

四川省年昼雨的多尺度时间变化特征

王远凯, 毛文书

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年9月19日; 发布日期: 2025年9月28日

摘要

利用四川省126个气象站点1961~2021年共61年逐日降水观测数据, 采用集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, 以下简称EEMD分解)详细地研究了四川省年昼雨的多时间尺度周期。结果表明: (1) EEMD分解表明各区域年昼雨存在显著的多时间尺度振荡主周期。川西南丘陵年昼雨的主要周期在准5a和准12.5a。川东北丘陵存在准4a、准7a和准15a的主要周期。成都平原存在准2a、6.5a和16a的主要周期。川西高原存在准5a、准10a和准16a的主要周期。川西南山地存在准7a和准20a的主要周期。

关键词

四川省, 年昼雨, EEMD分解, 多尺度, 振荡周期

The Temporal Variation Characteristics of Annual Daytime Rainfall in Sichuan Province

Yuankai Wang, Wenshu Mao

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

Received: June 21, 2025; accepted: September 19, 2025; published: September 28, 2025

Abstract

Using daily precipitation observation data from 126 meteorological stations in Sichuan Province for a total of 61 years from 1961 to 2021, the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) was

used to study in detail the multi-time scale cycles of annual daytime rainfall in Sichuan Province. The results indicate that: (1) EEMD decomposition shows significant multi-time scale oscillation, with main periods of annual diurnal rain in each region. The main cycles of annual daytime rain in the southwestern hills of Sichuan are in Zhun 5a and Zhun 12.5a. The existence of the northeastern hills in Sichuan has the main cycles of Zhun 4a, Zhun 7a, and Zhun 15a. There are main cycles of quasi 2a, 6.5a, and 16a in the Chengdu Plain. There are main cycles of quasi 5a, quasi 10a, and quasi 16a in the western Sichuan Plateau. There are main cycles of quasi-7a and quasi-20a in the mountainous areas of southwestern Sichuan.

Keywords

Sichuan Province, Annual Daytime Rainfall, EEMD Decomposition, Multiscale, Oscillation Period

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

在全球气候变暖背景下, 四川省水资源系统面临严峻挑战。近 30 年全省平均气温上升速率为 $0.26^{\circ}\text{C}/10$ 年, 高于全国平均水平, 极端天气事件频发, 如 2020 年“8·11”特大暴雨和 2022 年夏季“汛期反枯”事件, 对水资源调控带来巨大压力[1]。四川省汛期降水存在三个极值中心, 分别位于雅安、安州区和攀西地区, 大暴雨日主要集中在盆地西部与高原过渡带, 地形对暴雨分布影响显著[1]。川西南山地为易旱区, 年平均气温呈升高趋势, 区域排序为川中盆地 > 川西南山地 > 川西高原。高碳路径下特旱发生频率更高[2]。极端降水指数在川东北和盆地西部最高, 但川东北减少、川西增加, 全省整体呈增加趋势[3]。降水空间分布存在东西振荡现象, 盆地西部降水减少、东部变化不明显, 与高原夏季风和西太副高的作用密切相关[4]。华西雨屏带沿盆地西部边缘山地延伸, 从广元至宜宾[5]。暖季降水呈双峰特征: 4~5 月偏少, 6~8 月偏多, 盆地西南部和最南部存在强降水中心。受地形影响, 降水峰值多在凌晨至夜间, 西部及高原东坡存在午后弱峰值[6]。近 47 年夏季降水整体减少, 存在 6~8 年际和 22 年代际周期, 空间上可分为 4 个子区域, 其中东部和高原区降水增加, 中西部减少, 西南山区稳定[7]。近 60 年降水年际分布不均, 主周期为 28 年, 内含 13 年和 8 年子周期。川西高原降水以频率主导, 东部盆地以强度主导; 空间上呈东南向西北递减趋势[8]。环流上, 高原夏季风偏强时, 西太副高偏南, 有利于盆地东部强降水[9]。1961~2020 年气温东南高西北低, 整体升高; 降水量东多西少, 波动较大。盆地中心气温变化小, 边缘山区变化明显[10]。地形与降水呈反比关系, 高海拔地区降水少。降水周期以 20~47 年为主, 2~13 年和 10~27 年为次, 2008 年起进入丰水期[11]。研究方法上, M-K 检验显示三江源地区年与季节降水气候正常值整体增加, 但澜沧江源夏季为负趋势, 冬季整体下降[12]。

2. 资料和方法

2.1. 资料概括

本文基于 1961~2021 年共 61 年的四川省 126 个气象站的逐日降水观测资料进行分析, 其中北京时间 08:00~20:00 降水量为昼雨。所研究的经纬度范围为 $97^{\circ}21'\text{E}\sim 108^{\circ}12'\text{E}$, $26^{\circ}03'\text{N}\sim 34^{\circ}19'\text{N}$ 站点海拔高度范围为 280~4201 m。所使用的为站点数据, 采用反距离权重法(IDW)将站点数据转换为格点数据, 覆盖

整个四川省的范围来进行研究。通过对四川省年昼雨 REOF 分解可大致划分为川东南丘陵(区域一)、川东北丘陵(区域二)、成都平原(区域三)、川西高原(区域四)和川西南山地(区域五), 共 5 个区域见图 1。

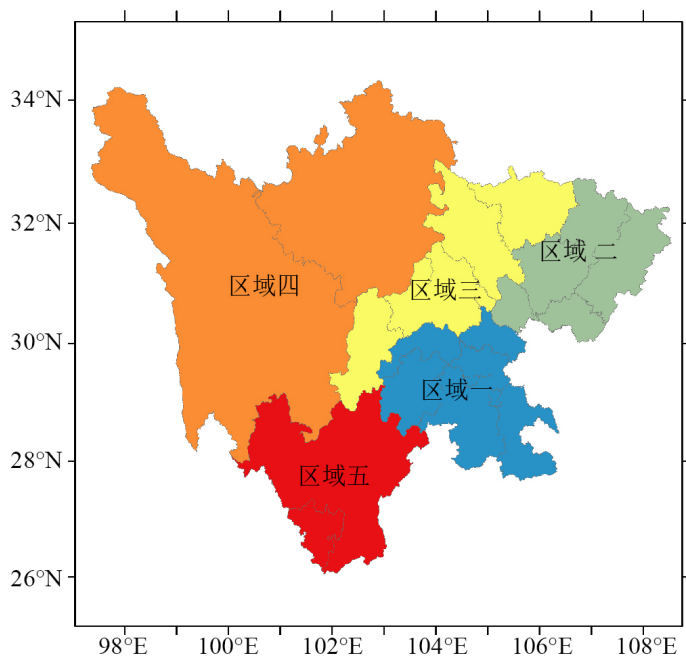


Figure 1. Schematic diagram of REOF zoning results for annual daytime rain in Sichuan Province (This figure was drawn by ArcGIS)

图 1. 四川省年昼雨的 REOF 分区结果示意图(本图由 ArcGIS 绘制)

2.2. 研究方法

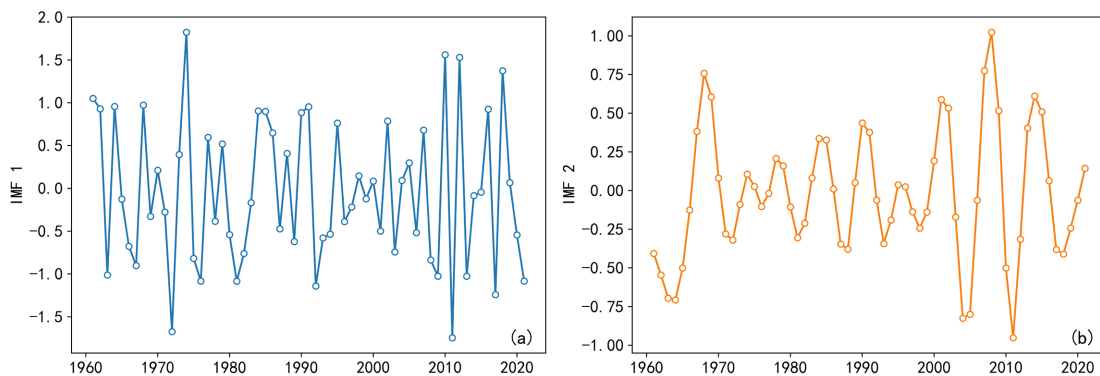
EEMD 分解

本文采用 EEMD 分解的方法对 REOF 各个模态进行分析, IMF1-2 表征年际振荡, IMF3-4 表征年代际变化, Res (t)表征长期趋势, 最后通过加权平均周期法来计算平均频率和平均周期[13]-[15]。

3. 四川省年昼雨的时间演变特征

3.1. 各区域年昼雨的 EEMD 分解

3.1.1. 川东南年昼雨的 EEMD 分解



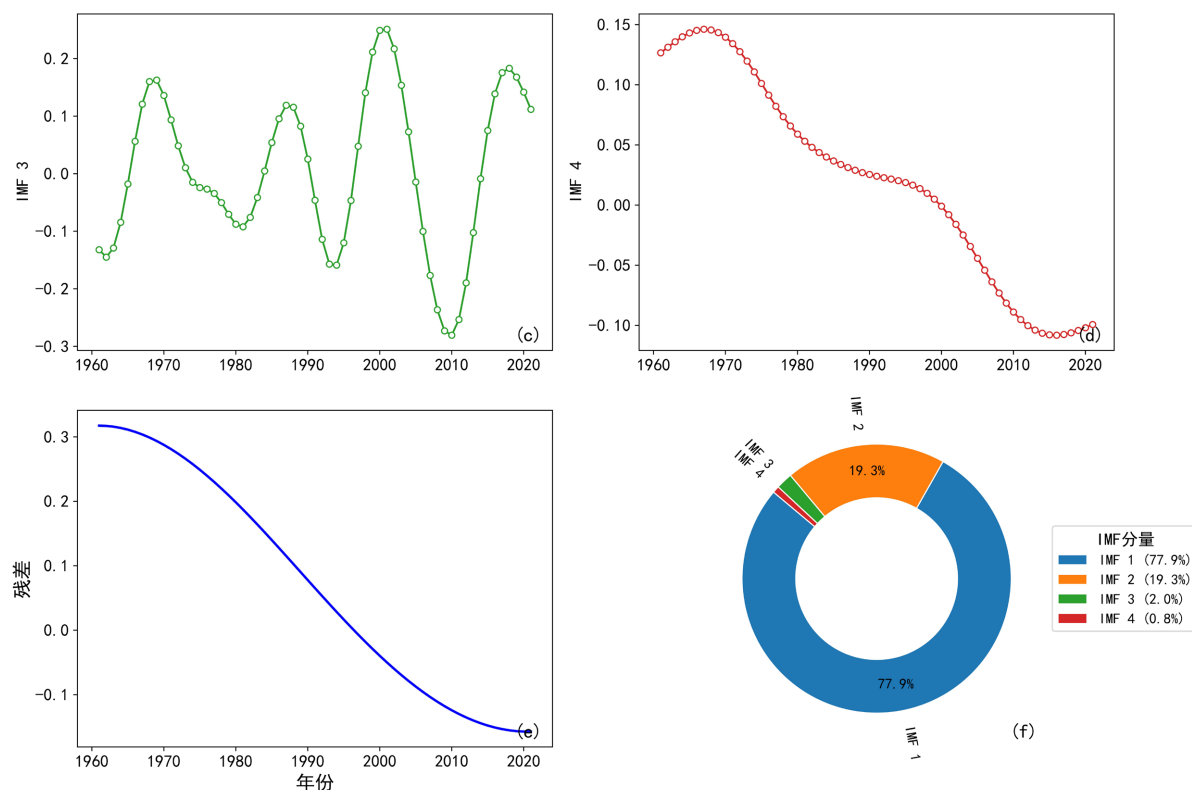


Figure 2. Subsequences of EEMD decomposition of annual diurnal rain in southeastern Sichuan (a)~(e) and the energy ratio of each subsequence (f) (This figure was drawn by python)

图 2. 川东南年昼雨 EEMD 分解的各子序列(a)~(e)及各子序列的能量占比图(f) (本图由 python 绘制)

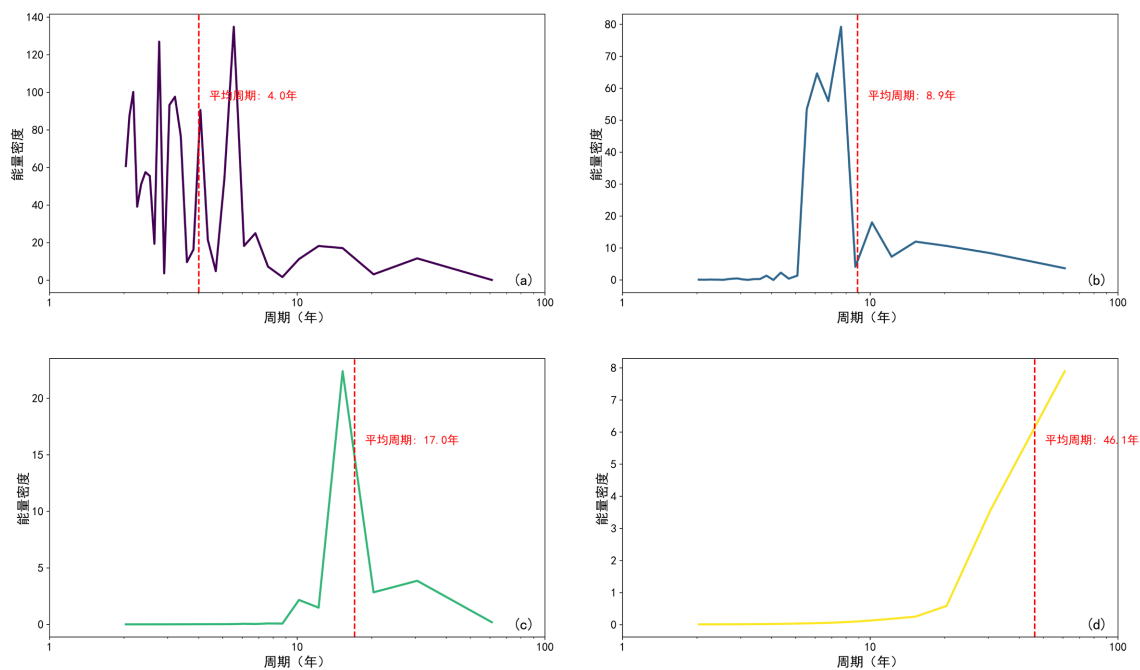


Figure 3. Mean period and energy relationship diagram of various IMF components in southeastern Sichuan: (a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (This figure was drawn by python)

图 3. 川东南各 IMF 分量的平均周期和能量关系图: (a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (本图由 python 绘制)

基于 REOF 第 1 模态(川东南年昼雨)的白噪声分解, 选取能量较高的 4 个 IMF 分量和 1 项残差。如图 2 所示。高频部分中, IMF1 振动频率和振幅最大, 周期约 3~5 年, 振幅在 1961~1975 年及 2009~2021 年较大, 1976~2008 年较小; IMF2 变化类似, 周期约 7~9 年, 振幅在 1961~1972 年及 2000~2021 年较大, 1973~1999 年较小。低频部分中, IMF3 周期约 16~18 年, 振幅 1994 年后明显增大; IMF4 具有 40~50 年准周期, 波动区间逐渐减小。残差项显示, 1990 年前年昼雨呈增幅渐缓的增加趋势, 1990 年后转为降幅渐大的减少趋势。

如图 3 所示, 各 IMF 分量的平均周期分别为: IMF1 约 4 年(能量集中于 2~6 年), IMF2 为 8.9 年, IMF3 为 17.0 年, IMF4 为 46.1 年, 表明川东南年昼雨变化存在多时间尺度的周期特征。

3.1.2. 川东北年昼雨的 EEMD 分解

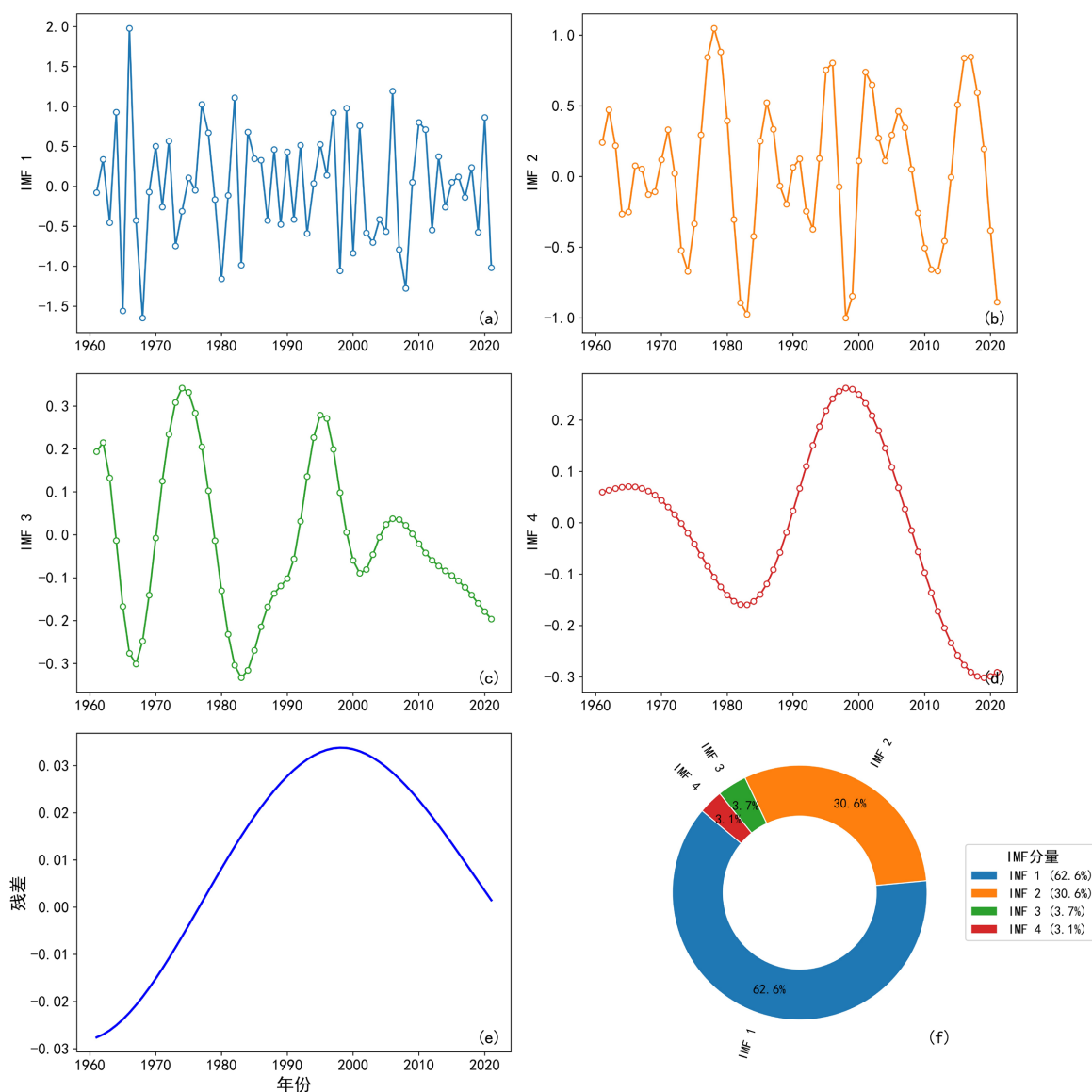


Figure 4. The subsequences (a)~(e) decomposed by EEMD in Northeast Sichuan and the energy ratio of each subsequence (f) (This figure was drawn by python)

图 4. 川东北 EEMD 分解的各子序列(a)~(e)及各子序列的能量占比图(f) (本图由 python 绘制)

基于 REOF 第 2 模态(川东北年昼雨)的白噪声分解, 选取了 4 个代表性 IMF 分量及 1 项残差。如图 4 所示。高频部分中, IMF1 在 1961~1970 年振幅大、频率高, 1970 年后趋于稳定, 周期约 2~5 年; IMF2 变化相反, 1961~1971 年振幅小, 1972 年后振幅增大, 周期约 7~9 年。低频部分中, IMF3 周期约 15~20 年, 1990 年后振幅骤减、频率加快; IMF4 具 30~35 年准周期, 波动区间从 0.1 增至 2.5 左右。残差项显示, 1990 年前年昼雨呈降幅渐缓的下降趋势, 之后转为上升, 2000 年前后增幅最大, 此后增势减缓, 未来可能再次下降。

如图 5 所示, 基于能量密度计算各 IMF 分量的平均周期分别为: IMF1 约 4.1 年, IMF2 为 8.9 年, IMF3 为 18.6 年, IMF4 为 35.4 年, 表明川东北年昼雨变化存在多时间尺度的周期特征。

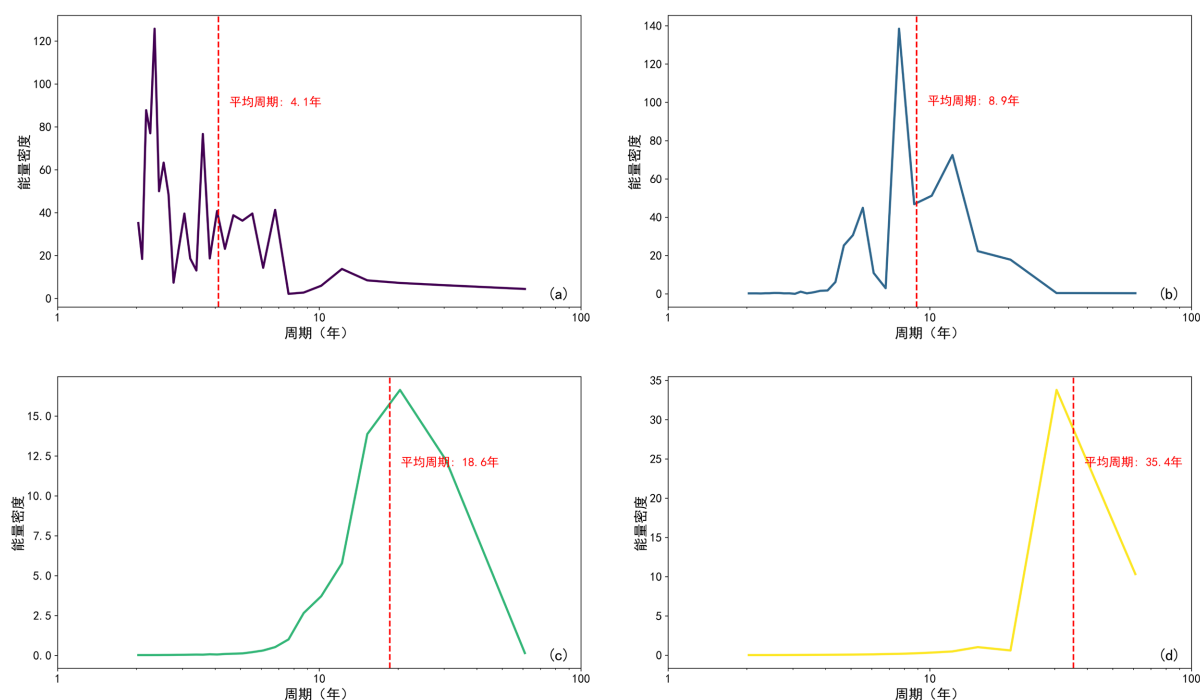
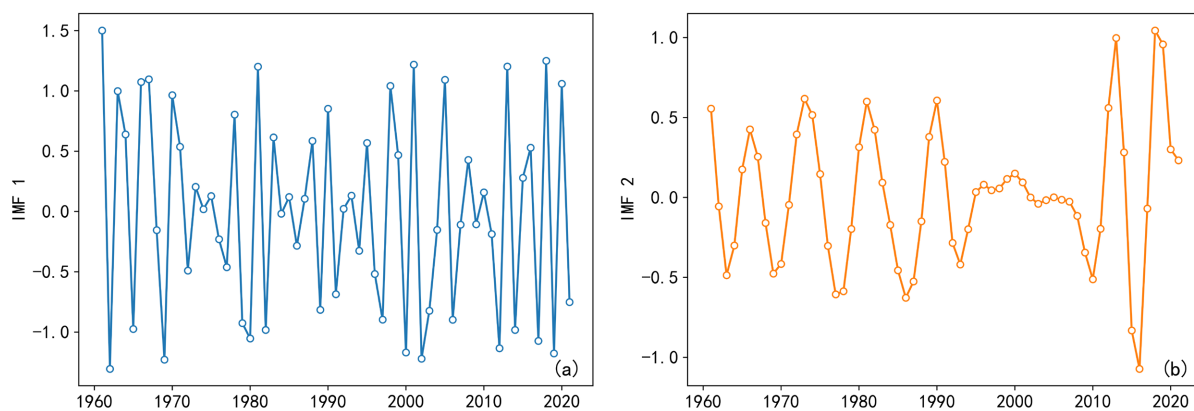


Figure 5. Average period energy relationship diagram of various IMF components in Northeast Sichuan: (a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (This figure was drawn by python)

图 5. 川东北各 IMF 分量的平均周期~能量关系图(a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (本图由 python 绘制)

3.1.3. 成都平原年昼雨的 EEMD 分解



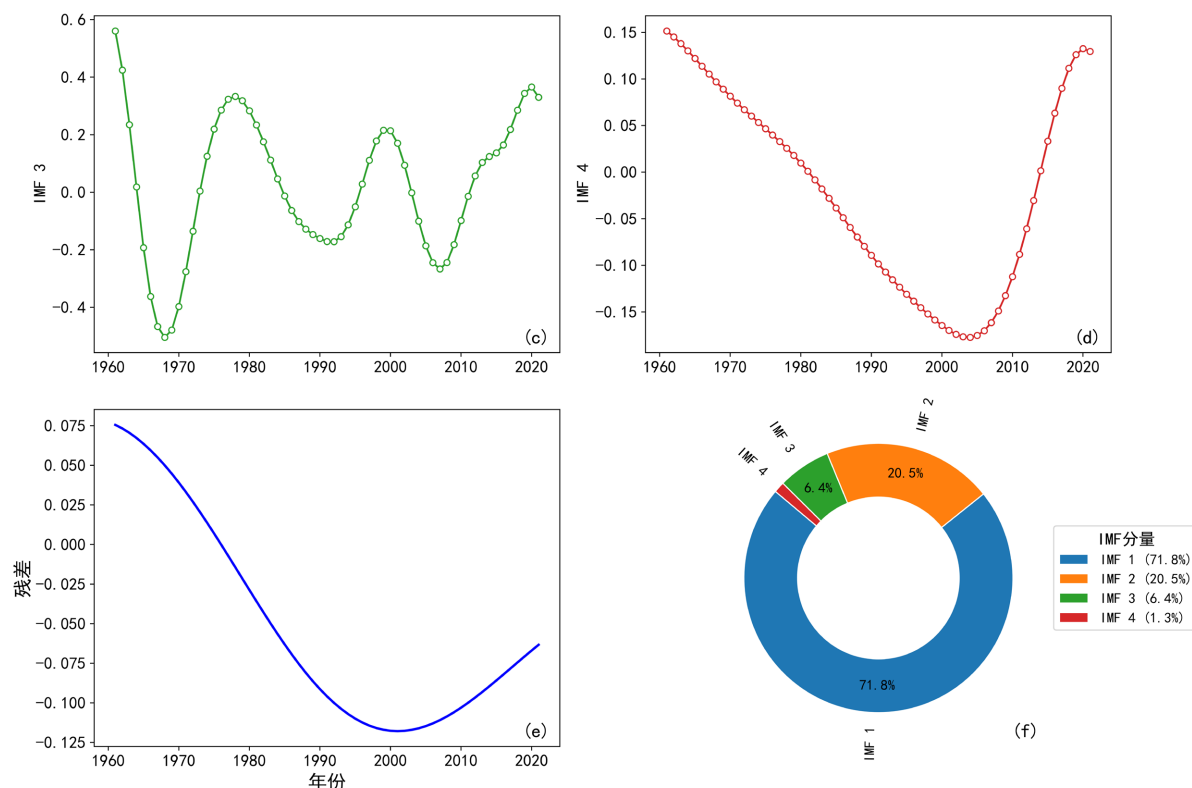


Figure 6. The subsequences (a)~(e) decomposed by EEMD in Chengdu Plain and the energy ratio of each subsequence (f) (This figure was drawn by python)

图 6. 成都平原 EEMD 分解的各子序列(a)~(e)及各子序列的能量占比图(f) (本图由 python 绘制)

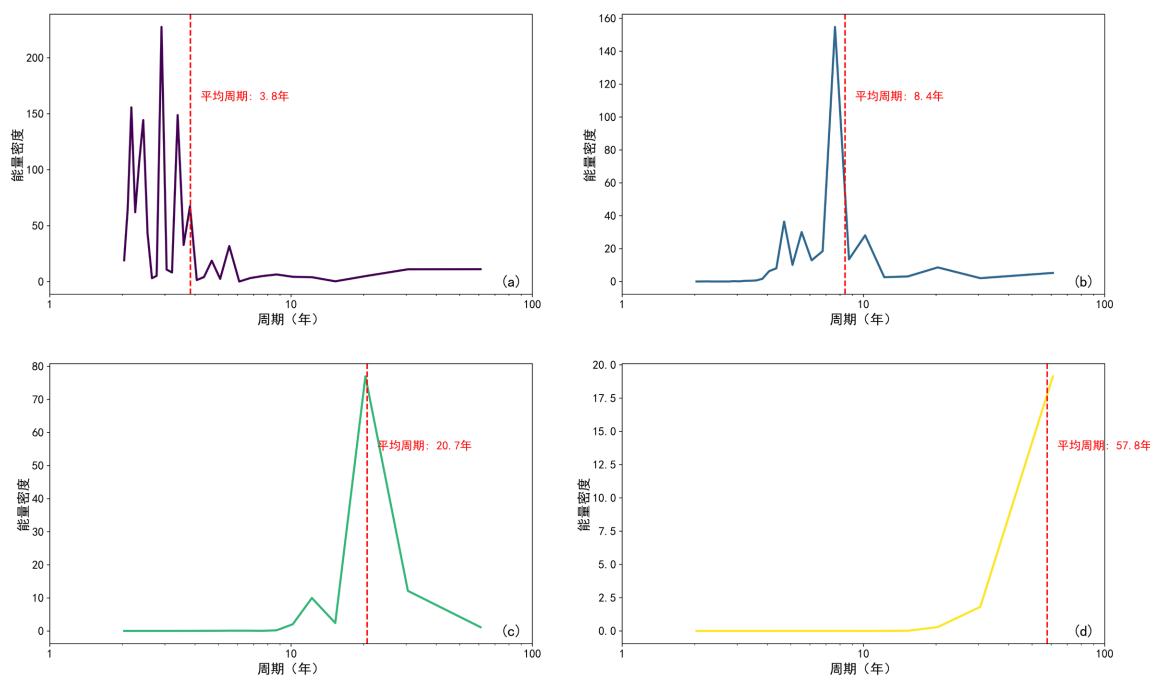


Figure 7. The average period energy relationship diagram of each IMF component in the Chengdu Plain (a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (This figure was drawn by python)

图 7. 成都平原各 IMF 分量的平均周期~能量关系图(a) IMF1; (b) IMF2; (c) IMF3; (d) IMF4 (本图由 python 绘制)

基于 REOF 第 3 模态(成都平原年昼雨)的白噪声分解, 选取了 4 个 IMF 分量和 1 项残差。如图 6 所示。高频部分中, IMF1 周期为 2~4 年, 振幅整体稳定, 仅在 1970s、1980s 及 2008~2010 年间出现异常低值; IMF2 呈三段式变化: 1960~1995 年振幅与周期(7~9 年)稳定, 1995~2010 年振幅骤减, 2010 年后又显著增大。低频部分中, IMF3 周期约 15~20 年, 1974 年前振幅较大, 之后趋于稳定; IMF4 具 50~55 年准周期。残差项表明, 1980 年前年昼雨为增势渐弱的上升趋势, 1980 年后转为下降, 1995 年前后降幅最大, 之后减缓, 2018 年起又转为上升。

为了能够更为直观地表现各个 IMF 分量的主要周期, 本文根据周期与能量密度的关系, 计算了平均周期, 从图 7 可以看出 IMF1 的能量主要集中在 2-4 年, 求平均得出周期在 3.8 年。同理 IMF2、IMF3、IMF4 的平均周期分别在 8.4 年、20.7 年和 57.8 年, 进一步说明了, 成都平原年昼雨具有多个周期。

3.1.4. 川西高原和川西南山地年昼雨的 EEMD 分解

对 REOF 第 4 模态(川西高原年昼雨)和第 5 模态(川西南山地年昼雨)同样进行白噪声分解后, 选取了 4 个主要 IMF 分量和 1 项残差, 并根据周期与能量密度的关系, 计算了其平均周期, 见下表 1 所示, 表明川西高原和川西南山地年昼雨变化存在多时间尺度的周期特征。

Table 1. The average period of each IMF component in the 4th and 5th modes of REOF
表 1. REOF 第 4, 5 个模态各个 IMF 分量的平均周期

模态	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4
4	3.3	10.1	19.9	38.9
5	4	8.4	38.9	28.4

4. 结论

根据 EEMD 分析结果, 各区域年昼雨变化周期及趋势如下: 川西南丘陵存在 4 年、8.9 年、17 年和 46.1 年周期, 趋势为先增后减; 川东北丘陵具有 4.1 年、8.9 年、18.6 年和 35.6 年周期, 趋势为先减后增; 成都平原存在 3.8 年、8.4 年、20.7 年和 57.8 年周期, 趋势为先增后减; 川西高原具有 3.3 年、10.1 年、19.9 年和 40 年周期, 趋势为先增后减; 川西南山地存在 4 年、8.4 年、20.8 年和 39.3 年周期。

参考文献

[1] 周秋雪, 康岚, 龙柯吉, 等. 基于稠密雨量观测的四川省复杂地形降水特征分析[J]. 高原气象, 2025, 44(2): 302-310.

[2] 王嘉驰. 气候变化背景下四川省干旱时空变化特征及预测[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2024.

[3] 段汀, 陈权亮, 王悦, 等. 2007-2020 年四川省极端降水的时空演变特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 317-327.

[4] 白莹莹, 张焱, 高阳华, 等. 四川盆地降水变化的区域差异[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 478-484.

[5] 胡文斌, 乔雪, 陈科艺, 等. 基于降水特征的华西雨屏地理范围界定[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 662-675.

[6] 孙婉莹, 朱磊, 王明昊. 四川省暖季降水时空分布特征及机理[J]. 热带气象学报, 2023, 39(1): 115-128.

[7] 赵旋, 李耀辉, 齐冬梅. 1961-2007 年四川夏季降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 959-967.

[8] 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.

[9] 罗玉, 马振峰, 陈超, 等. 四川省盛夏极端降水变化特征及与高原夏季风的关系[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 733-742.

[10] 吉玮, 董兴娜, 李丽. 四川省气温与降水时空演变特征分析[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(16): 205-211.

-
- [11] 孙伟, 刘志红, 卢晓宁, 等. 1951-2016 年四川省不同地貌单元夏季降水的多时间尺度特性分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 337-342.
 - [12] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨. 三江源地区 1961-2010 年降水时空变化[J]. 地理科学学报, 2013, 23(3): 447-464.
 - [13] 赵琳琳. 基于 PW-MK 及小波分析的辽阳降水特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 97-101.
 - [14] 孙银凤, 陆宝宏. 基于 EEMD 的南京市降水特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2013(3): 5-9.
 - [15] 张小鹏. 滦河上游年降水量多时间尺度变化的 EEMD 分析[J]. 海河水利, 2016(4): 37-39.