

四川省冬季昼雨的多尺度时间变化特征

贡嘎旦桑¹, 毛文书¹, 彭育云²

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²简阳市雷家学校, 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

利用为了研究四川省昼雨冬季的区域分布特征, 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Morlet小波分析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年来冬季昼雨的时空分布特征。研究表明: (1) 四川省冬季昼雨位于川南部, 中心值达到40 mm; 冬季的昼雨日数最大值在川东南部, 中心值达到40 d; 冬季昼雨强度位于川西南山地, 中心值达到0.1 mm/h。 (2) 冬季昼雨的REOF分解结果表明: 可分为川西南山地、川东北、川西北、川中南和川西高原5个区域。 (3) 时间变化上, 冬季昼雨趋势线在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; 冬季昼雨日数趋势线在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; 冬季昼雨强度趋势线在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) 小波分解表明冬季时: 川西北有6年、14年周期变化; 川东北部存在4年、15年周期变化; 川西南山地有6年、14年周期变化; 川中南部存在8年、19年周期变化; 川西高原5年、12年周期变化。

关键词

四川省, 冬季昼雨, REOF分解, 小波分析

Multi-Scale Temporal Variation Characteristics of Winter Daytime Rain in Sichuan Province

Gonggadansang¹, Wenshu Mao¹, Yuyun Peng²

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

²Leijia School of Jianyang City, Chengdu Sichuan

Abstract

To investigate the spatial pattern of winter daytime rain across Sichuan Province, this study utilized daily precipitation observation data from 126 meteorological stations in Sichuan from 1961 to 2021 (a total of 61 years). Using a suite of modern climatic diagnostic tools—including Rotated Empirical Orthogonal Function (REOF) decomposition and Morlet wavelet analysis—we present a detailed picture of the temporal and spatial variability of winter daytime rain in Sichuan over the past six decades. The research indicates: (1) Winter daytime rain in Sichuan is anchored in the south, where totals top out near 40 mm, while the southeast logs the greatest number of wet days—about 40—and the southwest mountains register the highest intensities, peaking at roughly 0.1 mm/h. (2) The REOF decomposition results of winter daytime rain show that it can be divided into five regions: the southwestern Sichuan mountains, northeastern Sichuan, northwestern Sichuan, south-central Sichuan, and the western Sichuan plateau. (3) In terms of temporal variation, the trend line for winter daytime rain amount shifted from below average to above average in the 1990s, showing an increasing trend, which indicates a linear increase in daytime rainfall. The trend line for the number of winter daytime rain days shifted from above average to below average in the 1990s, showing a decreasing trend, which indicates a linear decrease in the number of rainy days. The trend line for the intensity of winter daytime rain shifted from below average to above average in the 1990s, showing an increasing trend, which indicates a linear intensification of rain intensity. (4) Wavelet analysis reveals periodic changes in winter for each region: Northwestern Sichuan has periods of 6 and 14 years; Northeastern Sichuan has periods of 4 and 15 years; the Southwestern Sichuan mountains have periods of 6 and 14 years; South-central Sichuan has periods of 8 and 19 years; and the Western Sichuan Plateau has periods of 5 and 12 years.

Keywords

Sichuan Province, Winter Daytime Rain, REOF Decomposition, Wavelet Analysis

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

在全球气候变暖的宏观背景下，气候变化成为国际社会广泛关注的核心议题。为精准预测未来气候演变趋势。地势东高西低，这种独特的地形地貌与气候系统的交互作用，正是导致降水格局复杂演变的关键因素。昼雨作为重要的降水类型，其演变规律对区域气候特征研判具有特殊价值。昼雨时空分布特征的变化深刻影响着水资源配置效率、农业种植结构调整等关键领域。观测数据显示，近年来四川省频繁出现干旱与高温并发的极端天气现象，这些极端事件已对作物生长、生态平衡及公共安全产生显著影响。对深化极端降水事件认知、完善区域防灾减灾体系与气候预测模型具有重要意义[1]。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。从现阶段不同研究方法研究发现：1) 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。研究得出，空间分布为：四川省昼雨呈现出明显的区域差异。冬季降水量分布整体自东向西减少，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[2]。刘福平等研究表明：降水量空间分布差异大，整体上东多西少、南多北少，且由东南向西北逐渐减少，降水中心位于乐山市西部[3]。用百分位法定义方法，研究发现，西南雨季极端昼雨频次在横断山脉东侧增加最明显，且午后强降水贡献率提升至 67% [4]。2) 用旋转经验正交函数分解(EOF)、趋势分析、小波分析发现，四川地区强降水的季节分配极不均匀，强降水大值中心和强降水高频中心都随着季节变化逐渐东移[5]。

四川昼雨影响因素的研究现状不同区域分别是：在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[6][7]。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[8]。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[9]。四川东北部青藏高原东部地形等对川东北部降水有影响[10]且秦巴山地的地形及动力、热力条件对川东北降水有影响[11]。四川西南部受西南季风对其也有一定影响[12]。当前四川降水研究存在明显的侧重与不足，主要集中于夜雨特征分析，而对昼雨的研究则多局限于时间变化特征，缺乏对空间分布规律和影响因素的深入探讨。

2. 资料和方法

2.1. 资料概括

本文所使用的降水资料为 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 时段内的站点气象站观测的降水量，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(12 月~翌年 2 月为冬季)。

2.2. 研究方法

EOF 分解[13]-[15]和 Morlet 小波分析[4]。

3. 冬季昼雨空间分布特征

3.1. 冬季昼雨特征量的空间分布

图 1(a)是反映了四川昼雨空间分布，可以看出以下结论，四川省昼雨在冬季的空间分布是不均的，在川东北部和川西南山地部昼雨多，而在川西高原昼雨少。最大值中心位于川南部，中心值达到 40 mm。总的来说，四川昼雨变化整体东多西少、南多北少与张博等[16]与刘福平等[3]研究结论一致。除此之外，曾波等[2]研究表明这种差异主要是由于地形、环流共同作用引起的。图 1(b)是四川省冬季昼雨日数空间分布，得出以下结论。冬季的昼雨日数不相同且不均匀。昼雨日数高值区在、雅安一带、川东北部和川东南部，而低值区位于川西南部。冬季时最大值在川南部，中心值达到 40 天总的来说，川西高原南部和川西南山地高原较少，川西高原北部昼雨日数分布较少；川东北部和川西南山地部昼雨日数分布较高；盆地中部平原昼雨分布较少。雅安一带，李跃清等[17]研究指出昼雨日数四季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)是冬季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。冬季的昼雨强度的高值在四川的东北部和西南山地部，低值区位于阿坝和绵阳北部区域。冬季时最大值位于川西南山地，中心值达到 0.1 mm/h。总的来说，与董欣等[18]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。图 1(d)可以看出，昼雨趋势系数的空间分布不均匀。冬季时在东北部和川西高原为正增长趋势、其余为负增长趋势。

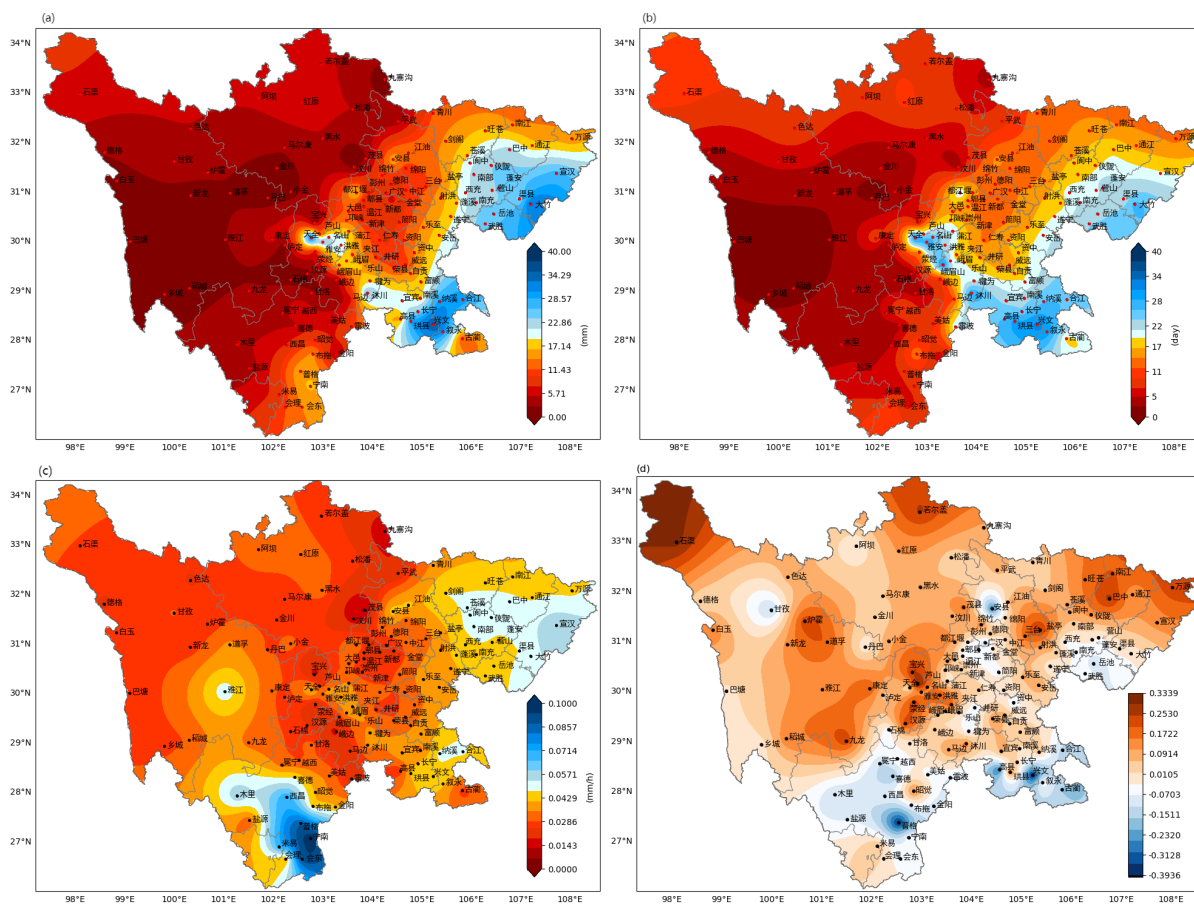


Figure 1. Spatial variation of daytime rainfall in four seasons in Sichuan from 1961 to 2021 ((a) Daytime rainfall; (b) Number of daytime rainfall days; (c) Intensity of daytime rainfall; (d) Trend coefficient of daytime rainfall)

图 1. 四川 1961~2021 年冬季昼雨的空间变化图((a) 昼雨; (b) 昼雨日数; (c) 昼雨强度; (d) 昼雨趋势系数)

3.2. 冬季昼雨 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, 将四川地区划分为 5 个区域(如图 2 所示)。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 个模态为川西南山地, 正的最高值在川西南山地, 负的最高值在小金站周围。2 分区对应第 2 个模态为川东北部, 正的最高值位于川东北部, 负的最高值在川西高原。3 分区对应第 1 个模态为川西北部, 正的最高值在川西北部, 负的最高值在川东北部。4 分区对应第 4 个模态川中部南部, 正的最高值位于川南部, 负的最高值位于阿坝地区。5 分区对应第 5 个模态为川西高原, 正最高值位于川西高原, 负的最高值位于川东部, 呈东西反向模态。对 REOF 分解的时间系数进行分析: 第 1 个数间系数正的有 24a、为负有 34a。其中 1995 年正值比较大, 增值比较明显; 1961 年、1981 年、2003 年、1999 年的负值比较大, 昼雨减少比较明显。第 2 个数间系数正的有 24a、为负有 33a。其中 1989 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 1969 年的负值比较大, 昼雨减少比较明显。第 3 个数间系数正的有 25a、为负有 37a。其中 1965 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 2012 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。第 4 个数间系数正的有 28a、为负有 30a。其中 2012 年、2013 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 1979 年、1998 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。第

5 个数间系数正的有 25a、为负有 35a。其中 2005 年、2015 年昼雨的正值比较大，增值比较明显；1974 年、2013 年昼雨的负值比较大，昼雨减少比较明显。从 2014 开始往后都为正值，昼雨增加。

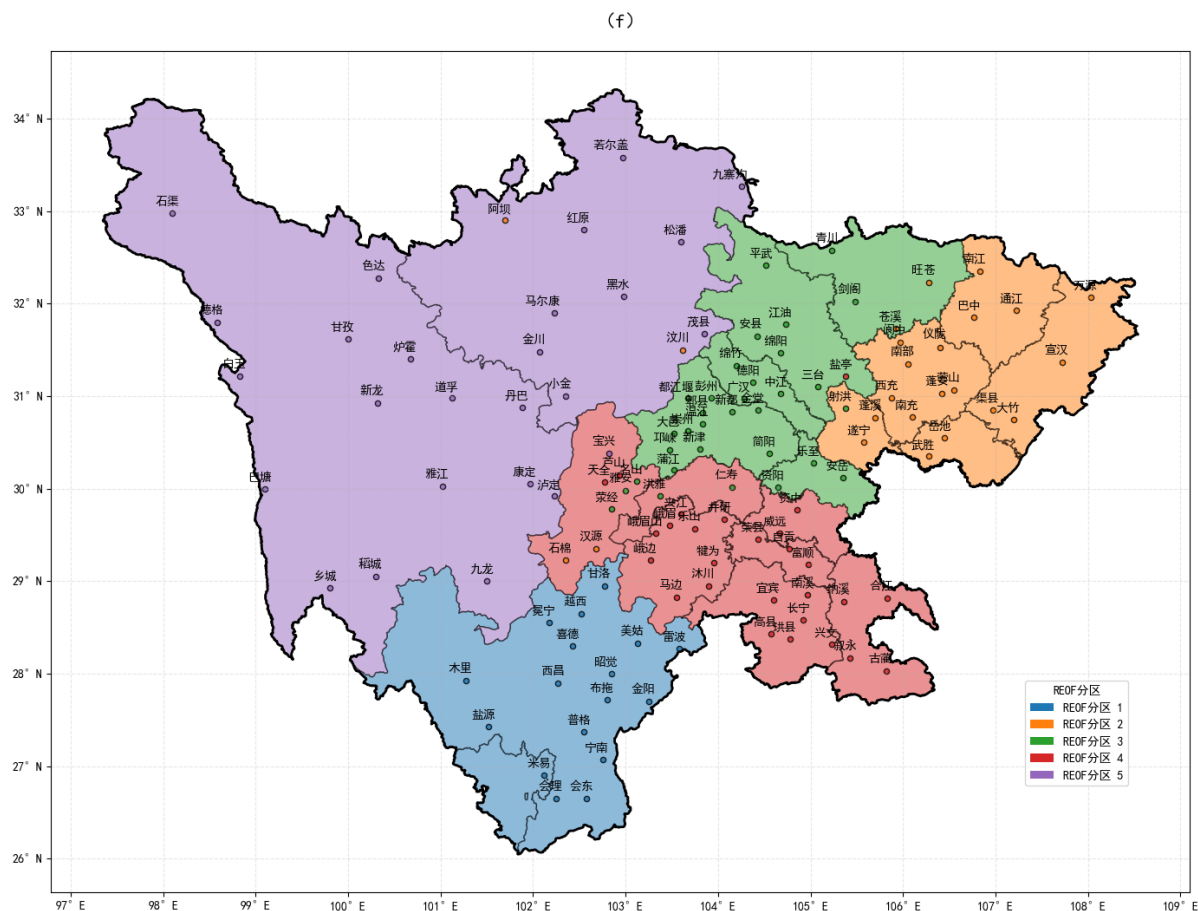
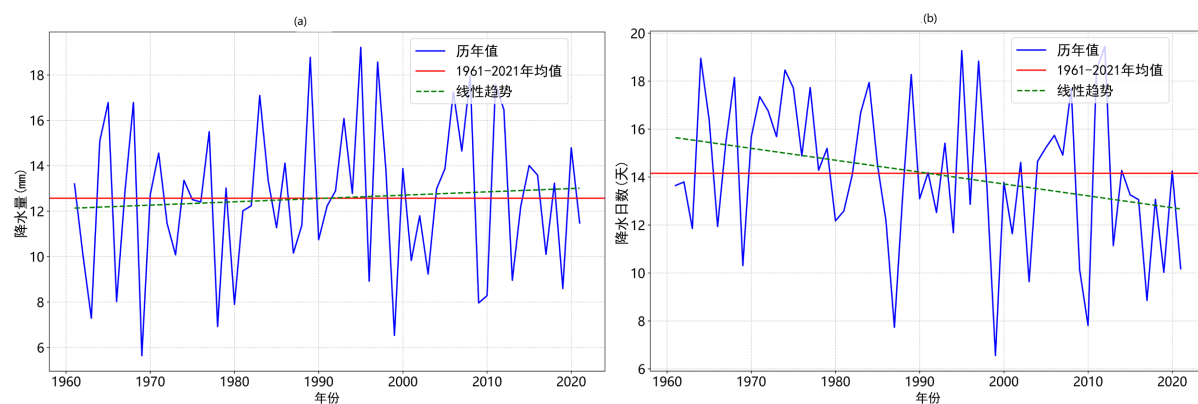


Figure 2. Zonal results of REOF decomposition in summer rain over Sichuan

图 2. 四川冬季昼雨 REOF 分解的前五个空间模态的空间分布分区结果

4. 冬季昼雨时间演变特征

4.1. 冬季昼雨时间变化



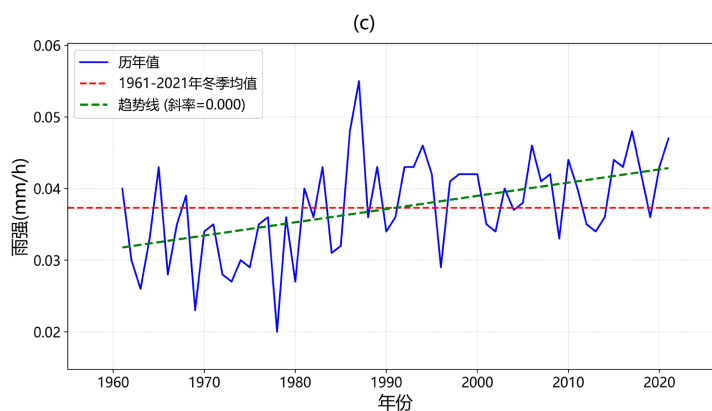
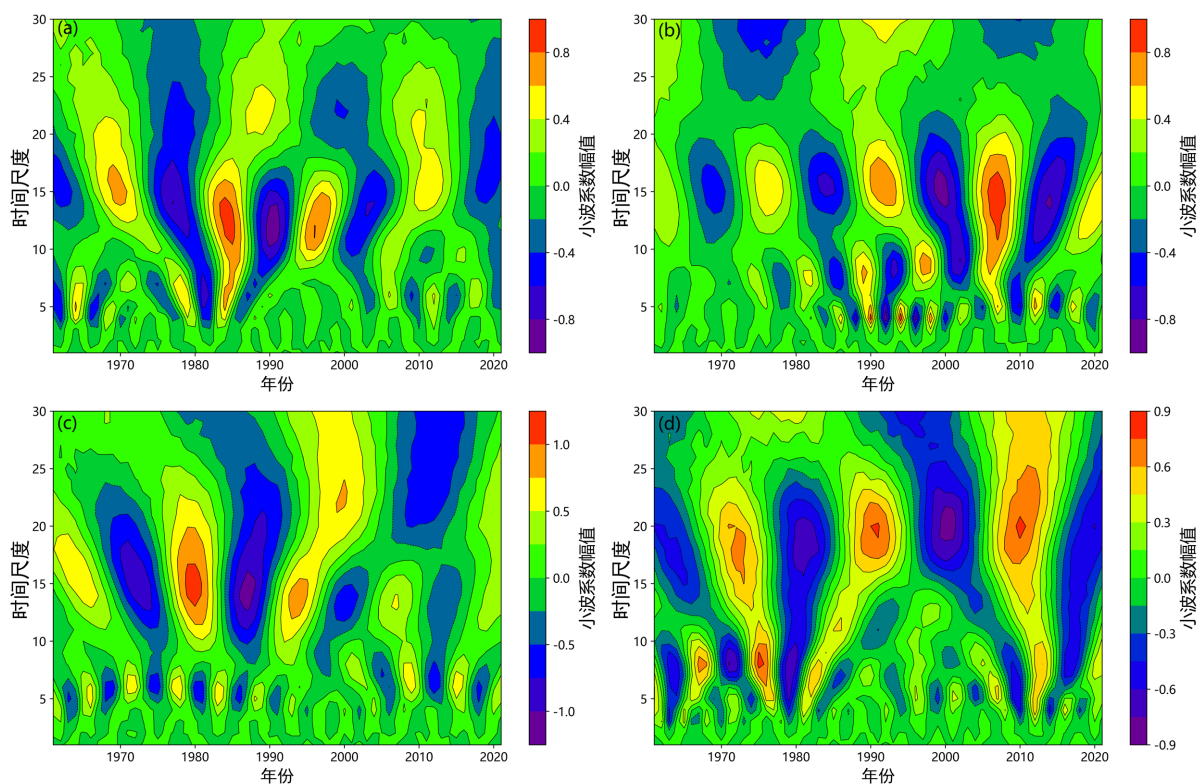


Figure 3. Time evolution of winter daytime rain characteristics in Sichuan from 1961 to 2021 (a) Daytime rain; (b) Number of days with daytime rain; (c) Intensity of daytime rain

图 3. 四川冬季昼雨特征量的时间演变(a) 昼雨; (b) 昼雨日数; (c) 昼雨强度

图 3(a)是从 1961~2022 年的冬季昼雨的时间变化, 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[2]人的研究结果一致。平均达 12.5 mm。图 3(b)是冬季昼雨日数的时间变化, 分析可得。昼雨日数的趋势线在 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, 平均为 14 天。图 3(c)是冬季昼雨强度的时间变化, 分析可得。昼雨强度的趋势线在 20 世纪 90 年代从低于均值后高于均值呈上升趋势, 表明降水日数线性增加。

4.2. 冬季昼雨小波分析



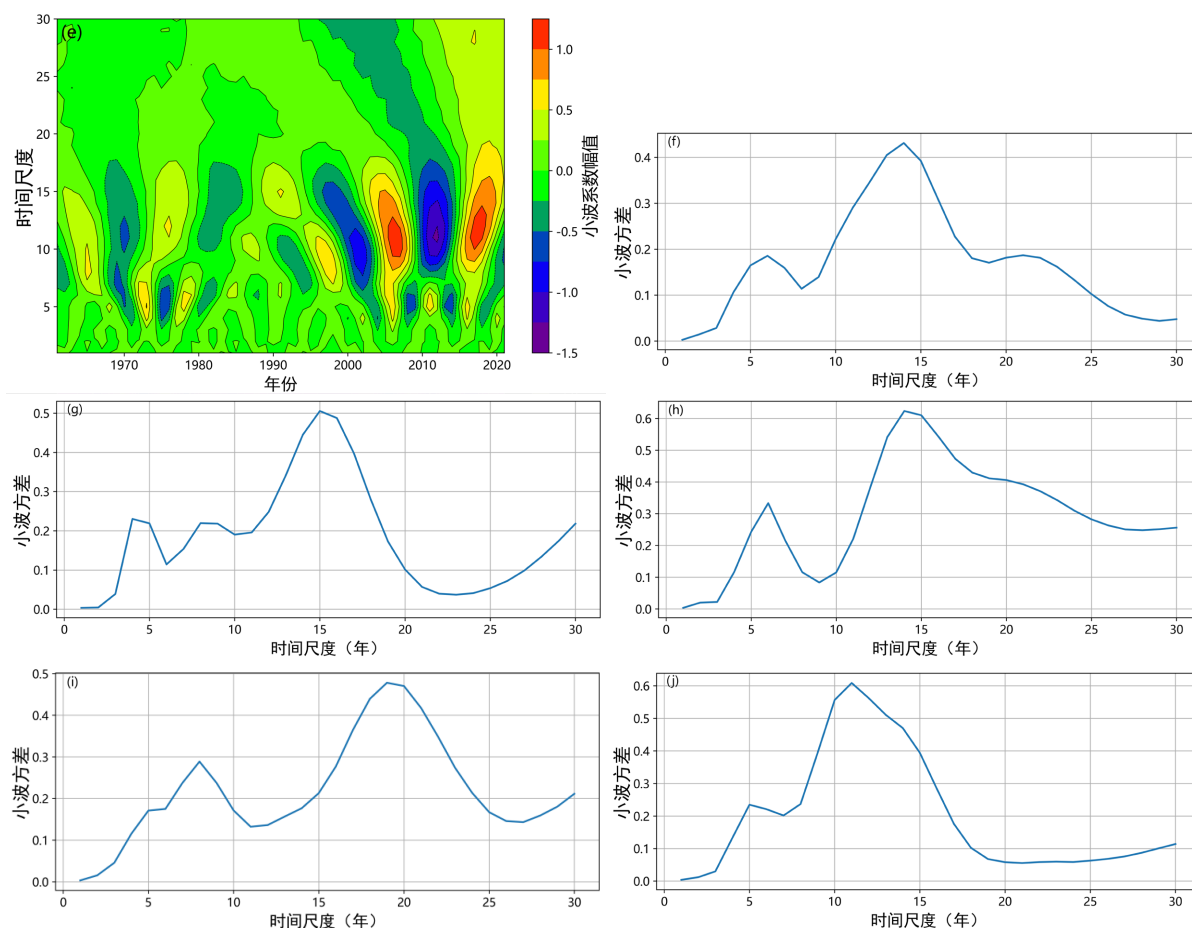


Figure 4. Real part contour map of wavelet coefficients for small wave analysis of winter daytime rainfall in Sichuan; (a) northwestern Sichuan; (b) northeastern Sichuan; (c) mountainous southwestern Sichuan; (d) central-southern Sichuan; (e) western Sichuan Plateau) and the wavelet variance map; (f) northwestern Sichuan; (g) northeastern Sichuan; (h) mountainous southwestern Sichuan; (i) central-southern Sichuan; (j) western Sichuan Plateau)

图 4. 四川冬季昼雨波系数实部等值线图((a) 川西北部; (b) 川东北部; (c) 川西南山地; (d) 川中南部; (e) 川西高原)和小波方差图((f) 川西北部; (g) 川东北部; (h) 川西南山地; (i) 川中南部; (j) 川西高原)

川西北部的小波分析如图 4(a)和方差图 4(f)结合分析,四川省的春季昼雨的第一主周期为 14a,第二主周期为 6a,分别为 10a~17a,在 20 世纪 80 年代周期明显增加后减弱,4a~10a 除在 20 世纪 90 年代,其他年都存在。川东北部的小波分析如图 4(b)和方差图 4(g)结合分析,四川省的春季昼雨的第一主周期为 15a,第二主周期为 4a,分别为 10a~20a,从 20 世纪 60 年代至 2021 年周期变化一直明显;准 4,从 20 世纪 80 年代到 2021 的周期变化明显。川西南山地的小波分析如图 4(c)和方差图 4(h)结合分析,四川省的春季昼雨的第一主周期为 14a,第二主周期为 6a,分别为 10a~20a,从 20 世纪 60 年代至 2021 年周期变化减弱;准 6a,除 20 世纪 90 年代的其他年周期变化较明显。川中南部的如小波分析如图 4(d)和方差图 4(i)结合分析,四川省的春季昼雨的第一主周期为 19a,第二主周期为 8a,分别为 15a~25a,从 20 世纪 60 年代至 2021 年周期变化一直明显;5a~10a,在 20 世纪 60 年代到 70 年代、2010~2020 年的周期变化明显。川西高原的小波分析如图 4(e)和方差图 4(j)结合分析,四川省的春季昼雨的第一主周期为 12a,第二主周期为 5a,分别为 10a~15a,从 20 世纪 60 年代至 70 年代、2000~2020 年周期变化明显;准 5a,在 20 世纪 70 年代、2010~2020 年的周期变化明显。

5. 结论

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

(1) 四川冬季的昼雨整体呈东多西少、南多北少。冬季位于川南部, 中心值达到 40 mm。冬季昼雨日数在川西高原南部和川西南山地较少; 川西高原北部分布较少; 川东北部和川南部分布较高; 盆地中部昼雨分布较少。冬季时昼雨强度在川东南部, 中心值达到 40 天。冬季时最大值位于川西南山地, 中心值达到 0.1 mm/h。

(2) 在 EOF 分析的基础上作 REOF 分解, 根据所得到的冬季 REOF 高载荷区、研究区地形及海拔等因素进行 5 个分区。1 分区为川西南山地、2 分区为川东北、3 分区川西北、4 分区川中南、5 分区为川西高原, 时间系数图中 1、3、4 模态的变化明显。

(3) 四川冬季昼雨趋势线在 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; 冬季昼雨日数趋势线在 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, 平均为 14 天; 四川冬季昼雨强度趋势线在 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) 小波分解分析表明冬季时: 川西北有 6 年、14 年周期变化; 川东北部存在 4 年、15 年周期变化; 川西南山地有 6 年、14 年周期变化; 川中南部存在 8 年、19 年周期变化; 川西高原 5 年、12 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, 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 常娜, 蔡宏珂. 四川地区强降水时空特征分析[J]. 地理科学研究, 2020, 9(3): 192-203.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李理, 刘俊杰, 朱文博, 等. 秦巴山地气候变化特征与旱涝区域响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 318-326.
- [11] 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.
- [12] 李刚, 江晓华, 闻斌, 等. 四川南部秋季降水变化及相应大气环流异常特征[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 1673-1891.
- [13] Richman, M.B. (1986) Rotation of Principal Components. *Journal of Climatology*, **6**, 293-335.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>
- [14] Kaiser, H.F. (1958) The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. *Psychometrika*, **23**, 187-200.
<https://doi.org/10.1007/bf02289233>
- [15] Wilks, D.S. (2011) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 3rd Edition, Academic Press.

-
- [16] 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.
 - [17] 李跃清, 张晓春. “雅安天漏”研究进展[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 289-295.
 - [18] 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.