达加斯加岛屿东部的小部分海域以外均通过 0.05 的显著性检验,这说明整个印度洋夏季关键区海温和西南雨季降水具有强烈遥相关性。而图 9(c)也可看出,两者随着时间变化的趋势也大致相同,模态相关为 0.71,通过 0.05 的显著性检验,空间分布型十分关系密切,并且从时间序列可以看出,受到全球变暖等影响,印度洋北部夏季海温呈一个逐渐升高的态势,与此同时,在整个西南地区中,只有青高的雨季降水随着海温的升高而逐渐增加,其余地区的降水量基本呈现出一个递减的态势,且这种情况在云南南部最为明显。但值得注意的是,在早先,王桂臣和管兆勇[32]曾提出过,SVD 并不能有效分离 IOD 事件与 ENSO 事件的相关信号,夏季印度洋海温单极模态可以是对于 ENSO 信号的单独响应,所以文章中第一模式里面体现的是否是印度洋海温对于西南雨季降水的自相关性还有待研究。



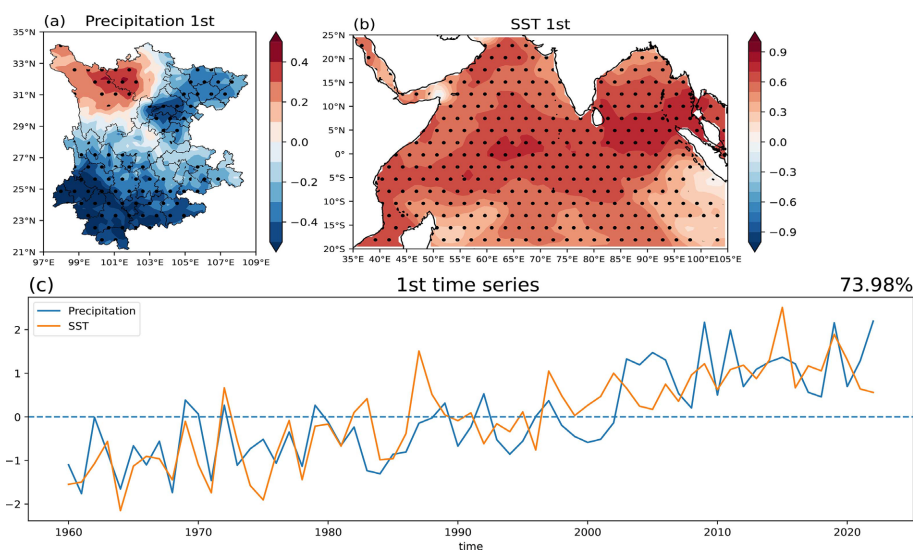
**Figure 9.** Southwest rainy season precipitation and the India Ocean summer SSTA SVD decomposition of the 1st mode of the heterossexual correlation coefficient (dotted by 95% confidence test) and the corresponding time coefficients (a) precipitation in the southwest rainy season, (b) summer sea surface temperature in the India Ocean, and (c) time coefficients

**图 9.** 西南雨季降水量与印度洋夏季 SSTA 的 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数(打点表示通过 95% 的置信检验)及相应的时间系数(a) 西南雨季降水量, (b) 印度洋夏季海温, (c) 时间系数

## 6.3. 西南雨季降水与秋季关键区海温的 SVD 分析

将秋季印度洋关键区海温和西南雨季降水做了 SVD 分解后,前三个模态的解释方差分别为:88.48%、5.46%、1.71%,有且只有第 1 模态通过 North 检验,因此着重分析第 1 模态的情况。明显地,我们可以看出图 10 和图 9 的整体情况基本一致,略有不同的地方在于:一、图 10(a)西南雨季降水的川北地区的

负相关性变得更大,且大部都通过 0.05 的显著性检验,大值中心位于雅安、峨眉山等地,达到 0.4 左右大小;二、秋季关键区较夏季而言,海温全部都呈现出一个正相关的态势。这表明同样的一个印度洋北部海温关键区,其秋季海温与西南地区的雨季降水相关性比夏季要好。此外,从图 10(c)可见,其相关系数约为 0.74,在整个四季时间序列的总相关系数中达到最高,这表明秋季关键区第 1 模态海温随时间的变化与西南雨季降水的时间变化趋势最相近。



**Figure 10.** Anisexual correlation coefficient between southwest rainy season precipitation and SVD decomposition mode 1 of the India Ocean summer SSTA (dotted by 95% confidence test) and the corresponding time coefficients (a) precipitation in the southwest rainy season, (b) summer sea surface temperature in the India Ocean, and (c) time coefficients

**图 10.** 西南雨季降水量与印度洋夏季 SSTA 的 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数(打点表示通过 95% 的置信检验)及相应的时间系数(a) 西南雨季降水量, (b) 印度洋夏季海温, (c) 时间系数

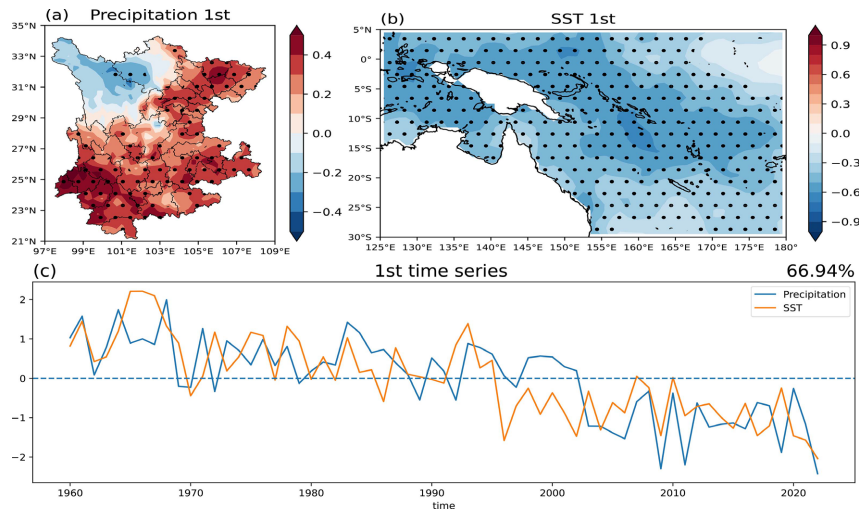
#### 6.4. 西南雨季降水与冬季关键区海温的 SVD 分析

从图 11 中可以观察到,雨季降水异性相关系数分布情况与上文基本一致,整个冬季关键区海温除开东北小部分海域以外都呈现出显著负相关关系,而西南雨季降水异性相关系数大值中心也发生了改变,大值中心从先前的云南南部转为西南处,瑞丽、腾冲等地的相关性最好,而四川先前位于雅安、峨眉山等地的大值中心此时也转移到了川东北绵阳、广元等地。而图 11(c)也可看出,两者模态相关为 0.67,通过了 0.05 的显著性检验,可以说,在关键区海温随时间的增长而增长之后,西南雨季降水逐渐减少,其中在千禧年之前,降水较多,而千禧年之后,除了在川西降水偏多以外,整个西南雨季降水有明显的下降,尤其是绵阳、瑞丽、腾冲等地受影响最明显。

#### 6.5. 西南雨季降水与西南雨季同期关键区海温的 SVD 分析

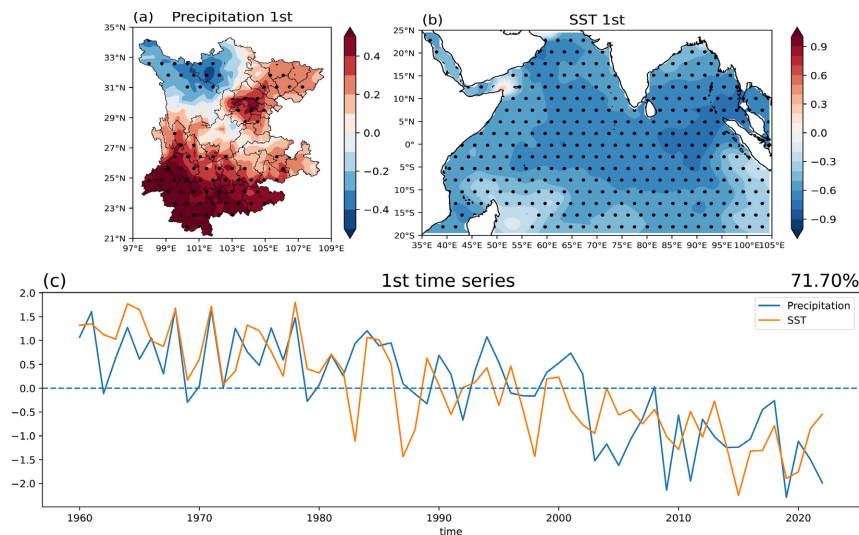
通过分析第 1 模态的情况可知:图 12(a)中降水量异性相关系数在四川由西向东呈现出负-正的形势,在贵州南部以及云南整部均为负相关,云南南部的相关系数大小达 0.5 以上,相关性最好,其次则是四川东部中间区域,以雅安、乐山、峨眉为主,均通过 95% 的水平置信检验。从图 12(b)中可以看出同期北印度洋海温除去亚丁湾和马达加斯加岛东部极小部分海域以外,相关系数基本为负,通过 0.05 的显著性检验,其中异性相关系数绝对最大值达 0.4 左右,负值中心位于苏门答腊岛西北海域附近。从相应的时间序列分布图上也可见,两者时间变化趋势大致相同,模态相关为 0.72,通过 0.05 的显著性检验。根据以

上分析可知：川中部、黔南和云南地区的雨季降水量与同期印度洋海温呈现显著的负相关关系。当印度洋海温异常偏暖(冷)时，这些地区的雨季降水量同年异常偏少(多)。相反地，当印度洋 5~10 月海温异常偏暖(冷)时，川西北地区的雨季降水量同年异常偏多(少)。



**Figure 11.** Anisotropic correlation coefficient between precipitation in the southwest rainy season and SVD decomposition mode 1 of the pre-Pacific winter SSTA (dot represents a 95% confidence test) and the corresponding time coefficients (a) precipitation in the southwest rainy season, (b) winter sea surface temperature in the Pacific Ocean, (c) Time factor

**图 11.** 西南雨季降水量与太平洋前冬季 SSTA 的 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数(打点表示通过 95%的置信检验)及相应的时间系数(a) 西南雨季降水量, (b) 太平洋冬季海温, (c) 时间系数



**Figure 12.** Precipitation in the southwest rainy season is associated with the anisotropy of SVD decomposition mode 1 of the SSTA in the India Ocean during the same period in the southwest rainy season Coefficients (dots indicate passing the 95% confidence test) and corresponding time coefficients (a) Southwest Rainy Season precipitation, (b) India Ocean Sea temperature, (c) time coefficient

**图 12.** 西南雨季降水量与西南雨季同期印度洋 SSTA 的 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数(打点表示通过 95%的置信检验)及相应的时间系数(a) 西南雨季降水量, (b) 印度洋海温, (c) 时间系数



## 7. 结论

1) 西南地区 63 年的雨季降水空间分布不均, 呈现东多西少, 南多北少的态势, 同时, 西南雨季降水与前冬季、当年春季澳大利亚东北部太平洋, 当年夏、秋季北印度洋和当年同期 5~10 月份的北印度洋海温呈现显著负相关关系, 即关键区海温异常偏暖(冷), 西南雨季降水偏少(多)。

2) EOF 分析表明, 在第 1 模态下, 前一年冬季和当年春季关键区海域海温的分布形式多呈现出西高东低的形式, 包括了东太平洋冷舌和西太平洋暖池形态, 并且在千禧年之前大部分都是海温多为偏冷状态; 而千禧年之后关键区海温由偏冷转为偏暖状态。而当年夏秋季和雨季同期关键区海域海温呈现出全区一致偏暖状态, 且在 90 年代之后海温从偏冷转变为偏暖状态; 而在第 2 空间模态分布下, 前冬和春季关键区海温呈现出与第 1 模态相反的位相变化, 而夏秋季和同期关键区海温为正印度洋偶极子分布形式。

3) SVD 分解表明, 关键区四季和同期海温与西南地区中的川西青高地区存在正相关关系, 而与川东、贵州南部和云南呈现出一个显著的负相关性, 不同季节的海温关键区影响的降水相关大值区域可能略有不同, 但总体来说, 当关键区海温异常偏高(低), 川西高原的雨季降水异常偏多(少), 而其余大部分地区降水异常偏少(多); 其分解结果与相关系数的分析和的结果基本一致并且从时间序列上可以看出近年来西南地区的雨季降水呈现出逐年减少的态势。

## 参考文献

- [1] Ma, Z.-F., Liu, J. and Yang, S.-Q. (2013) Climate Change in Southwest China during 1961-2010: Impacts and Adaptation. *Advances in Climate Change Research*, **4**, 223-229. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1248.2013.223>
- [2] Zhang, W., Villarini, G., Vecchi, G.A. and Smith, J.A. (2018) Urbanization Exacerbated the Rainfall and Flooding Caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature*, **563**, 384-388. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>
- [3] 胡豪然, 梁玲. 近 50 年西南地区降水的气候特征及区划[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(7): 146-154.
- [4] 王瑞英, 肖天贵. 西南雨季降水的时空分布及预报试验[J]. 气象科学, 2020, 40(3): 354-362.
- [5] 王昊, 姜超, 王鹤松, 等. 中国西南部区域雨季极端降水指数时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(1): 1-14.
- [6] 李希夷. 印度洋海温年代际变化对东亚夏季风降水的可能影响机理[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [7] 陈锦年, 王宏娜, 吕心艳. 西太平洋暖池时空分布特征及其与 ENSO 的关系[J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 10-19.
- [8] Kim, H., Ha, K. and Lau, W.K. (2023) Changes in the SST-Precipitation Relationship over the Indo-Pacific Warm Pool under a Warming Climate. *Environmental Research Letters*, **18**, Article 074031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdf8>
- [9] Takahashi, H.G. and Idenaga, T. (2013) Impact of SST on Precipitation and Snowfall on the Sea of Japan Side in the Winter Monsoon Season: Timescale Dependency. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **91**, 639-653. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-506>
- [10] 赵永晶, 钱永甫. 全球海温异常对中国降水异常的影响[J]. 热带气象学报, 2009, 25(5): 561-570.
- [11] 余锦华, 张婉莹, 张岳军. 赤道中太平洋海表温度异常对西南地区春季降水年际变化的影响[J]. 热带气象学报, 2015, 31(1): 11-20.
- [12] 刘扬, 刘屹岷. 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1215-1226.
- [13] 黄天赐, 华维. 南印度洋偶极型海温与中国西南地区初秋降水的关系[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 41-47.
- [14] 晏红明, 肖子牛. 中国西南汛期降水的振动和分布及其与印度洋海温异常的关系[J]. 气象科学, 2001, 21(1): 54-63.
- [15] Wang, B. and Fan, Z. (1999) Choice of South Asian Summer Monsoon Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **80**, 629-638. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0629:cosasm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0629:cosasm>2.0.co;2)
- [16] Wang, B., Wu, R. and Fu, X. (2000) Pacific-East Asian Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate? *Journal of Climate*, **13**, 1517-1536. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1517:peathd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1517:peathd>2.0.co;2)
- [17] Xie, S. and Philander, S.G.H. (1994) A Coupled Ocean-Atmosphere Model of Relevance to the ITCZ in the Eastern Pacific. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **46**, 340-350. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v46i4.15484>

- [18] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 140-141.
- [19] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 118-120.
- [20] 江志红, 丁裕国. 我国夏半年降水距平和北太平洋海温异常的奇异值分解法分析[J]. 热带气象学报, 1995, 11(2): 133-138.
- [21] 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云. 中国西北春季降水与太平洋秋季海温的异常特征及其相关分析[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 100-110.
- [22] 张万诚, 解明恩. 奇异值分解方法对降水的预测试验[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 102-107.
- [23] 晏红明, 李清泉, 孙丞虎, 等. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 1111-1128.
- [24] 吴贤云, 丁一汇, 叶成志, 等. 江南西部雨季降水区域特征及其受热带海洋海表温度异常的影响分析[J]. 气象, 2015, 41(3): 286-295.
- [25] 谢滨. 中国西南地区降水和大气环流的气候平均态研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2023(5): 13-17.
- [26] Overland, J.E. and Preisendorfer, R.W. (1982) A Significance Test for Principal Components Applied to a Cyclone Climatology. *Monthly Weather Review*, **110**, 1-4. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0001:astfpc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0001:astfpc>2.0.co;2)
- [27] 洪梅, 张韧, 余丹丹, 等. 热带太平洋要素场与 ENSO 的非线性相关特征分析[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(2): 28-36.
- [28] 殷永红, 倪允琪, 史历. 近 20 年来热带印度洋与热带太平洋海气系统相互作用特征的诊断研究[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 355-371.
- [29] 黄鹏飞, 王继光, 孙鹤泉, 等. 基于经验正交函数分解的热带印度洋海温研究[J]. 海洋技术, 2013, 2(1): 73-78.
- [30] 李丽平, 马晨誉, 倪语蔓, 等. 中国冬夏季气温和降水异常耦合关系的 SVD 与 MEOF 分析对比[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 647-656.
- [31] North, G.R., Bell, T.L., Cahalan, R.F. and Moeng, F.J. (1982) Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. *Monthly Weather Review*, **110**, 699-706. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0699:seiteo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0699:seiteo>2.0.co;2)
- [32] 王桂臣, 管兆勇. SVD 揭示的印度洋海气相互作用模态及其与中国降水的联系[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 63-71.