

西南地区夏季降水变化与南亚高压的关系

赖国欣^{1,2}, 毛文书^{1,2}, 董自正^{1,2}, 王洁^{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18日; 录用日期: 2023年12月29日; 发布日期: 2024年1月9日

摘要

为进一步研究西南地区夏季降水变化与南亚高压的关系, 利用1961~2022年6~8月西南地区76个气象观测站的逐日气象观测降水量资料、同期NCEP/NCAR的月平均再分析资料(包括高度场、风场、地面气压场、相对湿度场、比湿场), 网格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 通过合成分析、EOF分解、SVD奇异值分解、南亚高压特征量等方法, 详细探讨了西南地区夏季降水变化特征与南亚高压的关系其主要结论如下: (1) 西南地区1961~2022年夏季降水呈负趋势, 每10年夏季平均降水量减少4.377 mm, 降水量空间分布不均匀, 大致为自西北向东南呈增加趋势。(2) 根据EOF分析, 前三个模态累计方差贡献率达到了51.6%, 能够较好地反映出夏季降水的空间分布类型。第一模态表明西南地区整个地区全年都呈现出多雨(少雨)的趋势。第二模态呈现出正距平区和负距平区交错分布的情况。第三模态呈现出夏季降水从北向南呈“正-负-正”分布类型的情况。(3) 1961~2022年南亚高压特征量不仅存在明显的年际变化, 而且也存在明显的年代际变化, 除脊线位置外。从1961~2022年, 南亚高压的强度在逐渐增强, 面积在逐渐增大, 东脊点位置逐渐偏西, 西脊点位置逐渐偏东, 脊线位置逐渐偏南。(4) 从1961~2022年夏季南亚高压各特征参数与西南地区同期降水的点相关分布中可以看出, 南亚高压脊线位置、面积指数、强度指数与西南地区同期降水关系最密切。从西南地区夏季降水与同期南亚高压的SVD分解表明: 第一模态空间分布型反映了南亚高压偏弱(强)年与西南地区偏旱(涝)年对应关系一般。第二模态空间分布型反映了南亚高压偏弱(强)年与西南地区偏旱(涝)年对应关系较好。

关键词

南亚高压, 西南地区夏季降水, 南亚高压特征量, EOF分解, SVD分解

The Relationship between Summer Precipitation Changes in Southwest China and the South Asian High

Guoxin Lai^{1,2}, Wenshu Mao^{1,2}, Zizheng Dong^{1,2}, Jie Wang^{1,2}

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

文章引用: 赖国欣, 毛文书, 董自正, 王洁. 西南地区夏季降水变化与南亚高压的关系[J]. 自然科学, 2024, 12(1): 34-47. DOI: 10.12677/ojns.2024.121005

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

Received: Oct. 18th, 2023; accepted: Dec. 29th, 2023; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

In order to further study the relationship between summer precipitation change in Southwest China and South Asia high, the daily meteorological observation precipitation data of 76 meteorological stations in Southwest China from June to August from 1961 to 2022 and the monthly average reanalysis data of NCEP/NCAR in the same period (including height field, wind field, surface pressure field, relative humidity field and specific humidity field) were used. By means of composite analysis, EOF decomposition, SVD singular value decomposition, South Asia high characteristic quantity and other methods, the relationship between summer precipitation variation characteristics and South Asia high in Southwest China is discussed in detail. The main conclusions are as follows: (1) The summer precipitation in Southwest China showed a negative trend from 1961 to 2022, and the average summer precipitation decreased by 4.377 mm every 10 years. (2) According to the EOF analysis, the cumulative variance contribution rate of the first three modes reached 51.6%, which can better reflect the spatial distribution type of summer precipitation. The first mode shows that the whole southwest region shows a trend of more rain (less rain) throughout the year. The second mode shows the staggered distribution of positive anomaly area and negative anomaly area. The third mode shows a “positive-negative-positive” distribution pattern of summer precipitation from north to south. (3) From 1961 to 2022, the characteristics of the South Asia High not only have obvious interannual changes, but also have obvious interdecadal changes, except for the ridge position. From 1961 to 2022, the intensity of the South Asian High is gradually increasing, the area is gradually increasing, the eastern ridge point is gradually westward, the western ridge point is gradually eastward, and the ridge line is gradually southward. (4) It can be seen from the point correlation distribution between the characteristic parameters of the South Asia High and the precipitation in the southwest during the summer of 1961~2022 that the ridge line position of the South Asia High is most closely related to the precipitation in the southwest during the same period. The SVD decomposition of the summer precipitation in Southwest China and the South Asia high in the same period shows that the spatial distribution pattern of the first mode reflects the general correspondence between the weak (strong) years of South Asia high and the drought (flood) years in Southwest China. The spatial distribution pattern of the second mode reflects a good correspondence between the weak (strong) years of the South Asian High and the drought (flood) years in the southwest region.

Keywords

South Asian High, Summer Precipitation in Southwest China, South Asian High Characteristic Quantity, EOF Decomposition, SVD Decomposition

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. 绪论

中国西南地区是夏季降水较为充沛的地区之一，其地形地貌复杂，山地起伏连绵[1]。南亚高压是青藏高原及邻近地区夏季出现的大型高压系统，对中国东部地区夏季天气和气候有着重要的影响。西南地

区由于地形和海拔的变化,呈现出不同于其他区域的气候特点。四川盆地受印度洋西南季风影响,水汽充沛;而云贵高原冬季常常受到西北太平洋高压的影响而形成锋面寒潮天气和降雪天气。本研究旨在探讨西南地区夏季降水与南亚高压的关系,揭示影响西南地区夏季降水变化的强信号,不仅为该区域的短期气候预测提供理论依据,同时对于中国经济社会的发展也具有重要的意义。杜银等[2]人的研究表明,我国西南地区夏季降水呈现出 3~4 年的年际周期和 10~16 年的年代际周期。西南夏季降水量及早涝分布与南亚高压存在较好的相关关系,因此可以认为南亚高压是影响西南夏季降水的一个较为重要的因子。陈永仁等[3]人的研究表明,夏季川渝地区降水与南亚高压东西振荡存在一定的关系,并且存在准 5 年尺度和准 10 年尺度的适应时间尺度。用 16800 gpm 线定义的东西振荡指数对认识川渝地区降水异常有很好的指示意义。朱玲等[4]研究了南亚高压的气候变化特征及其与东部夏季降水异常的相互关系。结果表明,NCEP 再分析资料的气温和位势高度与实际观测值在整个中国地区具有相同的变化特征,适用于中国地区气候年际变化特征的研究。根据奇异值分解和相关分析发现,当南亚高压面积指数偏大、位置偏南时,长江中下游降水量偏多;当南亚高压面积偏小、位置偏北时,长江中下游降水量则偏少。张宇等[5]通过分析南亚高压和西太平洋副热带高压对我国西南地区夏季降水异常的影响,发现南亚高压对我国西南地区夏季降水的影响比西太平洋副热带高压更为显著。郭志荣等[6]人利用相关分析法研究了夏季南亚高压与云南地区降水的关系。结果表明,1961 年至 2012 年夏季,滇西南地区降水与南亚高压主中心经度呈显著负相关,滇南地区降水与南亚高压面积呈显著负相关。王斌[7]研究了高原地区 NASA 与 NCEP 再分析资料在南亚高压活动及其旱涝影响分析中的应用。研究表明,南亚高压活动的强弱与高原地区的旱涝变化密切相关。陈丹等[8]通过分析西南地区夏季大气水汽含量及其与南亚高压的关系,发现南亚高压与西南地区夏季降水的变化密切相关,南亚高压的异常活动可以影响西南地区的降水。王宁[9]研究了多时间尺度南亚高压与西太平洋副热带高压对西南地区夏季降水的特征及其与东亚夏季风的关系,在年际尺度上,南亚高压与西太平洋副热带高压的异常位置和强度变化对西南地区夏季降水的影响较为显著。罗米娜[10]通过研究南亚高压的时空演变特征及其对西南地区降水的影响,发现南亚高压在不同时间尺度上对西南地区降水的影响具有显著的差异。靖娟利[11]等人研究了西南地区干旱的时空演变特征,西南地区 SPEI12 整体呈下降趋势,下降速率为 0.025/10 a。综合上述文献可以看出,南亚高压与西南地区夏季降水变化存在密切的关系,但具体的影响机制和影响方式在不同的时间尺度和空间尺度上具有差异。因此,进一步深入研究南亚高压与西南地区夏季降水变化的关系,对于深化对气候系统的认识和提高预测准确性具有重要的意义。

西南地区是中国重要的农业区,同时也是生态环境脆弱区。夏季降水对其经济社会发展具有重要影响。因此,通过对西南地区夏季降水与南亚高压的关系进行深入研究,可以对西南地区夏季降水变化的驱动机制进行解析,为未来的气候预测和水资源管理提供科学依据。本文旨在分析西南地区夏季降水与南亚高压的关系,探讨其对西南地区气候的影响,并为进一步的研究提供基础和参考。

2. 资料和方法

2.1. 研究区概况

西南地区(21°N~34°N, 97°E~109°E)是一个宽泛的地理概念,指的是中国西南地区,包括四川、重庆、贵州、云南,西南地区 76 个站点及海拔分布如图 1 所示。

2.2. 资料概况

- (1) 1961~2020 年 6~8 月西南地区 76 个气象观测站的逐日降水量资料。
- (2) NCAR (<https://rda.ucar.edu/>)和美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(<https://www.ncei.noaa.gov/>)

提供的 NCEP/NCAR 的月平均再分析资料, 时间跨度从 1961 到 2022 共 62 年, 水平空间分布率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬格距, 包括的物理量有高度场, 风场, 地面气压场, 相对湿度场和比湿场。

(3) 南亚高压特征量定义

在研究西南地区夏季降水与南亚高压的关系时, 我们需要考虑到一些指数的影响。南亚高压面积指数: 是通过计算 100 hPa 高度场上 ($0^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{N}$, $40^{\circ} \text{E} \sim 180^{\circ}$) 区域内位置高度值大于等于 16750 gpm 的格点数得出的。南亚高压东(西)伸指数则表示 16750 gpm 等值线最东(西)端点所在位置的经度。南亚高压强度指数则反映了在相同区域内 16750 gpm 等值线范围内的最大位势高度值。南亚高压脊线位置: 即在相同区域内 16750 gpm 等值线范围内位势高度最大值的平均纬度值[12] [13]。

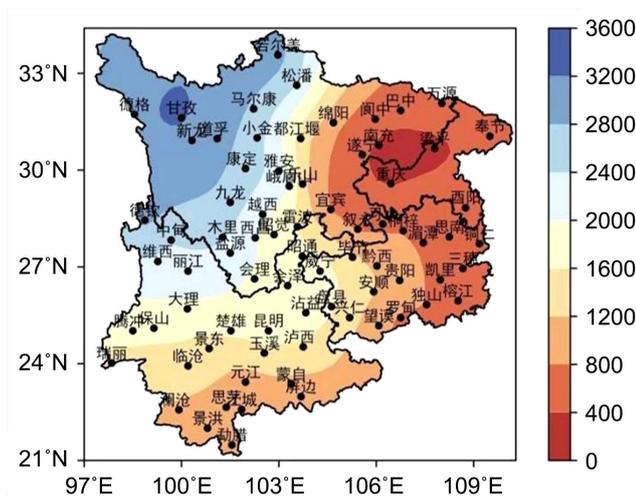


Figure 1. Altitude of meteorological stations in southwest
图 1. 西南地区气象站点海拔高度

2.3. 研究方法

包括 EOF 分解[14], Pearson 相关系数[15], 奇异值分解(SVD) [16] [17] [18]。

2.3.1. EOF 分解

经验正交函数分解是气候变化领域常用的时空分解方法。原理是把一个要素场进行分解为几个关键部分的要素场。利用这几个关键要素场的信息来反映所需要的场的主要信息。基本原理如下[14]:

(1) 设一个确定范围的气象要素场, 包含 m 个空间点有 n 次观测。把 m 个变量 n 次观测值排列成矩阵的形式, 将要分析的矩阵距平化, 得到矩阵 $X_{m \times n}$;

(2) 计算协方差矩阵 $C_{m \times m}$;

$$C_{m \times m} = -x^1 \times x^T \tag{1}$$

(3) 计算矩阵 C 的特征值 ($\lambda_{1,2,\dots,m}$) 和特征向量 ($V_{m \times m}$):

$$C_{m \times m} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times \Lambda_{m \times m} \tag{2}$$

其中

$$\Lambda_{m \times m} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_m \end{pmatrix} \tag{3}$$

一般将特征值 λ 从大到小排列, 反映各个主成分重要性。因为数据 X 是真实的观测值, 所以 λ 应该大于或者等于 0。每个非零特征值对应的一列特征向量就是 EOF。如 λ_1 对应的特征向量值称为第一个 EOF 模态, 也就是 V 的第一列; 第 k 个特征值对应的特征向量为 V 的第 k 列, 也叫做第 k 个模态。

(4) 计算主成分, 即空间特征向量对应的时间系数:

$$P_{m \times m} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times m} \quad (4)$$

其中 $P_{m \times m}$ 中的行就是对应每个特征量的时间系数。

(5) 计算每个特征量的方差贡献率以及前 P 个特征量的累积方差贡献:

每个特征量的方差贡献率为:

$$R_k = \frac{\lambda_k}{\sum_1^m \lambda_i} \quad (5)$$

其中: $K=1,2,\dots,p$ ($p < m$), 前 p 个特征量的累积方差贡献为:

$$G = \frac{\sum_1^p \lambda_i}{\sum_1^m \lambda_i} \quad (6)$$

2.3.2. Pearson 相关系数

在考虑其他因素的影响时, Pearson 相关系数可用于测量两个变量之间的相关程度。该系数的取值范围在 -1 到 1 之间, 绝对值越大说明两个变量的相关性越强。如果相关系数为正, 则表示两个变量之间呈正相关, 即一个变量随着另一个变量的增加而增加; 如果相关系数为负, 则表示两个变量之间呈负相关, 即一个变量随着另一个变量的增加而减少。在本研究中, 我们将运用 Pearson 相关系数分析西南地区夏季降水变化与南亚高压之间的关系, 以探究它们之间的相关性[15]。

可以抽象为以下计算模式:

$$\Gamma_D = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

其中 $a_{ij} = X_j - X_i$, $b_{ij} = Y_j - Y_i$ 。

2.3.3. 奇异值分解(SVD)

为了在气候诊断分析及大尺度气候场的遥相关方面简化数据处理过程, 研究者们采用了奇异值分解这种统计方法, 它能将一个数据集分解成多个互不相关的子集。奇异值分解通过将数据集中的一些值与其他值分离开来, 达到这个目的。SVD 方法是一种比典型相关分析方法更为先进的数据分析方法, 它能够最大限度地分离出相互独立的耦合分布型和各自满足的正交性, 找到真正的相关性和关键区域。基本原理如下[16][17][18]: 设有两个要素场: $Y'_{p \times n}$ (预报量场)和 $X_{q \times n}$ 预报因子场两个场的协方差矩阵为:

$$C_{q \times p} = X_{q \times n} Y'_{p \times n} \quad (8)$$

$C_{q \times p}$ 的奇异值分解为:

$$C_{q \times p} = L_{q \times m} \Sigma_{m \times m} R'_{m \times p} \quad (9)$$

式中, L 是 $q \times m$ 阶矩阵, 称为 C 的左奇异向量, $L'L = I$ 。 R 是 $p \times m$ 阶矩阵, 称为 C 的右奇异向量。 $R'R = I$ 。其中 $m = \min(q, p)$; Σ 是 $m \times m$ 对角阵。

其中 Σ 为:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ 为 C 矩阵的奇异值。第 i 对空间分布型(即 L_i, R_i)所能解释的协方差占总协方差的百分比为:

$$P_h = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \quad (11)$$

前 h 对奇异向量所解释的方差占原资料场的协方差百分比为:

$$P_h = \frac{\sum_{i=1}^h \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \quad (12)$$

对要研究的预报量场与预报因子场用奇异值分解展开后可根据式(11)和式(12)算其展开的精度, 决定所需选取的奇异向量对的数目。

3. 西南地区夏季降水变化与南亚高压的关系

3.1. 西南地区夏季降水变化特征

3.1.1. 西南地区夏季降水时空变化

从图 2(a)西南地区 1961~2022 年夏季降水年代际变化趋势图可以看出, 近 62 年夏季降水呈负趋势, 每 10 年平均降水量减少 4.377 mm。图 2(b)是西南地区近 62 年夏季降水量的平均分布图, 从图中可以看出西南地区夏季降水量空间分布不均匀, 大致为自东南向西北呈减少趋势。从图中可以看出四川的中部地区、云南的南部地区、贵州的东南部地区是整个西南地区的降水大值区, 降水最高的地区位于云南的南部地区, 从图 2(b)中可以明显的看出四川的西北地区降水量较少, 是整个西南地区的干旱区, 降水量与其他地区相比差距很大, 而四川盆地因为其独特的地理优势, 也呈现出一个降水大值区[1]。

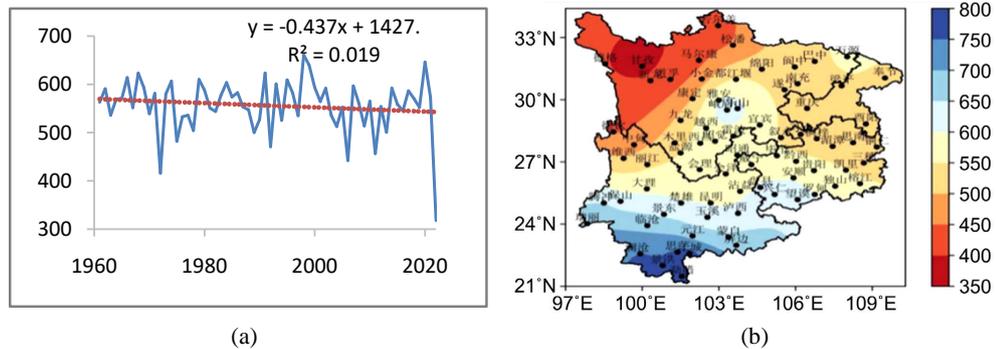


Figure 2. Summer precipitation in southwest (a) interdecadal variation trend and (b) spatial distribution
图 2. 西南地区夏季降水年代际变化趋势图(a)及空间分布图(b)

3.1.2. 西南地区夏季降水的 EOF 分解

下面是对西南地区 76 个气象站点 1961~2022 年的夏季降水量资料进行 EOF 分解。从图 3 中可以看出 EOF 前 3 个模态的方差贡献率分别为: 33.90%、9.39%、8.31%, 累计方差贡献率达到了 51.6%, 能够较好地反映出夏季降水的空间分布类型。根据图 3(a), 第 1 模态向量场的方差贡献率为 33.90%, 主要影响西南地区夏季降水的空间分布。该区域的降水呈现出正距平, 说明该模态下整个西南地区的降水变化趋势一致性非常强, 即西南地区为强正向年或强负向年。定义时间系数 ≥ 1 为降水强正向年, ≤ -1 为降

水强负向年。根据定义,从图 3(b)中可以看出,西南地区的夏季降水强正向年有:2018 年、2019 年、2020 年;降水强负向年有 1972 年、2011 年、2022 年。根据图 3(c),第 2 模态向量场的方差贡献率为 9.39%。正负距平区域交错分布,西北和东北部的四川、重庆、贵州地区呈现出正距平,其中万源-巴中-梁平一带为高值中心;而中部和南部的四川、云南地区呈现出负距平,负距平覆盖范围较广,峨眉山-乐山-雅安一带地区为低值中心区。即要么四川西北部地区和东北部地区、重庆、贵州降水强正向年,四川中部地区和南部地区、云南降水强负向年;要么四川西北部地区和东北部地区、重庆、贵州降水强负向年,四川中部地区和南部地区、云南降水强正向年。根据模态 1 的定义,从图 3(d)中可以看出,对于四川的西北部地区和东北部地区、重庆、贵州来说,降水强正向年有:1965 年、1982 年、1993 年、2000 年、2011 年、2019 年、2022 年;降水强负向年有:1961 年、1966 年、1971 年、1984 年、2018 年(图 3(d))。根据图 3(e),第 3 模态向量场的方差贡献率为 8.31%,夏季降水呈现出北-南“正-负-正”的分布类型。西南地区北部和南部具有正距平,元江-思茅-江城一带为高值中心;中部和南部的四川、重庆南部、贵州和云南北部地区则呈现出负距平。正负距平区域的范围相差不大。即要么西南地区的北部地区和南部地区降水强正向年,四川的中部地区和南部地区、重庆的南部地区、贵州和云南的北部地区降水强负向年;要么西南地区的北部和南部降水强负向年,四川的中部地区和南部地区、重庆的南部地区、贵州和云南北部地区降水强正向年。根据模态 1 的定义,西南地区的北部和南部地区的降水强正向年为:2011 年和 2018 年;降水强负向为:1974 年、2015 年、2016 年(图 3(f))。

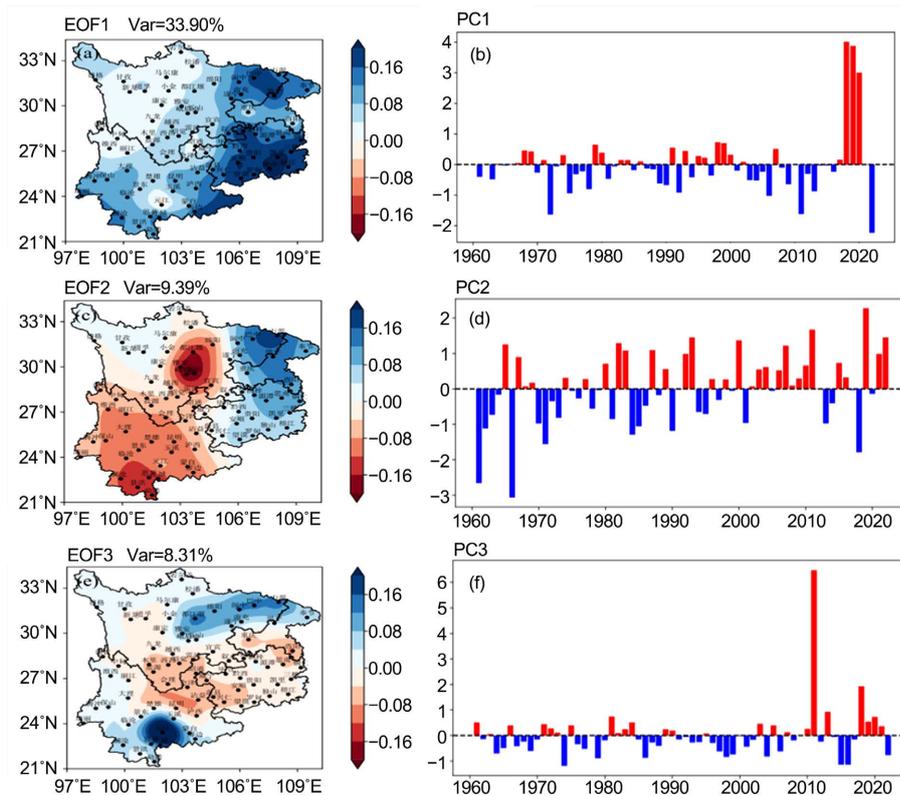


Figure 3. The first three modes and corresponding time coefficients of EOF decomposition of summer precipitation in Southwest China. (a) EOF 1st mode; (b) The time coefficient corresponding to the first mode of EOF; (c) EOF second mode; (d) The time coefficient corresponding to the second mode of EOF; (e) EOF 3rd mode; (f) Time coefficient corresponding to the third mode of EOF

图 3. 西南地区夏季降水量的 EOF 分解前 3 模态及相应的时间系数。(a) EOF 第 1 模态; (b) EOF 第 1 模态相应的时间系数; (c) EOF 第 2 模态; (d) EOF 第 2 模态相应的时间系数; (e) EOF 第 3 模态; (f) EOF 第 3 模态相应的时间系数

3.2. 南亚高压特征量变化特征

图 4 为南亚高压特征量 62 年夏季平均变化情况。从图中可以看出南亚高压特征量不仅存在明显的年际变化，而且也存在明显的年代际变化[19]，除脊线位置外。

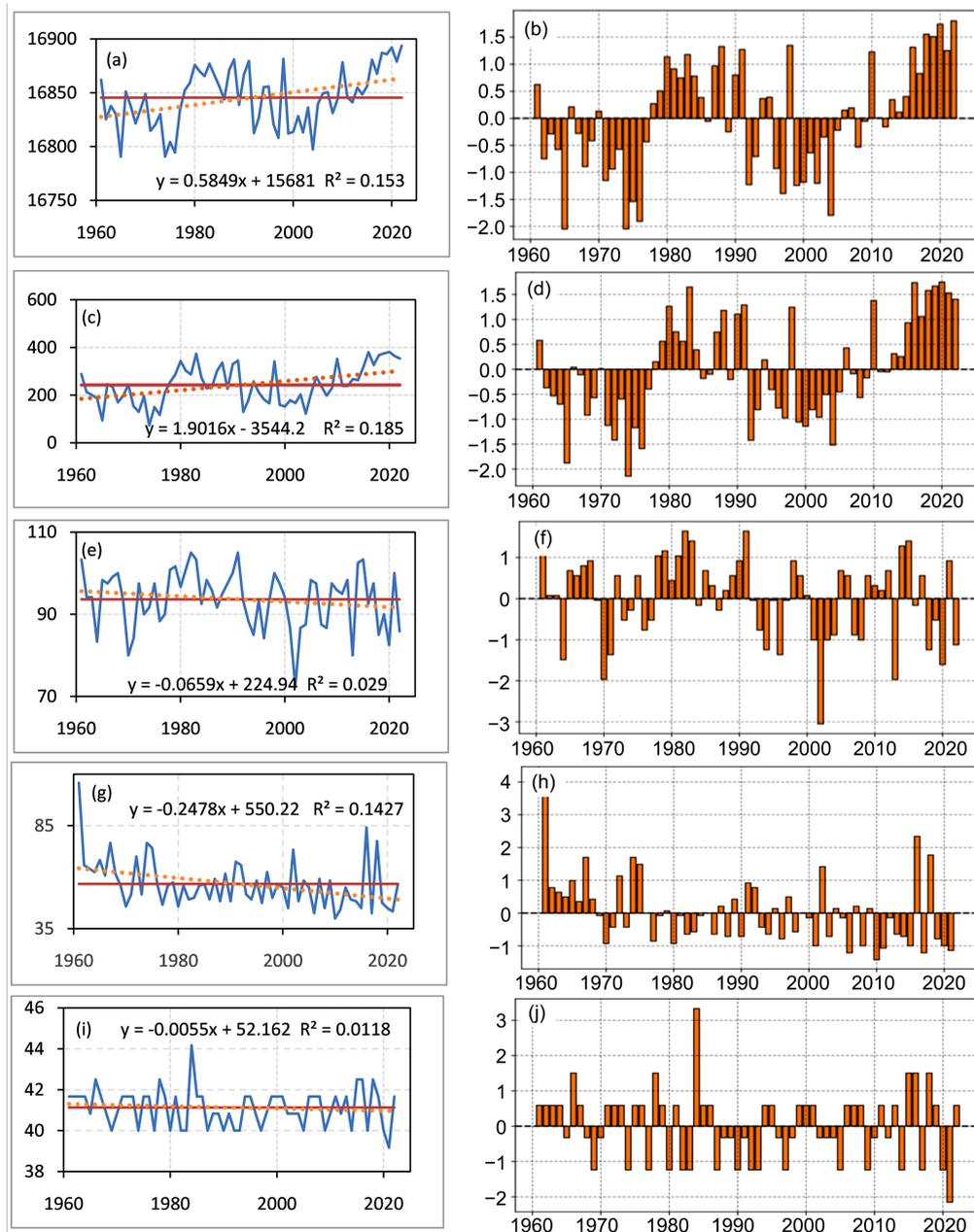


Figure 4. Interannual variation of summer characteristic quantities of the South Asian High in summer. (a) Linear trend of intensity index; (b) Standardized sequence of intensity index; (c) Linear trend of area index; (d) Standardized sequence of area index; (e) Linear trend of the position of the eastern ridge point; (f) Standardized sequence of the position of the eastern ridge point; (g) Linear trend of the position of the western ridge point; (h) Standardized sequence of the position of the western ridge point; (i) Linear trend of ridge position; (j) Standardized sequence of ridge position

图 4. 夏季南亚高压夏季特征量年际变化。(a) 强度指数线性趋势；(b) 强度指数标准化序列；(c) 面积指数线性趋势；(d) 面积指数标准化序列；(e) 东脊点位置线性趋势；(f) 东脊点位置标准化序列；(g) 西脊点位置线性趋势；(h) 西脊点位置标准化序列；(i) 脊线位置线性趋势；(j) 脊线位置标准化序列

3.2.1. 南亚高压特征量年代际变化

从图 4(a)可以看出, 南亚高压强度指数呈显著增强的趋势, 平均每 10 年南亚高压强度指数增强 5.849 gpm。1961~1978 年, 南亚高压强度大部分在均值以下; 1979~1991 年, 南亚高压强度大部分在均值以上; 1992~2009 年, 南亚高压强度大部分在均值以下; 2010~2022 年, 南亚高压强度大部分在均值以上。从图 4(b)中可以看出 1961~1978 年, 南亚高压强度偏弱; 1979~1991 年, 南亚高压强度偏强, 面积偏大; 1992~2009 年, 南亚高压强度偏弱; 2010~2022 年, 南亚高压强度偏强。从图 4(c)可以看出, 南亚高压面积指数呈显著增强的趋势, 平均每 10 年南亚高压面积指数增强 19.016 gpm·地球半径²。1961~1978 年, 南亚高压面积大部分在均值以下; 1979~1991 年, 南亚高压面积大部分在均值以上; 1992~2009 年, 南亚高压面积大部分在均值以下; 2009~2022 年, 南亚高压面积大部分在均值以上。从图 4(d)中可以看出 1961~1978 年, 南亚高压强度面积偏小; 1979~1991 年, 南亚高压面积偏大; 1992~2009 年, 南亚高压面积偏小; 2010~2022 年, 南亚高压面积偏大。从图 4(e)可以看出, 南亚高压东脊点位置呈偏西的趋势, 平均每 10 年南亚高压东脊点位置向西伸 0.659 经度。1961~1978 年, 南亚高压东脊点位置在平均值上下波动的振荡段; 1979~1991 年, 南亚高压东脊点大部分位于均值以上; 1992~2013 年, 南亚高压东脊点大部分位于均值以下; 2014~2022 年, 南亚高压东脊点位置在平均值上下波动的振荡段。从图 4(f)中可以看出 1961~1978 年, 南亚高压东脊点处于东西振荡段; 1979~1991 年, 南亚高压东脊点处于普遍偏东的位置; 1992~2013 年, 南亚高压东脊点处于普遍偏西的位置; 2014~2022 年, 南亚高压东脊点处于东西振荡段。从图 4(g)可以看出, 南亚高压西脊点位置呈偏东的趋势, 平均每 10 年南亚高压西脊点位置向东伸 2.478 经度。1961~1975 年, 南亚高压西脊点位置大部分在平均值以上; 1976~2015 年, 南亚高压西脊点位置大部分在平均值以下; 2015~2022 年, 南亚高压西脊点位置在平均值上下波动的振荡段。从图 4(h)中可以看出 1961~1975 年, 除 1970 年外, 南亚高压西脊点处于普遍偏西的位置; 1976~2015 年, 除 1991、1992、2002 年外, 南亚高压西脊点处于普遍偏东的位置; 2015~2022 年, 南亚高压西脊点处于东西振荡段。从图 4(i)可以看出, 南亚高压脊线位置呈偏南的趋势, 平均每 10 年南亚高压脊线位置向南伸 0.055 纬度。从图 4(j)可以看出, 1961~2022 年, 南亚高压脊线位置一直在南北上下波动的振荡段。

3.2.2. 南亚高压特征量之间点相关系数

表 1 给出了 1961~2022 年夏季南亚高压特征量间的 Pearson 相关系数, 可以看出, 高压面积指数与强度指数的相关系数达到了 1% 的高相关显著性检验; 面积指数和东西脊点位置的相关系数达到了 10% 的显著性检验; 脊线指数和西脊点位置的相关系数达到了 10% 的显著性检验。

Table 1. Correlation coefficient table of various characteristic parameters of South Asian high pressure

表 1. 南亚高压各特征参数相关系数表

	面积指数	西伸指数	东伸指数	强度指数	脊线指数
面积指数	1 (0.000 ^{***})				
西伸指数	-0.223 (0.081 [*])	1 (0.000 ^{***})			
东伸指数	0.23 (0.073 [*])	0.083 (0.519)	1 (0.000 ^{***})		
强度指数	0.968 (0.000 ^{***})	-0.219 (0.087 [*])	0.2 (0.119)	1 (0.000 ^{***})	
脊线指数	-0.003 (0.984)	0.228 (0.075 [*])	-0.104 (0.420)	0.039 (0.765)	1 (0.000 ^{***})

注: ^{***}、^{**}、^{*} 分别代表 1%、5%、10% 的显著性水平。

3.3. 西南地区夏季与南亚高压的 SVD 分解

图 5 为 1961~2022 年夏季(6~8 月)南亚高压各特征参数与西南地区同期降水的相关分布。

3.3.1. 西南地区夏季降水与南亚高压的点相关分析

由图 5(a)可知, 夏季西南地区降水与同期南亚高压脊线位置在西南地区的中部和南部地区为正相关。在四川的西北地区、四川东北地区、重庆的东北部和东部地区为显著负相关; 在云南的西北地区、云南的西南地区、云南的南部地区为显著正相关。由图 5(b)可知, 夏季西南地区降水与同期南亚高压西伸脊点在四川的中部地区、云南大部分地区、贵州的西部地区为正相关。中甸-大理一带为显著正相关。由图 5(c)可知, 夏季西南地区降水与同期南亚高压东伸脊点在四川的东部地区、重庆的南部地区、云南和贵州的大部分地区为负相关。屏边-景洪一带和贵州东部为显著负相关, 在四川的西北地区为显著正相关。由图 5(d)可知, 夏季西南地区降水与同期南亚高压面积指数在四川的西南部地区、云南的北部地区为负相关。在四川的北部地区和东北部地区、重庆和贵州的大部分地区、云南的西南地区为显著正相关。由图 5(e)可知, 夏季西南地区降水与同期南亚高压主中心强度在四川的西南部地区和云南的西北部地区为负相关。在四川的东北部地区和北部地区、重庆和贵州的大部分地区、云南的西南地区为显著正相关。

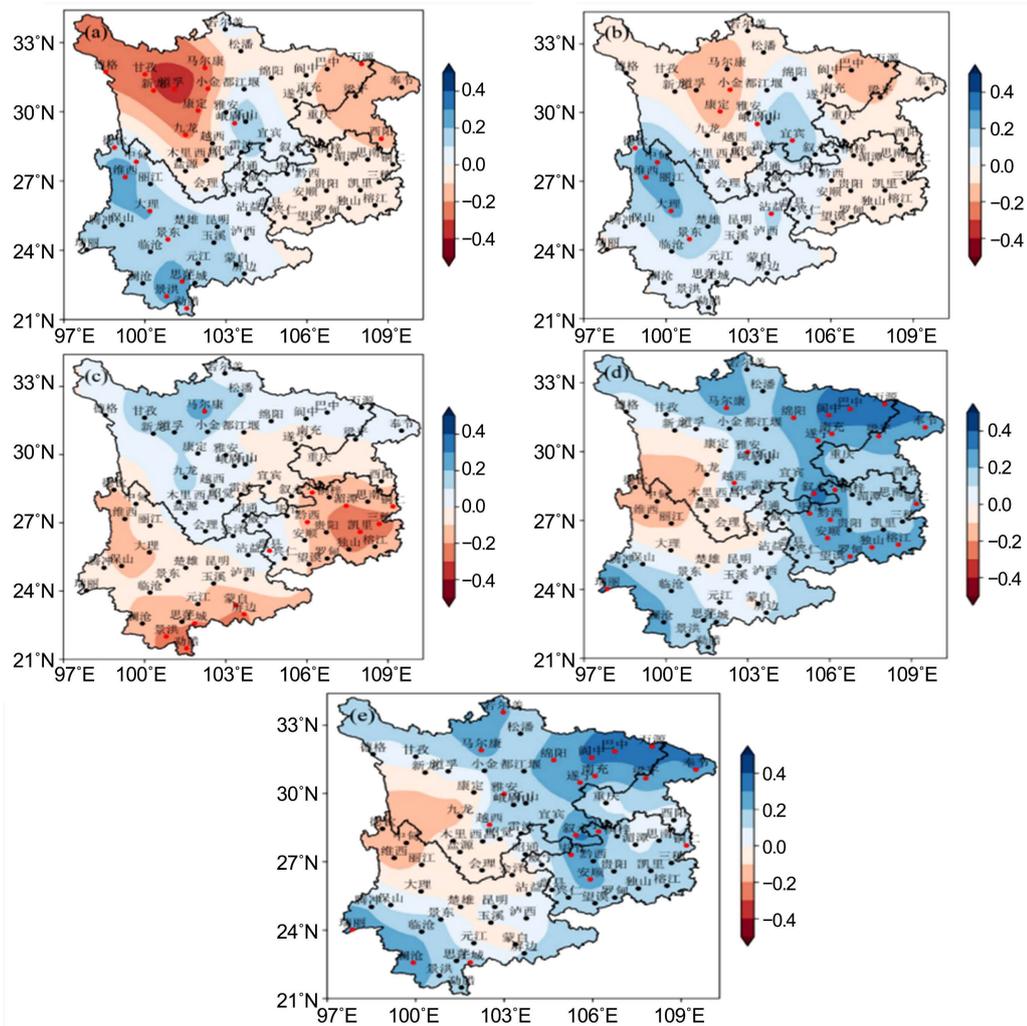


Figure 5. The correlation distribution between the summer characteristics of the South Asian High and the precipitation in the Southwest region during the same period. (a) the position of the ridge line; (b) West extension position; (c) Eastward extension position; (d) Area index; (e) Intensity index (red dots pass 90% correlation test, black dots fail test)

图 5. 南亚高压夏季特征量与西南地区同期降水的相关分布。(a) 脊线位置; (b) 西伸位置; (c) 东伸位置; (d) 面积指数; (e) 强度指数(红点通过 90% 的相关性检验, 黑点没通过检验)

综上所述，南亚高压脊线位置、面积指数、强度指数与西南地区同期降水关系最密切。对于四川的西北地区、四川的东北部地区、重庆的东北部和东部地区来说，夏季南亚高压脊线越偏北，降水越少；对于云南的西北地区、云南的西南地区、云南的南部地区来说，夏季南亚高压脊线越偏南，降水越少；对于四川的西北地区、四川的东北地区来说，夏季南亚高压的西伸脊点越偏东，降水越少；对于云南西北地区来说，南亚高压的西伸脊点越偏西，降水越多；对于四川的西北地区来说，夏季南亚高压的东伸脊点越偏东，降水越少；对于云南的西南地区和南部地区、贵州的东部地区来说，东伸脊点越偏西，降水越多。

3.3.2. 西南地区夏季降水与南亚高压的 SVD 分解

将西南地区夏季降水场作为左场，有 76 个测站；将 $0^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ ， $0^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 夏季 100 hPa 高度场作为右场，所选区域涵盖了南亚高压所在位置。左右场时间跨度：1961 年~2022 年，共 62 年，左、右场经过标准化处理后，进行 SVD 分析。利用 SVD 方法对 1961~2022 年南亚高压和我国西南地区夏季降水进行了统计分析，获得了降水场异常和高度场异常的耦合状态，并通过一一对应的特征向量来描述这种耦合模态。由表 2 可知，在前 3 对特征向量的解释方差中，SVD 分析前两个模态的协方差贡献分别为 74.11% 和 11.35%，累计协方差贡献率达到了 85.46%。这表明 SVD 的分析结果具有高度的解释性和可靠性，且前两个模态左右场间的系数分别为 0.42 和 0.53，收敛速度较快，并通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。因此，通过研究这两对特征向量场的配置，可以获得关于西南地区夏季降水场异常和 100hPa 高度场异常关系的大部分信息。

Table 2. The first three pairs of principal component modal variance contribution rates and correlation coefficients for SVD analysis of summer precipitation and 100 hPa height field in Southwest China

表 2. 西南地区夏季降水与 100 hPa 高度场 SVD 分析的前 3 对主分量模态方差贡献率及相关系数

季节	夏季		
SVD 模态	1	2	3
方差贡献率/%	74.11	11.35	5.47
累计贡献率/%	74.11	85.46	90.93
相关系数	0.42	0.53	0.44

西南地区夏季降水变化与南亚高压的关系是当前气候研究的热点之一。针对此问题，研究者们通过分析不同时间段的气象数据，发现南亚高压与西南地区夏季降水呈现一定的相关性。为了确定异常符号，需要分别对特征向量场的“正”、“负”时间系数进行分析，并结合二者是否异号。特征向量场在各个年份所占比重的大小，也可以通过时间系数图来反映[20]。图 6 为夏季 100 hPa 高度场与同期西南地区降水 SVD 分析的第一模态空间分布型，可以看出，100 hPa 高度场的负中心在 40°N 以南 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间，反映当时间系数为正时，南亚高压为偏弱年；时间系数为负时，南亚高压为偏强年。与此对应的西南地区降水场(图 6(a))，除了四川西南部地区、云南西北部地区和北部地区为正相关外，西南其余地区为负相关，最大的负中心位于绵阳 - 遂宁 - 梁平一带[21]。图 6(c)为经过标准化处理的西南地区夏季降水场和同期 100 hPa 高度场的第一模态的时间系数。从图中可以看出，西南地区夏季降水场和 100 hPa 高度场的变化趋势大致一致，相关系数为 0.42。定义 100 hPa 高度场的时间系数 ≥ 1 时为南亚高压偏弱年， ≤ -1 时为南亚高压偏强年，根据这个定义，从图 6(c)可以看出，南亚高压偏弱年有：1962、1964、1968、1971、1974、1975、1976、2000 年；南亚高压偏强年有：1980、1982、1988、1991、1998、2010、2015、2016、2018、2019、2020、2021 年。定义西南大部分地区降水场时间系数 ≥ 1 时为西南大部分地区偏旱年， ≤ -1 时为西南大部分地区偏涝年，根据这个定义，从图 6(c)中可以看出，西南地区偏旱年有：1972、2006、2011、2022 年；西南地区偏涝年有：1983、1998、2018、2019、2020 年。对比发现，南亚高压偏弱(强)

年与西南地区偏旱(涝)年对应关系一般。图 6(d)为夏季 100 hPa 高度场与同期西南地区降水 SVD 分析的第二模态空间分布型,反映了南亚高压位置南北变化及西南地区降水场变化的主要信息。可以看出,100 hPa 高度场正相关中心在 40°N 左右 40°E~160°E 之间,反映当时间系数为正时,南亚高压脊线为偏北年;时间系数为负时,南亚高压脊线为偏南年。与此对应的西南地区降水场,除了四川东北部地区、四川中部和南部地区、云南大部分地区为正相关外,反映当时间系数为正时,降水为偏涝年;时间系数为负时,降水为偏旱年,西南其余地区为负相关;最大的负中心位于德格-甘孜一带。图 6(f)为经过标准化处理的西南地区夏季降水场和同期 100 hPa 高度场的第二模态的时间系数。从图中可以看出,西南地区夏季降水场和 100 hPa 高度场的变化趋势大致一致,相关系数为 0.53。定义 100 hPa 高度场时间系数 ≥ 1 时为南亚高压脊线偏北年, ≤ -1 时为南亚高压偏南年,根据这个定义,从图 6(f)可以看出,南亚高压脊线偏北年有:1961、1984、1998、2010、2013、2018、2021、2022 年;南亚高压脊线偏南年有:1974、1976、1983、1992、1993、1995 年。定义四川东北部地区、四川中部和南部地区、云南大部分地区时间系数 ≥ 1 时为涝年, ≤ -1 时为旱年,根据这个定义,从图 6(f)中可以看出,四川东北部地区、四川中部和南部地区、云南大部分地区的涝年有:1961、1966、1971、1973、1984、2013、2018;四川东北部地区、四川中部和南部地区、云南大部分地区的旱年有:1965、1982、1987、1993、1998、2003、2004、2014、2015。对比发现,南亚高压脊线偏北(南)年基本对应四川东北部地区、四川中部和南部地区、云南大部分地区偏涝(旱)年。

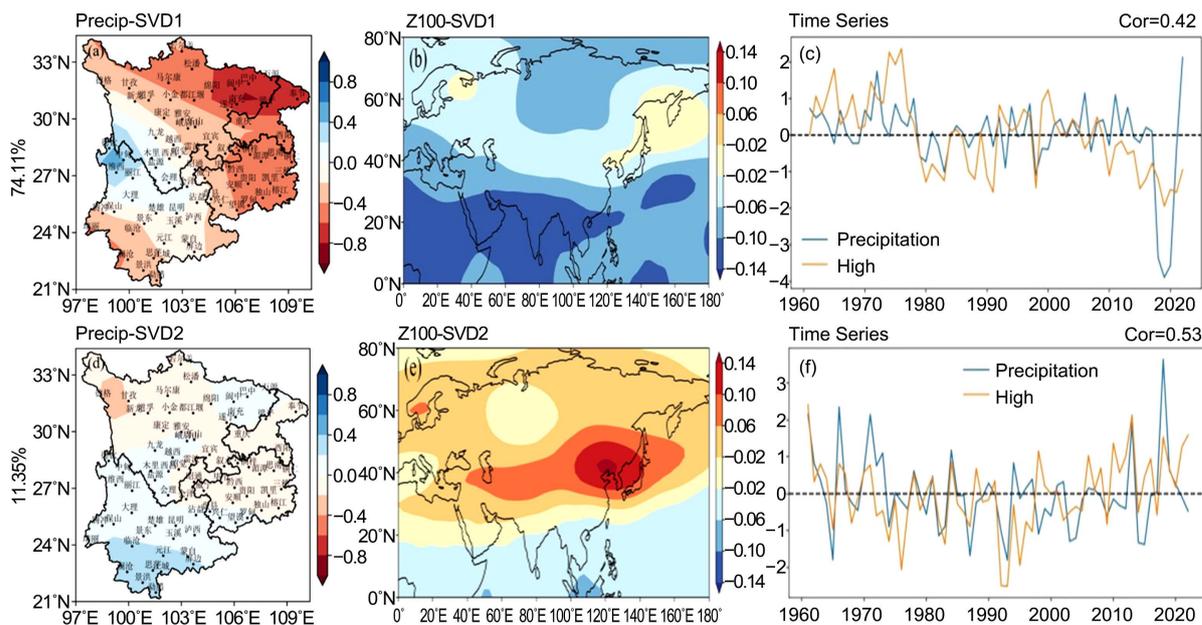


Figure 6. SVD decomposition of summer precipitation and 100hPa height field in the Southwest. (a) The first mode of summer precipitation field in the southwest region; (b) The 100hPa height field of the first mode; (c) Time series diagram of the first mode; (d) The summer precipitation field in the southwest region of the second mode; (e) 100 hPa height field of the second mode; (f) Time series diagram of the second mode

图 6. 西南地区夏季降水量和 100 hPa 高度场的 SVD 分解。(a) 第 1 模态的西南地区夏季降水场; (b) 第 1 模态的 100 hPa 高度场; (c) 第 1 模态的时间序列图; (d) 第 2 模态的西南地区夏季降水场; (e) 第 2 模态的 100 hPa 高度场; (f) 第 2 模态的时间序列图

4. 结论

(1) 西南地区 1961~2022 年夏季降水呈负趋势,每 10 年平均降水量减少 4.377 mm,由于西南地区独

特的地形和山脉影响,造成多雨区域及少雨区域交替分布,大致为自东南向西北呈减少趋势。西南地区夏季降水高值区有:四川的中部地区、云南的南部地区、贵州的东南部地区。

(2) 根据 EOF 分析,前三个模态累计方差贡献率达到了 51.6%,能够较好地反映出夏季降水的空间分布类型。第一模态表明西南地区整个地区全年都呈现出多雨(少雨)的趋势。第二模态呈现出正距平区和负距平区交错分布的情况。第三模态呈现出夏季降水从北向南呈“正-负-正”分布类型的情况。

(3) 1961~2022 年南亚高压特征量不仅存在明显的年际变化,而且也存在明显的年代际变化,除脊线位置外。从 1961~2022 年,南亚高压的强度在逐渐增强,面积在逐渐增大,东脊点位置逐渐偏西,西脊点位置逐渐偏东,脊线位置逐渐偏南。

(4) 从 1961~2022 年夏季南亚高压各特征参数与西南地区同期降水的点相关分布中可以看出,南亚高压脊线位置、面积指数、强度指数与西南地区同期降水关系最密切。从西南地区夏季降水与同期南亚高压的 SVD 分解表明:第一模态空间分布型反映南亚高压强弱变化及西南地区降水场变化的主要信息,协方差贡献为 74.11%,左右场时间系数的相关系数为 0.42。对比南亚高压强弱年和西南地区夏季降水旱涝年发现,南亚高压偏弱(强)年与西南地区偏旱(涝)年对应关系一般。第二模态空间分布型反映了南亚高压位置南北变化及西南地区降水场变化的主要信息,协方差贡献为 11.35%,左右场时间系数的相关系数为 0.53。对比南亚高压位置南北变化年和西南地区夏季降水旱涝年发现,南亚高压偏弱(强)年与西南地区偏旱(涝)年对应关系较好。

参考文献

- [1] 蒙映菲,毛文书,邓涛,等.西南地区夏季降水量的多尺度变化特征[J].自然科学,2022,10(4):554-568.
<https://doi.org/10.12677/OJNS.2022.104068>
- [2] 杜银,谢志清.中国西南地区夏季降水的年际变化及与南亚高压的关系[J].高原山地气象研究,2002,22(4):8-13.
- [3] 陈永仁,李跃清,王春国,等.夏季南亚高压与川渝地区降水的关系研究[J].高原气象,2009,28(3):539-548.
- [4] 朱玲,左洪超,李强,等.夏季南亚高压的气候变化特征及其对中国东部降水的影响[J].高原气象,2010,29(3):671-679.
- [5] 张宇,李耀辉,魏林波,等.南亚高压与西太平洋副热带高压对我国西南地区夏季降水异常的影响[J].干旱气象,2013,31(3):464-470.
- [6] 郭志荣,江燕如,彭丽霞,等.5月南亚高压与云南地区夏季降水的关系[J].气象科学,2014,34(4):397-403.
- [7] 王斌.高原地区 NASA 与 NCEP 再分析资料在南亚高压活动及其旱涝影响分析中的应用[J].高原气象,2015,34(2):327-336.
- [8] 陈丹,周长艳,邓梦雨.西南地区夏季大气水汽含量及其与南亚高压关系[J].应用气象学报,2016,27(4):473-479.
- [9] 王宁.多时间尺度南亚高压与西太平洋副热带高压对西南地区夏季降水的特征及其与东亚夏季风的关系[J].高原气象,2018,37(2):327-336.
- [10] 罗米娜.南亚高压的时空演变特征及其对西南地区降水的影响[J].气候变化研究快报,2019,8(3):255-268.
- [11] 靖娟利,和彩霞,王永锋,等.西南地区 1902-2018 年干旱时空演变特征分析[J].水土保持研究,2022,29(3):220-227.
- [12] 胡景高,周兵,陶丽.南亚高压特征参数与我国夏季降水的关系分析[J].气象,2010,36(4):51-56.
- [13] 雷显辉,宋敏红,张少波.夏季南亚高压和西太副高活动特征指数与中国东部降水分布的联系[J].高原气象,2022,41(2):489-501.
- [14] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].第二版.北京:气象出版社,1999.
- [15] 韩晟,韩坚舟,赵璇,等.距离权重改进的 Pearson 相关系数及应用[J].石油地球物理勘探,2019,54(6):1363-1370.
- [16] 丁裕国,江志红.SVD 方法在气象场诊断分析中的普适性[J].气象学报,1996,54(3):365-371.

-
- [17] 江志红, 丁裕国. 我国夏半年降水距平与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): 133-141.
- [18] 魏慧娟, 熊伟. SVD 方法在夏季降水预测中的应用[J]. 河南气象, 2002(2): 3-5.
- [19] 张琼, 钱永甫, 张学洪. 南亚高压的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 2000, 24(1): 67-78.
- [20] 谢炯光, 秦冰冰, 王静渊. 奇异值分解方法在季降水预测中的应用[J]. 气象学报, 1997, 55(1): 334-339.
- [21] 王芝兰, 李耀辉, 王劲松, 等. SVD 分析青藏高原冬春积雪异常与西北地区春、夏季降水的相关关系[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 363-370.