

西南夏季降水的时空分布及其影响环流

宋丹阳, 孟丽霞*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月9日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

为进一步研究西南地区夏季降水的特征及影响环流, 该研究基于1961~2022年的中国逐日降水格点数据和ERA5再分析资料, 采用线性回归和相关分析等方法, 探讨了中国西南地区夏季降水的时空分布特征及其相关的环流系统。研究将西南地区划分为西北部、东部和西南部三个子区域。结果显示: 1) 夏季降水量呈现自西北向东南“增-减-增”的格局, 降水日数自东北向西南增加, 降水强度高值区集中在东部和南部。2) 长期来看, 西南地区的降水特征(降水量、日数、强度)线性趋势不显著。3) 高空急流、气旋性环流和垂直上升运动为降水提供了动力条件, 而太平洋和印度洋的水汽输送是主要的水汽来源。不同子区域的环流和水汽来源存在差异。4) 斯堪的纳维亚遥相关指数与西北部降水呈显著负相关; 东亚-太平洋遥相关指数与东部降水呈显著负相关; 南亚季风指数与西南部降水呈显著正相关。

关键词

西南地区, 夏季降水, 时空变化, 影响环流, 影响因子

The Spatiotemporal Distribution of Summer Precipitation in Southwest China and Its Influencing Circulation Systems

Danyang Song, Lixia Meng*

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

Received: Aug. 15th, 2025; accepted: Sep. 9th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

Abstract

To further investigate the characteristics of summer precipitation and its associated atmospheric circulation in Southwest China, this study analyzes daily gridded precipitation data from China and

*通讯作者。

ERA5 reanalysis data from 1961 to 2022, employing methods such as linear regression and correlation analysis to examine the spatiotemporal variations of summer precipitation and its influencing circulation patterns. The study divides the southwestern region into three sub-regions: northwestern, eastern, and southwestern parts. The results show that: 1) Summer precipitation exhibits a spatial pattern of “increase–decrease–increase” from northwest to southeast, while the number of precipitation days increases from northeast to southwest. High precipitation intensity is concentrated in the eastern and southern parts. 2) In the long term, the linear trends of precipitation characteristics (amount, days, and intensity) across southwest China are not significant. 3) The upper-level jet stream, cyclonic circulation, and vertical upward motion provide dynamic conditions for precipitation, while moisture transport from the Pacific and Indian Oceans serves as the main moisture source. There are differences in circulation patterns and moisture sources among the sub-regions. 4) The Scandinavian Pattern Index shows a significant negative correlation with precipitation in the northwestern sub-region; the East Asia-Pacific Pattern Index is significantly negatively correlated with precipitation in the eastern sub-region; and the Monsoon Hadley Circulation Index is positively correlated with precipitation in southwestern sub-region.

Keywords

Southwest China, Summer Precipitation, Spatiotemporal Variation, Associated Atmospheric Circulation, Influencing Factor

Copyright © 2025 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

降水作为水循环的组成部分, 对大气环流、水资源管理、农业生产等有重要作用。西南地区地处东亚季风与南亚季风过渡带[1], 降水存在季节性和区域性差异。整体来看, 其年降水日数呈减少趋势, 但极端事件占比提高, 降水格局整体趋于少雨但更极端, 且极端降水事件的空间变异性增强[2]。区域来看, 四川中部存在多雨中心, 云南东部以及川西高原由于地形影响为少雨区[3]。季节上, 西南地区夏季降水量总和占全年总降水量的 75%以上, 且夏季降水量具有明显的年代际特征[4]。

近年来, 学者们从不同角度探讨了西南降水的影响因子。环流方面, 副高偏西偏南时, 西南地区东部受下沉气流控制, 降水偏少; 偏东偏北时, 东部水汽输送增强[5]。四川盆地夏季降水由东亚夏季风与高原夏季风共同作用, 以 105°E 为界, 西部受高原夏季风影响, 东部受东亚夏季风影响[6]。南亚夏季风水汽输送是云南夏季降水的主要水汽通道, 夏季异常旱涝年与来自孟加拉湾和南海地区的西南水汽输送有关[7]。此外, 贝加尔湖高压脊或鄂霍次克海阻塞高压的异常可引导冷空气路径变化, 影响降水分布[8]。高原冬季热源偏弱可能抑制后期春季降水, 导致西南西部干旱[9]。海温强迫方面, 太平洋海温对西南地区降水的影响从年代际尺度上来看, 太平洋年代际震荡(PDO)在近十几年表现为显著的冷相位状态特征, PDO 表现为冷相位时, 副高位置明显偏东, 西南地区北部夏季降水在近十几年显著减少[10]; 年际尺度上来看, 厄尔尼诺年云南冬季降水以偏多为主, 而拉尼娜年则相反[11]。印度洋海温影响方面, 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, 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[12]。遥相关型方面, 东亚-太平洋遥相关型和斯堪的纳维亚遥相关型与同期中国西南地区夏季降水呈显著负相关, 其可通过影响中高纬度大气环流形势、西南地区的水汽输送等来影响西南地区夏季降水[13]。

2. 资料和方法

2.1. 研究区域概况

选取人口相对密集的四川、重庆、贵州、云南四省(市)作为研究区域, 不含西藏。如图 1 所示, 以 28°N 和 105°E 为界[9], 将西南地区划分为三个区域, 西南地区西北部、东部及西南部分别记为 I 区、II 区及 III 区。

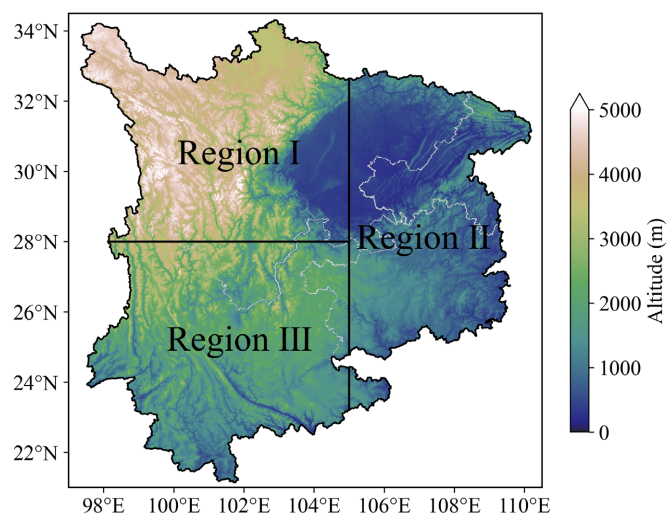


Figure 1. Topography and regional division of Southwest China

图 1. 西南地区地形及分区

2.2. 资料概况

资料主要包括国家青藏高原科学数据中心提供的中国逐日降水数据集, 空间分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; 欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 逐月再分析资料, 水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 美国国家海洋和大气管理局提供的逐月斯堪的纳维亚遥相关(Scandinavian, SCA)指数数据。以上资料的时间范围均为 1961~2022 年。

2.3. 研究方法

2.3.1. 回归分析

分析西南地区夏季降水的时空分布及环流成因时, 采用一元线性回归方法, 计算公式如下:

$$x_i = a + bt_i \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$, x_i 为某要素, t_i 为年份, n 为样本量, a 为回归常数, b 为回归系数。

2.3.2. 整层水汽通量计算

对地面(1000 hPa)至 300 hPa 水汽通量进行积分, 公式如下:

$$\int dQ = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_1} qVdp \quad (3)$$

式中, Q 为单层水汽通量, q 为比湿, V 为水平风矢量, g 为重力加速度。

2.3.3. 指数计算

东亚-太平洋(East Asia-Pacific, EAP)遥相关指数参考 Huang [14]利用 500 hPa 位势高度来计算:

$$I_{\text{EAP}} = -0.25Z'_s(60^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E}) + 0.50Z'_s(40^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E}) - 0.25Z'_s(20^\circ\text{N}, 125^\circ\text{E}) \quad (5)$$

其中, $Z'_s = Z' \cdot \sin 45^\circ / \sin \varphi$ 是纬度 φ 网格点的标准化季节性平均 500 hPa 高度距平, $Z' = Z - \bar{Z}$ 是网格点的夏季季节性平均 500 hPa 高度距平。

南亚季风指数选取 Goswami 等[15]提出的 MHI 指数, 定义为(10°N~30°N, 40°E~110°E)区域 850 hPa 及 200 hPa 平均经向风切变, 公式如下:

$$\text{MHI} = V_{850}(10^\circ \sim 30^\circ\text{N}, 70^\circ \sim 110^\circ\text{E}) - V_{200}(10^\circ \sim 30^\circ\text{N}, 70^\circ \sim 110^\circ\text{E}) \quad (6)$$

3. 西南地区夏季降水的时空分布

3.1. 西南地区夏季降水的空间分布特征

西南地区夏季降水量(图 2(a))呈现从西北向东南“增-减-增”的变化趋势。高值区主要集中在四川南部、云南西南部和贵州南部, 超过 600 mm; 川西高原降水量较低, 在 500 mm 以下。降水日数(图 2(b))呈自东北向西南增加, 降水强度(图 2(c))高值区集中分布, 主要位于西南地区东部及云南南部。

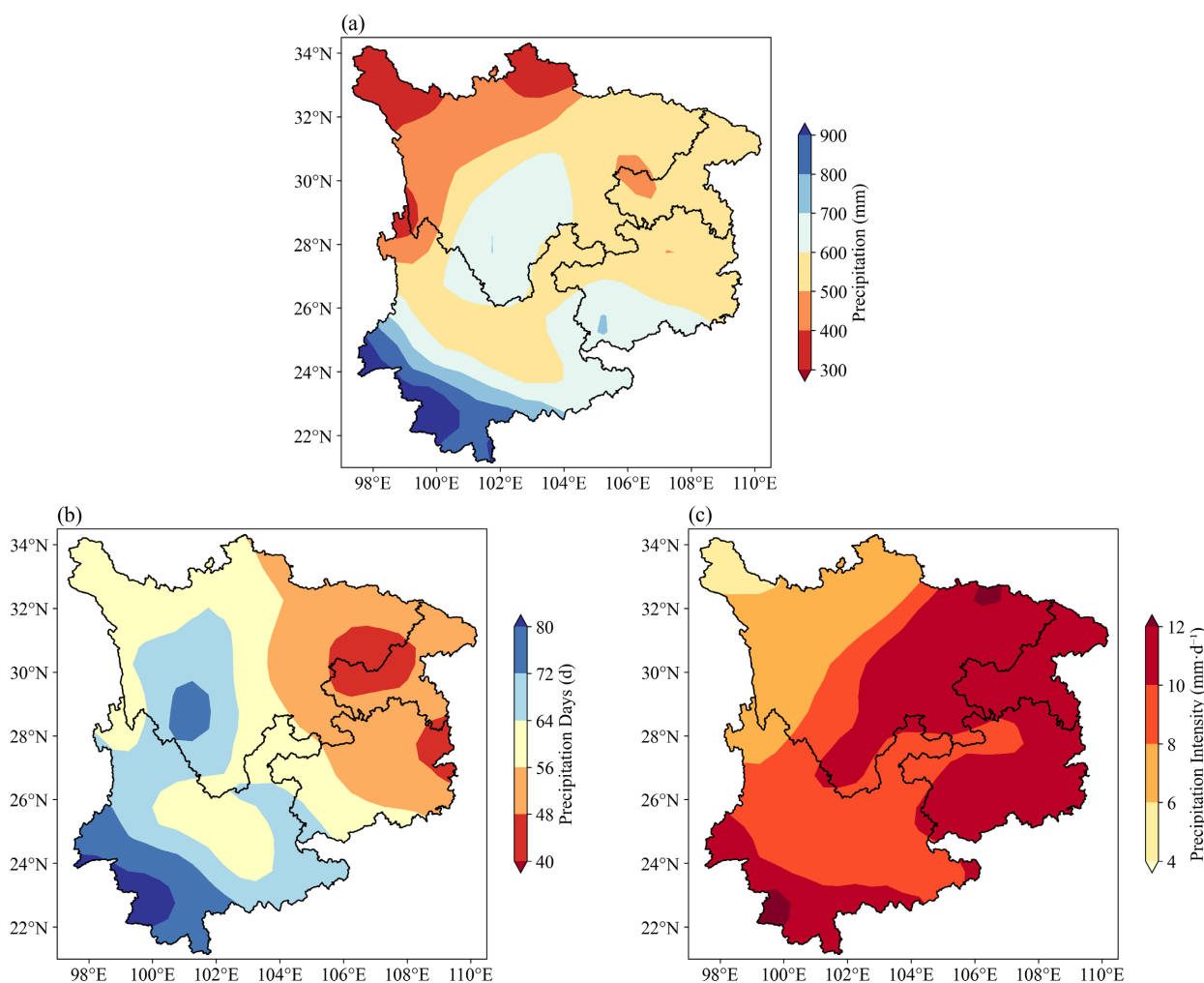


Figure 2. Spatial distribution of summer precipitation in Southwest China. (a) Precipitation; (b) Precipitation days; (c) Precipitation intensity

图 2. 西南地区夏季降水空间分布。(a) 降水量; (b) 降水日数; (c) 降水强度

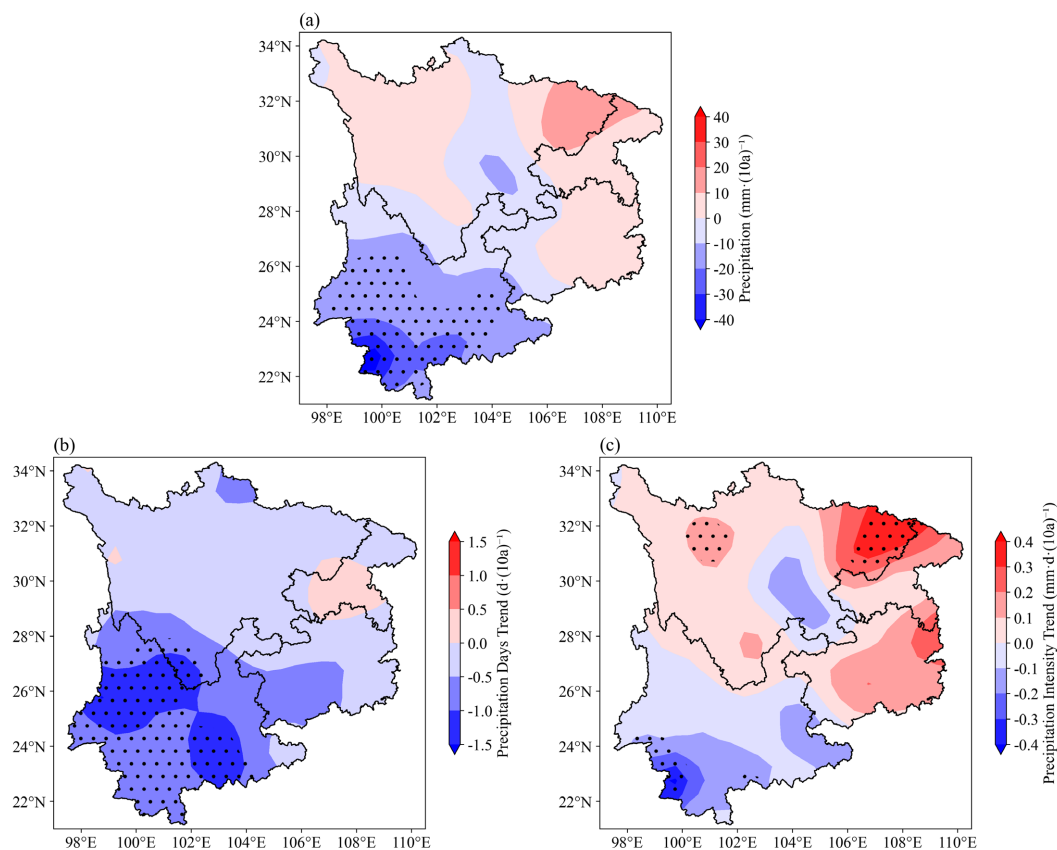


Figure 3. Spatial distribution of summer precipitation change trends in Southwest China. (a) Precipitation; (b) Precipitation days; (c) Precipitation intensity; Stippled areas indicate passing the 95% confidence level test

图 3. 西南地区夏季降水变化趋势空间分布。(a) 降水量; (b) 降水日数; (c) 降水强度; 打点区域代表通过 95% 信度检验

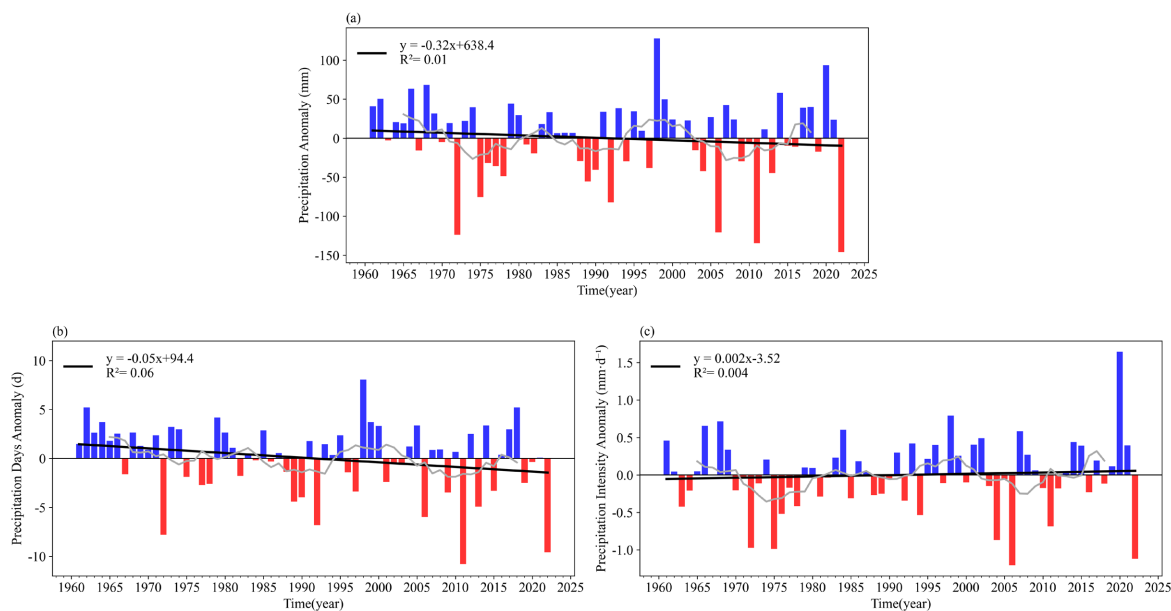


Figure 4. Spatial distribution of interannual variations in summer precipitation anomalies in Southwest China. (a) Precipitation; (b) Precipitation days; (c) Precipitation intensity; The gray line represents the 9-year moving average

图 4. 西南地区夏季降水距平值年际变化。(a) 降水量; (b) 降水日数; (c) 降水强度; 灰色线为 9 年滑动平均

3.2. 西南地区夏季降水的时间演变特征

西南地区西南部夏季降水量(图 3(a))呈减少趋势, 云南南部降幅超过 $20 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 东部及川西高原呈增加趋势, 增幅在 $0 \sim 20 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。降水日数变化(图 3(b))呈普遍减少态势, 除重庆中部略有增加, 其他区域降幅在 $0 \sim 1.5 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。降水强度(图 3(c))变化趋势较为复杂: I 区大部分区域增幅在 $0 \sim 0.1 \text{ mm} \cdot \text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$; II 区整体呈增加趋势, 北部增幅显著, 超过 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$; III 区呈减弱趋势, 云南南部降幅超过 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。图 4(a)~(c)可见西南地区夏季降水特征(降水量、日数、强度)长期线性趋势不显著。降水量和降水日数在进入 21 世纪后波动性增强, 正负距平交替频繁。降水强度变化波动相对较小, 但在个别年份出现极端值, 如 2020 年降水强度距平达到 62 年来最大值, 但该年份降水量并非最高, 暗示了全球变暖背景下应提高对极端降水事件的关注和重视。

4. 西南地区夏季降水的环流成因

4.1. 500 hPa 环流特征分析

对 500 hPa 风、位势高度和降水间的回归关系进行分析, 图 5(a)显示, I 区高空为西南风, 同时 500 hPa 位势高度与 I 区部分区域降水呈现微弱的负相关, 气流上升为降水提供了良好的动力条件。图 5(b)中, II 区上空偏西风显著增强, 同时西太平洋、南海海面体现出明显的反气旋性环流特征, 且呈正位势高度变化, 说明西太平洋副热带高压的位置和强度是影响西南地区东部夏季降水的重要因素之一。图 5(c)中, III 区上空风表现为气旋性环流特征, 且位势高度与该区降水呈负相关, 利于该区降水的形成。

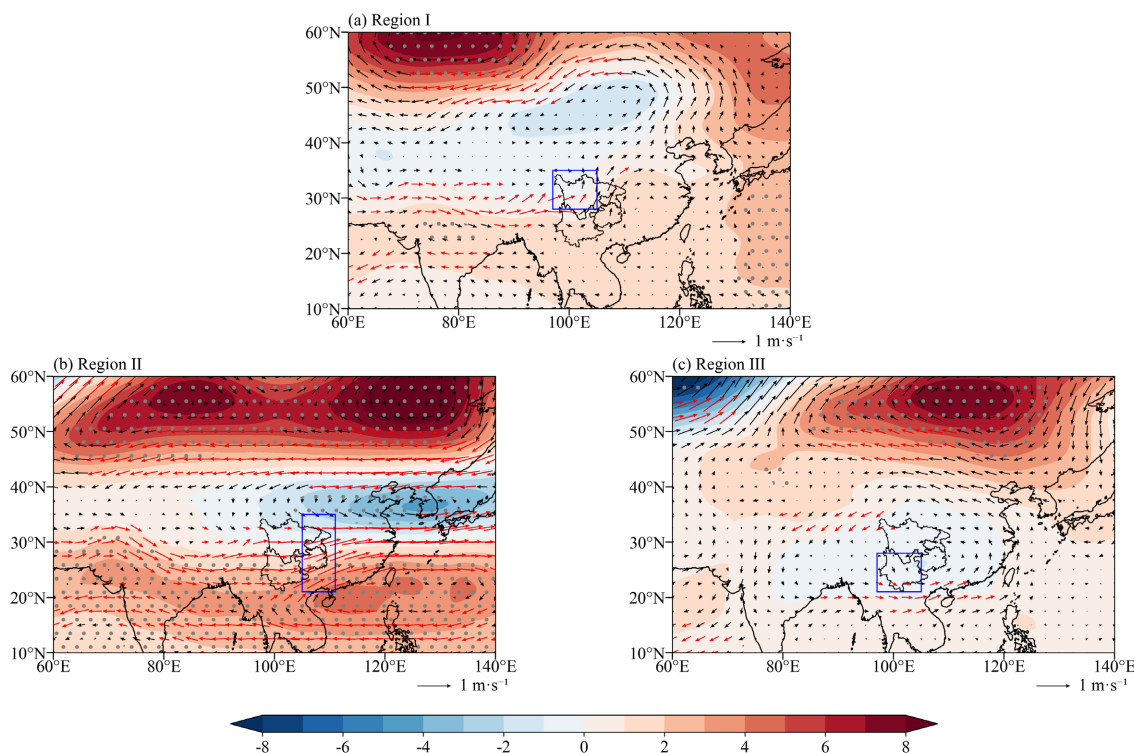


Figure 5. Regression distribution of standardized summer mean precipitation with 500 hPa wind and geopotential height in each region. (a) Region I; (b) Region II; (c) Region III; Red vectors and stippled areas indicate passing the 95% confidence level test

图 5. 各区域夏季平均降水量标准化值与 500 hPa 风及位势高度的回归分布。(a) I 区; (b) II 区; (c) III 区; 红色矢量和打点区域代表通过 95% 信度检验

4.2. 水汽输送特征分析

西南地区夏季降水的水汽来源多样。图 6 中, 红色矢量和打点区域代表通过 95%信度检验。I 区(图 6(a))水汽主要来源于印度洋 - 阿拉伯海; II 区(图 6(b))夏季降水存在两个水汽通道, 主要是西太平洋携南海的湿润气流向东北方向传输至西南地区东部, 其次是来自印度洋的水汽对东部夏季降水有一定贡献; III 区(图 6(c))水汽主要来自印度洋 - 孟加拉湾。三个子区均显示良好的水汽辐合。

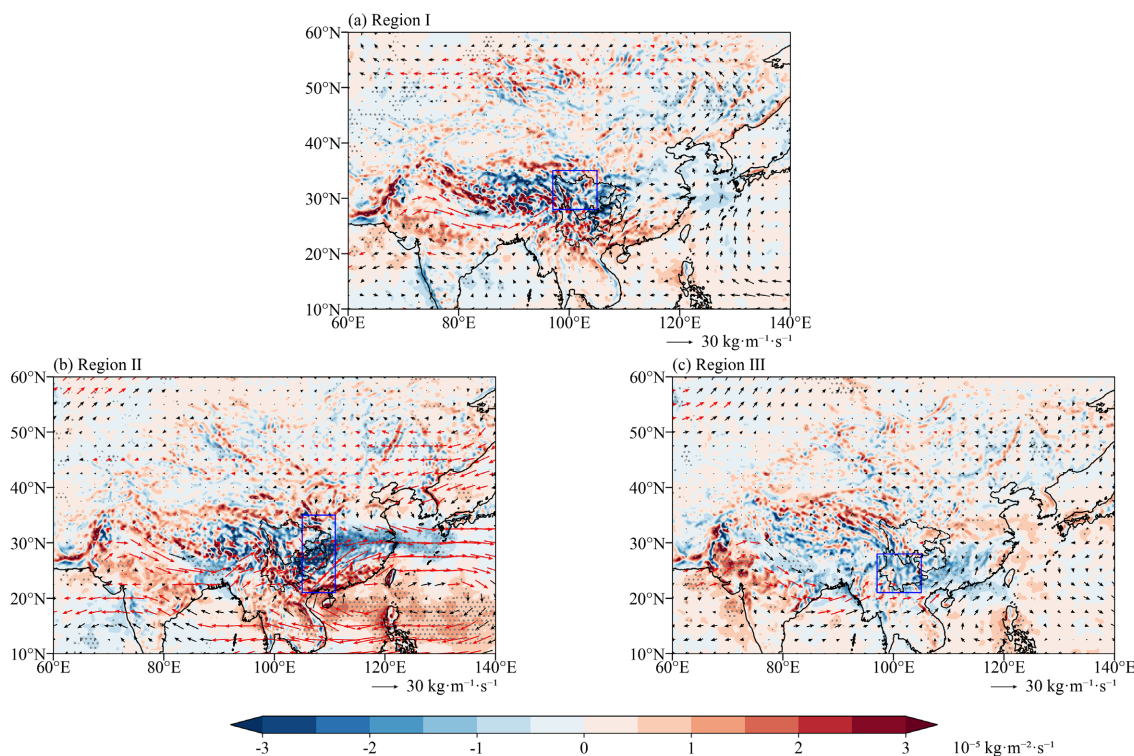


Figure 6. Regression distribution of standardized summer mean precipitation with integrated water vapor flux and water vapor flux divergence in each region. (a) Region I; (b) Region II; (c) Region III

图 6. 各区域夏季平均降水量标准化值与整层水汽通量及水汽通量散度的回归分布。(a) I 区; (b) II 区; (c) III 区

4.3. 垂直速度特征分析

图 7 中阴影为地形, 红色矢量和打点区域代表通过 95%信度检验, 可见各子区垂直风速回归系数均表现出强烈的负相关性。I 区整体海拔较高, 在距离地面较高的高度层中, 水平风相对较显著, 而高空水平风对降水的贡献不显著。III 区水平风影响亦不显著, 而高空急流与上升运动对 II 区降水影响均显著。

5. 西南地区夏季降水的影响因子

西南地区不同区域的变化特征及影响因素具有差异性, 那么什么因子能够影响各子区夏季降水?

图 8 可见, 斯堪的纳维亚遥相关(SCA)指数和 I 区夏季降水量相关系数为-0.42, 呈显著负相关, 去趋势后的相关系数为-0.45。结合图 9(a), SCA 指数的正位相与 500 hPa 西风急流的减弱密切相关。东亚 - 太平洋遥相关(EAP)指数与 II 区夏季降水的相关系数为-0.43, 呈显著负相关, 去趋势后相关系数为-0.42。综合图 5(b)和图 9(b), 发现 EAP 指数增加时 II 区周围 500 hPa 环流场与其降水降低时的基本一致。南亚季风指数(MHI)与 III 区夏季降水的相关系数为 0.37, 呈显著正相关, 去趋势后的相关系数为 0.30。图 9(c)可见, MHI 正位相时, III 区 500 hPa 高空有气旋性环流, 且位势高度呈负异常, 利于降水发生。

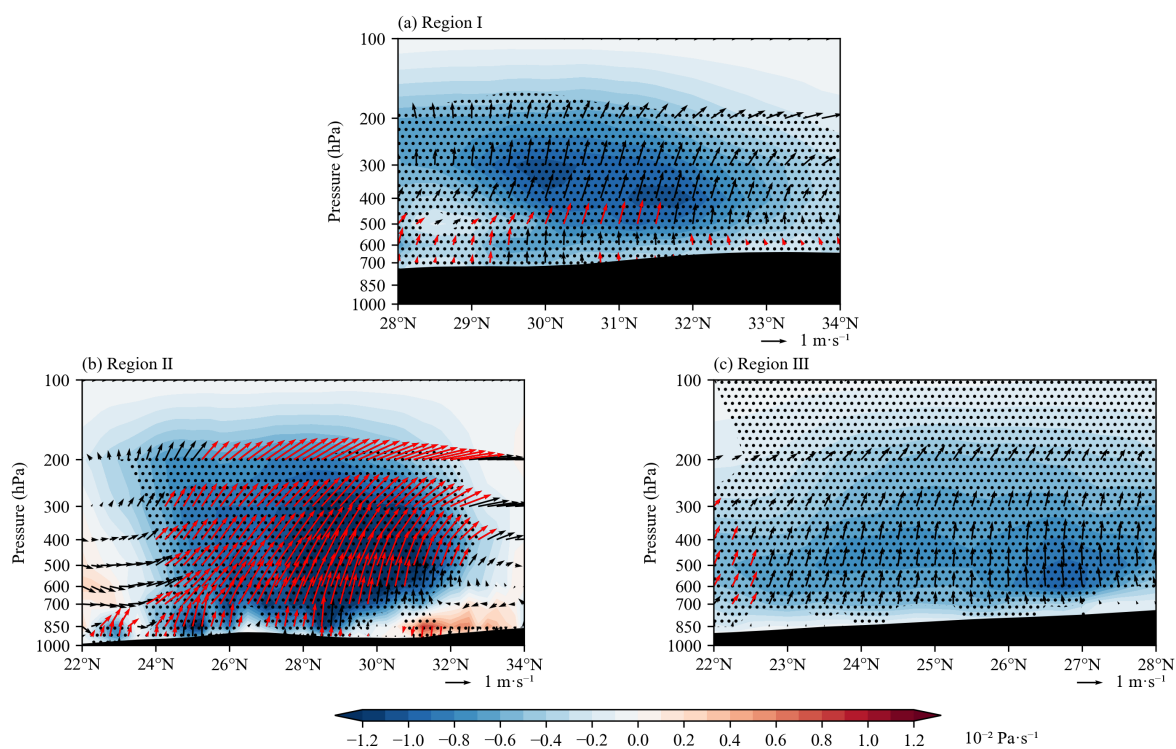


Figure 7. Zonal cross-section of regression distribution between standardized summer mean precipitation and meridional mean wind as well as vertical velocity in each region. (a) Region I; (b) Region II; (c) Region III

图 7. 各区域夏季平均降水量标准化值与经向平均风及垂直速度的回归分布的纬向剖面。(a) I 区; (b) II 区; (c) III 区

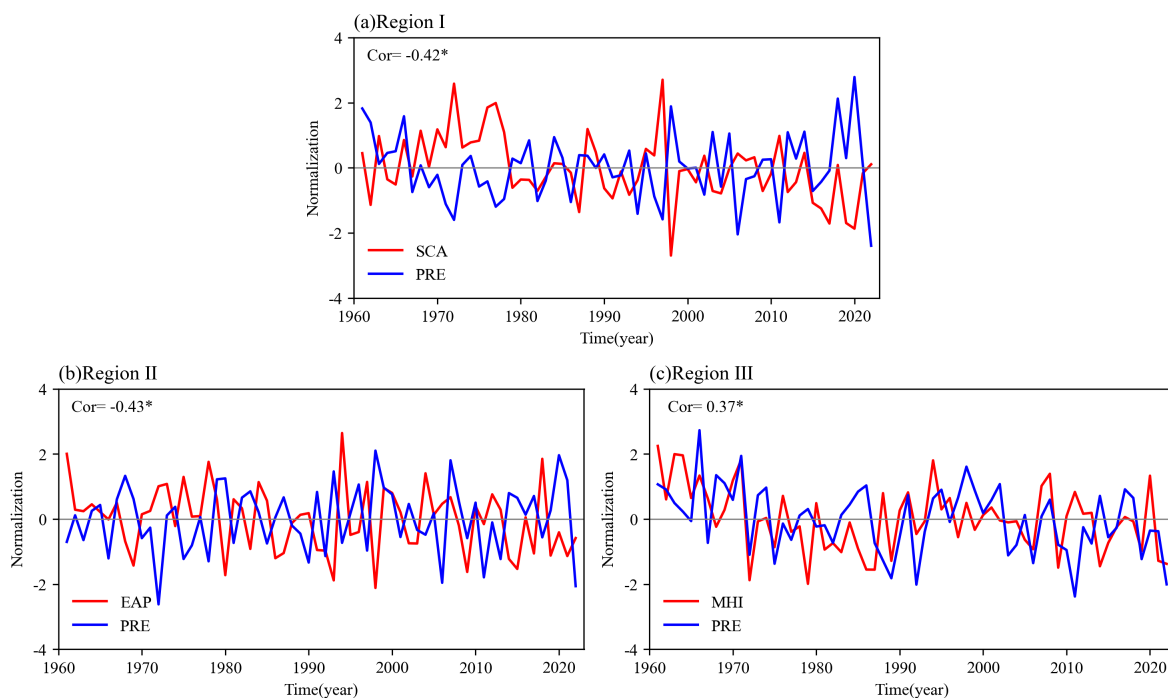


Figure 8. Interannual variations in summer mean precipitation and teleconnection indices in each region. (a) Region I and SCA index; (b) Region II and EAP index; (c) Region III and MHI

图 8. 各区域夏季平均降水量和遥相关指数的年际变化。(a) I 区和 SCA 指数; (b) II 区和 EAP 指数; (c) III 区和 MHI

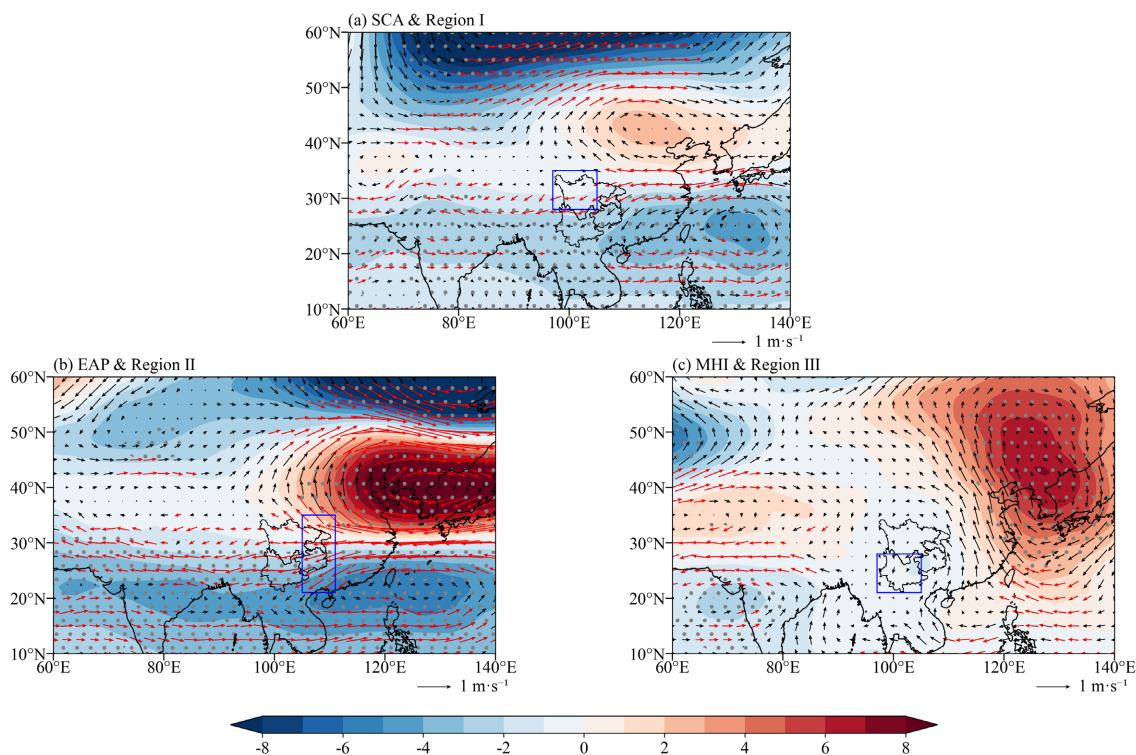


Figure 9. Regression distribution of teleconnection indices with 500 hPa wind and geopotential height. (a) SCA index; (b) EAP index; (c) MHI; Red wind fields and stippled areas indicate passing the 95% confidence level test

图 9. 遥相关指数与 500 hPa 风及位势高度的回归分布。(a) SCA 指数; (b) EAP 指数; (c) MHI; 红色风场和打点区域代表通过 95% 信度检验

6. 结论

通过对西南地区 1961~2022 年夏季降水的时空变化及影响因素的分析, 得到以下主要结论。

(1) 西南地区夏季降水量整体呈从西北向东南“增-减-增”变化, 四川南部、云南西南部和贵州南部夏季降水量较高, 超过 600 mm; 川西高原降水量较低, 在 500 mm 以下。降水日数自东北向西南增加, 降水强度高值区集中分布, 主要位于西南地区东部及云南南部。

(2) 西南地区的夏季降水特征(降水量、日数、强度)长期线性变化趋势不显著。

(3) 西南地区西北部降水增加常伴随 500 hPa 西风增强及位势高度降低, 水汽主要来源于印度洋-阿拉伯海; 东部同样伴随高空急流增强, 500 hPa 高度在西太平洋及南海海面呈显著的反气旋环流特征及位势高度增加, 水汽主要来自西太平洋、南海; 西南部 500 hPa 表现为气旋性环流特征, 水汽主要来自印度洋-孟加拉湾。各区域均存在显著的上升运动及水汽辐合。

(4) 斯堪的纳维亚遥相关(SCA)指数与西南地区西北部夏季降水量呈显著负相关, 相关系数为-0.43; 东亚-太平洋遥相关(EAP)指数与东部的降水呈显著负相关, 相关系数为-0.42; 南亚季风指数(MHI)与西南部降水呈显著正相关, 相关系数为 0.37。

本研究对于西南地区夏季降水研究较为详细, 研究过程中综合了大气环流、海温等因素, 但分区简化未能充分考虑到不同区域的气候复杂性, 且复杂地形对降水的动力和热力影响机制有待进一步探究。

参考文献

- [1] Wang, B. and Lin, H. (2002) Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon. *Journal of Climate*, **15**, 386-398.

- [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0386:rsotap>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0386:rsotap>2.0.co;2)
- [2] Miao, C., Duan, Q., Sun, Q., Lei, X. and Li, H. (2019) Non-Uniform Changes in Different Categories of Precipitation Intensity across China and the Associated Large-Scale Circulations. *Environmental Research Letters*, **14**, Article ID: 025004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf306>
 - [3] 张凤太. 中国西南地区季节性降水时空特征及其与大尺度环流因子的关系研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.
 - [4] 周秀华, 肖子牛. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 653-666.
 - [5] 李永华, 向波, 卢楚翰, 等. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其机制[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 437-450.
 - [6] 白莹莹, 张焱, 李强, 等. 四川盆地夏季降水区域差异及其与季风的联系初探[J]. 气象, 2014, 40(4): 440-449.
 - [7] 张万诚, 汤阳, 郑建萌, 等. 夏季风水汽输送对云南夏季旱涝的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 293-301.
 - [8] 王映思, 肖天贵, 董雪峰. 1961-2019 年中国西南地区夏季长周期旱涝急转与大气环流特征[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 760-772.
 - [9] 夏阳, 万雪丽, 严小冬, 等. 中国西南地区春季降水的时空变化及其异常的环流特征[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 510-524.
 - [10] 吴秋洁. 近 55 年西南地区干旱气候特征及成因分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.
 - [11] 陶云, 黄玮, 郑建萌, 等. 云南冬季降水的演变特征及成因分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 130-139.
 - [12] 杨天娇, 毛文书, 王洁, 等. 西南地区夏季降水和印度洋海温的关系[J]. 自然科学, 2023, 11(6): 1045-1058.
 - [13] Yang, M.X., Xiao, T.G., Zhang, P., *et al.* (2022) Joint Effect of East Asia-Pacific and Scandinavian Teleconnections on Summer Precipitation in Southwest China. *Theoretical and Applied Climatology*, **150**, 1477-1493. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04227-w>
 - [14] Huang, G. (2004) An Index Measuring the Interannual Variation of the East Asian Summer Monsoon—The EAP Index. *Advances in Atmospheric Sciences*, **21**, 41-52. <https://doi.org/10.1007/bf02915679>
 - [15] Goswami, B.N., Krishnamurthy, V. and Annmalai, H. (1999) A Broad-Scale Circulation Index for the Interannual Variability of the Indian Summer Monsoon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **125**, 611-633. <https://doi.org/10.1002/qj.49712555412>