

四川省夏季昼雨时空变化特征

贡嘎旦桑¹, 毛文书¹, 彭育华²

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²简阳市云龙金马学校, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月17日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月10日

摘要

为了研究四川省昼雨夏季的区域分布特征, 利用四川省126个气象站1961~2021年共61年的逐日降水观测资料, 通过旋转经验正交函数分解(Rotated Empirical Orthogonal Function Decomposition, 以下简称REOF分解)和集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, 以下简称EEMD分解)等多种现代气候诊断统计分析方法, 较为详细地分析了四川省61年来夏季昼雨的时空分布特征。研究表明: (1) 四川省夏季昼雨空间分布不均匀, 昼雨空间分布均表现为东多西少、南多北少的型态, 其中大值中心位于东北部, 中心分别达到425 mm。昼雨日数最大值分别为在川西高原南部, 中心值达到60天。昼雨强度大值分布位于川东部, 大致中心达到0.5 mm/h。(2) 夏季昼雨的REOF分解结果表明: 分为川西南、川东北、川西北、盆地中部和川西高原5个区域。(3) 时间变化上, 昼雨趋势线在20世纪90年代从低于均值变成高于均值呈上升趋势, 表明昼雨线性增加; 昼雨日数趋势线在20世纪90年代从高于均值变成低于均值呈下降趋势, 表明降水日数线性减少; 昼雨强度趋势线在20世纪90年代从低于均值变成高于均值呈上升趋势, 表明降水强度线性增强。(4) EEMD分解表明夏季时: 川东北部有准7年、准18年、准35年; 川西北部有准5年周期变化; 川西南部有准5年、准15年、准30年周期变化; 川西高原有准5年、准8年周期变化; 盆地中部为准6年、准30年周期变化。

关键词

四川省, 夏季昼雨, REOF分解, EEMD分析

Spatial Variation Characteristics of Annual Daytime Rainfall in Sichuan Province

Gonggadansang¹, Wenshu Mao¹, Yuhua Peng²

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

²Jianyang Yunlong Jinma School, Chengdu Sichuan

Received: June 17, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 10, 2025

Abstract

In order to study the regional distribution characteristics of daytime rainfall in Sichuan Province during summer, data from 126 meteorological stations across Sichuan Province over a period of 61 years (1961~2021) were utilized. Using modern climate diagnostic statistical analysis methods, including rotated empirical orthogonal function decomposition (REOF decomposition) and ensemble empirical mode decomposition (EEMD decomposition), a detailed analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of summer daytime rainfall in Sichuan Province over 61 years was conducted. The research findings are as follows: (1) The spatial distribution of daytime rainfall in summer in Sichuan Province is uneven, with a pattern that shows more in the east and less in the west, and more in the south and less in the north. The maximum value centers are located in the northeast, reaching up to 425 mm. The maximum number of rainy days occurs in the southern part of the western Sichuan Plateau, with a central value of 60 days. The high intensity distribution of diurnal rainfall is found in the eastern part of Sichuan, with a roughly central value of 0.5 mm/h. (2) The REOF decomposition results of diurnal rainfall in summer indicate that it can be divided into five regions: southwestern Sichuan, northeastern Sichuan, northwestern Sichuan, central basin, and western Sichuan Plateau. (3) In terms of temporal changes, the trend line of diurnal rainfall has risen from below the mean to above the mean in the 1990s, indicating a linear increase in precipitation amount; the trend line of the number of rainy days has decreased from above the mean to below the mean in the 1990s, indicating a linear decrease in the number of rainy days; the trend line of diurnal rainfall intensity has risen from below the mean to above the mean in the 1990s, indicating a linear increase in precipitation intensity. (4) EEMD decomposition reveals that during the summer, the northeastern Sichuan region exhibits quasi-7-year, quasi-18-year, and quasi-35-year cycles; the northwestern Sichuan region shows a quasi-5-year cycle; the southwestern Sichuan region has quasi-5-year, quasi-15-year, and quasi-30-year cycles; the western Sichuan plateau features quasi-5-year and quasi-8-year cycles; and the central basin of the middle reaches has quasi-6-year and quasi-30-year cycles.

Keywords

Sichuan Province, Summer Daytime Rain, REOF Decomposition, EEMD Analyse

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. 绪论

伴随全球气温持续攀升，中国四川省的降水格局，尤其是昼雨分布特征，呈现出显著变化[1]。四川省地处中国西南腹地，北倚秦岭，南连云贵高原，西靠青藏高原与横断山脉，东接湘鄂西山地。过去几十年来，许多研究通过不同研究方法已经揭示了降水时空分布的复杂性和多样性。近年来，在该背景下，该地区的降水格局发生显著改变，这对区域经济社会的可持续发展提出了新的挑战。因此，系统研究四川地区降水的时空变化特征，对于深入理解区域气候系统响应机制和制定适应性策略具有重要的科学价值。系统研究四川地区雨季降水变化特征，不仅能为短期气候预测提供理论依据，更能对未来情景下的极端气候事件进行科学预估，这对提升区域防灾减灾能力具有重要的指导意义[2]。从现阶段不同研究方法研究发现：基于站点的数据，采用气候倾向率、Mann-Kendall 检验方法分析季节昼夜降水趋势，并将

昼夜降水分离, 进行对比分析, 四川省昼雨呈现出明显的空间分布区域差异。在夏季盆地和攀西地区比高原地区降水量大, 降水大值中心位于盆地西部, 次大值中心在攀西地区, 时间特征为: 突变点, 1987 年有突变点, 其左右由减少转为增加趋势, 2003 年后增速加快[3]。用 Morlet 小波分析和滑动 T 检验方法, 研究发现, 近 50 年四川年降水量减少, 1994 年为突变点, 盆地西部夏季昼雨与青藏高原热力强迫呈显著正相关[4]。采用线性回归、Mann-Kendall 检验分析降水量的长期变化趋势, 并且利用克里金插值(Kriging)绘制降水空间分布图, 结合 EOF 分解提取主要模态。研究发现, 近 40 年(1982~2020)四川地区夏季降水量总体变化特征呈减少趋势, 整体上呈从北向南逐渐递增。四川地区夏季降水在 1982 年左右发生突变。四川地区夏季降水存在 20 年左右尺度的长周期变化和 4~6 年 8~12 年两个尺度的短周期变化[5]。用水汽通量计算和显著性检验, 研究表明, 四川的降水量在白天与夜间一样东多西少、南多北少, 白天的降水量整体呈减少趋势, 但川西高原昼雨略有增加, 且趋势变化较弱。季节变化, 在夏季, 昼雨量达到峰值, 但仍低于夜雨[6]。

影响四川昼雨的因素在不同区域各有不同, 在四川西部川西高原西南涡也是导致川西高原强降水的重要天气系统[7][8]。当高原夏季风异常偏强时, 川西高原区易发生洪涝[9]。在四川中部西南涡活动越活跃, 则四川中部降水量越多, 反之越少[10]。大气环流的变化, 如位势高度场的分布、中低层急流的强弱等, 对四川盆地中部极端降水有重要影响; 热力条件也是影响四川盆地中部极端降水的重要因素[11]。四川南部主要受印度季风以及东亚季风的影响[12]。四川东北部受青藏高原东部地形等对川东北部降水有影响[13]。四川西南山地部与西太平洋副高的面积指数、强度指数与贵州夏季的大部分区域的降水强度呈正相关关系[14]。川西南西受太平洋副高的影响较显著[15]-[17]。当前四川降水研究对夜雨较多、对研究昼雨, 对昼雨空间分布规律与影响因素探讨不足, 难以全面掌握不同地形区降水特征, 研究春季昼雨时空变化十分必要。

2. 资料和方法

2.1. 资料概括

降水资料为 1961 年~2021 年四川省 126 个基本气象站共 61 年逐日降水量观测资料, 其中昼雨为北京时间 08:00~20:00 时段内的站点气象观测降水量, 北京时间 08:00~20:00 降水量大于等于 0.1 mm, 降水日数为昼雨日数, 同时段内昼雨与昼雨日数的比值为昼雨强度(6~8 月为夏季)。

2.2. 研究方法

REOF 分解[18]-[20]与 EEMD 分解[2]。

3. 夏季昼雨空间分布特征

3.1. 夏季昼雨特征量的空间分布

图 1(a)是反映了四川夏季昼雨空间分布, 可以看出以下结论, 四川省昼雨在空间分布是不均的, 昼雨在川东北部和川南部宁南气象站附近较大, 最大中心达到 425 mm。在阿坝南部和甘孜西部昼雨较少。总的来说, 四川昼雨变化整体东多西少、南多北少与张博等[6]与刘福平等[21]研究结论一致。除此之外, 曾波等[3]研究表明这种差异主要是地形、环流共同作用引起的。图 1(b)是四川省夏季昼雨日数空间分布, 得出以下结论。夏季的昼雨日数不相同且不均匀。昼雨日数整体川东部向西部增加, 昼雨日数高值中心位于稻城和九龙一带、川西北部, 最大中心值达到 60 天。总的来说, 川西高原北部昼雨日数分布较高; 川东北部和川西南山地部昼雨日数分布较小; 盆地中部平原昼雨分布较少。张博等[6]研究指出夏季西部昼雨日数大是由于夏季季风(西南、东南)影响, 水汽遇到地形的影响, 从而昼雨日数增加。雅安一带, 李

跃清等[22]研究指出昼雨日数四季都大是由于暖湿气流的向西推进遇到“喇叭口”地形后气流被迫抬升,加上高原涡、局地环流等影响。图 1(c)是夏季的昼雨强度的空间分布,得出以下结论。昼雨强度的空间分布不均匀。夏季的昼雨强度的高值在四川的东北部和西南山地部,大值中心为 0.5 mm/h。低值区分布在川西高原与董欣等[23]研究结论对西南地区不同海拔昼雨降水的空间分布特征,海拔高的地区昼雨强度低,海拔低的地区昼雨强度高的结论相符合。由图 1(d)可以看出,昼雨趋势系数的空间分布不均匀,川西南山地南和川南部为负增长趋势,其余地为正增长趋势。

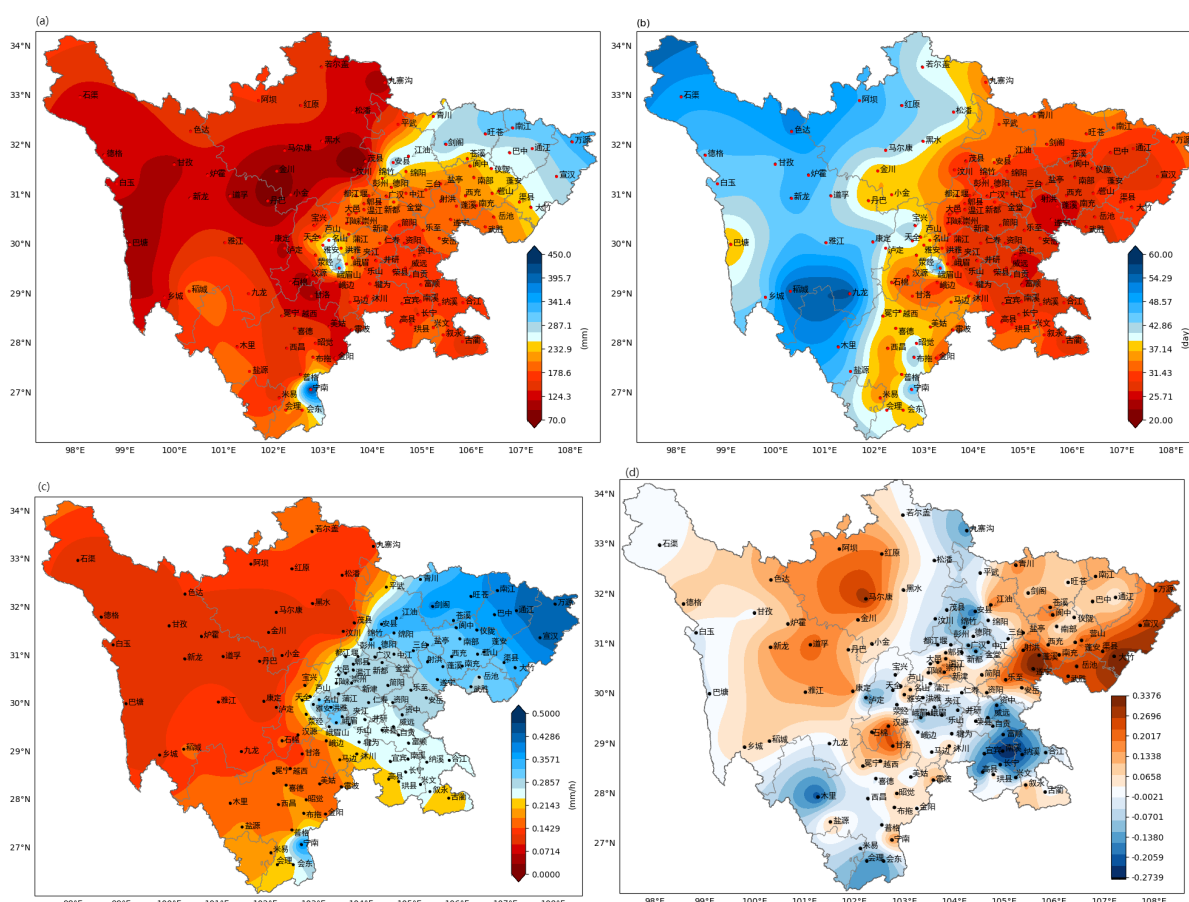


Figure 1. Spatial variation of summer daytime rainfall characteristics in Sichuan province (a) Daytime rainfall; (b) Number of daytime rainfall days; (c) Intensity of daytime rainfall; (d) Trend coefficient of daytime rainfall

图 1. 四川夏季昼雨特征量的空间变化图(a) 昼雨; (b) 昼雨日数; (c) 昼雨强度; (d) 昼雨趋势系数

3.2. 夏季昼雨 REOF 分解

在 REOF 分解为空间分布和时间系数。空间分布是在 EOF 分解的基础上对前 5 个特征向量进行旋转,使不重要区域的降水量变化信息减小,得到 5 个特征向量场。按照前五个模态的空间分布的高载荷区(特征向量绝对值 > 0.5),并结合海拔的因素,如图 2 所示将四川地区划分为 5 个区域。将 REOF 分解的空间分布进行分析分成五个区域再进行分析:1 分区对应第 3 个模态为川西南部,正最高值位于川西南山地及川南,负最大值位于川西高原及川西北,呈南北反向模态。2 分区对应第 1 个模态为川东北部,正最大值位于川东北部,负最大值位于盆地中部及北部。3 分区对应第 2 个模态为川西北部,正最大值位于盆地西北部,负最大值位于川西高原及川东部。4 分区对应第 4 个模态为川西高原,负最大值位于川西

高原西部,呈东西反向模态。5 分区对应第 5 个模态为盆地中部,正最大值位于盆地中部,负最大值位于川西南山地。对 REOF 分解的时间系数进行分析:由第 1 个数间系数可知,时间系数序列图为正的有 29a、为负有 31a。其中 1995 年、2021 年昼雨的正值比如较大,增值比较明显;2000 年昼雨的负值比较大,昼雨减少比较明显。由第 2 个数间系数可知,时间系数序列图为正的有 22a、为负有 40a。其中 1961 年、1974 年昼雨的正值比如较大,增值比较明显;1968 年、1977 年昼雨的负值比较大,昼雨减少。由第 3 个数间系数可知,时间系数序列图为正的有 30a、为负有 32a。其中 1978 年、2004 年昼雨的正值比较大,增值比较明显;2011 年昼雨的负值比较大,昼雨减少比较明显。由第 4 个数间系数可知,时间系数序列图为正的有 33a、为负有 26a。其中 1971 年、1983 年昼雨的正值比较大,增值比较明显;1998 年、2013 年昼雨的负值比较大,昼雨减少比较明显。由第 5 个数间系数可知,时间系数序列图为正的有 33a、为负有 28a。其中 1966 年、2010 年、2015 年昼雨的正值比如较大,增值比较明显;1995 年、1970 年、1997 年、2000 年昼雨的负值比较大,昼雨减少比较明显。

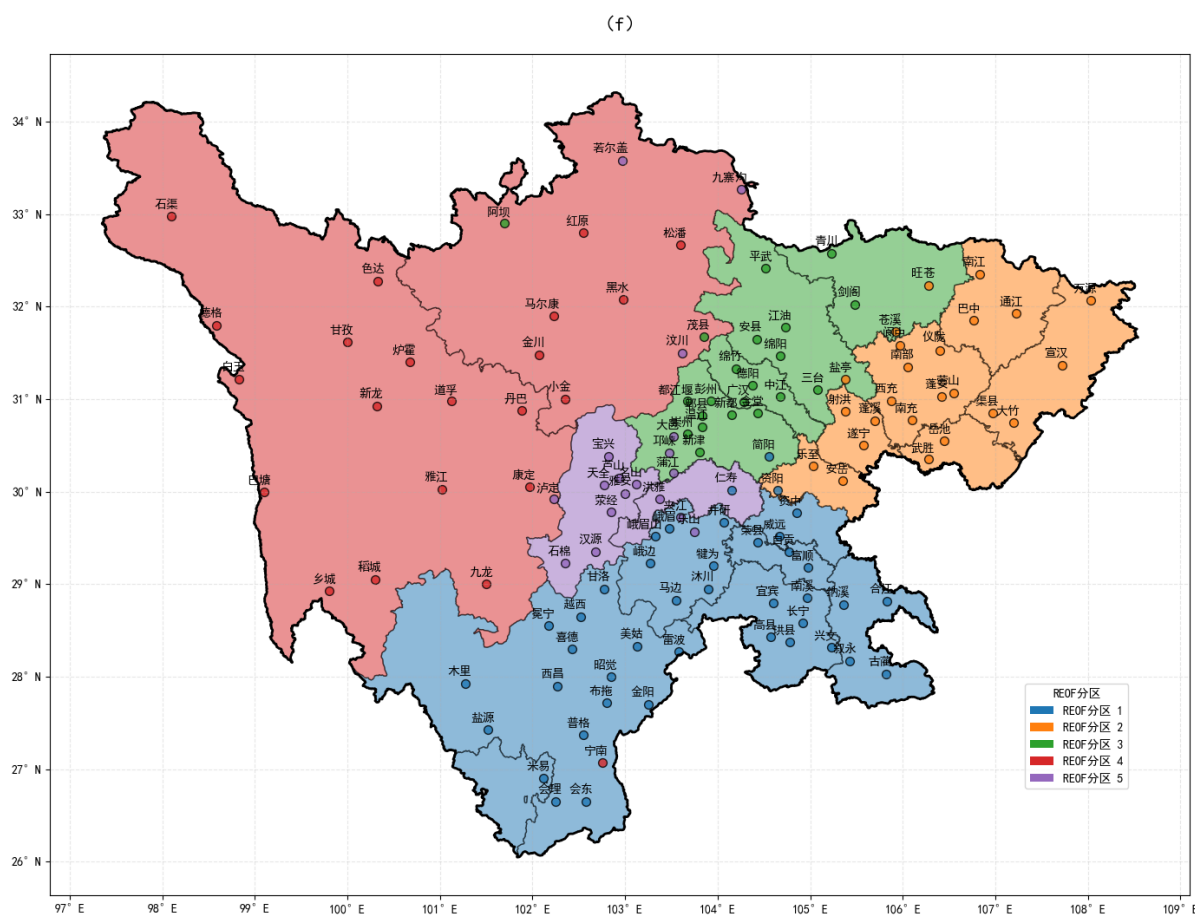


Figure 2. Zonal results of REOF decomposition in summer rain over Sichuan

图 2. 四川夏季昼雨 REOF 分解的分区结果

4. 夏季昼雨时间演变特征

4.1. 夏季昼雨时间变化

图 3(a)是从 1961~2022 年的四川省的夏季昼雨的时间变化,分析可得。昼雨趋势线在 20 世纪 90 年

代从低于均值变成高于均值呈上升趋势,表明降水量线性增加,与曾波等[3]人的研究结果一致。图 3(b)是夏季昼雨日数的时间变化,分析可得。昼雨降水日都的趋势线在 20 世纪 90 年代从高于均值变成低于均值呈下降趋势,表明降水日数线性减少,平均达到 34 天。图 3(c)可以看出昼雨强度趋势线在 20 世纪 90 年代从低于均值变成高于均值呈上升趋势,表明降水强度线性增强。

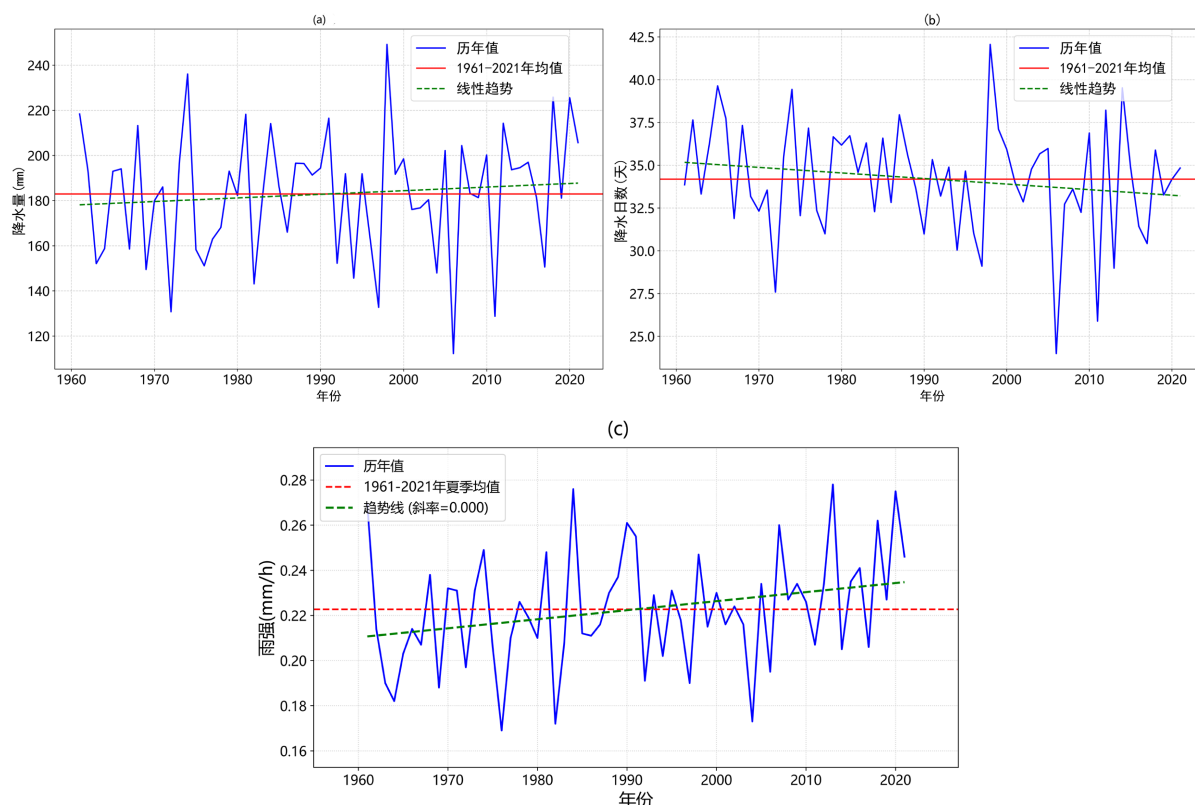


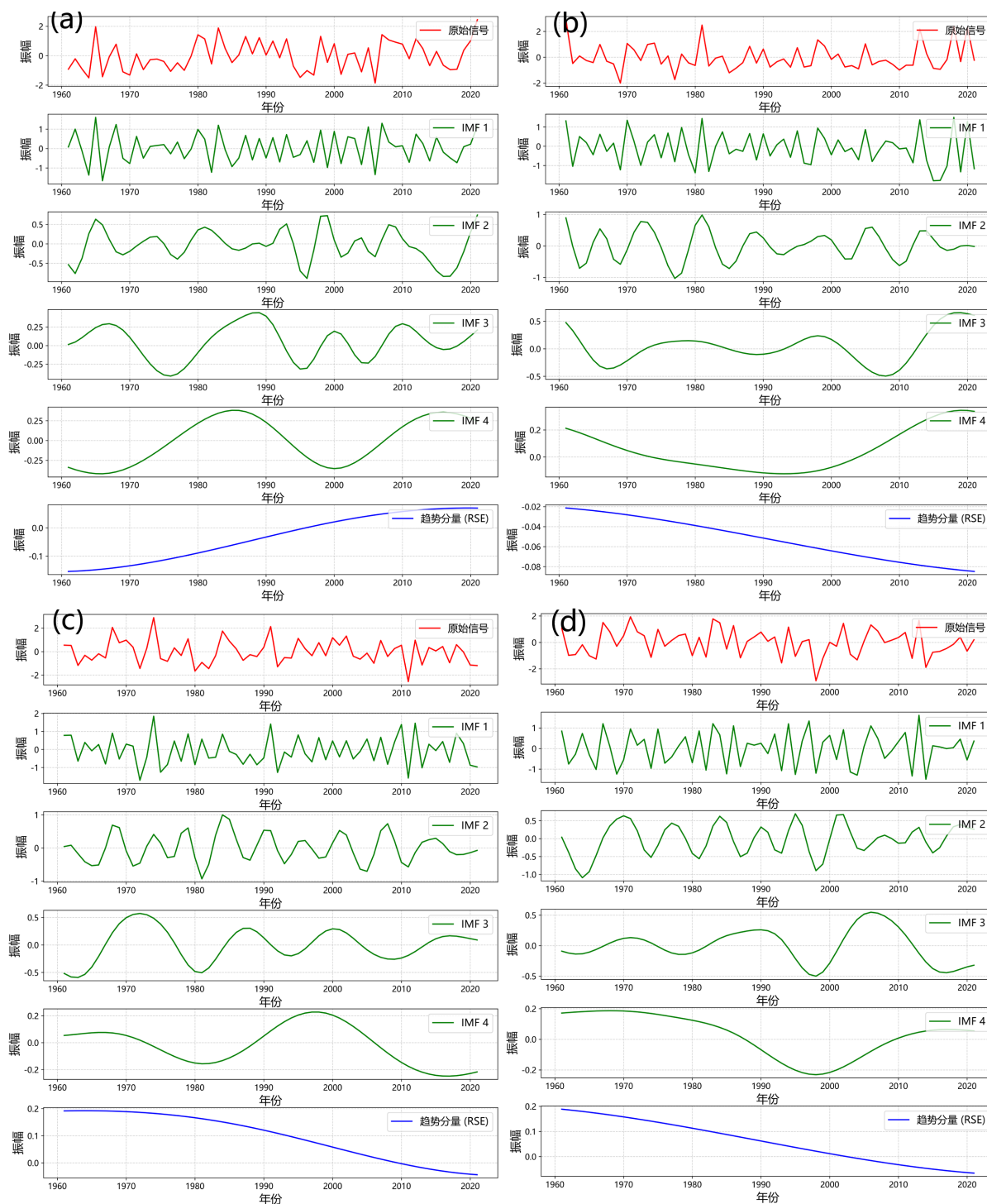
Figure 3. (a) Time variation of summer daytime rainfall, with the horizontal axis being annual variation and the vertical axis being precipitation; (B) Time variation of the number of rainy days in summer, with the horizontal axis representing the annual change and the vertical axis representing the number of rainy days; (C) Time variation of summer precipitation intensity, where the x-coordinate is the annual change and the y-coordinate is the precipitation intensity

图 3. 四川省夏季昼雨特征量的空间分布((a) 昼雨; (b) 昼雨日数; (c) 昼雨强度)

4.2. 夏季昼雨 EEMD 分解

集合经验模态分解(EEMD), 设置迭代次数为 100 次, 信噪比为 0.08 dB, 分解后可以得到 4 个 IMF 分量和一个趋势分量(RSE)。这些 IMF 分量在不同的时间尺度上, 揭示了降水量的波动特性。每个 IMF 分量都在上下波动, 但随着 IMF 分量越大, IMF 的振幅会逐渐减小, MF1 的振幅变化与原数据相似。趋势分量则为我们呈现了降水量随时间变化的整体趋势。若对原始数据归一化到特定区间(如[0, 100])后再做 EEMD, 或对分解结果进行放大等后处理, 纵坐标会呈现较大数值。川东北部的分析如图 4(a)所示。MF1 在 20 世纪 60 年代后振幅变化较大, 周期为 2 年。MF2, MF3, MF4 周期分别为 7 年、18 年、35 年。趋势分量(RSE)呈上升趋势, 表明夏季降水序列上升。川西北部的分析如图 4(b)所示。MF1 在 21 世纪 10 年代振幅变化较大, 周期为 2 年。MF2 周期为 5 年。趋势分量(RSE)呈下降趋势, 表明夏季降水序列下降趋势。川西南部的分析如图 4(c)所示。MF1 在 20 世纪 70 年代及 21 世纪 10 年代振幅变化较大, 周期为 2 年。MF2, MF3, MF4 周期分别为 5 年、15 年、30 年。趋势分量(RSE)呈下降趋势, 表明夏季

降水序列下降。川西高原的分析如图 4(d)所示。MF1 整体振幅变化较大, 周期变化 3 年。MF2, MF3, MF4 周期分别为 5 年、8 年、40 年。趋势分量(RSE)呈下降趋势, 表明夏季降水序列下降。盆地中部的分析如图 4(e)所示。MF1 在 20 世纪 60 年代和 2010 年后一直振幅变化较大, 20 世纪 90 年代振幅变化较小, 周期变化 2.5 年。MF2, MF3 周期分别为 6 年、30 年。趋势分量(RSE)呈下降趋势, 表明夏季降水序列下降。



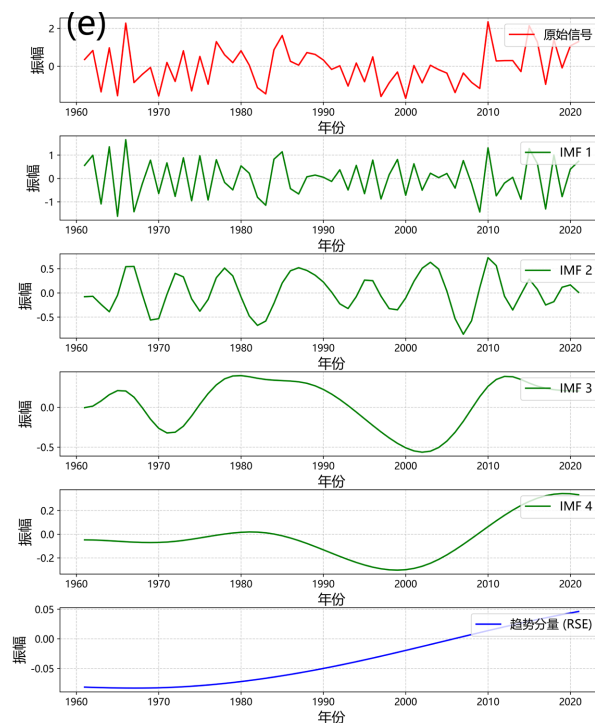


Figure 4. shows the decomposition of EEMD of summer daytime rainfall in Sichuan into original data, IMF1, IMF3, IMF4 and RSE ((a) Northeastern Sichuan; (b) Northwestern Sichuan; (c) Southwestern Sichuan; (d) Western Sichuan Plateau; (e) Central Basin)

图 4. 四川夏季昼雨 EEMD 分解为原数据、IMF1、IMF3、IMF4、RSE 的图((a) 川东北部; (b) 川西北部; (c) 川西南部; (d) 川西高原; (e) 盆地中部)

5. 结论

通过对四川地区 126 站 1961~2021 年的站点降水资料, 从夏季角度出发讨论昼雨的时空变化特征, 得出以下结论:

(1) 四川夏季的昼雨整体呈东多西少、南多北少, 昼雨高值在东北部, 中心达到 425 m。夏季昼雨日数在川西高原南部和川西南山地较高; 川西高原北部分布较高; 川东北部和川南部分布较少; 盆地中部昼雨分布较少。昼雨日数最大值在川西南部, 中心值达到 60 天。夏季昼雨强度高值区分布在川东北部和川西南山地, 低值区分布在川西高原, 昼雨强度大致中心 0.5 mm/h。

(2) 根据所得到的夏季 REOF 高载荷区、研究区地形及海拔等因素进行 5 个分区, 1 分区为川西南、2 分区为川东北、3 分区为川西北、4 分区为川西高原, 5 区为盆地中部。时间系数图中模态变化明显。

(3) 四川夏季昼雨趋势线在 20 世纪 90 年代从低于均值变成高于均值呈上升趋势, 表明昼雨线性增加。昼雨日数趋势线在 20 世纪 90 年代从高于均值变成低于均值呈下降趋势, 表明昼雨日数线性减少。昼雨强度趋势线在 20 世纪 90 年代从低于均值变成高于均值呈上升趋势, 表明昼雨强度线性增强。

(4) EEMD 分解表明夏季时: 川东北部有准 7 年、准 18 年、准 35 年; 川西北部有准 5 年周期变化; 川西南部有准 5 年、准 15 年、准 30 年周期变化; 川西高原有准 5 年、准 8 年周期变化; 盆地中部中部准 6 年、准 30 年周期变化。

声 明

本文图片由 python、spyder、arcgis 制图。

参考文献

- [1] 薛苏桓. 四川地区夏季降水变化特征及其影响因子研究[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [2] 沈恒, 毛文书, 彭育华, 等. 西南雨季降水时空变化特征[J]. 自然科学, 2024, 12(5): 1104-1115.
- [3] 曾波, 王钦, 伍清. 近 56 年四川地区不同季节昼夜降水特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(3): 7-16.
- [4] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 619-630.
- [5] 薛苏桓, 李晓婧. 近 40 年四川地区夏季降水时空分布特征分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(22): 246-252.
- [6] 张博, 李国平. 全球气候变暖背景下四川地区夜雨的变化特征[J]. 中国科技论文, 2015, 10(9): 1111-1116.
- [7] 张宗群. 西南涡与川西高原强降水关系分析[J]. 四川气象, 2002(4): 14-16.
- [8] 李方正, 李国平. 一次西南涡影响下四川盆地夏季暴雨过程昼夜降水的对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(2): 1-8.
- [9] 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 近 50 年四川地区旱涝时空变化特征研究[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1170-1179.
- [10] 赖欣, 王庆语, 皇甫静亮, 等. 西南涡的气候学研究进展[J]. 大气科学, 2023, 47(6): 1983-2000.
- [11] 杨雪, 孙俊, 张敏, 张明, 等. 1981-2018 年四川盆地中部极端降水特征研究[J]. 青海气象, 2021(4): 18-24, 32.
- [12] 连钰, 许彦艳, 李华宏, 等. 哀牢山两侧夏季降水差异的时空分布特征和季风的相关性研究[J]. 高原气象, 2024, 43(4): 1026-1038.
- [13] 艾真珍, 董寅硕, 徐昕, 等. 青藏高原东部地形对四川盆地东北部一次暴雨过程的影响[J]. 南京大学学报(自然科学), 2024, 60(2): 209-217.
- [14] 王芬, 张娇艳, 谷晓平, 等. 西太平洋副热带高压不同特征指数与贵州夏季降水的关系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(4): 348-356.
- [15] 王玥彤, 张娇艳, 何东坡, 等. 贵州省旱涝急转时空特征与大气环流异常的联系[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(4): 41-46.
- [16] 伍红雨, 王谦谦. 贵州夏季降水异常的环流特征分析[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1120-1126.
- [17] 赵志龙, 罗娅, 余军林, 等. 贵州高原 1960-2016 年降水变化特征及重心转移分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1432-1442.
- [18] Richman, M.B. (1986) Rotation of Principal Components. *Journal of Climatology*, **6**, 293-335.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>
- [19] Kaiser, H.F. (1958) The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. *Psychometrika*, **23**, 187-200.
<https://doi.org/10.1007/bf02289233>
- [20] Wilks, D.S. (2011) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd Edition, Academic Press.
- [21] 刘福平, 杨晨, 刘颖. 四川省近 60 年降水时空演变规律[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 16-23.
- [22] 李跃清, 张晓春. “雅安天漏”研究进展[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 289-295.
- [23] 董欣, 倪相. 西南地区不同海拔极端降水时空变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(9): 110-121.