

四川省春季昼雨气候变化特征

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8月20日; 发布日期: 2025年8月28日

摘要

为了研究四川省春季昼雨的区域分布特征, 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)、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年来春季昼雨的时空分布特征。研究表明: (1) 四川省春季昼雨空间分布不均匀, 春季昼雨空间分布均表现为东多西少、南多北少的型态, 其中春季时的大值中心位于东北部, 中心达到340 mm。春季的昼雨日数最大值在康定、雅安、峨眉一带, 中心值达到40天。春季的昼雨强度大值分布位于川东部, 大致中心达到0.2 mm/h。(2) 春季昼雨的REOF分解结果表明: 春季昼雨可分为川南、川东北、川西北、川西高原和川西南山地5个区域。(3) 时间变化上, 春季昼雨趋势线在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; 春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, 而昼雨强度与之相反, 春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) 小波分析得出, 春季时川西北有准8年、准18年周期变化; 川西南山地有准8年、准25年周期变化; 川西高原有准7年、准21年周期变化; 川南有准7年、准15年周期变化; 川东北部有准6年、准16年周期变化。

关键词

四川省, 春季昼雨, REOF分解, 小波分析

Climate Change Characteristics of Spring Daytime Rain in Sichuan Province

Gonggadansang¹, Wenshu Mao¹, Yuhua Peng²

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

²Jin Ma YunLong School of JianYang, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 17th, 2025; accepted: Aug. 20th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

To study the regional distribution characteristics of spring daytime rainfall in Sichuan Province, data from 126 meteorological stations across Sichuan Province over a period of 61 years (1961-2021) were utilized. Using modern climate diagnostic statistical methods, including rotated empirical orthogonal function decomposition (REOF decomposition) and Morlet wavelet analysis, a detailed analysis was conducted on the spatiotemporal distribution characteristics of spring daytime rainfall in Sichuan Province over the past 61 years. The study reveals: (1) The spatial distribution of spring daytime rainfall in Sichuan Province is uneven, generally showing more rainfall in the east and west, and more in the south and north. The peak value during spring is located in the northeastern part of the province, reaching 340 mm. The area with the highest number of spring daytime rainfall days is around Kangding, Ya'an, and Emei, with a central value of 40 days. The maximum intensity of spring daytime rainfall is found in eastern Sichuan, with a central value of approximately 0.2 mm/h. (2) The REOF decomposition results indicate that spring daytime rainfall can be divided into five regions: southern Sichuan, northeastern Sichuan, northwestern Sichuan, western Sichuan Plateau, and southwestern Sichuan mountainous areas. (3) In terms of time changes, the trend line for spring daytime rainfall shifted from below to above the mean in the 1990s, indicating a linear increase in daytime rainfall. The trend line for the number of spring daytime rainfall days shifted from above to below the mean in the 1990s, indicating a linear decrease in the number of rainy days. However, the intensity of daytime rainfall showed an opposite trend, with the trend line for spring daytime rainfall intensity shifting from below to above the mean in the 1990s, indicating a linear increase in daytime rainfall intensity. (4) According to wavelet analysis, in spring, the northwest of Sichuan exhibits quasi-8-year and quasi-18-year cycles; the mountainous areas of southwestern Sichuan show quasi-8-year and quasi-25-year cycles; the western plateau of Sichuan has quasi-7-year and quasi-21-year cycles; southern Sichuan has quasi-7-year and quasi-15-year cycles; and northeastern Sichuan has quasi-6-year and quasi-16-year cycles.

Keywords

Sichuan Province, Spring Day 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

伴随全球气温持续升高，人类正面临愈发严峻的气候与环境挑战[1]。作为青藏、川西高原与东部平原的过渡地带，其特殊的地理位置与复杂地形，塑造了独特的气候系统。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) 观测数据分析与统计方法：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。春季降水量分布整体自东向西减少，其中松潘高原及沿盆地西部边缘地区为多个降水大值中心。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]。采用 EOF 分解结合旋转主成分分析、小波分析、突变检验方法。研究发现，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]。2) 环流诊断与动力分析。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。在春季,昼雨量较少,主要集中在盆地[4]。用水汽通量散度诊断,研究表明,雅安地区昼雨的水汽大多都来自孟加拉湾,高原东侧地形抬升,强降水集中在海拔 500~1500 m 区域[5]。3) 多源数据融合与新观测技术:用 TRMM 与地面数据融合,研究显示,四川降水变化存在区域差异,四川降水整体空间分布呈东西振荡,盆地内降水异常[6]。

四川地区作为我国西南部的重要地理单元,其降水时空分布特征对该区域的水资源管理、农业生产和生态环境保护等方面具有重要影响[7]影响四川昼雨的因素在不同区域各有不同:研究表明在四川西部川西高原与西南孟加拉湾和南海暖湿气流输送水汽密切相关,并强调复杂的地形对暖湿气流有抬升作用,另外天气系统也有影响[8]-[10]。四川中部大气环流的变化,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]。四川东北部受秦巴山地的地形及动力、热力条件对川东北降水有影响[13]。西南季风对四川西南山地有一定影响[14]。当前四川降水研究夜雨较多、昼雨较少,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

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,其站点分布如图 1 所示,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(3~5 月为春季)。

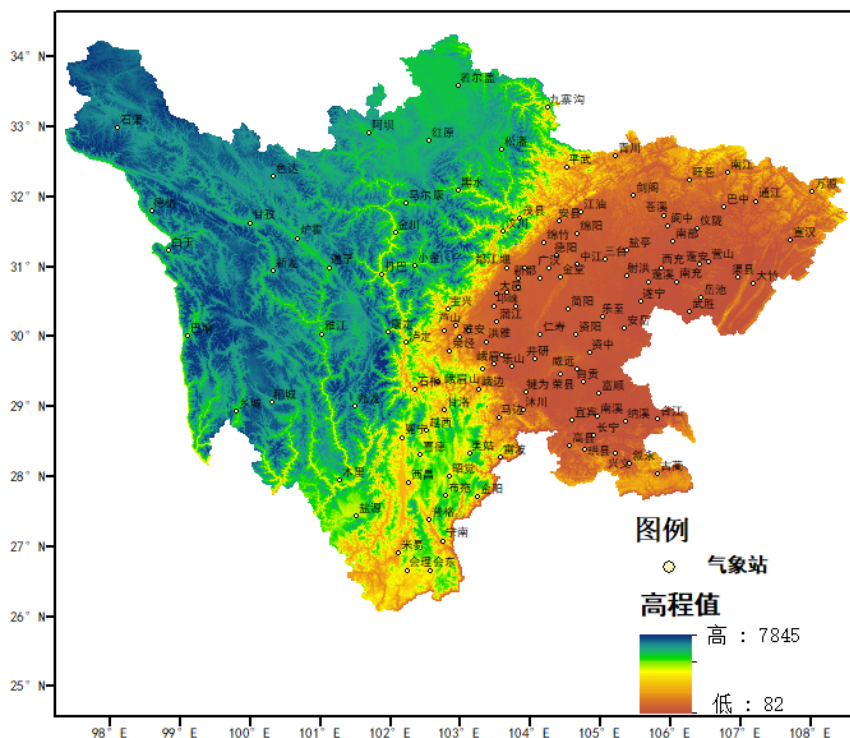


Figure 1. Site distribution map of diurnal rainfall data in Sichuan Province
图 1. 四川省昼雨降水资料的站点分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. REOF 分解

旋转经验正交函数(REOF)分解在传统 EOF 基础上,通过正交旋转(如极大方差法)简化空间模态结构[15]。对于标准化数据矩阵 $X_{m \times n}$ (m 个站点, n 次观测),其分解形式为:

$$X = AF + U \quad (1)$$

通过[16]的极大方差法(Varimax)对 A 实施正交旋转,求解旋转矩阵 T 使目标函数

$$\phi = \sum_{j=1}^p \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_{ij}^*)^4 - \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_{ij}^*)^2 \right)^2 \right] \quad (2)$$

最大化,最终获得旋转后的载荷矩阵

$$A^* = AT \quad (T^T T = I) \quad (3)$$

使高载荷值集中于少数空间点位(阈值设定为 $|a_{ij}^*| > 0.5$)基于旋转后的 REOF 分量(A^* 的列向量 REOF1-REOF5),采用 K-means 算法[17]划分气候区域。具体步骤包括:(1) 标准化各 REOF 分量至零均值单位方差;(2) 设定聚类数 $k = 5$,初始化质心为高载荷站点(载荷绝对值前 5%的点位);(3) 以欧式距离为度量,迭代优化至质心变化小于 10^{-4} ;(4) 通过轮廓系数(silhouette score > 0.6)验证聚类有效性。最终将四川省 21 个地级市归属至最近站点的所属气候分区,完成空间区划。

2.2.2. 小波分析

本研究采用 Morlet 连续小波变换方法分析气象要素时间序列的多尺度变化特征。Morlet 小波作为复值解析小波,具有明确的物理意义和良好的时频局部化特性,其数学表达式为:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad \omega_0 = 1.5 \quad (4)$$

式中 $\omega_0 = 1.5$ 为小波的中心频率,这一参数选择在时域分辨率和频域分辨率之间取得了最佳平衡,特别适合非平稳气象信号的分析。对于离散化的气象观测序列 $x(t_k)$ ($k = 1, 2, \dots, N$),其连续小波变换定义为:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{k=1}^N x[k] \cdot \psi^* \left(\frac{k\Delta t - b}{a} \right) \quad (5)$$

其中 a 为尺度参数,与物理周期存在对应关系; b 为平移参数,反映时间位置; Δt 为采样间隔; ψ^* 表示复 Morlet 小波的共轭复数。通过系统地改变尺度参数 a ,可以获得信号在不同时间尺度上的时频特征。为定量表征各尺度上的波动能量分布,计算小波方差:

$$\text{Var}(a) = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N |W(a, b)|^2 \quad (6)$$

该统计量反映了信号能量随尺度的分布情况,本研究选取 1~30 年的尺度范围进行分析,这一区间涵盖了气象要素变化的典型周期(如年际变化、年代际振荡等),考虑到边界效应的影响,引入影响锥(Cone of Influence, COI)的概念,定义有效分析区域为 $a\sqrt{2}$ 该区域的结果视为不可靠。

3. 春季昼雨空间分布特征

3.1. 春季昼雨特征量的空间分布

图 2 的(a)是反映了四川春季昼雨空间分布,可以看出以下结论,四川省昼雨在的空间分布是不均的,昼雨大体由西南向东北递增;其中大值中心位于东北部,中心达到 340 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[4]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2的(b)是四川省春季昼雨日数空间分布,得出以下结论。昼雨日数值高值区位于在川东北部、川西北部、川西南山地中部中部的峨眉与康定一带,中心值达到40天。低值区位于攀西高原和甘孜南部。总的来说,川西高原南部和川西南山地高原昼雨日数较少,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高;盆地中部平原昼雨日数分布较少。雅安一带,李跃清等[5]研究指出昼雨日数四季都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2的(c)是春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。春季的昼雨强度的高值在四川的东北部和西南山地部,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。低值区位于川西高原西北部。春季的降水强度最大值分布位于川东部,大致中心分别达到0.2 mm/h。由图2的(d)可以看出,昼雨趋势系数的空间分布不均匀。分布从川东部负增长趋势逐渐向川西高原北部变为正增长趋势。

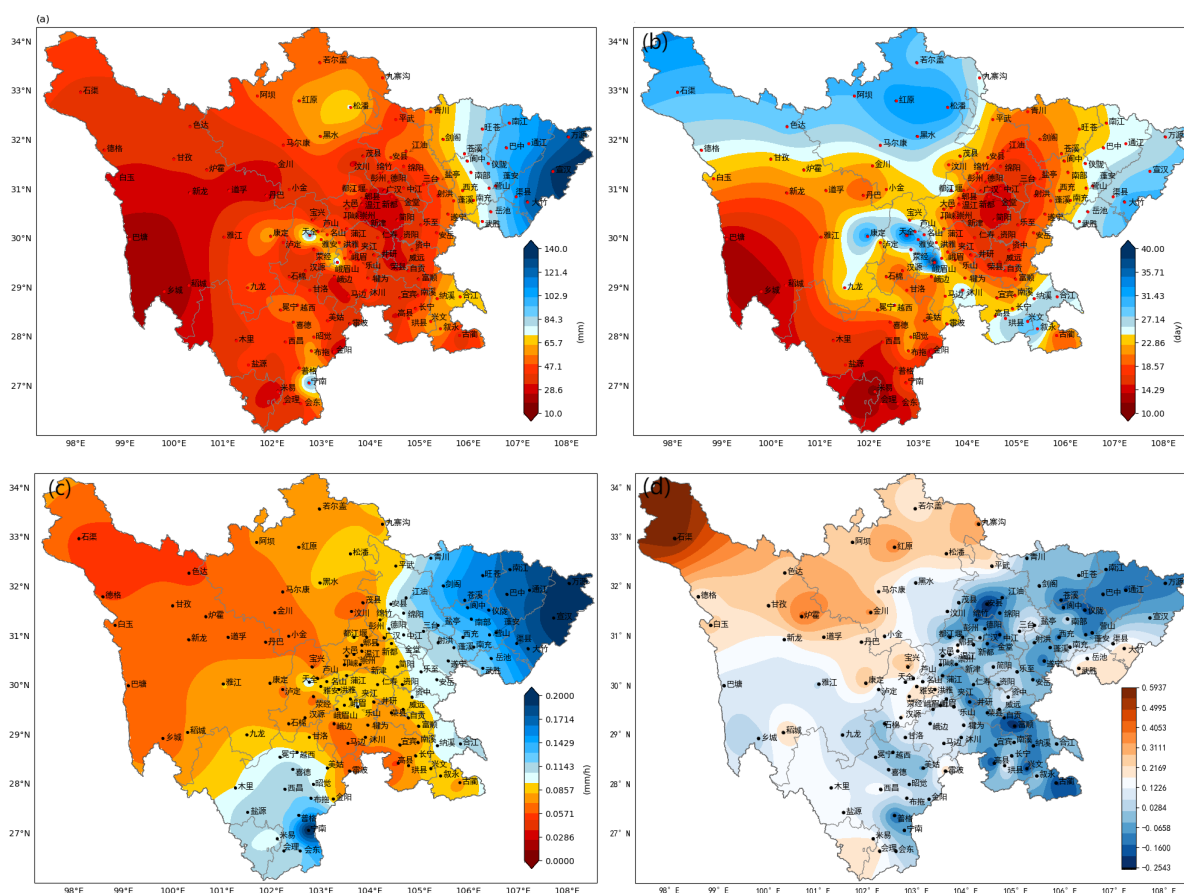


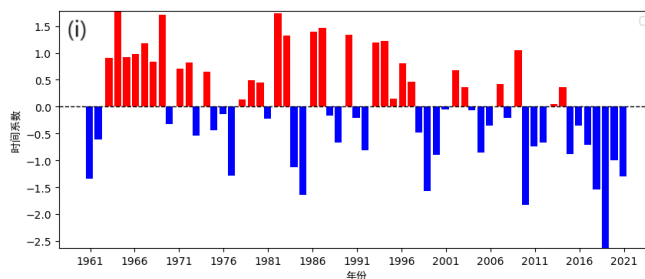
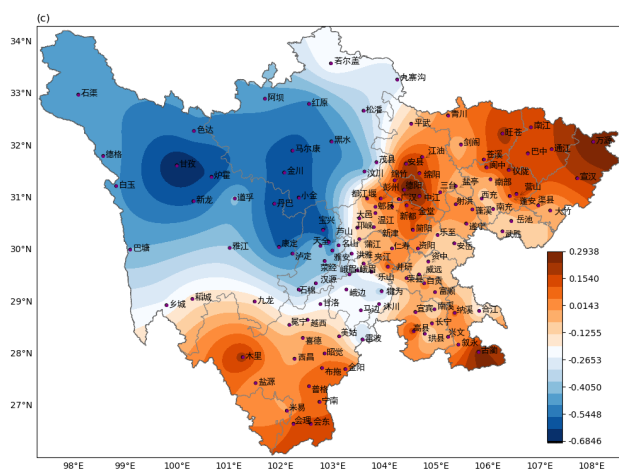
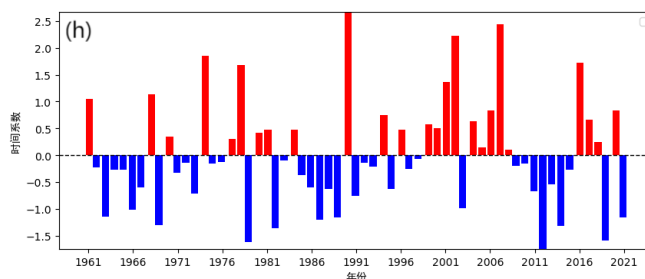
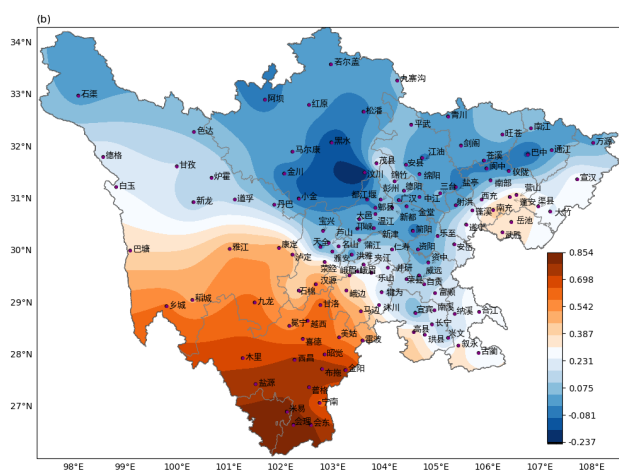
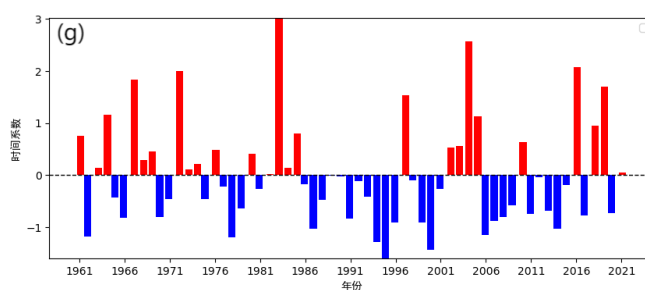
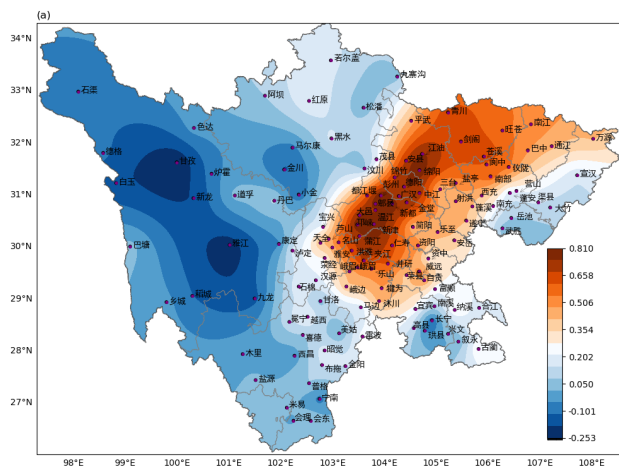
Figure 2. Spatial variation of spring daytime rainfall characteristics in Sichuan province. (a) Daytime rainfall; (b) Number of daytime rainfall days; (c) Intensity of daytime rainfall; (d) Trend coefficient of daytime rainfall

图 2. 四川省春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. 春季昼雨 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。按照图 3(a),图 3(b)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。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 区对应第 2 个模态为川西南山地, 正最大值位于川西南山地, 负最大值位于阿坝地区, 呈南北反向模态; 2 区对应第 5 个模态为川东北, 正的最大值位于川东北, 负的正最大值位于川西高原西北部; 3 区对应第 1 个模态为川西北部, 正最大值在川东部, 负最大值在川西高原。4 区对应第 3 模态为川西高原地区, 正的最大值位于川东北, 负的最大值位于川西高原。5 区对应第 4 模态为



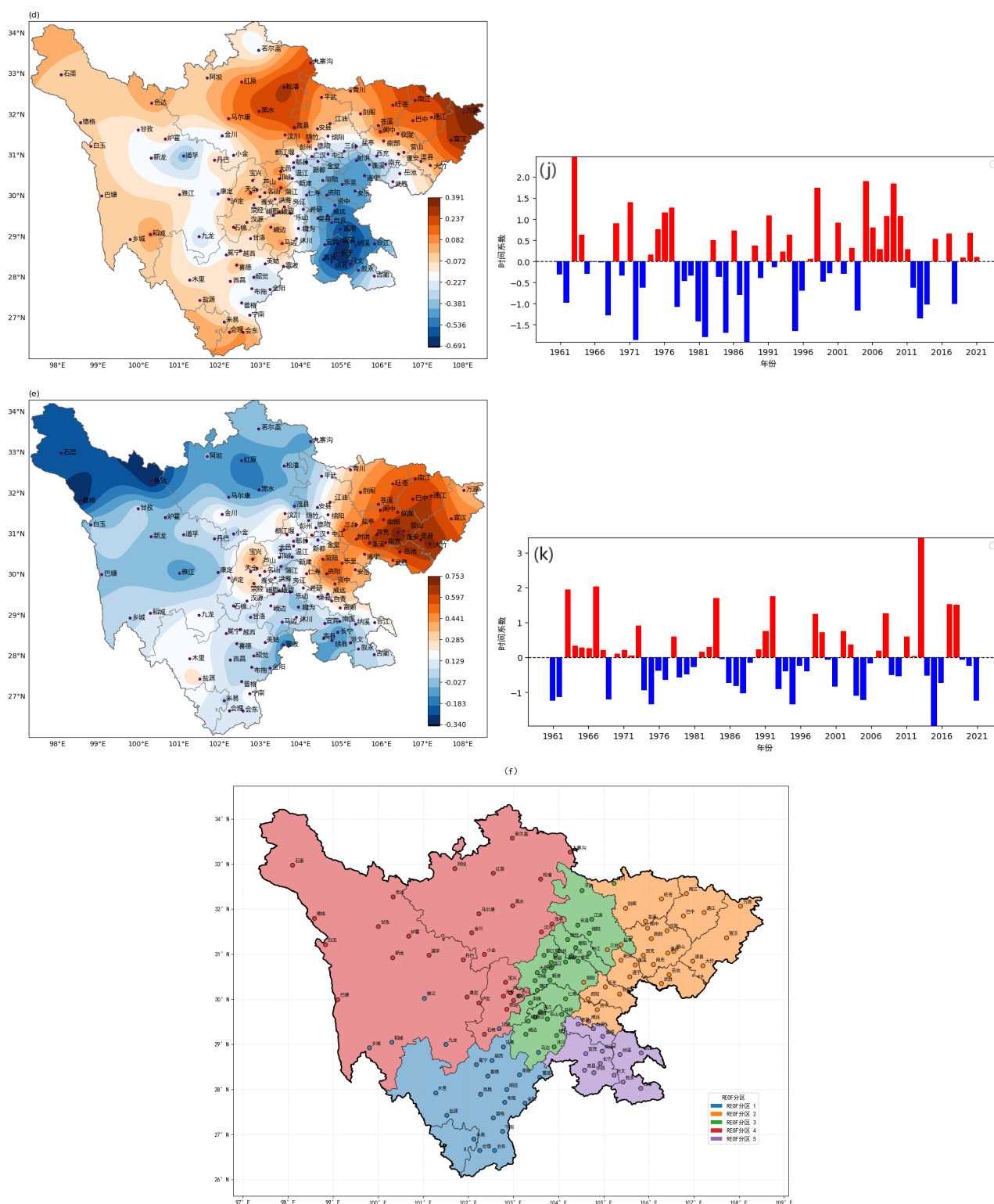


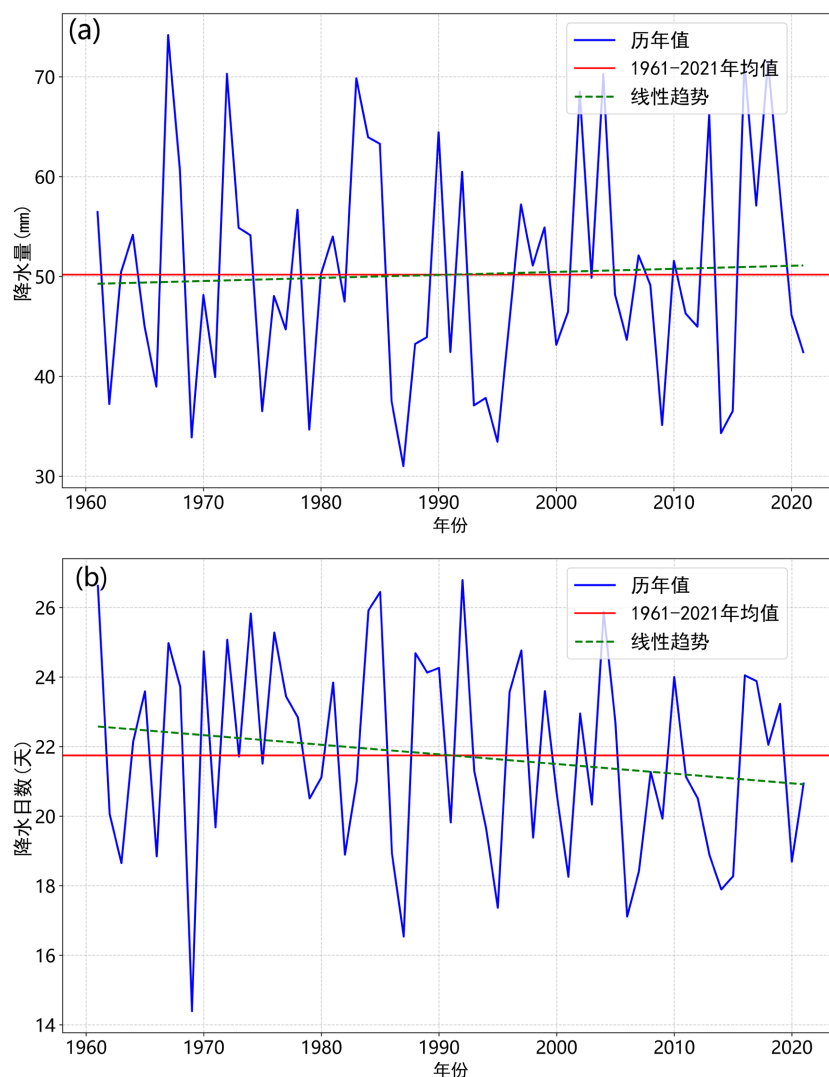
Figure 3. Spatial distribution of the top five spatial modes and corresponding temporal coefficients of REOF decomposition for spring daytime rain in Sichuan. ((a) (g) Mode 1 and its time coefficient; (b) (h) Mode 2 and its time coefficient; (c) (i) Mode 3 and its time coefficient; (d) (j) Mode 4 and its time coefficient; (e) (k) Mode 5 and its time coefficient diagram; (f) Partition results)

图 3. 四川春季昼雨 REOF 分解的前 5 个空间模态的空间分布及相应的时间系数。((a) (g) 第 1 模态及时间系数; (b) (h) 第 2 模态及时间系数; (c) (i) 第 3 模态及时间系数; (d) (j) 第 4 模态及时间系数; (e) (k) 第 5 模态及时间系数图; (f) 分区结果)

川南部, 正的最大值位于川东北, 负最大值位于川南。对 REOF 分解的时间系数进行分析: 由第 1 个数间系数图 3(g)可知, 时间系数序列图为正的有 24a、为负有 32a。其中 1983 年、2004 年昼雨正值比较大, 增值比较明显; 1995 年、2000 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。由第 2 个数间系数图 3(h)可知, 时间系数序列图为正的有 25a、为负有 35a。其中 1990 年、2002 年、2007 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 1979 年、2012 年、2019 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。由第 3 个数间系数图 3(i)可知, 时间系数序列图为正的有 28a、为负有 31a。其中 1964 年、1969 年、1982 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 2010 年、2019 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。从 2014 年开始都为负值, 昼雨呈减少趋势。由第 4 个数间系数图 3(j)可知, 时间系数序列图为正的有 31a、为负有 29a。其中 1963 年、2005 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 1972 年、1988 年昼雨的负值比较大, 昼雨减少比较明显。由第 5 个数间系数图 3(k)可知, 时间系数序列图为正的有 26a、为负有 31a。其中 2013 年昼雨的正值比较大, 增值比较明显; 2015 年昼雨的负值比较大, 降水减少比较明显。

4. 春季昼雨时间演变特征

4.1. 春季昼雨特征量的时间演变



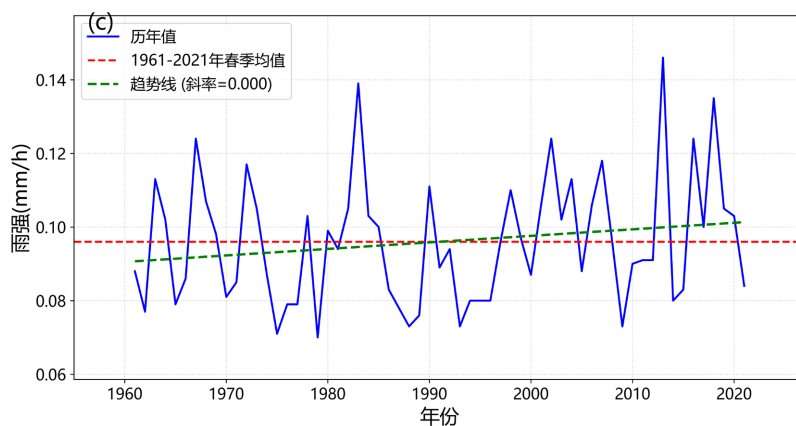
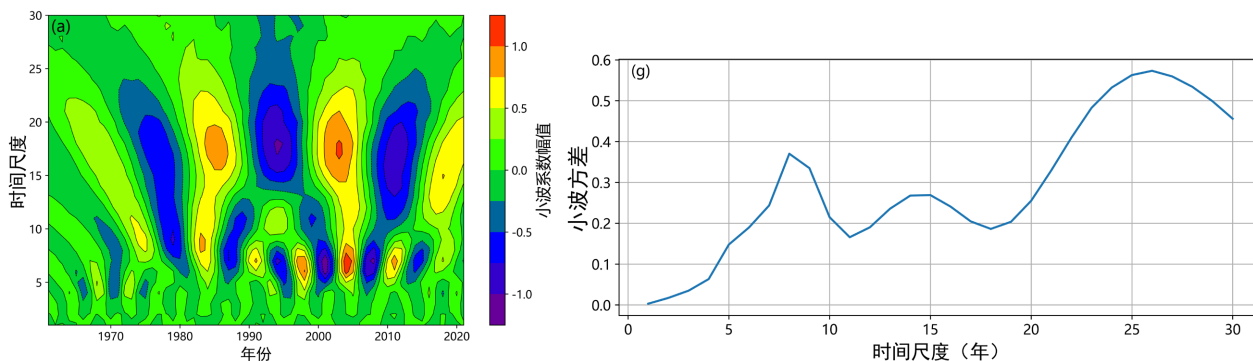


Figure 4. Spatial distribution of spring daytime rainfall characteristics in Sichuan Province. ((a) daytime rainfall; (b) number of daytime rainfall days; (c) intensity of daytime rainfall)
图 4. 四川省春季昼雨特征量的空间分布。(a) 昼雨; (b) 昼雨日数; (c) 昼雨强度)

图 4(a)是从 1961~2022 年的四川省的春季昼雨的时间变化, 分析可得。昼雨趋势线在 20 世纪 90 年代从低于均值超过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。图 4(b)是春季昼雨降水日数的时间变化, 分析可得。春季(a)的昼雨降水日数的趋势线在 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。图 4(c)是春季昼雨强度的时间变化, 可以看出, 春季的昼降水强度趋势线在 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。

4.2. 春季昼雨小波分析

川西北部的小波系数实部图 5(a)和方差图 5(f)结合分析, 该区域的春季昼雨的第一主周期为 18a, 第二主周期为 8a, 分别为 15a~20a 从 20 世纪 80 年代以后周期变化明显; 15a~20a 从 20 世纪 90 年代以后周期变化明显。川西南山地的小波系数实部图 5(b)和方差图 5(f)结合分析, 该区域的春季昼雨的第一主周期为 25a, 第二主周期为 8a, 分别为 20a~30a 从 2010 年到 2022 年周期变化明显增加; 15a~20a 从 20 世纪 60 年代以后周期变化明显。川西高原的小波系数实部图 5(c)和方差图 5(f)结合分析, 该区域的春季昼雨的第一主周期 21a, 第二主周期为 7a, 分别为 15a~25a 从 20 世纪 80 年代之前周期变化明显增加, 5a~10a 从周期变化一直明显。川南部小波系数实部图 5(d)所示, 该区域的春季昼雨的第一主周期为 15a, 第二主周期为 7a, 分别为 10a~17a、5a~10a 从 20 世纪 60 年代到 2022 年周期变化明显。川东北部的小波系数实部图 5(e)和方差图 5(f)结合分析, 该区域的春季昼雨的第一主周期为 6a, 第二主周期为 16a, 分别为 12a~17a 从 20 世纪 60 年代到 2022 年周期变化较明显、5a~10a 从 20 世纪 60 年代到 2022 年周期变化先增强减弱再增强。



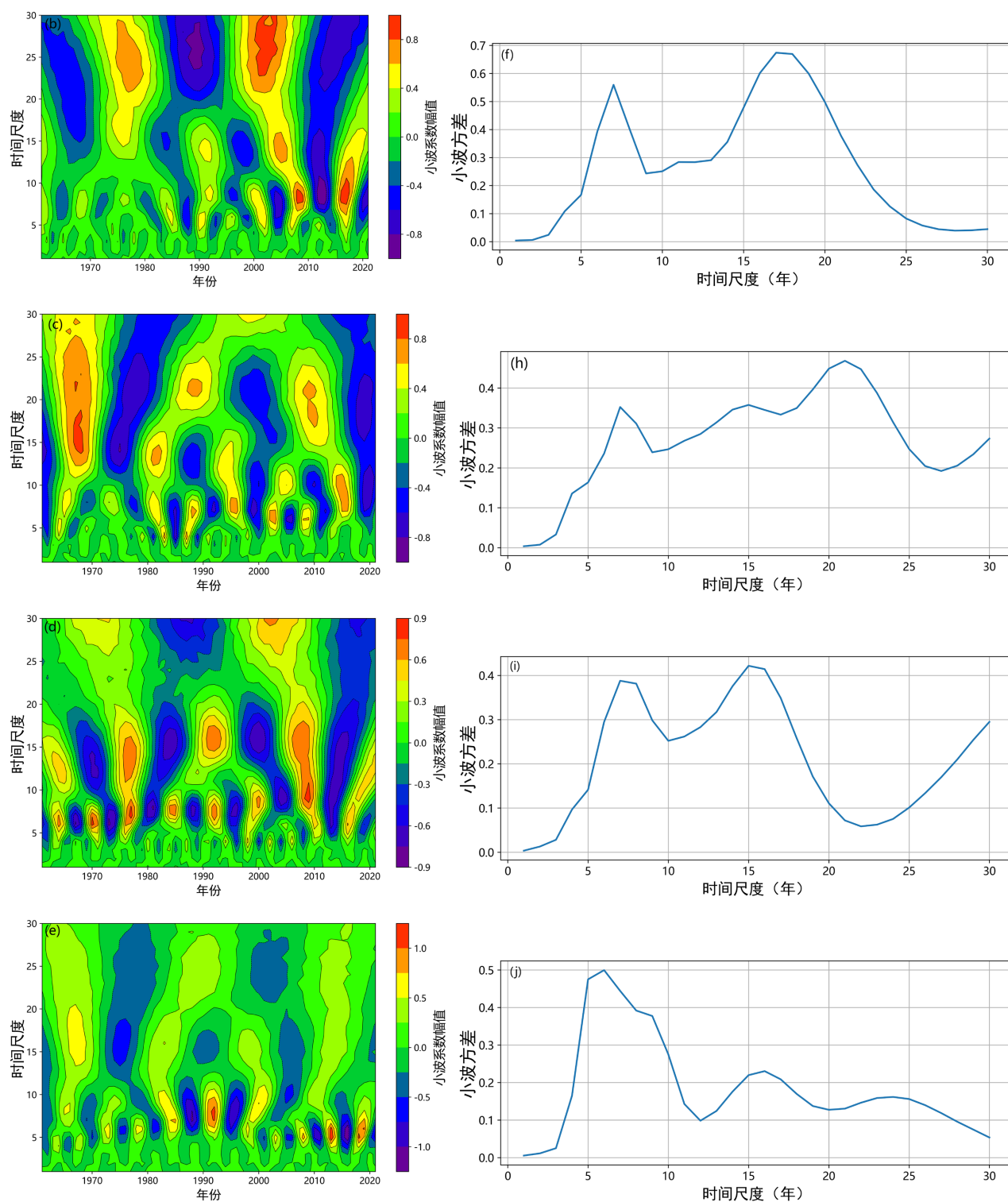


Figure 5. Wavelet coefficient real part contour maps of spring daytime rain in Sichuan. ((a) Northwestern Sichuan; (b) Southwestern Mountainous Area of Sichuan; (c) Western Sichuan Plateau; (d) Southern Sichuan; (e) Northeastern Sichuan) and Wavelet Variance Maps; ((f) Northwestern Sichuan; (g) Southwestern Mountainous Area of Sichuan; (h) Western Sichuan Plateau; (i) Southern Sichuan; (j) Northeastern Sichuan)

图 5. 四川春季昼雨小波分析的小波系数实部等值线图。((a) 川西北部; (b) 川西南山地; (c) 川西高原; (d) 川南部; (e) 川东北部)和小波方差图; ((f) 川西北部; (g) 川西南山地; (h) 川西高原; (i) 川南部; (j) 川东北部)

5. 结论

通过对四川地区 126 站 1961~2021 年的站点降水资料, 从春季角度出发对比分析讨论昼雨的时空变化特征, 得出以下结论:

(1) 四川春季的昼雨整体呈东多西少、南多北少。降水量高值都在东北部, 其中大值中心位于东北部, 中心分别达到 340 mm。昼雨日数在川西高原南部和川西南山地里较少; 川西高原北部分布较高; 川东北部和川南部分布较高; 盆地中部分布较少。昼雨日数最大值在康定、雅安、峨眉一带, 中心值达到 40 天。昼雨强度高值区在川东北部和川西南山地, 低值区分布在川西高原, 大值中心分别达到, 0.2 mm/h。

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

(3) 四川春季昼雨趋势线在 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) 小波分解分析表明春季时: 川西北有准 8 年、准 18 年周期变化; 川西南山地有准 8 年、准 25 年周期变化; 川西高原有准 7 年、准 21 年周期变化; 川南有准 7 年、准 15 年周期变化; 川东北部有准 6 年、准 16 年周期变化。

注 释

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] 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] 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.
- [5] 李跃清, 张晓春. “雅安天漏”研究进展[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 289-295.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郭璇, 田苗, 洪程之, 等. 川西高原地形特征对降水的影响[J]. 新疆农垦科技, 2017, 40(12): 40-42.
- [9] 徐媛, 喻琴昆, 刘成刚, 等. 川西高原甘孜州汛期短时强降水的时空分布特征[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(2): 50-57.
- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] Richman, M.B. (1986) Rotation of Principal Components. *Journal of Climatology*, 6, 293-335.
<https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>

- [16] Kaiser, H.F. (1958) The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. *Psychometrika*, **23**, 187-200.
<https://doi.org/10.1007/bf02289233>
- [17] Wilks, D.S. (2011) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd Edition, Academic Press.
- [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.