

西南地区夏季降水和印度洋海温的关系

杨天娇^{1,2}, 毛文书^{1,2}, 王 洁^{1,2}, 董自正^{1,2}

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2023年10月19日; 录用日期: 2023年11月22日; 发布日期: 2023年11月29日

摘 要

为研究印度洋海温变化对西南地区夏季降水的影响, 利用西南地区76个气象站点1961~2022年共62年夏季逐日气象观测降水量资料、同期Hadley全球月平均海表温度资料, 网格距 $1^\circ \times 1^\circ$, 以及同期NCEP-NCAR月平均再分析格点资料, 网格距 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 通过合成分析、EOF分解、SVD分解、相关分析等方法, 详细分析了西南地区夏季降水变化和印度洋海温的关系。结果表明: (1) 西南地区夏季降水量的显著相关区域位于孟加拉海湾, 阿拉伯海海温附近的中印度洋海域($30^\circ \sim 105^\circ \text{E}$, $30^\circ \text{N} \sim 40^\circ \text{S}$)。 (2) 海温偏暖年时, 西南地区夏季降水集中于渝, 贵地区; 海温偏冷年时, 西南地区夏季降水主要集中于西南地域中部地区以及成都平原附近; 且海温偏暖年的降水量远多于偏冷年。 (3) 当印度洋春冬两季海温异常偏暖(冷)的时候, 西南川渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少), 而云南地区则相反; 当印度洋夏季海温异常偏暖(冷)的时候, 川北, 川中和渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少); 而云南北部和川南地区相反。 (4) 降水偏多年, 西南地区位势高度为负异常值, 大气稳定性差, 低层水汽通量辐合强度大, 散度为负且绝对值大, 水汽来源充足, 且风场和水汽通道方向一致利于降水; 偏少年, 西南地区位势高度为正, 水汽来源少, 水汽辐合强度小, 大气层结稳定, 不易产生强对流天气。

关键词

西南地区, 夏季降水, 印度洋海温, 相关分析, EOF分解, SVD分解

Relationship between Summer Precipitation Variation in Southwest China and Indian Ocean SST

Tianjiao Yang^{1,2}, Wenshu Mao^{1,2}, Jie Wang^{1,2}, Zizheng Dong^{1,2}

¹School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 19th, 2023; accepted: Nov. 22nd, 2023; published: Nov. 29th, 2023

Abstract

To study the impact of sea surface temperature changes in the Indian Ocean on summer precipitation in the southwestern region, 62 years of daily meteorological observation precipitation data from 76 meteorological stations in the southwestern region from 1961 to 2022 were used, as well as global monthly average sea surface temperature data from Hadley during the same period. The grid distance was $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, and the monthly average reanalysis grid data of NCEP-NCAR during the same period, with a grid distance of $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. The relationship between summer precipitation changes in the southwestern region and Indian Ocean sea surface temperature was analyzed in detail through methods such as synthesis analysis, EOF decomposition, SVD decomposition, and correlation analysis. The results show that: (1) The significant key area of the correlation between summer precipitation in the southwestern region and Indian Ocean sea surface temperature is the central Indian Ocean region near the Arabian Sea and the Bay of Bengal ($30^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{S}$). (2) When sea surface temperature shows abnormal warming, summer precipitation in the southwest region is concentrated in Chongqing and Guizhou regions; when the sea surface temperature is abnormally cold, the summer precipitation in southwest is mainly concentrated in the middle of southwest China and near Chengdu Plain; and the precipitation in warm years is much higher than that in cold years. (3) When sea surface temperatures in the Indian Ocean are anomalous and warmer or colder during the spring and winter seasons, the Chongqing, Sichuan, and Guizhou regions experience more or less precipitation during the following summer season, while the Yunnan region experiences the opposite. When the Indian Ocean sea surface temperature is warmer (colder) during the summer season, the northern part of Sichuan, the central part of Sichuan, and the Chongqing and Guizhou regions experience more (less) precipitation during the following summer season, while the northern part of Yunnan and the southern part of Sichuan experience the opposite. (4) The precipitation is more than years old, the geopotential height in the southwest region is negative outlier, the atmospheric stability is poor, the low level water vapor flux convergence intensity is large, the divergence is negative and the absolute value is large, the water vapor source is sufficient, and the wind field and the water vapor channel direction are consistent in favor of precipitation; as years with less precipitation, the southwest region has a positive geopotential with few sources of water vapor, low intensity of water vapor convergence, stable atmospheric stratification, and not conducive to generating strong convective weather.

Keywords

Southwest Region, Summer Precipitation, Indian Ocean Sea Surface Temperature, Correlation Analysis, EOF Decomposition, SVD Decomposition

Copyright © 2023 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. 绪论

气候变化及其成因是目前大气科学相关研究的重点，人们通过对不同地区导致气候变化的原因进行研究，来探求不同因子与气候变化的关系。在全球的气候系统中，海洋是最重要的一部分。印度洋是西南地区夏季降水水汽及各种能量最重要的来源之一，印度季风强度在很大程度上取决于西南地区雨季的起始，雨区分布及降水变异。印度洋海表温度是印度洋热力状况的代表，在夏季风的形成、维持中起着积极作用。对我国西南地区夏季降水量与印度洋海温之间关系的研究是十分必要的。

迄今为止,有大量文献从不同方面揭示了降水海温之间的相互作用以及各自的特点,例如,贾小龙等[1]指出我国大陆东部夏季和秋季的降水受前年南印度洋偶极子模影响并且影响十分显著,偶极子正相位的时候,对应我国华南地区降水减少,长江流域降水增多,负相位年则相反。刘燕等[2]提出西南地区降水有很显著的年代际变化。相关研究也支持这一观点,如马振峰等人指出,在过去40年里,西南三个高原地区的气温和降水都呈上升趋势[3]。A. M. DUAN等[4]人的研究结果表明,由于青藏高原是一个巨大的高空热源,夏季表面加热最为强烈,导致在表层附近形成浅层气旋环流,并在其上方形成深层反气旋环流。相关研究指出,四川夏季降水呈现出明显的年际变化,具有大约3年至10年的周期振荡。如果只考虑七月份,四川的降水呈现出干湿同步的现象,东南部分降水较多,而西北部分较少,并且呈递减趋势[5]。陈偌怡[6]指出西南地区近三十年年降水量总体呈现下降趋势,其中秋季下降趋势达到了0.01的显著性水平。而且四季的降水量均存在明显的突变。李芸[7]等使用趋势分析等方法指出从1961至2010年近50a间西南地区的年均暴雨出现次数在空间分布上呈现由西北向东南增加的变化趋势。海温的异常变化也直接影响到气候,国内外现有大量有关海温异常给陆地区域气候变化带来影响的学术文章。根据刘丽等[8]展开的研讨会,汛期时低纬度高原大雨事件多发可能与西太平洋和东印度洋暖池海温状况存在很大联系。针对海温和降水方面变化明显,有研究表明印度洋具有暖池效应。彭模等[9]对中国夏季降水和同期印度洋海温采用EOF以及SVD等方法进行分析,得到二者之间存在紧密联系,其中江淮流域夏季降水与同期的印度洋海温是正相关关系,余下的我国大部分地区表现出负相关关系。假拉等[10]利用经验正交函数等气象常用方法研究了前期和同期印度洋SSTA分布场和高原夏季降水的关系,指出二者存在显著相关性,其中以西印度洋-非洲东海岸赤道地区的海表温度距平和高原地区夏季降水的联系最为紧密。孟加拉湾表面产生的水汽是西南地区水汽的重要来源之一。吴国雄等[11]进行了有关印度洋海温季节方面的变化特征的学术研究,得出与赤道印度洋海温年际变化有显著的正相关的是东太平洋。徐建军等[12]在其报告中指出赤道东、西太平洋和赤道印度洋的海温变化是相同的,同时与南半球和北半球热带外的海洋温度呈反向变化,由此得出热带印度洋-太平洋区域的海温存在紧密的关联。谢骏成等[13]通过对热带印度洋偶极子指数(DMI)与南方涛动指数(SOI)和SLA的相关性分析,得出IOD与ENSO之间可能存在一定相关关系同时证实IOD具有季节锁相的重要特征。根据刘会军和汤燕冰的研究[14],指出热带印度洋海温异常时,通过影响热带对流异常和欧亚列波的发展,有利于形成前2-1候110~140°E经向异常环流。在ZHOU TIANJUN等[15]的研究中指出WPSH向西发展的这种显著变化部分是由于大气对观测到的印度洋-西太平洋(IWP)变暖的反应。张秀年[16]指出印-太暖池区夏季各月潜热通量和感热通量都为正值,海洋对大气有正的加热效应。在刘娜等[17]的研究中,从1951~2000年里印度洋海温呈现上升趋势,东南印度洋和西北印度洋的海温变化呈现一定的反位相关关系。巢纪平等[18]研究印度洋和太平洋两大洋,指出它们之间的海温距平的偶极子模态间存在密切的联系。相关研究还存在于李崇银等[19]有关的印度洋海温偶极子和太平洋海温异常的文献中。PJ Webster等[20]却提出在有些方面,印度洋地区的气候变异性好像与厄尔尼诺、南方涛动等外部现象的强迫没有关系。

研究西南地区夏季降水和印度洋海温的关系,可以揭示全球气候变化的影响机制,为全球气候变化的预测和应对提供科学依据和参考。总而言之,研究西南地区夏季降水和印度洋海温的关系,具有重要的科学意义和现实意义。

2. 资料和方法

2.1. 资料

(1) 由中国气象局现有的1961至2022年共62年西南地区(云,贵,川,渝四省)76个气象观测站点的逐日气象观测降水量资料。

(2) 英国气象局哈德莱中心现有的全球海表温度(Surface sea temperature, SST)相关资料。

2.2. 方法

研究方法包括：合成分析法、EOF 分解和 SVD 分解方法。

2.2.1. EOF 分解

EOF (Empirical Orthogonal Function)分析法是一种常用的气象数据处理方法，用于提取数据中的主要空间模态和时间演化特征。EOF 分析法分析海温的时候需要收集气象数据，包括时间和空间位置的气象要素数值。然后构建数据矩阵 X (需先确定 X 的作标准化取距平处理，称此时的 X 为主分量)，通过主分量分析，将 X 自然正交展开为 Z (时间函数)和 V (空间函数)即： $X = VZ$ 或

$$x_{it} = \sum_{k=1}^m V_{ik} Z_{kt} = V_{i1} Z_{1t} + V_{i2} Z_{2t} + \dots + V_{im} Z_{mt} \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m)$$

由 X 求协方差矩阵

$$XX^T = VZZ^T V^T \quad (2)$$

$$A = XX^T \quad (3)$$

A 为实对称矩阵，所以有 $V^T A V = \Lambda$ (V 的列是 A 的特征向量， Λ 是 A 的特征值组成的对角矩阵) $Z = V^T X$ 。

即：

$$z_{it} = \sum_{k=1}^m v_{ki} x_{kt} \quad (4)$$

第 i 个特征向量对 X 场的贡献率(解释方差)

$$R_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (5)$$

前 p 个特征向量对 X 场的贡献率(累积解释方差)

$$R_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (6)$$

当 $m \geq n$ 时， xx^T 的特征值为 λ_i ，特征向量为 u_i ， XX^T 的特征值为 λ_i ，特征向量为 v_i 。转化关系如下：

$$v_i = Xu_i / \sqrt{\lambda_i} \quad (7)$$

$$V = v_1, v_2, \dots, v_m \quad (8)$$

$$Z = V^T X \quad (9)$$

根据转换关系使用 Jacobi 法求出 A 的全部特征值 λ_h ，特征向量 V_h ， $h = 1 \sim H$ 。

根据 λ_h ， $h = 1 \sim H$ 和 X 总方差，求出 R_h ， G_h ， $h = 1 \sim H$ ，由 X 及主要 V_h 求其时间系数 Z_h ， $h = 1 \sim H$ ，主要的数量由分析目的及分析对象定，最后得出结果。

同时要注意 EOF 分析法的结果受到数据质量和选择主要 EOF 的影响，因此在使用时需要进行数据质量控制和 EOF 的贡献率分析，以确保结果的可靠性和有效性。

2.2.2. SVD 分解

SVD (Singular Value Decomposition)分解是一种常用的矩阵分解方法，它可以将一个矩阵分解为三个矩阵的乘积，即： $A = U \Sigma V^T$ ，其中 A 为 $m \times n$ 的矩阵， U 为 $m \times m$ 的正交矩阵， Σ 为 $m \times n$ 的对角矩阵， V 为 $n \times n$ 的正交矩阵。本文采用该方法来分析西南地区夏季的降水量和印度洋海温时间，空间等变

化量之间的相关关系。用西南地区夏季降水区域的平均值来作为西南地区夏季降水指数。

将一个非零的 $m \times n$ 实矩阵 A , $A \in R^{m \times n}$, 表示为以下三个实矩阵乘积形式的运算, 即进行矩阵的因子分解:

$$A = U \Sigma V^T \quad (10)$$

其中 U 是 m 阶正交矩阵(orthogonal matrix), V 是 n 阶正交矩阵, Σ 是由降序排列的非负的对角线元素组成的 $m \times n$ 矩形对角矩阵(rectangular diagonal matrix)。

满足以下条件:

$$UU^T = I \quad (11)$$

$$VV^T = I \quad (12)$$

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p) \quad (13)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$$

$$P = \min(m, n) \quad (14)$$

$U\Sigma V^T$ 称为矩阵 A 的奇异值分解(singular value decomposition, SVD), σ 称为矩阵 A 的奇异值(singular value), U 的列向量称为左奇异向量(left singular vector), V 的列向量称为右奇异向量(right singular vector)。详细可参考刘权的高维低秩矩阵填充问题相关算法及应用研究。

3. 西南地区夏季降水量变化特征

3.1. 西南地区地形

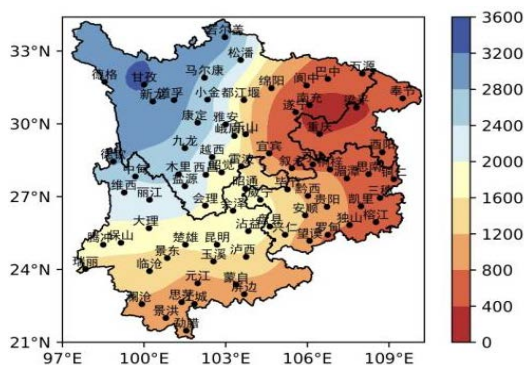


Figure 1. Elevation in southwest China

图 1. 西南地区海拔高度

西南地区位于我国西南部, 其区域地理位置处于 $97^{\circ} \sim 111^{\circ} \text{E}$, $21^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 之间。包括了四川省、贵州省、云南省、重庆市共四个省市。西南地区左边是川西高原, 南部为云贵高原, 四川盆地中心是成都平原, 川北广元多山, 地形多样复杂, 整体地势呈现西高东低的形势。图 1 为西南地区海拔高度图, 图中直观地展示了西南地区地形海拔, 海拔呈现西北高东南低的走向。区域内四川盆地内平均海拔在 500 m 左右, 川西高原地区海拔高达 3600 m 以上, 其中的甘孜站点为海拔最高值站点。图中低值中心位于川渝交界处, 重庆, 南充, 梁平站包含在内。云南高原和贵州高原的海拔分别为 2000 m 和 1000 m 左右。

3.2. 降水时间变化特征

图 2 为 1961~2022 年西南地区夏季(6~8 月)降水量标准化距平的年际变化曲线图, 如图所示, 可明显

得出, 夏季降水存在 2~3 年以及 3~5 年显著性周期的年际变化特征, 同时也存在显著性周期在 15 年左右的年代际变化特征, 这点与徐海宁[21]研究结果一致。在所研究的 62 年里, 1972 年, 1992 年, 2006 年, 2011 年以及 2022 年降水量较之前一年明显大量减少, 在距平图上形成明显的低值点将其作为降水负异常年; 同理 1968 年, 1991 年, 1998 年, 1999 年和 2019 年降水量较之前一年明显大量增加, 在距平图上形成明显的低值点将其作为降水正异常年。

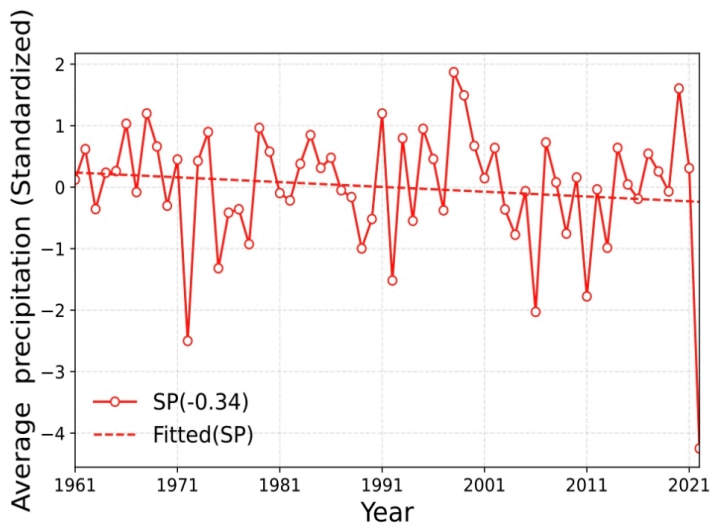


Figure 2. Sequence map of summer precipitation in Southwest China from 1961 to 2022
图 2. 1961~2022 年西南地区夏季降水序列图

3.3. 降水空间变化特征

根据西南地区 1961~2022 年夏季(6~8 月)年均降水量所得的夏季降水的空间分布见图 3。

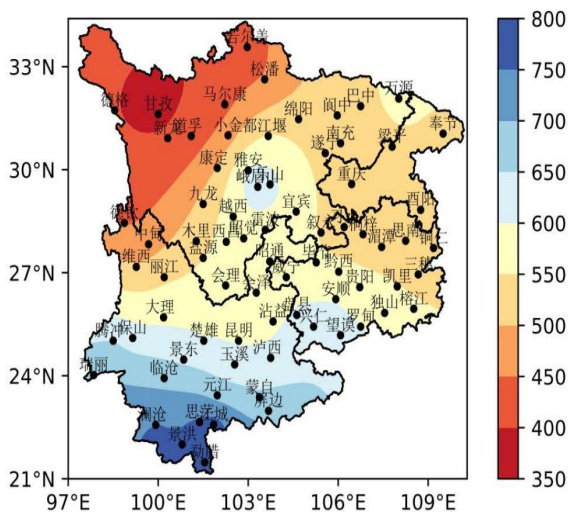


Figure 3. Spatial distribution map of cumulative precipitation in the southwestern region in the summer from 1961 to 2022
图 3. 1961~2022 年西南地区夏季累计降水空间分布图

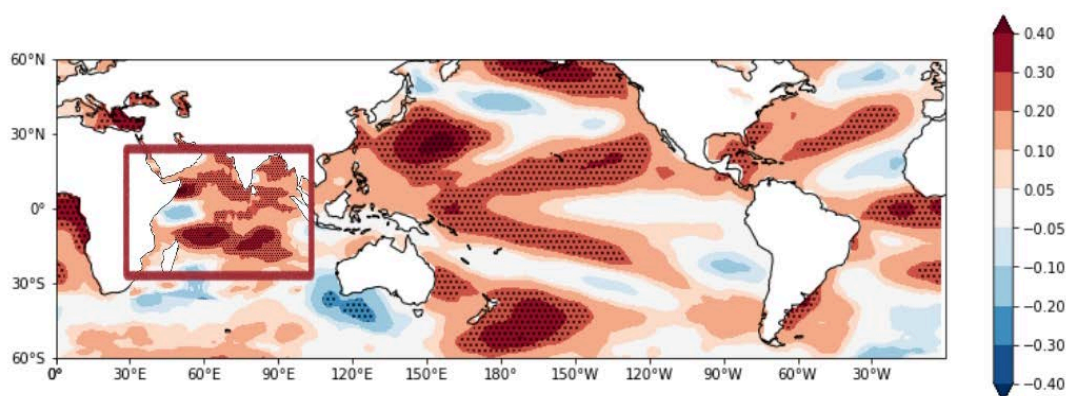
由图 3 可以发现西南地区近六十年降水量呈现南多北少的纵向空间分布, 川北高原地区以甘孜为中

心夏季年平均降水量最少,而云南南部地区夏季年平均降水量最多且向南递增。图中不难看出除去高原地区四川盆地夏季降水差异较大,以都江堰为分界线,都江堰以南地区站点(都江堰、雅安、资阳、乐山、宜宾等)降水量可达 700 mm,而以北地区(广元、阆中、南充、绵阳、巴中等)仅在 550 mm 左右。西南地区的夏季降水存在三个高值区,最高值区位于云南的南部地区,达到 750~800 mm,另外两个高值区分别位于四川东部地区和贵州东南部地区,达到了 600~650 mm。此外,整个重庆地区降水量均在 500 mm~550 mm 之间,相对较少。

4. 西南地区夏季降水与印度洋海温的关系

4.1. 海温关键区的选取

为寻找西南地区夏季降水量与全球海温的显著相关海区,用 1961~2022 年共 62 年的夏季降雨量与全球 1961~2022 同年共 62 年的海温做相关分析,可以得到与西南地区夏季降水量相关显著的全球海域(图 4),由图 4 可知:显著相关海域位于中印度洋附近,相关系数达 0.35 以上,通过 90%的置信水平检验,本文将选取印度洋海域(30°N~40°S、30°~105°E)作为将影响西南地区夏季降水量的海温关键区(图 4 方框区域)。



(The box is marked as a significant key area; the dot indicates that the correlation has passed the 90% credit level test)
(方框处记为显著关键区;打点表示相关性通过 90%置信水平检验)

Figure 4. Related distribution map of summer precipitation in Southwest China and global sea temperature standardized distance level (SSTA)

图 4. 西南地区夏季降水量与全球海温标准化距平(SSTA)的相关分布图

4.2. 西南夏季降水与关键区海温的点相关性分析

图 5 所标记的区域包含北印度洋即孟加拉湾等地,目前有许多研究均表明孟加拉湾和我国大部分地区夏季的降水的联系紧密,该地盛行西南季风,而西南季风主要影响我国西藏东南部,云南大部,四川西南部地区。该地位于印度洋北部,印度洋作为与我国接近的热带海洋之一,放大关键区得到图 5,通过图 5,进一步展开对印度洋海温与西南地区夏季降水的相关性研究。通过印度洋与西南地区夏季月平均降水相关性计算以及 90%置信度检验的临界相关系数计算公式,标记打点图中区域为相关性通过百分之九十置信水平检验。从图 5 分析可得赤道印度洋,孟加拉海湾,阿拉伯海的海表温度与西南地区的夏季降水相关性具有一定的同步效应,其相关系数达 0.2 以上,相关性显著。说明赤道印度洋,孟加拉海湾,阿拉伯海海温的异常变化出现后,会引发异常的大气环流,从而对西南地区夏季降水造成相应的变化,且该海域的同期海温变化对西南地区的夏季降水相应强烈,具有一定的遥相关。

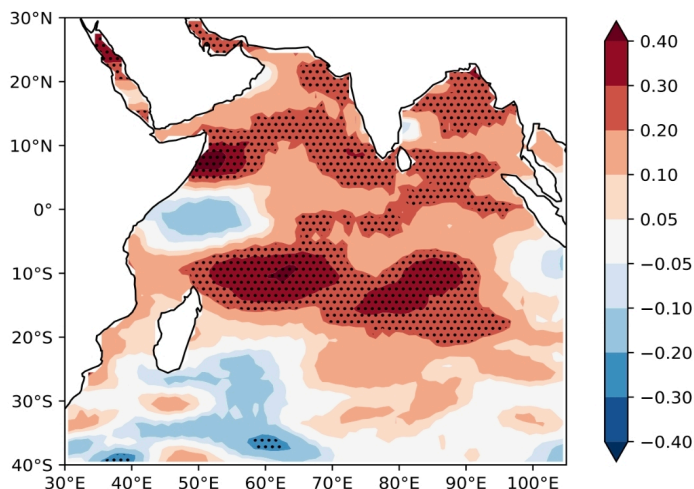
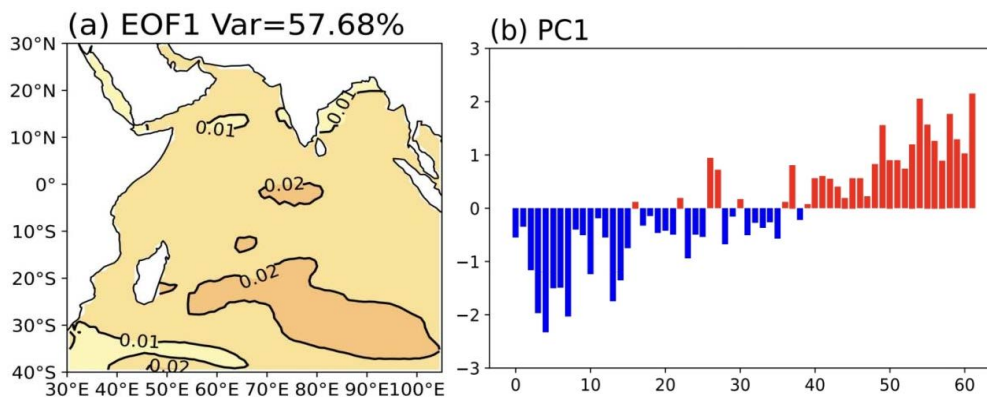


Figure 5. Correlation coefficient diagram of precipitation and sea temperature in key areas (Indian Ocean selection range: 30°E~105°E; 30°N~40°S)
图 5. 关键区降水 and 海温的相关系数图(印度洋选取范围(30°E~105°E; 30°N~40°S))

4.3. 印度洋海温 EOF 分析

为了进一步探究印度洋海温与西南地区夏季降水变化的关系，我们接下来分析印度洋海温的年际年代振荡(印度洋范围为 30°~105°E, 30°N~40°S)，首先用 HadISST 印度洋区域资料进行 EOF 分析，得到图 6。图 6(a)~(b)是 EOF 分析的第 1 个模态和时间系数，占了总模态的 44.93%，图 6(c)~(d)是第 2 个模态占 12.12%，图 6(e)~(f)是第 3 个模态占 8.7%，1、2、3 模态的总贡献率达到了 65.75%，因此可以取 EOF 分析所得的前 3 个模态以及相应的时间序列对印度洋海温年际年代变化进行分析。印度洋第 1 模态中，其空间分布(见图 6(a))如下，选取的整个印度洋区域均呈现正相关，图 6(b)中可知海温正异常年为 2015 年，2017 年，2019 年；负异常年为 1964 年，1965 年，1968 年，海温趋于变暖。印度洋第 2 模态中，其空间分布(见图 6(c))如下，选取的整个印度洋区域均呈现南北正负反位像变化，代表选区的中高纬印度洋与低纬度印度洋海温的局地差异，图 6(d)中在八十年代前海水温度存在明显的年代际变化而八十年代后海温变为年际变化，变化周期在 5~8 年。且海温正异常年为 1964 年，1996 年，2002 年，2003 年，2020 年；负异常年为 1961 年，1978 年。印度洋第 3 模态中，其空间分布(见图 6(e))如下，选区的左下右下两片区域与其他区域呈现正负反相位变化，存在局地差异。图 6(f)中可知海温年代际变化不明显，海温正异常年为 1968 年，1972 年，1982 年，1983 年；负异常年为 1984 年，1985 年，2001 年和 2022 年。



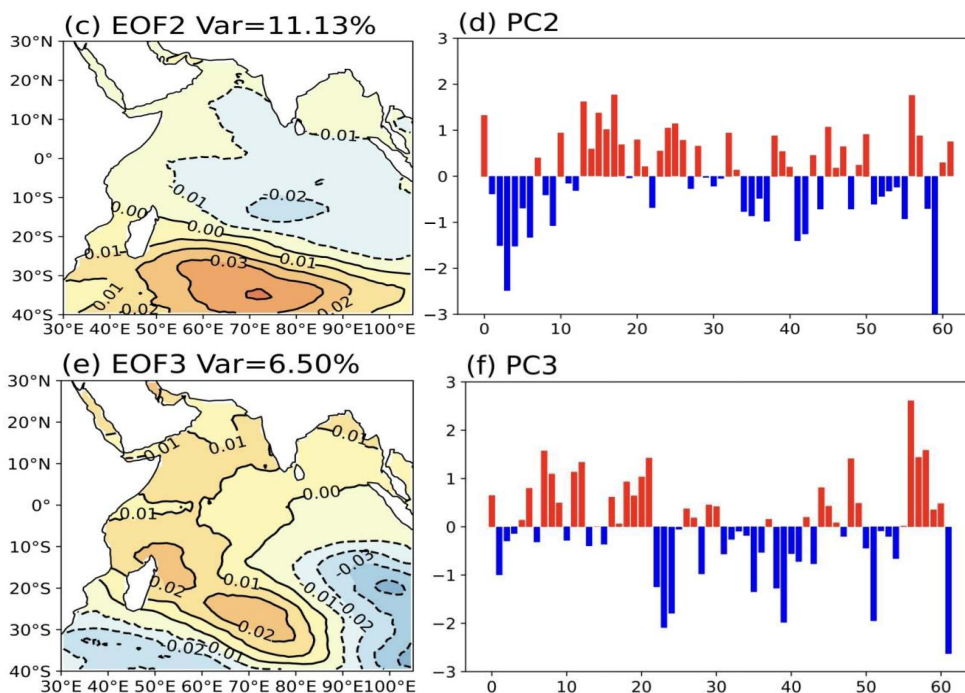


Figure 6. The first three modal spatial distributions of EOF decomposition of the Indian Ocean’s summer sea temperature standardized distance. The first model love (a; b); the second model love (c; d); the third model love (e; f)

图 6. 印度洋夏季海温标准化距平 EOF 分解的前 3 个模态空间分布。第 1 模态(a; b); 第 2 模态(c; d); 第 3 模态(e; f)

4.4. 印度洋海温异常西南地区夏季降水量合成分析

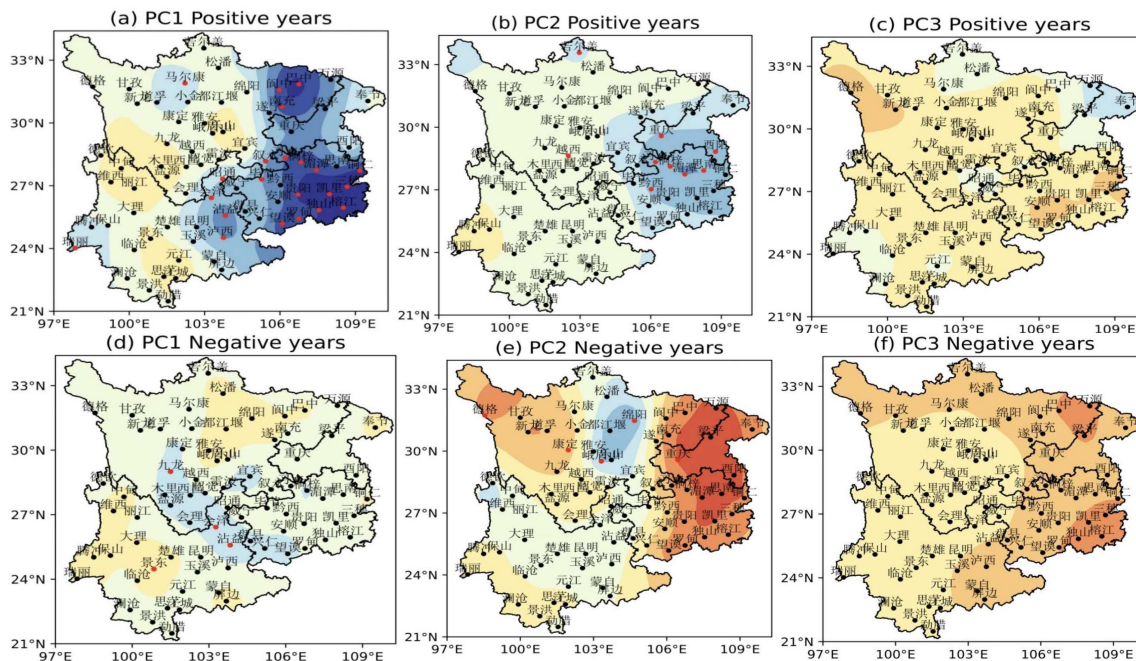


Figure 7. Spatial distribution map of precipitation synthesis in Southwest China based on abnormal years

图 7. 基于异常年分的西南地区降水量合成的空间分布图

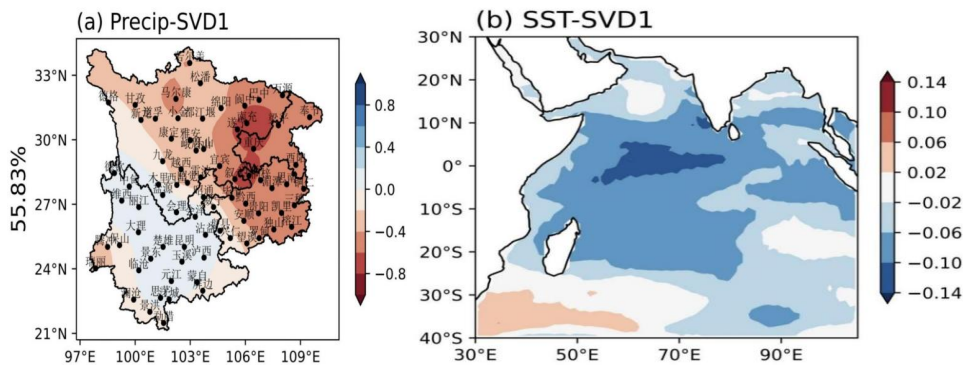
图 7 给出北印度洋海温异常偏冷(暖)当年西南地区降水量合成的空间分布的合成场布。(1) 图 7(a)和图 7(d)是 PC1 正异常年(2015、2017、2019)和 PC1 负异常年(1964、1965) (简称 A 场)代表西南地区暖水异常年时西部多雨, 东部少雨; 冷水异常年时中部多雨, 四周少雨的海温场分布。(2) 图 7(b)和图 7(e)是 PC2 正异常年(1964、1996、2002、2003、2020)和 PC2 负异常年(1961、1978)的合成场(简称 B 场)代表西南地区暖水异常年时西部多雨, 东部少雨; 冷水异常年时仅成都, 绵阳, 眉山小片区多雨, 四周少雨西部渝, 贵干旱的海温场分布。(3) 图 7(c)和图 7(g)是 PC3 正异常年(1968、1972、1973、1982、1983)和 PC3 负异常年(1984、1985、2001、2022)的合成场(简称 C 场)代表西南地区暖水异常年时仅个别站(奉节, 昭通, 元江等)多雨; 冷水异常年时梁平以及贵州东部干旱的海温场分布。即海温正异常年(偏暖年)时, 西南地区夏季降水集中于渝, 贵地区; 海温负异常年(偏冷年)时, 西南地区夏季降水主要集中于西南地域中部地区以及成都平原附近; 重庆和贵州大部出现干旱。且对比图片, 明显可得海温偏暖年的降水量明显多于偏冷年。

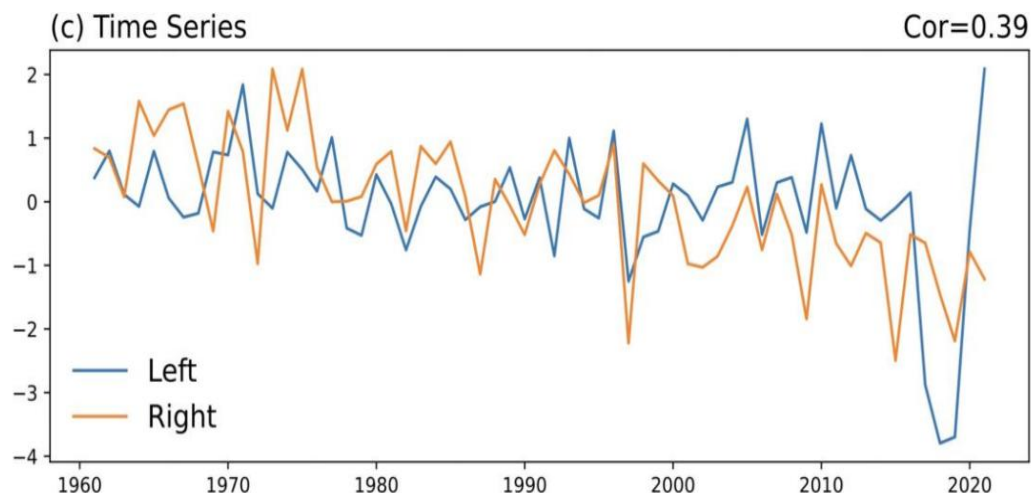
4.5. 西南地区夏季降水与印度洋关键区海温的 SVD 分解

为了探究上文所得的合成结果是否具有统计意义, 下面分别对 1961~2022 年共 62 年印度洋海温 (30°~105°E, 30°N~40°S)与西南地区同期的降水量标准化距平进行 SVD 分解, 来探究二者之间的关系。分别取印度洋前冬, 春, 夏三个季节进行分析。

4.5.1. 西南地区夏季降水与冬季印度洋关键区海温的 SVD 分解

将西南地区夏季降水与前期冬季海温做 SVD 分析后, 得到的前 3 个模态解释方差分别为 55.83%, 12.04%以及 6.81%, 后 2 个模态的解释方差平方和较小, 本文主要分析第 1 模态。图 8 为冬季温差场(b)和降水场(a)第 1 模态的空间分布和时间系数(c)。从图 8(b)中可以看出冬季所选关键区的印度洋海温的相关系数几乎为负(除去左下角小片区域), 通过 0.05 显著性检验, 其中阿拉伯海下方海域异性相关系数绝对最大值达 0.14 以上, 负值中心位于阿拉伯海。在图 8(a)中, 降水量异性相关系数云南地区几乎为正, 除去云南的大部, 以及川南小部分地区其他地区异性相关系数均为负值且通过 0.05 的显著性检验, 其负值中心位于南充, 遂宁站片区, 相关系数绝对值达 0.8 及以上, 即该地区夏季降水与阿拉伯海前冬季海温具有强烈的遥相关, 且表现为一致变化, 尤其是 2000 年到 2015 年之间的变化趋势几乎完全一致。从相应的时间系数分布图 8(c)上也可看出, 两者时间变化趋势大致相同, 模态相关系数为 0.39, 通过 0.05 的显著性检验, 相关性较好。从上分析可见, 西南(东南部)川渝贵地区夏季降水量与前期印度洋冬季海温存在显著正相关关系, 与晏理华[22]得出的结果一致, 当印度洋冬季海温异常偏暖(冷)的时候, 西南地区的重庆, 贵州和四川除去川南大部分地区的同年夏季降水量异常偏多(少)。而云南地区(除去右下和左下角)夏季降水量与前期印度洋冬季海温存在负相关关系, 即印度洋冬季海温异常偏暖(冷)的时候, 云南地区同年夏季降水量异常偏少(多)。





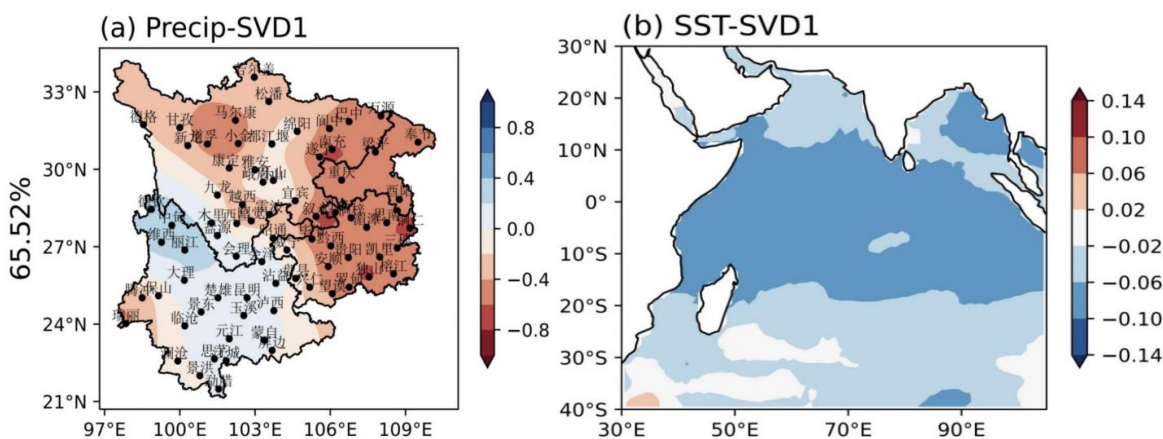
The heterosexual correlation coefficient of the first mode and the corresponding time coefficient

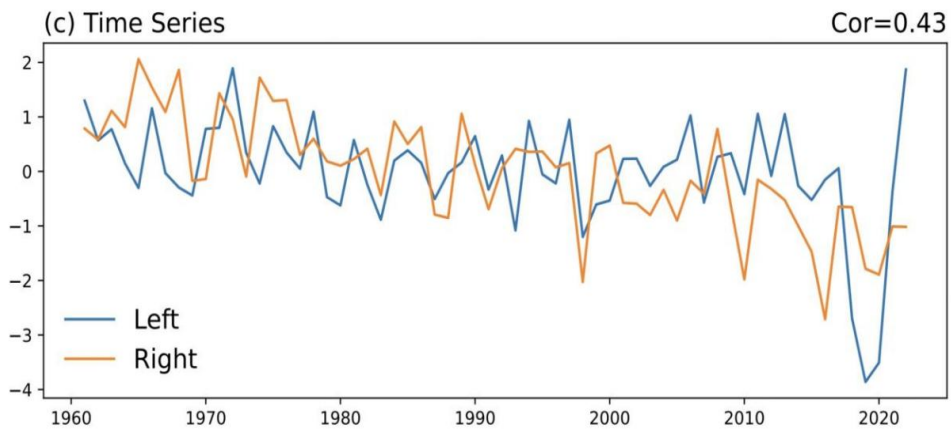
Figure 8. Winter SSTa in the Indian Ocean and summer precipitation in the southwest during the same period SVD decomposition: (a) Summer precipitation in Southwest China; (b) Indian Ocean Winter SSTa; (c) Time coefficient

图 8. 印度洋冬季 SSTA 与同期西南地区夏季降水量 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数及相应的时间系数(a) 西南地区夏季降水量; (b) 印度洋冬季 SSTA; (c) 时间系数

4.5.2. 西南地区夏季降水与春季印度洋关键区海温的 SVD 分析

将西南地区夏季降水与前期春季海温做 SVD 分析后, 得到的前 3 个模态解释方差分别为 65.52%, 12.48%以及 7.58%, 同上, 主要分析第 1 模态。图 9 为春季温差场(b)和降水场(a)第 1 模态的空间分布和时间系数(c)。从图 9(b)中可以看出春季印度洋海温的相关系数几乎为负(除去左下角小片区域), 通过 0.05 显著性检验, 其中赤道度洋区域(即赤道附近海域)异性相关系数绝对最大值达 0.1 以上。图 9(a)中降水量异性相关系数云南地区几乎为正, 除去云南其他地区异性相关系数均为负值且通过 0.05 的显著性检验, 其负值中心为南充, 独山, 铜仁和叙永站, 相关系数绝对值达 0.8 及以上。从相应的时间系数分布图上也可看出, 两者时间变化趋势大致相同, 模态相关系数为 0.43, 通过 0.05 的显著性检验, 耦合程度较好。从上分析可见, 西南川渝贵地区夏季降水量与前期印度洋春季海温存在显著正相关关系, 当印度洋春季海温异常偏暖(冷)的时候, 西南川渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少); 而云南地区夏季降水量与前期印度洋春季海温存在负相关关系, 即印度洋春季海温异常偏暖(冷)的时候, 云南地区同年夏季降水量异常偏少(多)。





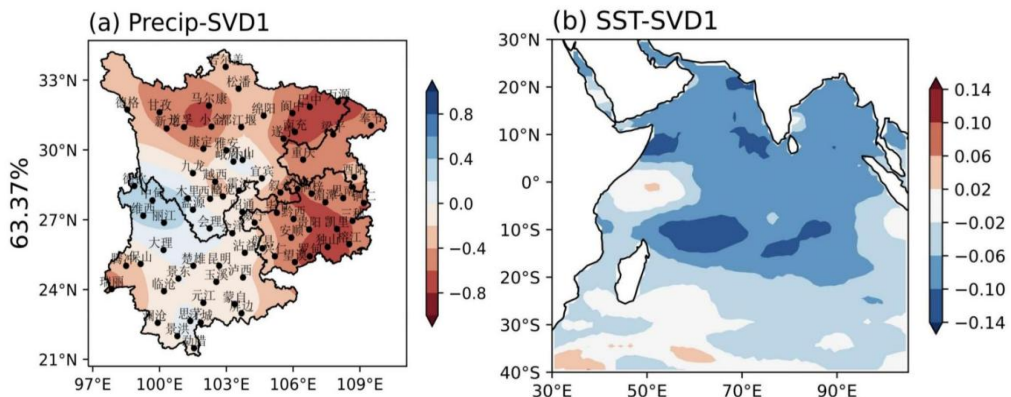
The heterosexual correlation coefficient of the first mode and the corresponding time coefficient

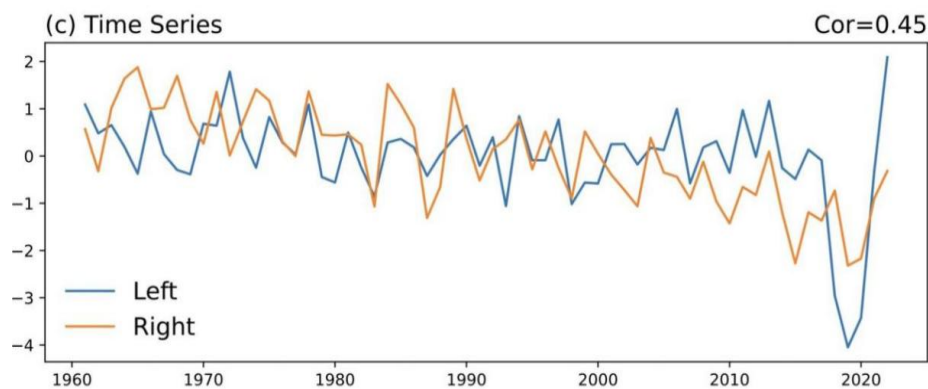
Figure 9. Spring SSTA in the Indian Ocean and summer precipitation in the southwest during the same period SVD decomposition: (a) Summer precipitation in southwestern Japan; (b) Indian Ocean Spring SSTA; (c) Time coefficient

图 9. 印度洋春季 SSTA 与同期西南地区夏季降水量 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数及相应的时间系数(a) 西南地区夏季降水量; (b) 印度洋春季 SSTA; (c) 时间系数

4.5.3. 西南地区夏季降水与夏季印度洋关键区海温的 SVD 分解

将西南地区夏季降水与前期夏季海温做 SVD 分析后, 得到的前 3 个模态解释方差分别为 63.37%, 12.04%以及 6.81%, 同上, 主要分析第 1 模态。图 10 为夏季温差场(b)和降水场(a)第 1 模态的空间分布和时间系数(c)。从图 10(b)中可以看出夏季赤道度洋区域(即赤道附近海域)和北印度洋海温的相关系数为几乎负(除去西部赤道附近小片区域), 通过 0.05 显著性检验, 其中赤道度洋区域(即赤道附近海域)和北印度洋异性相关系数绝对最大值达 0.14 以上, 负值中心位于中印度洋海盆区域。图 10(a)中降水量异性相关系数呈负-正-负型, 四川绝大部分地区以及渝贵地区均为负相关, 有三处负值中心, 分别位于川西高原, 川北广元一带以及贵州中部地区相关系数绝对值高达 0.8 以上, 而川南与云南北部连接的地方呈现正相关, 且通过 0.05 的显著性检验。从相应的时间系数分布图上也可看出, 两者时间变化趋势大致相同, 模态相关为 0.45, 通过 0.05 的显著性检验, 且前 20 年西南地区夏季降水量均为正值。从上分析可见, 川北, 川中和渝贵地区夏季降水量与前期印度洋夏季海温存在显著正相关关系, 当印度洋春季海温异常偏暖(冷)的时候, 川北, 川中和渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少); 而云南北部和川南地区夏季降水量与前期印度洋春季海温存在负相关关系, 即印度洋春季海温异常偏暖(冷)的时候, 云南北部和川南同年夏季降水量异常偏少(多)。





The heterosexual correlation coefficient of the first mode and the corresponding time coefficient

Figure 10. Summer SSTA in the Indian Ocean and summer precipitation in the southwest during the same period SVD decomposition: (a) Summer precipitation in southwestern Japan; (b) Indian Ocean Spring SSTA; (c) Time coefficient

图 10. 印度洋夏季 SSTA 与同期西南地区夏季降水量 SVD 分解第 1 模态的异性相关系数及相应的时间系数(a) 西南地区夏季降水量; (b) 印度洋夏季 SSTA; (c) 时间系数

5. 结论

(1) 点相关分析表明: 西南地区夏季降水量显著相关的关键区位于孟加拉海湾, 阿拉伯海海温附近的中印度洋海域($30^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{S}$)。

(2) 合成分析表明: 海温异常年(偏暖年)时, 西南地区夏季降水集中于渝, 贵地区; 海温异常年(偏冷年)时, 西南地区夏季降水主要集中于西南地域中部地区以及成都平原附近; 且海温偏暖年的降水量明显多于偏冷年。

(3) SVD 分析结果表明: 当印度洋前冬和春季两季海温异常偏暖(冷)的时候, 西南川渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少); 而云南地区夏季降水量与印度洋前冬, 春季两季海温存在负相关关系, 即印度洋前冬, 春季海温异常偏暖(冷)的时候, 云南地区同年夏季降水量异常偏少(多)。川北, 川中和渝贵地区夏季降水量与印度洋同期夏季海温存在显著正相关关系, 当印度洋夏季海温异常偏暖(冷)的时候, 川北, 川中和渝贵地区同年夏季降水量异常偏多(少); 而云南北部和川南地区夏季降水量与印度洋同期夏季海温存在负相关关系, 即印度洋夏季海温异常偏暖(冷)的时候, 云南北部和川南同年夏季降水量异常偏少(多), SVD 分解结果与合成分析的结果基本一致。

参考文献

- [1] 贾小龙, 李崇银. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. 地球物理学报, 2005(6): 25-36.
- [2] 刘燕, 王谦谦, 程正泉. 我国西南地区夏季降水异常的区域特征[J]. 大气科学学报, 2002, 25(1): 105-110.
- [3] 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 近 40 年西南地区的气候变化事实[J]. 高原气象, 2006, 25(4): 633-642.
- [4] Duan, A.M. and Wu, G.X. (2005) Role of the Tibetan Plateau Thermal Forcing in the Summer Climate Patterns over Subtropical Asia. *Climate Dynamics: Observational, Theoretical and Computational Research on the Climate System*, 24, 793-807. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0488-8>
- [5] 赵旋. 四川地区盛夏 7 月降水异常与大气环流的联系[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [6] 陈偕怡. 我国西南地区降水季节变化特征分析[J]. 自然科学, 2020, 8(5): 450-457.
- [7] 李芸, 穆文彬. 西南地区暴雨时空分布特征分析[J]. 黑龙江大学学报, 2014, 5(2): 37-42.
- [8] 刘丽, 曹杰, 何大明, 等. 中国低纬高原汛期强降水事件的年代际变化及其成因研究[J]. 大气科学, 2011, 35(3): 435-443.

- [9] 彭模, 韩雪, 陈茂钦. 中国夏季降水雨型雨带与印度洋海温变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4645-4650.
- [10] 假拉, 周顺武. 印度洋海温异常对印度季风, 高原夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2003, 22(z1): 132-137.
- [11] 吴国雄, 孟文. 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, 22(4): 470-480.
- [12] 徐建军, 王东晓. 印度洋太平洋海温的年际、年代际异常及其对亚洲季风的影响[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 34-43.
- [13] 谢骏成, 张国胜, 徐青, 张彪. 热带印度洋海温与海表面高度相关关系分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 39-44.
- [14] 刘会军, 汤燕冰. 江淮持续性暴雨前期热带印度洋海温影响初析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2014, 41(1): 113-122.
- [15] Zhou, T.J., Yu, R.C., Zhang, J., *et al.* (2009) Why the Western Pacific Subtropical High Has Extended Westward since the Late 1970s. *Journal of Climate*, **22**, 2199-2215. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2527.1>
- [16] 张秀年. 印太暖池区域海气相互作用的年际变化及其与低纬高原夏季降水异常的关系研究[D]. [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [17] 刘娜, 丑士连, 许海龙. 印度洋海温异常对我国降水的影响初探[J]. 吉林气象, 2012(3): 28-33.
- [18] 巢纪平, 袁绍宇. 热带印度洋和太平洋海气相互作用事件间的联系[J]. 自然科学进展, 2003, 13(12): 1280-1285.
- [19] 李崇银, 穆明权, 潘静. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常[J]. 科学通报, 2001, 46(20): 1747-1751.
- [20] Webster, P.J., Moore, A.M., Loschnigg, J.P., *et al.* (1999) Coupled Ocean-Atmosphere Dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, **401**, 356-360. <https://doi.org/10.1038/43848>
- [21] 徐海宁, 肖天贵, 杨明鑫, 等. 西南地区夏季降水的变化特征分[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(10): 908-920.
- [22] 晏理华. 我国南方冬季极端降水与印度洋海温的关系[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(23): 9724-9727.