

四川盆地夏季夜雨气候变化特征

刘琼鸿, 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: 2026年6月22日; 录用日期: 2026年9月2日; 发布日期: 2026年9月14日

摘 要

为研究四川盆地夏季夜雨的时空变化特征, 本文基于1961~2023年盆地82个气象站逐日降水资料, 采用REOF分解、Morlet小波分析和EEMD分解等统计方法, 分析了夏季(6~8月)夜雨量、夜雨日数和夜雨强度的空间分布格局、时间演变趋势及多尺度周期特征。结果表明: 1) 四川盆地夏季夜雨具有显著的“西南高、东北低”空间分布格局, 高值区集中于雅安-乐山-眉山一带。2) REOF分解结果反映盆地西南部夜雨偏强、东北部相对偏弱的基本空间结构。进一步将四川盆地划分为盆地西部、盆地东北部和盆地南部三个典型区域。3) 夜雨量时间演变的线性趋势不显著, 年际波动主导变化; 夜雨日数略有减少, 而夜雨强度呈增强趋势, 尤其21世纪以来高强度夜雨事件增多。4) 小波分析和EEMD对区域分析表明: 盆地西部以4~8年和16~32年尺度最显著, 东北部兼具5~6年和13年、22年周期, 南部则表现出有3~4年的短周期变化, 其次是6年、22年周期。

关键词

四川盆地, 夏季夜雨, REOF分解, 小波分析, EEMD分析

Climate Change Characteristics of Summer Nighttime Precipitation in the Sichuan Basin

Qionghong Liu, Wenshu Mao*

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

Received: June 22, 2026; accepted: September 2, 2026; published: September 14, 2026

Abstract

To investigate the spatiotemporal characteristics of summer nighttime precipitation in the Sichuan Basin, this study uses daily precipitation data from 82 meteorological stations in the basin from 1961 to 2023, and employs REOF, Morlet wavelet analysis, and EEMD to analyze the spatial

*通讯作者。

文章引用: 刘琼鸿, 毛文书. 四川盆地夏季夜雨气候变化特征[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 626-644.
DOI: 10.12677/ojns.2026.145066

distribution patterns, temporal evolution trends, and multi-scale periodic features of summer (June~August) nighttime rainfall amount, nighttime rainfall days, and nighttime rainfall intensity. The results are as follows: 1) Summer nighttime precipitation in the Sichuan Basin exhibits a distinct spatial pattern of “high in the southwest and low in the northeast”, with the high-value areas concentrated around the Ya'an-Leshan-Meishan region. 2) REOF results reveal a basic spatial structure in which nighttime rainfall is relatively stronger in the southwestern basin and weaker in the northeastern basin. Based on this, the Sichuan Basin is further divided into three typical subregions: the western basin, the northeastern basin, and the southern basin. 3) The linear trend of nighttime rainfall amount over time is not statistically significant, with interannual fluctuations dominating the variation. Nighttime rainfall days have decreased slightly, whereas nighttime rainfall intensity shows an increasing trend, and high-intensity nighttime rainfall events have become more frequent since the beginning of the 21st century. 4) Regional wavelet and EEMD analyses indicate that the western basin is dominated by 4~8-year and 16~32-year scales; the northeastern basin exhibits 5~6-year, 13-year, and 22-year cycles; and the southern basin mainly shows a short 3~4-year cycle, followed by 6-year and 22-year cycles.

Keywords

Sichuan Basin, Summer Nighttime Precipitation, REOF Decomposition, Wavelet Analysis, EEMD Decomposition

Copyright © 2026 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

四川盆地位于我国西南地区，是青藏高原东侧与长江上游间的重要过渡区域，周边山地环绕，气候系统复杂。该区域受东亚夏季风、西南季风、西太平洋副热带高压、青藏高原热力和动力作用等多种因素共同影响，夏季降水时空分布有明显的不均匀性。四川盆地不仅是我国重要的人口聚集区和农业生产区，也是长江上游水资源调蓄和生态安全格局中的关键区域。夏季降水的多少和分布变化，直接关系到区域农业灌溉、水库调度、城市排水、防洪减灾和生态环境维持。由于盆地地形特殊，暖湿气流进入后易在山地迎风坡和盆地边缘地区抬升凝结，形成频繁降水过程，其中夜间降水尤为突出。已有研究和资料显示，四川盆地夏季夜雨占全年降水的重要比例，是该区域降水日变化中最具代表性的现象之一。与白天降水相比，夜雨具有发生时间特殊、局地性强、持续性明显和灾害隐蔽性较高等特点。夜间降水发生时，人员活动和监测防范能力相对较弱，一旦出现短时强降水，容易诱发山洪、滑坡、泥石流和城市积涝等灾害，对山区居民点、交通线路和城市基础设施造成威胁。同时，夜雨也是区域水资源的重要补给来源，其变化会影响土壤水分、农作物生长和水库蓄水过程。因此，研究四川盆地夏季夜雨的变化规律，不仅有助于深化对复杂地形区降水日变化机制的认识，也能够为农业生产、防灾减灾和水资源管理提供科学依据。

近年来，国内外学者围绕四川盆地夏季降水演变、夜雨形成机制、复杂地形作用以及极端降水响应开展了大量研究，形成了较为丰富的研究成果。针对四川地区夏季降水长期变化特征的研究，国内学者较早开始从气候统计角度分析区域降水演变规律。赵旋等[1]人利用 1961~2007 年气象资料研究四川夏季降水时空变化后指出，四川夏季降水存在明显空间分异特征，其中盆地西部和东北部降水波动较大，而川西高原部分区域则呈现减弱趋势。研究认为，四川降水变化与东亚夏季风强弱、西太平洋副热带高压

位置以及高原热力条件变化密切相关。孙伟等[2]人则从多时间尺度角度研究 1951~2016 年四川省不同地貌单元夏季降水变化,发现四川盆地和高原山地存在明显周期振荡,其中盆地表现出较强的准 20 年尺度变化特征。该研究强调,不同地貌单元在气候变化背景下对大尺度环流异常的响应存在显著差异,复杂地形会进一步放大地降水变化的不稳定性。白莹莹等[3]人在分析四川盆地夏季降水区域差异及其与季风联系时发现,四川盆地降水与东亚夏季风活动关系密切。夏季风偏强年份,来自南海和孟加拉湾的暖湿气流能够更加深入盆地内部,从而导致盆地东部和东北部降水明显增加;而副热带高压异常西伸时,盆地西部容易形成持续性强降水中心。研究指出,青藏高原东侧特殊地形会对暖湿气流产生明显阻挡和抬升作用,从而促进局地对流发展。薛苏桓和李晓婧[4]通过研究近 40 年四川地区夏季降水时空分布特征发现,四川夏季降水总体呈波动增加趋势,盆地西部和东北部增幅最为明显。薛苏桓[5]在后续研究中进一步指出,ENSO 事件、西太平洋副热带高压异常以及高原热力条件变化均会对四川降水产生重要调制作用。研究认为,全球气候变暖背景下大气含水量增加,是四川极端降水频次上升的重要原因之一。

关于四川盆地夜雨现象的研究,金霞[6]较早系统研究了四川盆地降水日变化特征及其成因,指出四川盆地存在明显的夜间降水峰值,夜雨高值区主要位于盆地西缘和东北缘山地区域。研究认为,四川盆地特殊的封闭地形结构容易形成夜间低层辐合和边界层急流,从而促进暖湿气流抬升并触发夜间降水。该研究还指出,青藏高原热力作用能够影响盆地内部昼夜热力差异,进而改变局地环流结构。相关研究为后续四川盆地夜雨形成机制研究奠定了基础,也表明夜雨并非单纯局地天气现象,而是复杂地形与区域环流共同作用的结果。张博和李国平[7]在全球气候变暖背景下研究四川地区夜雨变化特征时指出,四川夜雨发生频率和夜雨量均呈增加趋势,尤其在盆地西部及东北部山地区域表现更加明显。研究认为,气候变暖背景下水汽含量增加能够增强夜间降水效率,同时城市化发展和下垫面变化也可能影响夜间边界层结构,从而促进夜雨增强。范江琳等[8]人对 1961~2018 年四川盆地夜雨特征进行分析后发现,四川盆地夜雨量在总降水中的占比呈持续升高趋势,夜雨高值中心主要分布在盆地西缘及川东北地区。研究指出,夜雨变化存在明显年代际波动,20 世纪 90 年代后夜雨增强趋势尤为显著。董自正等[9]人进一步分析四川省近 60 年夏季夜雨时空变化特征后发现,四川夜雨在空间上具有显著区域差异,盆地西部和东北部夜雨频次明显高于盆地中部区域。研究认为,复杂地形能够增强夜间低层辐合,同时有利于暖湿气流在山地迎风坡附近持续抬升。刘宇航和毛文书[10]则从时间变化角度研究四川省夏季夜雨演变特征,指出夜雨增强主要集中于午夜至凌晨阶段,部分地区夜雨峰值时间还存在后移趋势。研究认为,低层急流活动增强和局地热力条件变化是导致夜雨增强的重要原因。相关研究表明,四川盆地夜雨不仅具有显著的空间差异,其日变化特征和年代际变化也表现出较强区域性。

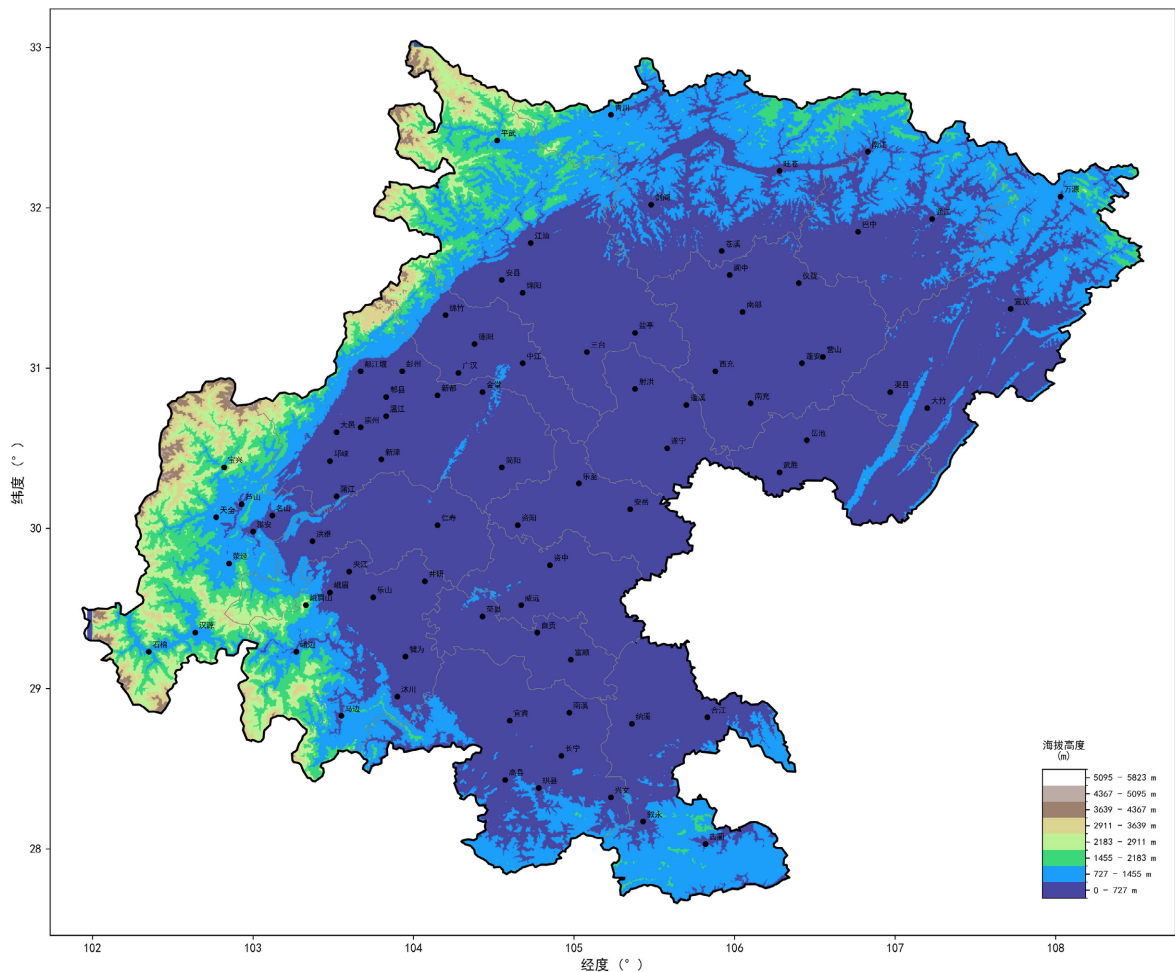
现阶段关于四川盆地夏季夜雨的研究已经取得较大进展,但仍存在一定不足。一部分研究主要集中于典型暴雨个例分析,对于长时间序列夜雨演变规律和区域差异的综合研究相对有限;全球气候变暖背景下四川盆地夜雨频率、强度以及极端事件变化趋势也仍需要进一步深入分析。因此,系统研究四川盆地夏季夜雨的气候变化特征,对于认识气候变化背景下区域水循环响应规律、提升灾害预警能力和保障区域可持续发展具有重要意义。

2. 资料和方法

2.1. 资料概括

本文以四川盆地夏季夜雨气候变化特征为研究主题,研究范围主要在四川省内四川盆地地区(见图 1),研究时段为 1961~2023 年夏季(6~8 月)。所用资料为四川盆地 82 个气象站点 1961~2023 年的逐日降水观测数据,并据此提取逐日夜夜间降水量、夜雨日数和夜雨强度等指标。为统一夜雨统计口径,本文将夜间

时段定义为北京时间 20:00 至次日 08:00。在此基础上, 夜雨量定义为夜间时段降水量总和; 夜雨日数定义为夜间时段出现有效降水的天数, 并以夜间降水量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 作为一次夜雨日的判定标准; 夜雨强度定义为夜雨量与夜雨日数的比值, 即平均每个夜雨日的降水量。基于上述指标, 本文系统分析四川盆地夏季夜雨的时空分布特征及其长期变化规律。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Spatial distribution of meteorological stations and topographic elevation over the Sichuan Basin

图 1. 四川盆地站点分布以及海拔高度图

2.2. 研究方法

旋转经验正交函数(EOF)、Morlet 小波分析、集合经验模态分析(EEMD)。

2.2.1. REOF 分解

REOF 方法通过对 EOF 分析提取的前几个主成分进行旋转优化, 通常采用 Varimax 正交旋转方式, 使模态载荷更加集中于局部区域, 从而增强空间结构的独立性和可解释性。其本质可表示为旋转后模态等于原始 EOF 模态与旋转矩阵的乘积。经过旋转后, 各模态之间的重叠信息明显减少, 不同模态的信号能够更加清晰地分离出来, 更能够反映原始数据的变化特征。使每个模态包含更多原始信息, 从而更加有效地反映气候要素的时空变化规律。本文 REOF 前三个模态方差贡献率分别约为 24.23%、13.65%、

10.27%, 其余模态方差贡献率均小于 5%, 因此选取前三个模态作为主要模态进行分析。

REOF 改进步骤为: 截取前 k 个 EOF 模态进行 Varimax 旋转(最大化空间载荷的方差, 使载荷值趋向 0 或 ± 1), 对前 k 个 EOF 模态的载荷矩阵 $V_{m \times k}$ 进行正交旋转:

$$V_r = V_T \quad (1)$$

T : 旋转矩阵, 满足 $T^T T = I$ (正交性约束), 旋转后的时间系数需重新计算:

$$PC_r = X V_r \quad (2)$$

2.2.2. 小波分析

小波分析是一种在气象学领域内应用广泛的信号处理技术。它主要用于分析和处理气象数据, 如气温、降水量、风速等时间序列。该方法核心优势在于其同时提供时间和频率的信号, 这使得它非常适用于分析具有非平稳性和多尺度特征的气象信号。本文采用的是 Morlet 小波分析, 其表达式为:

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} e^{i\omega t} \quad (3)$$

式(3)中 ω 为频率, i 表示虚数; $\psi(t)$ 表示 Morlet 母小波。

在降水量时间序列的分析中, 小波方差能够有效地反映降水量的波动能量在不同尺度上的分布情况。通过 Morlet 小波计算小波方差, 其表达式为:

$$w_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \psi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) \quad (4)$$

$$Var(a) = \sum (w_f)^2(a, b) \quad (5)$$

式(4)中 $w_f(a, b)$ 为小波变换系数, a 为尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为时间因子, 反映时间上的平移。

式(5)中, $Var(a)$ 为 a 在不同尺度下的小波方差, 其中 a 为小波系数实部, b 为小波系数虚部。

2.2.3. EEMD 分析

集合经验模态分解(EEMD)是一种自适应信号分解方法。该方法在经验模态分解(EMD)基础上, 通过添加白噪声并进行多次重复分解, 可提取复杂信号的局部特征和周期性成分, 并在一定程度上减弱 EMD 中的模态混叠问题, 从而提高非平稳气候序列尺度分解的稳定性和可靠性。该方法实现的具体过程如下:

在原始信号 $x(t)$ 中添加白噪声 $w(t)$, 把添加的白噪声次数记为 N 次。

$$x_i(t) = x(t) + w_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

将处理后的原始信号采用 EMD 方法分解得到 m 个 IMF 分量和一个趋势项 $r_i(t)$ 。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^m C_{ij}(t) + r_i(t) \quad (7)$$

重复添加白噪声, 将每次得到的 IMF 分量进行集成平均处理, 作为最终的分解结果。

$$IMF_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_{ij}(t) \quad (8)$$

公式中 $x_i(t)$ 为处理第 i 次的原始信号, $w_i(t)$ 为符合高斯正态分布的白噪声信号, N 为添加的白噪声个数, $C_{ij}(t)$ 为添加的第 j 个白噪声后的第 i 个 IMF 分量。

3. 四川盆地夏季夜雨特征量空间分布特征

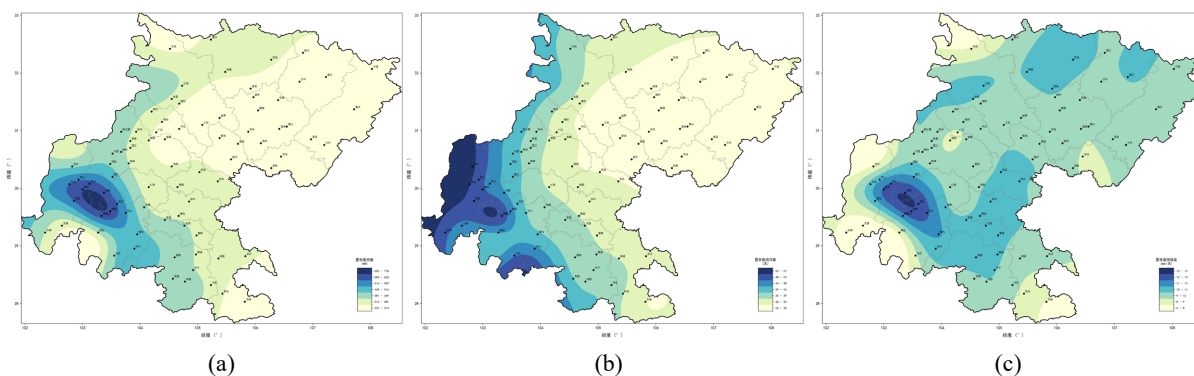
3.1. 夏季夜雨空间分布特征

根据图 2(a), 四川盆地夏季夜雨量集中在 247~718 mm 范围区间。高值区主要集中于盆地西南部, 尤其在雅安-乐山-眉山一带形成明显的降水核心区, 具有显著的夜雨集中现象。高值中心向外围呈环状递减, 夜雨量由西南向东北逐渐降低。中等降水区主要位于盆地中部和南部, 包括成都平原南缘、资阳、内江及宜宾北部等区域。这些地区处于西南高值区向东北低值区的过渡带, 空间梯度较为明显, 反映出盆地内部夜雨量由西南向东北的递减过程。低值区主要分布于盆地东北部和东部, 包括南充、达州、广安及巴中等地区。

根据图 2(b), 夏季夜雨日数主要在 26~57 天的范围之间。高值区主要位于四川盆地西部和西南部, 尤其集中在雅安、芦山、邛崃及乐山北部一带, 形成显著高值中心, 表明该区域夜雨发生频率极高, 夜间降水过程活跃。中值区主要位于盆地中西部及南部地区, 包括成都平原南部、眉山、资阳、内江及宜宾附近, 空间梯度变化较明显, 反映出夜雨活动在盆地内部存在由西向东递减的趋势。低值区主要分布在盆地东北部和东部, 包括广元、巴中、达州、南充以及广安等地, 这些地区夏季夜间降水发生频率相对较低。

据图 2(c), 四川盆地夏季夜雨强度集中在 6~15 mm/天的范围区间。高值中心主要位于盆地西南部雅安-洪雅-夹江-峨眉山附近区域, 并形成闭合型高值核心区, 该区不仅夜雨发生频率高, 单次夜间降水过程的降水效率也较强。除西南部核心区外, 盆地南部和中部局部地区也存在次高值区。例如宜宾北部、泸州附近以及遂宁-重庆北缘一带, 夜间降水仍具有一定持续性和对流发展能力。而盆地东北部及东部地区, 包括达州、广安、南充等地, 夜雨强度整体偏低, 表明夜间降水过程相对较弱。

这些特征表明四川盆地夏季夜雨的空间分布具有显著的地区差异性, 总体呈现“西南高、东北低”的分布格局。四川盆地夜雨量空间分布也伴随明显的局地高值中心与梯度递减特征; 四川盆地夏季夜雨日数空间分布具有明显的不均匀性和经向差异, 且高值区沿盆地西缘分布特征尤为突出; 与夜雨总量和夜雨日数分布相比, 夜雨强度的空间差异相对更突出, 局地高值中心更加集中, 总体呈现“西部高、东部低, 局地中心突出”的分布特征。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 号的标准地图制作, 底图无修改。

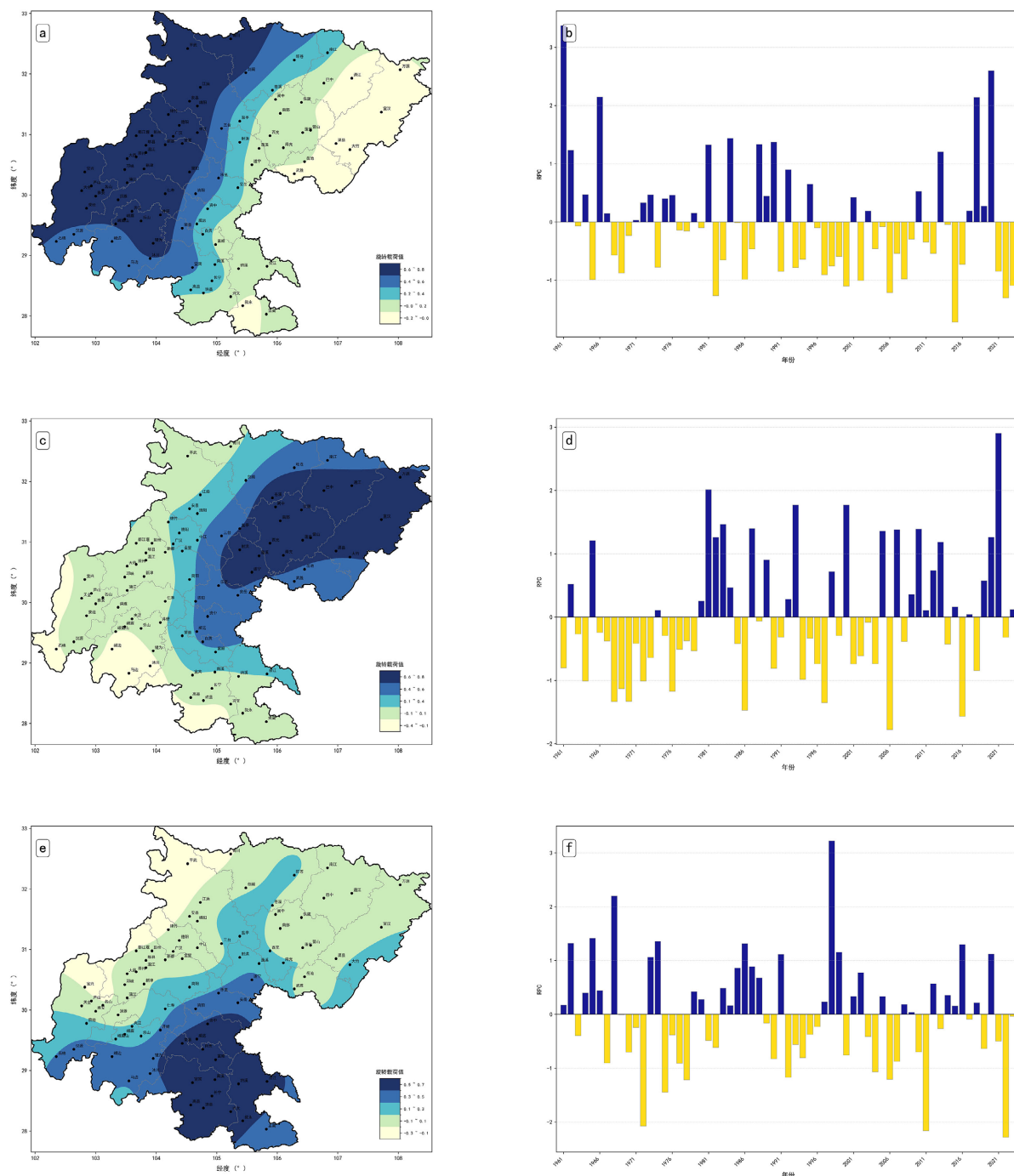
Figure 2. Spatial distribution of summer nighttime precipitation over the Sichuan Basin

图 2. 四川盆地夏季夜雨特征量空间分布图(a. 夜雨量空间分布 b. 夜雨日数空间分布 c. 夜雨强度空间分布)

3.2. 夏季夜雨量 REOF 分解

为了进一步揭示四川盆地不同区域夏季夜雨的空间差异特征, 首先对四川盆地夏季夜色雨降水量进行 EOF 分解, 发现其存在区域变化特征, 在此基础上, 进一步采用 REOF 对 1961~2023 年四川盆地夏

季夜雨量进行分解。REOF 分解能够在 EOF 基础上增强空间模态的局地代表性, 使各模态对应的典型区域更加清晰。

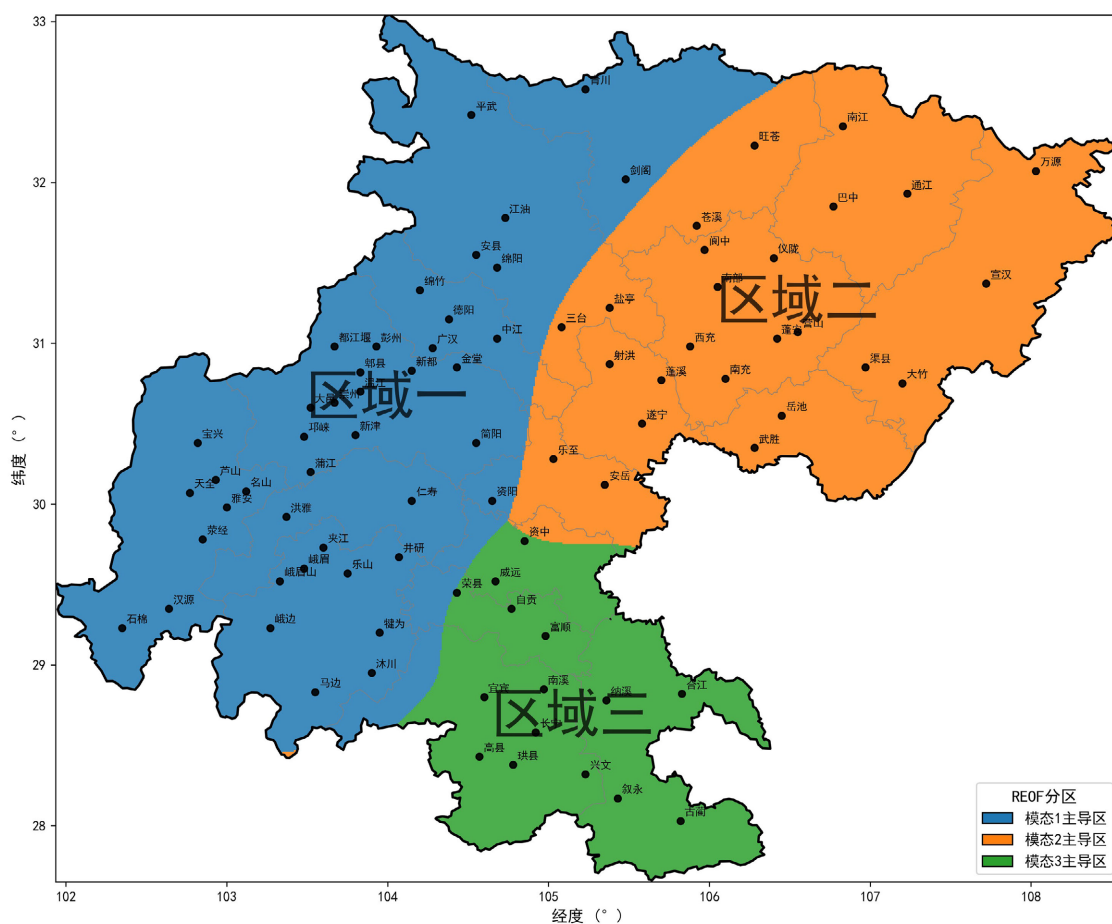


注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 3. Spatial patterns and time coefficients of the first three REOF modes of summer nighttime precipitation over the Sichuan Basin: (a) REOF1 spatial pattern; (b) REOF1 time coefficient; (c) REOF2 spatial pattern; (d) REOF2 time coefficient; (e) REOF3 spatial pattern; (f) REOF3 time coefficient

图 3. 四川盆地夏季夜雨量 REOF 分解前 3 个模态: (a) REOF 第 1 模态空间分布; (b) 第 1 模态时间系数; (c) REOF 第 2 模态空间分布; (d) 第 2 模态时间系数; (e) REOF 第 3 模态空间分布; (f) 第 3 模态时间系数

图 3 第 1 模态表现为明显的盆地西部型, 方差贡献率为 24.2%。该模态中, 图 3(a)中较大正载荷区主要分布在四川盆地西部和西南部, 包括雅安、成都平原西缘、乐山、眉山以及盆地西北缘一带, 表明这些地区是四川盆地夏季夜雨日数变化最显著的区域。盆地东部和东北部载荷值相对较小, 表明其对该模态的贡献较弱。该空间型与前文夜雨空间分布中“西多东少”的格局基本一致, 表明盆地西部是夏季夜雨量变化敏感的核心区域。对应图 3(b)时间系数显示, 1960 年代初期、1980 年代中后期以及 2010 年代后期为正值较明显阶段, 表明这些时期盆地西部夜雨量相对偏多; 而 1970 年代、2000 年前后以及 2015 年前后出现负值, 表明该区域夜雨量存在阶段性减少。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. REOF-based regionalization of summer nighttime precipitation over the Sichuan Basin

图 4. 四川盆地夏季夜雨 REOF 分区结果示意图

第 2 模态表现为盆地东北部型, 方差贡献率为 13.6%。图 3(c)中该模态的高值载荷主要位于盆地东北部和东部, 包括南充、达州、巴中、广安及其周边地区, 而盆地西部和西南部载荷较低, 呈现出明显的东西差异特征。该模态表明四川盆地夏季夜雨量除西部主导型变化外, 东北部地区也存在相对独立的变化特征。图 3(d)时间系数序列显示, 1980 年代初期、1990 年代初期、2000 年前后以及 2010 年代后期出现较大正值, 而 1970 年代、1980 年代中后期和 2000 年代中期则出现负值, 表明盆地东北部夜雨该模态年际波动较明显。

第 3 模态表现为盆地南部型, 方差贡献率为 10.3%。图 3(e)中该模态较大正载荷区主要位于盆地南

部和东南部, 包括宜宾、泸州、自贡、内江及重庆西缘附近, 而盆地北部和西北部载荷相对较小或为负值, 表明该模态主要反映盆地南部夜雨的局地变化特征。该空间分布表明, 四川盆地南部夜雨变化与北部、西部地区并不完全一致, 具有相对独立的区域响应特征。对应图 3(f) 时间系数显示, 1960 年代中期、1980 年代后期、1990 年代末以及 2010 年代中后期为正值阶段, 表明这些年份盆地南部夜雨量偏多; 而 1970 年代初期、2000 年代后期以及 2020 年以后出现明显负值, 表明南部地区夜雨量在这些时期偏少。

综合 REOF 前 3 个模态分析结果可以发现, 四川盆地夏季夜雨量具有明显的区域分异特征, 其主要空间变化可划分为盆地西部、盆地东北部和盆地南部三个典型区域(图 4)。

区域一为盆地西部高频区, 主要包括雅安、成都、眉山、乐山、德阳、绵阳等地。该区域夜雨量多、变化幅度大。区域二为盆地东北部变化区, 主要包括南充、达州、巴中、广安、遂宁等地, 该区域夜雨量总体低于西部。区域三为盆地南部差异区, 主要包括宜宾、泸州、自贡、内江、资中及周边地区。

4. 四川盆地各区域夏季夜雨时间演变特征

为进一步揭示四川盆地西部夏季夜雨变化的多时间尺度特征, 结合前 REOF 的分区, 对盆地西部、东北部、南部区域夜雨序列进行小波分析和集合经验模态分解(EEMD)。

4.1. 四川盆地西部区

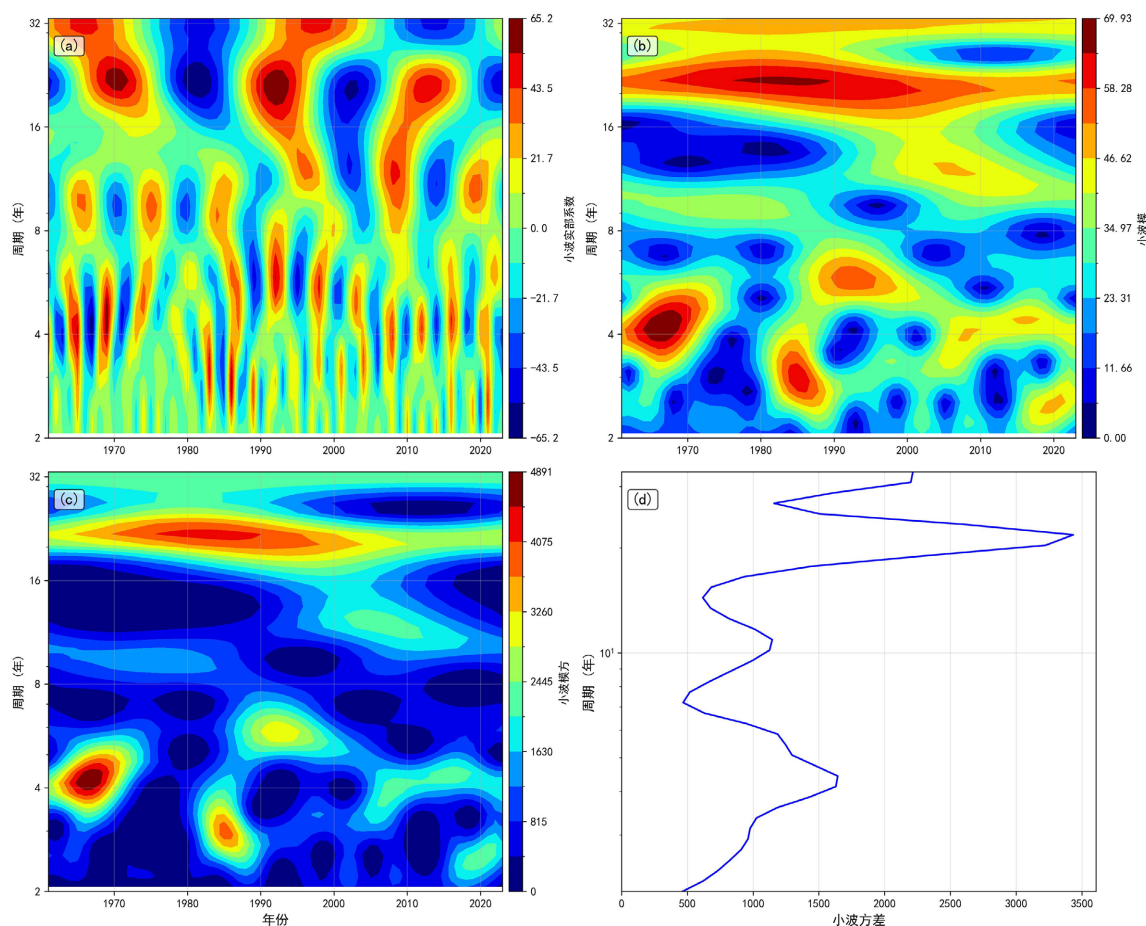


Figure 5. Wavelet analysis of summer nighttime precipitation over the western Sichuan Basin during 1961–2023: (a) real-part coefficients; (b) modulus; (c) squared modulus; (d) wavelet variance

图 5. 1961~2023 年四川盆地西部夏季夜雨小波分析图: (a) 小波实部系数; (b) 小波模; (c) 小波模方; (d) 小波方差

从图 5(a)整体来看, 2~4 年尺度正负位相交替频繁, 在短周期年际尺度上有较强波动性, 但该尺度振荡持续性相对较弱, 主要表现为局地性和阶段性变化。在 4~8 年尺度上, 小波实部振荡信号较清晰, 20 世纪 60 年代中后期、80 年代中期、90 年代前后以及 2010 年以后均出现较明显的正负位相转换, 表明该区域夜雨在年际尺度上存在较活跃的周期变化。10~12 年尺度附近也存在一定振荡信号, 但其连续性弱于低频尺度。16~32 年尺度振荡则表现出持续时间长、影响范围广的特点, 尤其在 20 世纪 60 年代末至 90 年代后期表现较明显, 表明四川盆地西部夏季夜雨具有较强的年代际变化背景。图 5(b)小波模图进一步揭示了各周期尺度振荡能量的时间分布特征。可见, 四川盆地西部夏季夜雨在 16~32 年尺度上存在连续且较强的能量中心。此外, 4 年左右尺度也存在明显高能量中心但为部分时期, 表明短周期年际振荡在部分时期较活跃。10~12 年尺度附近虽也存在一定能量分布, 但强度和持续性均弱于 16~32 年尺度。图 5(c)小波模方图进一步反映了不同周期尺度上振荡能量的强弱。结果显示, 16~32 年尺度形成最强、最连续的高能区。与此同时, 4 年左右尺度在 20 世纪 60 年代中后期存在较强高能中心, 11 年左右尺度也表现出一定能量峰值。从图 5(d)小波方差分布来看, 四川盆地西部夏季夜雨存在多个周期峰值, 其中最显著峰值出现在 22 年左右, 表明准 22 年周期是该区域夜雨变化的第一主周期。除 22 年主周期外, 11 年左右周期对应小波方差也存在明显峰值, 可作为第二主周期。此外, 4 年和 30 年左右尺度也存在较明显峰值, 为第三主周期, 表明盆地西部夜雨在年际尺度上同样存在较活跃的短周期振荡。

总体来看, 小波分析表明, 在 1961~2023 年这一时间段内四川盆地西部, 22 年左右的周期变化特性比较明显, 其次是 4 年、11 年、30 年。

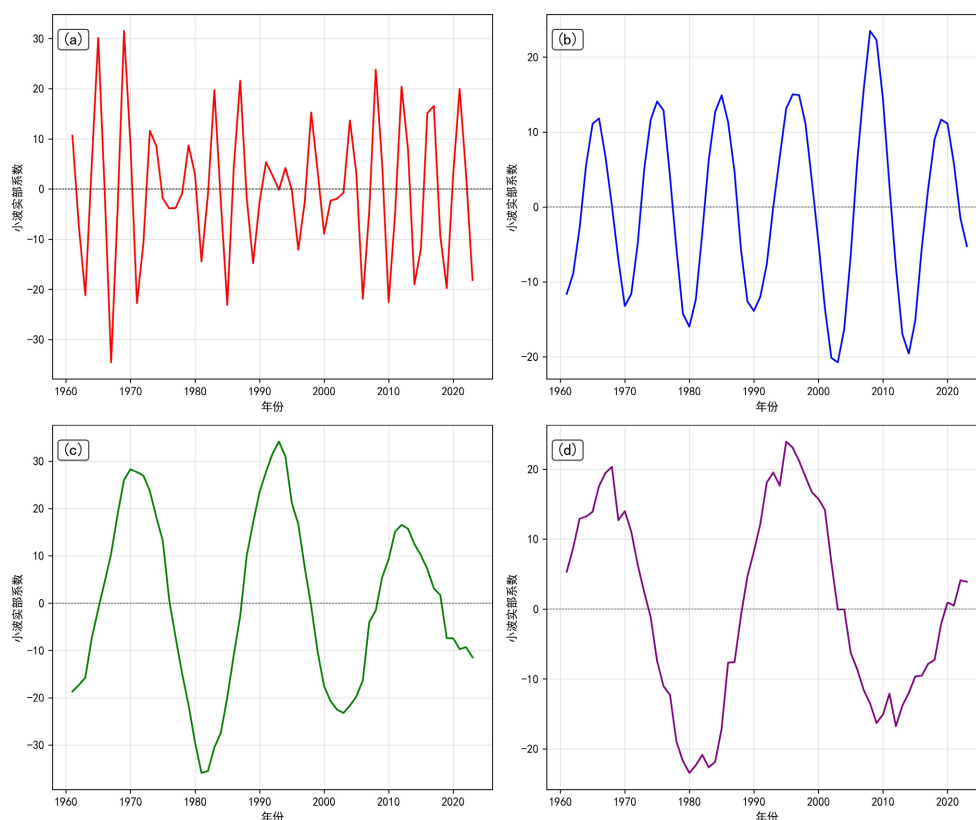


Figure 6. Wavelet coefficient series for the dominant periods of summer nighttime precipitation over the western Sichuan Basin: (a) 4-year period; (b) 11-year period; (c) 22-year period; (d) 30-year period

图 6. 四川盆地西部夏季夜雨量主周期小波系数图: (a) 4 年主周期小波系数; (b) 11 年主周期小波系数; (c) 22 年主周期小波系数; (d) 30 年主周期小波系数

从图 6 来看, 四川盆地西部夏季夜雨在不同时间尺度上的丰枯转换特征存在明显差异。

在图 6(a) 4 年主周期尺度上, 经历了约 16 个丰水期与枯水期的转换, 转换周期较短。在 1960 年代中后期以及 2005 年以后振荡较明显, 2010 年以后正负位相转换更剧烈。在图 6(b) 11 年主周期尺度上, 经历了约 6 个丰水期与枯水期的转换, 周期变化较 4 年尺度更加平稳。在 2000 年以后, 11 年尺度振荡幅度比较明显地增强, 表明进入 21 世纪后, 四川盆地西部夜雨的丰枯变化更加突出。在图 6(c) 22 年主周期尺度上, 研究时段内大致经历了约 3 个丰水期与枯水期的转换。在 1980 年代至 1990 年代中期振荡幅度明显增强, 该时期四川盆地西部夜雨丰枯转换较显著。在图 6(d) 30 年主周期尺度上, 经历了约 2 个丰水期与枯水期的转换, 变化过程最平滑, 表明四川盆地西部夜雨在 30 年尺度上存在明显的年代际丰枯转换。

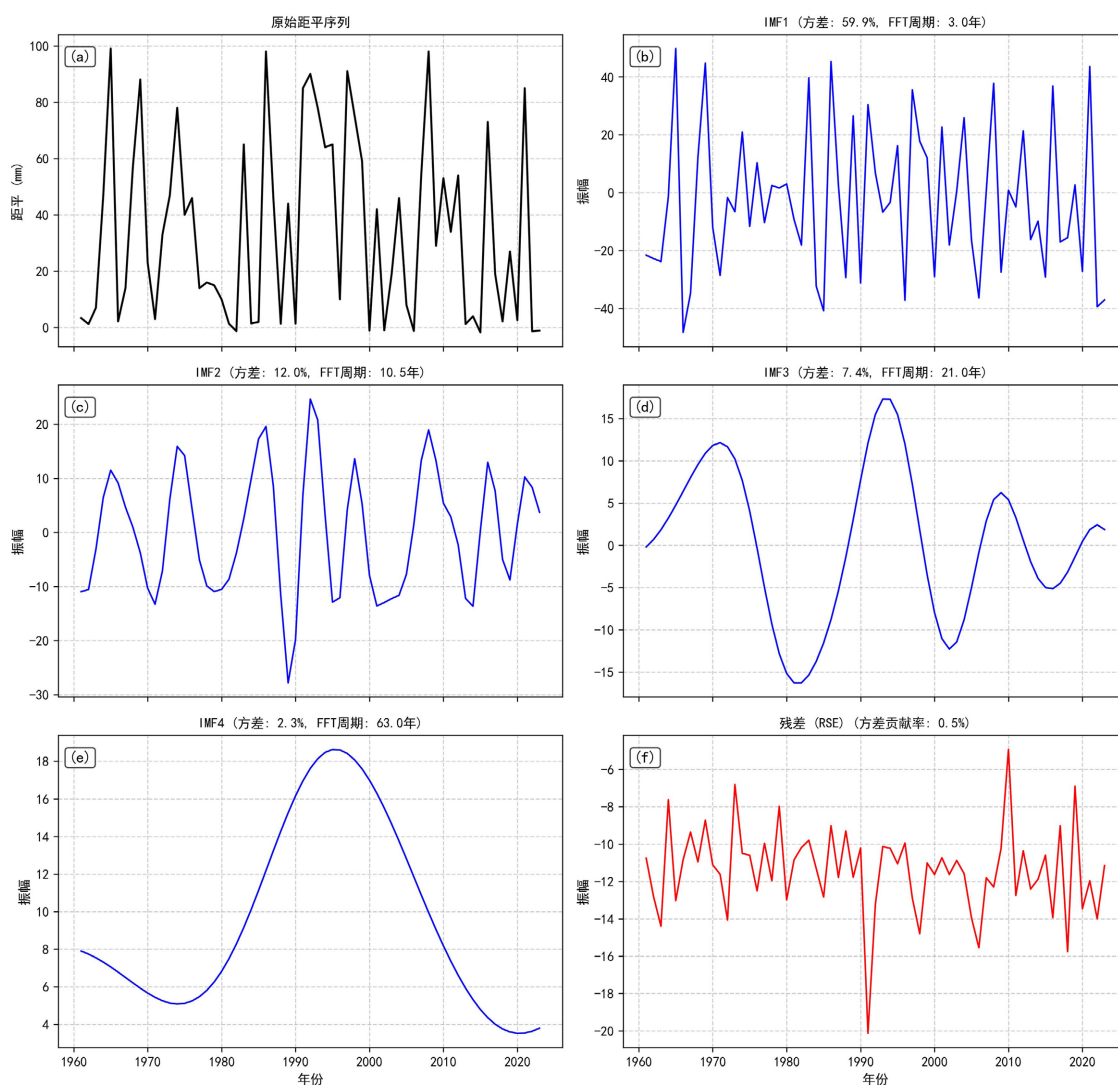


Figure 7. EEMD decomposition of the summer nighttime precipitation time series over the western Sichuan Basin from 1961 to 2023: (a) original anomaly series; (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE (residual)

图 7. 1961~2023 年四川盆地西部夏季夜雨时间序列 EEMD 分解图: (a) 原始距平序列; (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE

将四川盆地西部夏季夜雨时间序列进行 EEMD 分解, 共得到图 7 的 4 个 IMF 分量和 1 个长期趋势项 (RSE)。

图 7(b) IMF1 分量方差贡献率为 59.9%, 是所有分量中贡献最大的主导模态, 该分量周期约为 3.0 年, 与 ENSO 的 2~7 年典型振荡尺度较为接近, 表明可能受到热带太平洋海气相互作用及其对东亚夏季风异常调制的影响。图 7(c) IMF2 分量的方差贡献率为 12%, 周期大约为 10.5 年, 与 PDO 低频变化及太阳活动约 11 年周期具有一定相似性, 可能受到年代际海气耦合过程的影响。图 7(d) IMF3 分量方差贡献率为 7.5%, 周期约为 21.0 年, 与 PDO、AMO 等低频气候振荡的时间尺度较为接近, 反映出区域夜雨变化可能存在较明显的年代际背景信号。图 7(e) IMF4 分量为长期趋势项, 其方差贡献率为 2.3%, 表明四川盆地西部夏季夜雨长期线性趋势并不显著。图 7(f) 残差趋势分量(RES)主要反映四川盆地西部夏季夜雨序列的长期变化趋势。从图中可见, 残差趋势分量整体呈现明显波动变化, 并未表现出持续单调增加或减少趋势, 而是存在一定阶段性起伏特征。其中 20 世纪 90 年代前后出现较明显负值中心, 而 2010 年前后则出现显著正值峰值, 表明四川盆地整体夏季夜雨长期变化具有较强的不稳定性及阶段性特征。综合各 IMF 分量分析结果可以发现, IMF2 与 IMF1 两者累计方差贡献率达到 71.9%, 表明四川盆地西部夏季夜雨降水变化主要由 IMF1 和 IMF2 决定。

综合小波分析和 EEMD 分解结果, 可以得出四川盆地西部 3~4 年的短周期变化为主, 22 年左右的周期变化特性比较明显, 其次是 11 年、30 年。

4.1.1. 四川盆地东北部区

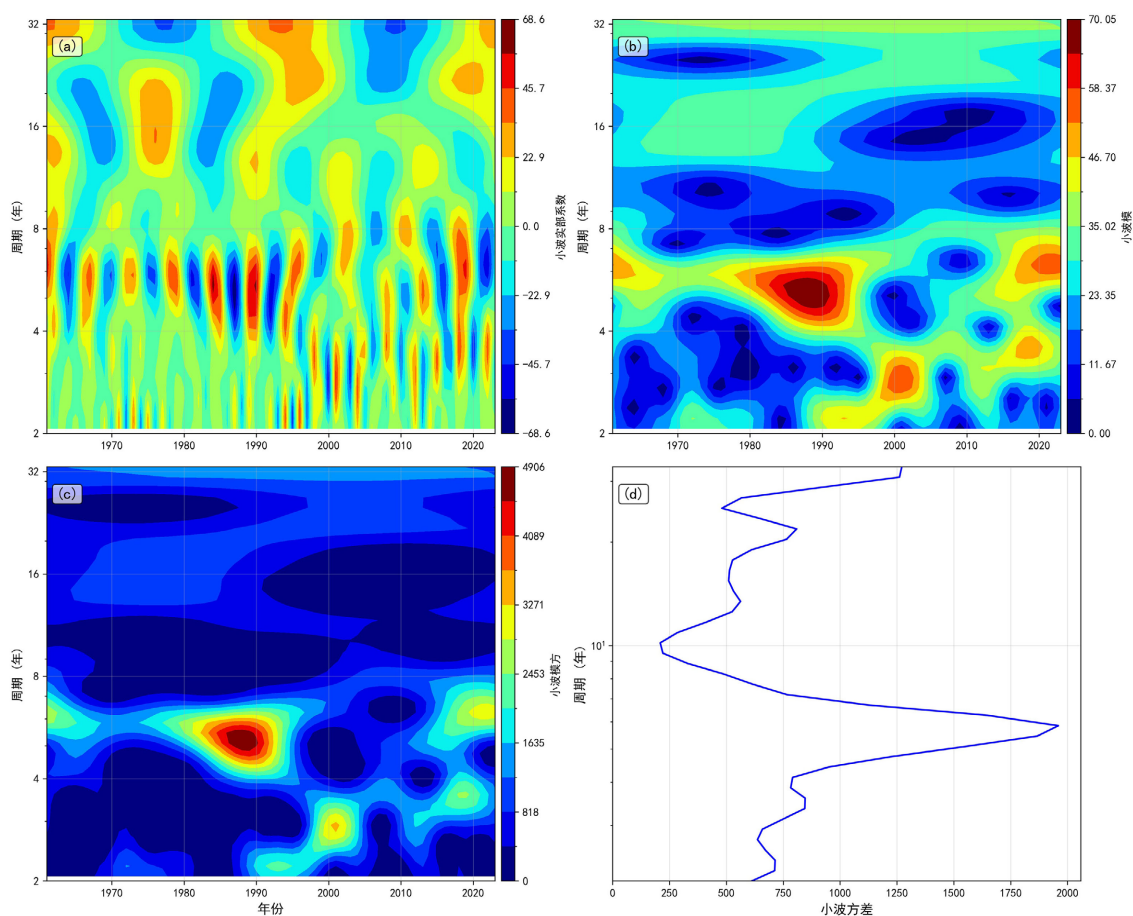


Figure 8. Wavelet analysis of summer nighttime precipitation over the northeastern Sichuan Basin during 1961~2023: (a) real-part coefficients; (b) modulus; (c) squared modulus; (d) wavelet variance

图 8. 1961~2023 年四川盆地东北部夏季夜雨小波分析图: (a) 小波实部系数; (b) 小波模; (c) 小波模方; (d) 小波方差

从图 8(a)小波实部系数分布来看, 在 2~4 年尺度上, 该振荡主要在 20 世纪 60 年代、80 年代中后期以及 2000 年以后表现出较强的阶段性变化特征。在 4~8 年尺度上, 小波实部振荡信号最明显, 特别是在 20 世纪 80 年代中后期至 90 年代初期以及 2010 年以后出现较明显的振荡中心, 表明该区域夜雨在该时间尺度上存在较稳定的周期变化。10~15 年尺度附近也存在一定振荡信号, 尤其在 20 世纪 80 年代后期至 90 年代中期表现较明显。此外, 16~32 年尺度也可见一定低频振荡信号。图 8(b)小波模图可见, 4~8 年尺度能量最突出, 2000 年以后, 4~8 年尺度仍存在局地能量增强区, 表明近几十年该区域夜雨年际波动仍较明显。相比之下, 10~15 年和 16~32 年尺度虽然也存在一定能量分布, 但其强度和连续性弱于 4~8 年尺度, 表明年代际振荡更多体现为低频背景变化, 而不是最主要的能量中心。图 8(c)小波模方图结果显示, 四川盆地东北部夏季夜雨在 4~8 年尺度上形成最强高能区, 与此同时, 2~4 年尺度虽存在局地高能量中心, 但持续时间较短, 表明该短周期振荡稳定性相对较弱。图 8(d)小波方差分布来看, 主要集中在 4 年、6 年、13 年、22 年和 30 年左右尺度附近。其中, 6 年左右周期对应的小波方差最大, 为该区域夏季夜雨变化的第一主周期。30 年左右周期也存在明显峰值, 作为第二主周期; 22 年左右周期为第三主周期。此外, 4 年左右周期存在波动, 但峰值相对较弱。

总体来看, 小波分析表明, 在 1961~2023 年这一时间段内四川盆地东北部, 6 年左右的周期变化特性比较明显, 其次是 30 年、22 年、4 年。

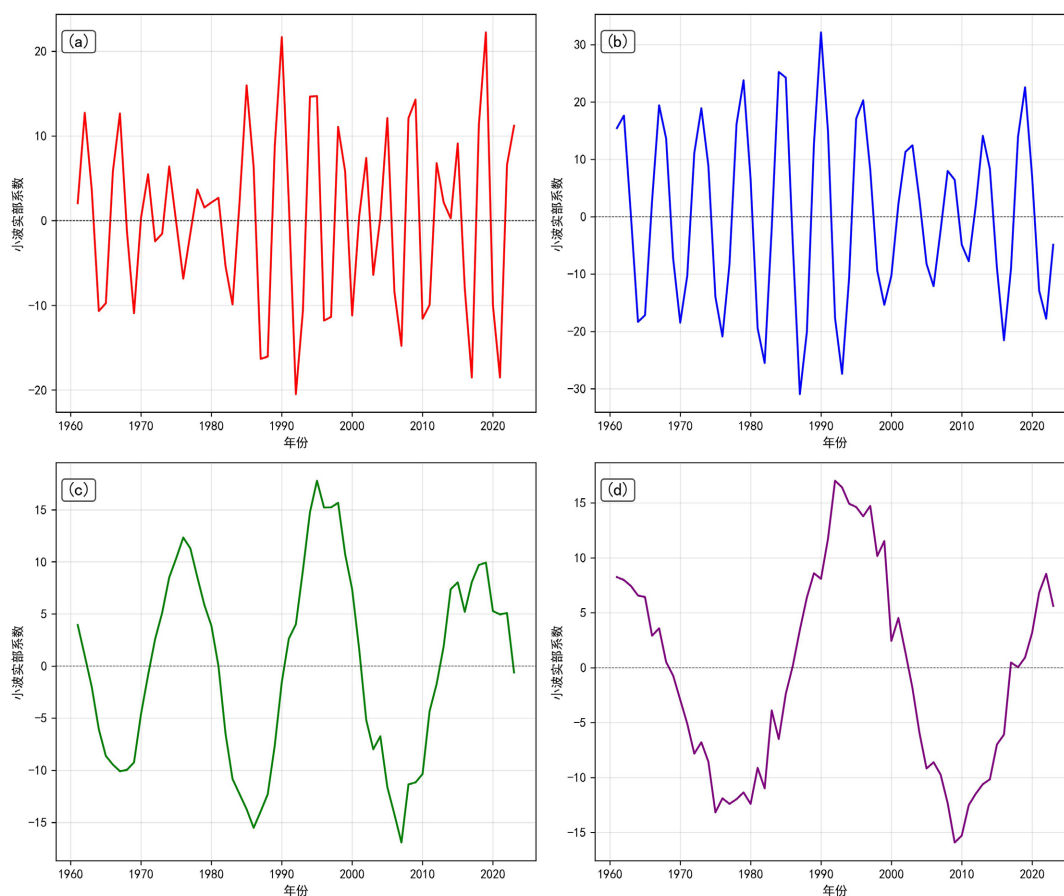


Figure 9. Wavelet coefficient series for the dominant periods of summer nighttime precipitation over the northeastern Sichuan Basin: (a) 4-year period; (b) 6-year period; (c) 22-year period; (d) 30-year period

图 9. 四川盆地东北部夏季夜雨量主周期小波系数图: (a) 4 年主周期小波系数; (b) 6 年主周期小波系数; (c) 22 年主周期小波系数; (d) 30 年主周期小波系数

从图 9 小波系数变化来看, 四川盆地东北部夏季夜雨在不同时间尺度上的丰枯转换特征存在明显差异。

在图 9(a) 4 年主周期尺度上, 经历了约 16 个丰水期与枯水期的转换。其中 1990 年前后和 2020 年前后正位相峰值较高, 表明这两个时期短周期尺度上的夜雨偏多特征较突出。特别是在 2015 年以后, 4 年尺度振荡幅度明显增强。在图 9(b) 6 年主周期尺度上, 大致经历了约 10 个丰水期与枯水期的转换, 其中在 1980 年代中后期至 1990 年代初期, 6 年尺度振荡幅度增强, 这一时期盆地东北部夜雨年际尺度丰枯转换较剧烈。在图 9(c) 22 年主周期尺度上, 经历了约 3 个丰水期与枯水期的转换, 该尺度下小波系数变化较平滑, 正负位相持续时间较长。在 1980 年代末至 1990 年代中后期, 22 年尺度振荡幅度明显增强, 表明该时期夜雨丰枯转换突出。在图 9(d) 30 年主周期尺度上, 1961~2023 年大致经历了约 2 个丰水期与枯水期的转换, 变化过程最平滑, 体现出明显的低频背景特征。

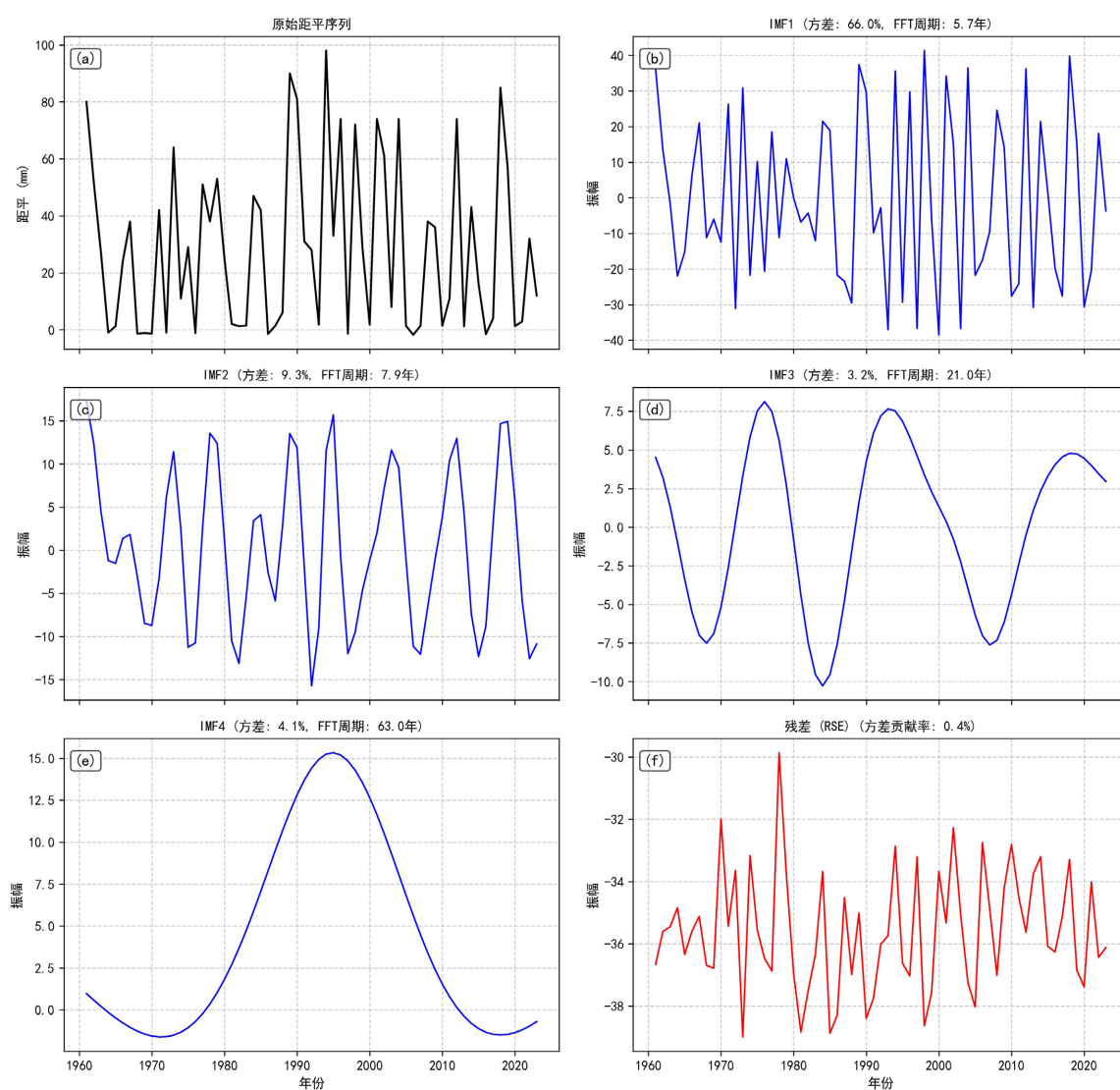


Figure 10. EEMD decomposition of the summer nighttime precipitation time series over the northeastern Sichuan Basin from 1961 to 2023: (a) original anomaly series, (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE (residual)

图 10. 1961~2023 年四川盆地东北部夏季夜雨时间序列 EEMD 分解图: (a) 原始距平序列; (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE

将四川盆地东北部夏季夜雨时间序列进行 EEMD 分解, 共得到图 10 的 4 个 IMF 分量和 1 个长期趋势项(RSE)。图 10(b) IMF1 分量方差贡献率为 66.0%, 为所有分量中贡献最大的主导模态, 该分量周期约为 5.7 年, 表现出明显的年际变化特征。图 10(c) IMF2 分量方差贡献率为 9.3%, 周期约为 7.9 年。前两个分量周期与 ENSO 约 2~7 年的典型变化尺度较为一致, 可能受到 ENSO, 同时与西太平洋副热带高压、印度洋海温异常等年代际海气作用等低频海气过程有关。图 10(d) IMF3 分量方差贡献率为 3.2%, 周期约为 21.0 年, 与 PDO、AMO 等年代际振荡周期具有一定对应关系。图 10(e) IMF4 分量为长期趋势项, 其方差贡献率为 4.1%。整体表现为先减弱后增强再减弱的变化趋势。图 10(f)残差趋势分量(RES)主要反映四川盆地整体夏季夜雨序列的长期变化趋势。从图中可见, 残差趋势分量整体呈现明显波动变化, 并未表现出持续单调增加或减少趋势, 而是存在一定阶段性起伏特征。其中 20 世纪 70 年代后期出现显著正值峰值, 整体的波动变化表明四川盆地东北部夏季夜雨长期变化具有较强的不稳定性和阶段性特征。由于 IMF1 贡献率超过 60%, 表明 5~6 年左右的短周期振荡是四川盆地东北部夏季夜雨变化最主要的周期尺度。

综合小波分析和 EEMD 分解结果, 可以得出四川盆地东北部有比较明显的 5~6 年的短周期变化, 其次是 30 年、22 年、4 年。

4.1.2. 四川盆地南部区

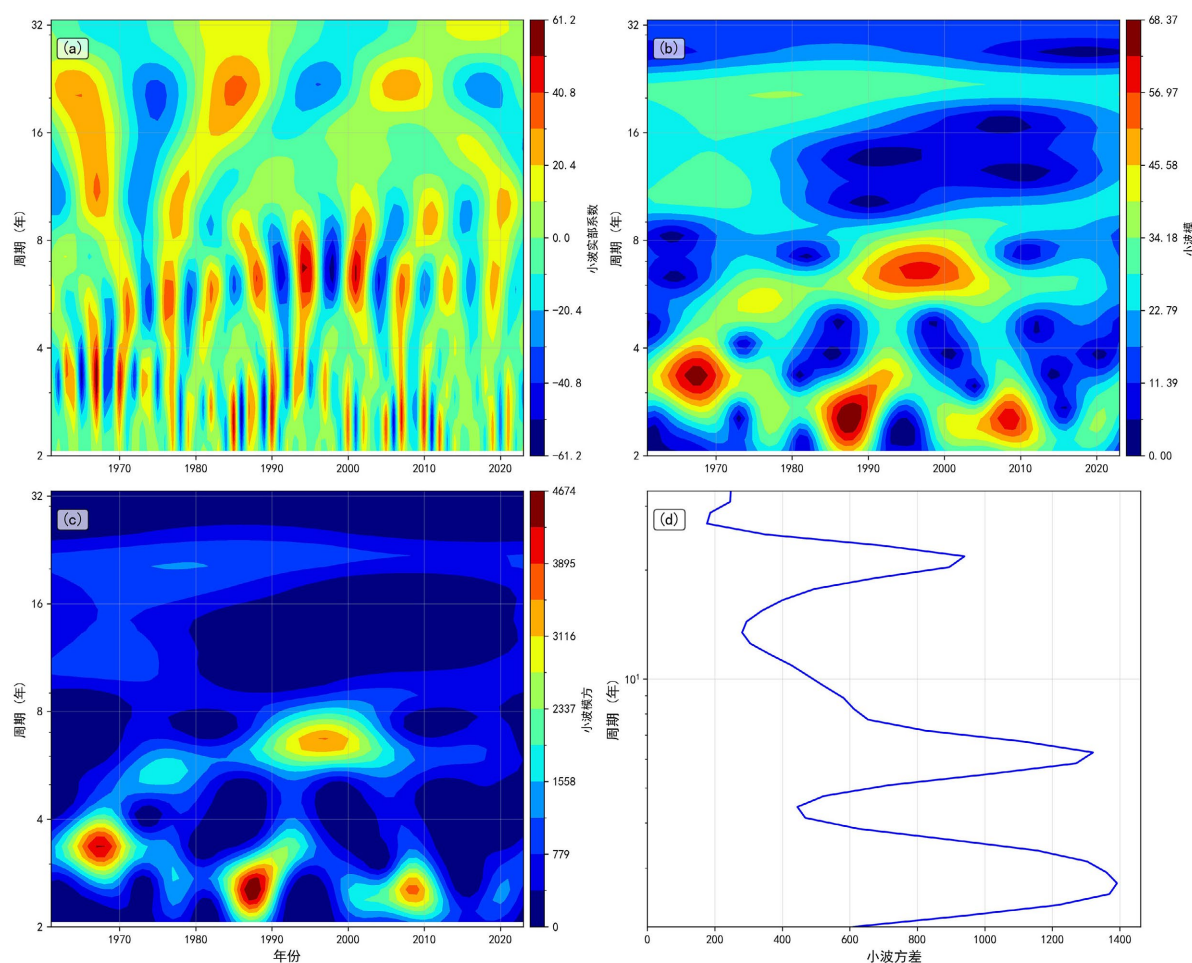


Figure 11. Wavelet analysis of summer nighttime precipitation over the southern Sichuan Basin during 1961~2023: (a) real-part coefficients; (b) modulus; (c) squared modulus; (d) wavelet variance

图 11. 1961~2023 年四川盆地南部夏季夜雨小波分析图: (a) 小波实部系数; (b) 小波模; (c) 小波模方; (d) 小波方差

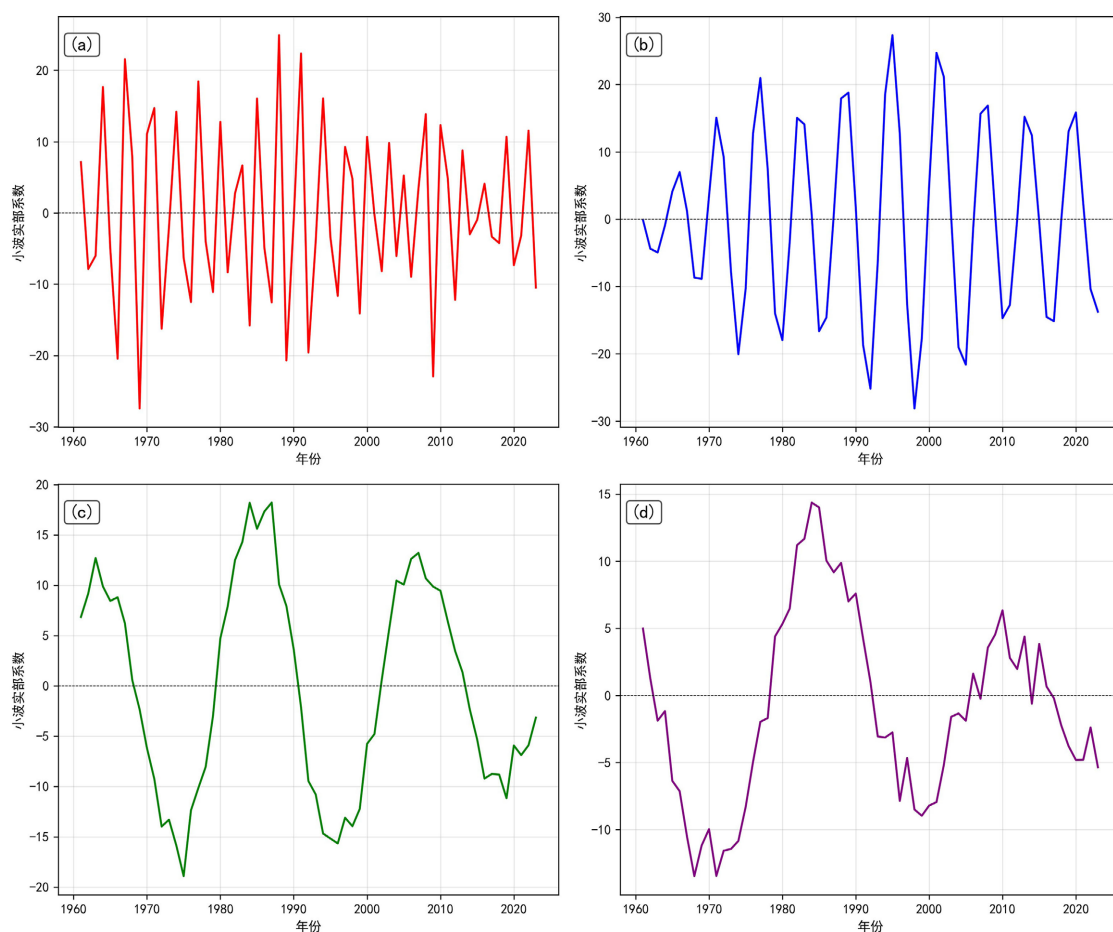


Figure 12. Wavelet coefficient series for the dominant periods of summer nighttime precipitation over the southern Sichuan Basin: (a) 3-year period; (b) 6-year period; (c) 22-year period; (d) 30-year period

图 12. 四川盆地南部夏季夜雨量主周期小波系数图: (a) 3 年主周期小波系数; (b) 6 年主周期小波系数; (c) 22 年主周期小波系数; (d) 30 年主周期小波系数

从图 11(a)小波实部系数分布来看, 在 2~4 年尺度上, 小波实部正负位相交替频繁, 表明四川盆地南部夏季夜雨在短周期尺度上波动较强。尤其在 20 世纪 60 年代中后期、80 年代中后期以及 2000 年以后表现较活跃。在 4~8 年尺度上, 小波实部振荡信号同样较明显, 20 世纪 80 年代末至 90 年代末出现较连续的位相转换过程, 表明该时期四川盆地南部夜雨年际振荡较活跃。10~16 年尺度附近也存在一定波动信号, 但连续性和强度相对较弱, 主要表现为阶段性变化。16~32 年尺度上, 图中可见较明显的低频变化。图 11(b)小波模图进一步揭示了各周期尺度振荡能量的时间分布特征。结果表明, 四川盆地南部夏季夜雨在 2~4 年和 4~8 年尺度上存在较强能量中心。此外, 在 16~32 年尺度上也存在一定能量分布, 尤其 20 年左右尺度附近较明显, 表明该区域夜雨变化具有一定年代际背景。但与短周期尺度相比, 年代际尺度能量分布更为平缓。图 11(c)小波模方图进一步确认了不同周期尺度的能量强弱特征。可见, 四川盆地南部夏季夜雨在 3 年左右和 6 年左右尺度上形成较明显高能区, 其中 3 年左右尺度能量最突出, 表明该尺度是南部夜雨变化的重要短周期振荡信号。6 年左右尺度在 20 世纪 90 年代中后期附近能量较强, 表明该时期年际振荡较显著。与此同时, 22 年左右尺度也存在一定能量峰值。从图 11(d)小波方差分布来看, 四川盆地南部夏季夜雨存在多个周期峰值, 主要集中在 3 年、6 年和 22 年左右尺度附近。其中, 3 年左右周期对应的小波方差最大, 为该区域夏季夜雨变化的第一主周期。除 3 年主周期外, 6 年左右周期

也存在明显峰值, 可作为第二主周期; 22 年左右周期为第三主周期。

总体来看, 小波分析表明, 在 1961~2023 年这一时间段内四川盆地南部, 3 年左右的周期变化特性比较明显。其次是 6 年、22 年。

从图 12 来看, 四川盆地南部夏季夜雨在各时间尺度上的丰枯转换特征存在明显差异。

在图 12(a) 3 年主周期尺度上, 经历了约 21 个丰水期与枯水期的转换。从图中可见, 该尺度在 1980 年代末至 1990 年代初, 3 年尺度振荡幅度明显增强, 表明该阶段四川盆地南部夜雨年际波动较剧烈。在图 12(b) 6 年主周期尺度上, 大致经历了约 10 个丰水期与枯水期的转换, 该尺度在 1980 年代末至 1990 年代中后期, 6 年尺度振荡幅度明显增强, 表明这一时期南部夜雨年际尺度上的丰枯转换较突出。在图 12(c) 22 年主周期尺度上, 大致经历了约 3 个丰水期与枯水期的转换, 该尺度下小波系数变化较平滑, 在 1980 年代初至 1990 年代初, 22 年尺度振荡幅度明显增强, 表明该阶段南部夜雨年代际尺度上的丰枯转换显著。在图 12(d) 30 年主周期尺度上, 大致经历了约 2 个丰水期与枯水期的转换, 体现出明显的低频背景特征。该尺度下, 在 1970 年代后期至 1980 年代中期, 30 年尺度振荡幅度明显增强。

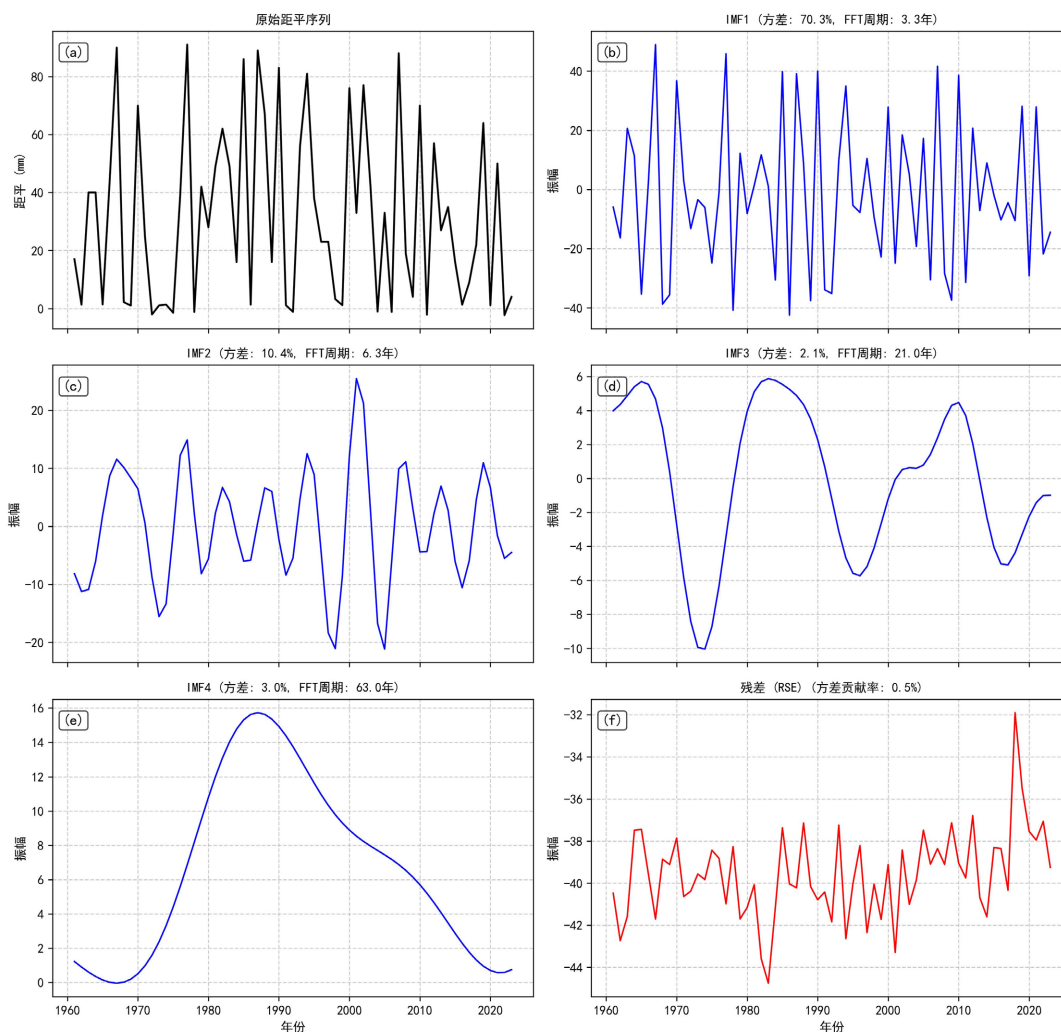


Figure 13. EEMD decomposition of the summer nighttime precipitation time series over the southern Sichuan Basin from 1961 to 2023: (a) original anomaly series; (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE (residual)

图 13. 1961~2023 年四川盆地南部夏季夜雨时间序列 EEMD 分解图: (a) 原始距平序列; (b) IMF1; (c) IMF2; (d) IMF3; (e) IMF4; (f) RSE

将四川盆地南部夏季夜雨时间序列进行 EEMD 分解, 共得到图 13 的 4 个 IMF 分量和 1 个长期趋势项(RSE)。图 13(b) IMF1 分量方差贡献率为 70.3%, 是所有分量中贡献最大的主导模态, 该分量周期约为 3.3 年, 属于典型的短周期年际振荡。图 13(c) IMF2 分量方差贡献率为 10.4%, 周期约为 6.3 年。前两个分量周期与 ENSO 典型振荡周期高度接近, 表明四川盆地南部夏季夜雨可能主要受热带太平洋海温异常及东亚夏季风异常的共同影响。图 13(d) MF3 分量方差贡献率为 2.1%, 周期约为 21.0 年, 图 13(e) IMF4 分量为长期趋势项, 方差贡献率为 3%, 整体表现为先减弱后增强再减弱的变化趋势。图 13(f)残差趋势分量(RES)主要反映四川盆地南部夏季夜雨序列的长期变化趋势。从图中可见, 残差趋势分量整体并未表现出持续单调增加或减少趋势, 存在一定阶段性起伏特征。其中 20 世纪 80 年代前期出现较明显负值中心, 而 2020 年前出现显著正值峰值, 表明四川盆地南部夏季夜雨长期变化具有较强的不稳定性 and 阶段性特征。由于 IMF1 贡献率超过 70%, 表明 3~4 年左右的短周期振荡是四川盆地南部夏季夜雨变化最主要的周期尺度。

综合小波分析和 EEMD 分解结果, 可以得出四川盆地南部有 3~4 年的短周期变化, 其次是 6 年、22 年。

5. 讨论

本文研究结果与已有研究总体一致, 并在此基础上进一步补充与完善。在空间分布方面, 四川盆地夏季夜雨总体呈现“西南高、东北低”的分布格局, 高值区集中于雅安-乐山-眉山一带, 与赵旋等[1]关于四川夏季降水空间分异特征的结论以及金霞[6]、范江琳等[8]、董自正等[9]关于夜雨高值区主要位于盆地西缘和川东北山区的研究结果基本一致。不同的是, 本文利用 REOF 方法识别出盆地西部、东北部和南部三个典型区域, 进一步细化了四川盆地夜雨空间分异特征。在时间变化方面, 本文发现 1961~2023 年四川盆地夏季夜雨量整体变化趋势不显著, 而夜雨强度持续增强、夜雨日数略有减少, 21 世纪以来高强度夜雨事件明显增多。这与张博和李国平[7]、范江琳等[8]关于夜雨增强的结论基本一致, 但本文基于更新资料进一步表明, 夜雨变化主要表现为降水强度增强而非降水频次增加, 即呈现“少而强”的演变特征, 对已有研究进行了补充和修正。在多时间尺度方面, 本文识别出盆地西部以 4~8 年和 16~32 年周期为主, 东北部兼具 5~6 年、13 年和 22 年周期, 南部则以 3~4 年短周期最为突出, 并伴有 6 年和 22 年周期。这一结果支持了孙伟等[2]提出的四川盆地存在准 20 年年代际振荡的结论, 同时进一步揭示了不同区域主导周期存在明显差异。结合 EEMD 分析, 各区域主要周期与 ENSO、PDO 等气候振荡时间尺度具有较好对应关系, 说明复杂地形可能对大尺度气候信号产生调制作用。总体而言, 本文基于 1961~2023 年最新资料, 更新了四川盆地夏季夜雨长期变化特征, 客观划分了典型夜雨区域, 并揭示了不同区域夜雨变化的主导周期及其可能的气候学意义, 为认识四川盆地夏季夜雨的时空演变及其气候响应提供了新的参考。

6. 结论

本文通过 REOF 空间模态分解、小波分析与 EEMD 分析方法, 系统揭示了四川盆地夏季夜雨的多尺度时空演变规律。研究表明, 四川盆地夏季夜雨呈现出显著的“西南高、东北低”空间格局, 并且表现出明确的区域分异特征。REOF 分解有效提取了三种具有局地物理意义的模态: 以雅安-乐山-眉山为核心的盆地西部区, 不仅是夜雨量(局部 > 700 mm)和频次(>50 天)的高值中心, 更是夜雨活动年代际增强趋势最显著的敏感区; 盆地东北部区则呈现出“低均值、高波动”的动态特征, 其年际振幅甚至在部分时段超过西部; 而南部区表现出与东北部、西部截然不同的相位变化, 凸显了复杂地形下局地环流对降水过程的深刻影响。在周期上, 西部区以稳定的 3~6 年准周期振荡为主导, 反映了该区域对太平洋海温

异常(ENSO)等大尺度强迫信号的规则性响应;而东北部与南部区则表现为多尺度振荡叠加、周期阶段性跃变的不稳定特征,揭示了地形与背景环流非线性相互作用的复杂性。

本研究对四川盆地防灾减灾具有一定参考价值:盆地西部夜雨强度和频次较高,山洪、地质灾害及城市内涝等夜间灾害风险突出,应加强高时空分辨率短临预报和精准预警;东北部夜雨年际波动明显,预警体系应兼顾异常年份的突发性变化;南部夜雨区域差异显著,应结合区域特征制定差异化防灾措施。同时,城乡排水设计、水库调度及农业灌溉等也应充分考虑夜间降水增强的影响。同时,仍存在一定局限性:本文主要基于地面气象站逐日降水资料开展统计分析,对高空环流、水汽输送及边界层结构等物理机制探讨不足,尚未形成完整的动力学解释;同时,复杂地形及城市化、土地利用变化等人为因素对夜雨演变的影响尚未得到充分量化。因此,未来研究可结合高空观测、再分析资料及高分辨率数值模式,深入分析地形动力、边界层过程及下垫面变化对夜雨形成和演变的影响,进一步区分自然气候变率与人为活动的贡献,为四川盆地暴雨预警、水资源管理及气候变化适应提供更加可靠的科学依据。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 白莹莹, 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.
- [4] 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.
- [5] 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]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [6] 金霞. 四川盆地降水日变化特征分析及成因研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.
- [7] 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.
- [8] 范江琳, 曹萍萍, 冯良敏, 等. 1961-2018 年四川盆地夜雨特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(4): 24-30.
- [9] 董自正, 毛文书, 白磊. 四川省近 60 年夏季夜雨时空变化特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2024, 39(5): 589-596.
- [10] 刘宇航, 毛文书. 四川省夏季夜雨的时间变化特征[J]. 自然科学, 2025, 13(6): 1139-1147.