

四川省夏季夜雨的空间变化特征

刘宇航, 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23日; 录用日期: 2025年8月20日; 发布日期: 2025年8月28日

摘要

为研究四川省夏季夜雨的降水时空变化特征, 本文利用了四川省1961~2021年共61年全省126个基本气象站的逐日降水观测资料, 采用旋转经验正交函数分解(Rotated Empirical Orthogonal Function decomposition, 以下简称REOF分解), 详细探讨了四川省夏季夜雨降水的空间变化特征。结果表明: 1) 四川省夏季夜雨空间分布是非常不均匀的, 总体上呈现出南部多, 北部少的分布形式; 盆地与高原交界的山区明显偏多, 盆地和高原内部相对偏少的分布特征, 其中在雅安天全县到乐山市区一带, 夜雨呈现出显著的最大值, 普遍超过500 mm甚至局地达到了700 mm。四川盆地夏季夜雨日数相对较低但是夜雨强度更大, 而川西高原地区夏季夜雨日数相对较高但是夜雨强度较小。2) REOF分析结果表明四川省夏季夜雨可划分为四个区域, 分别为: 盆地西北型(方差贡献率为25.7%)、川东北型(方差贡献率为17.3%)、南北相反型(方差贡献率为13.6%)和高原盆地相反型(方差贡献率为8.5%)。其中, 盆地西北型的增长速度是 $-0.067 \cdot (10a)^{-1}$, 川东北型的增长速度是 $-0.087 \cdot (10a)^{-1}$, 南北相反型的增长速度是 $-0.117 \cdot (10a)^{-1}$, 高原盆地相反型的增长速度是 $0.074 \cdot (10a)^{-1}$ 。

关键词

四川省, 夏季夜雨, 空间变化, REOF分解

Spatial Variation Characteristics of Summer Night Rain in Sichuan Province

Yuhang Liu, Wenshu Mao

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

Received: Jun. 23rd, 2025; accepted: Aug. 20th, 2025; published: Aug. 28th, 2025

Abstract

In order to study the spatiotemporal variation characteristics of summer night rain precipitation in Sichuan Province, this paper uses daily precipitation observation data from 126 basic meteorological

stations in Sichuan Province from 1961 to 2021 were used. The Rotating Empirical Orthogonal Function decomposition (REOF decomposition) was employed to explore in detail the spatiotemporal variation characteristics of summer night rain precipitation in Sichuan Province. The results show that: 1) The spatial distribution of summer night rain in Sichuan Province is very uneven, generally showing a distribution pattern of more in the south and less in the north; The mountainous areas at the junction of basins and plateaus are significantly more abundant, while the distribution characteristics within basins and plateaus are relatively less. In the area from Tianquan County in Ya'an to Leshan City, night rain shows a significant maximum value, generally exceeding 500 mm or even locally reaching 700 mm. The number of night rain days in summer in the Sichuan Basin is relatively low, but the intensity of night rain is greater, while the number of night rain days in summer in the western Sichuan Plateau is relatively high, but the intensity of night rain is smaller. 2) The REOF analysis results indicate that summer nights in Sichuan Province can be divided into four regions, namely: Northwest Basin Type (variance contribution rate of 25.7%), Northeast Sichuan Type (variance contribution rate of 17.3%), North South Opposite Type (variance contribution rate of 13.6%), and Plateau Basin Opposite Type (variance contribution rate of 8.5%). Among them, the growth rate of the northwest basin type is $-0.067 \cdot (10a)^{-1}$, the growth rate of the northeast Sichuan type is $-0.087 \cdot (10a)^{-1}$, the growth rate of the north-south opposite type is $-0.117 \cdot (10a)^{-1}$, and the growth rate of the plateau basin opposite type is $0.074 \cdot (10a)^{-1}$.

Keywords

Sichuan Province, Summer Night Rain, Spatial Variation, REOF Decomposition

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

夜间降雨即 20 时至 08 时的降水量, 而夜雨多于昼雨这种状况的形成受季风、中尺度对流系统、地形特征以及其他天气和气候因素的共同影响[1]。四川省地处我国一二级阶梯交界处, 四川的西部多高山高原, 横断山脉及其以西属于青藏高原的组成部分, 海拔可达 3000 米以上甚至 4000 米。而四川的东部为四川盆地, 内部为成都平原及川东平行岭谷状丘陵分布区, 平均海拔只有四五百米。其中, 青藏高原东侧到四川盆地西缘是地形等高线最密集区, 特别是盆地西部的绵阳到雅安一线, 在东西不足 100 km 的范围内高度跨越了 2500 m 以上, 从东向西形成陡峭的上升地形[2]。四川地区因其独特的地理条件, 夏季的夜雨现象显得尤为显著。在季风环流的影响以及复杂地形的共同作用下, 四川地区展现出了明显的“夜雨”日变化特征。自古以来, 该地区就以“巴山夜雨”而闻名遐迩, 其中“雅安天漏”更是这一现象的典型代表。通常情况下, 该地区的降水强度会在午夜前后达到峰值。据相关统计数据显示, 四川地区的夜雨频率占据了全年降水的 70%至 75% [3]。根据胡迪等[4]的研究成果, 在盆地的西南部地区, 夜间降雨量占全天降水量的比例是最大的。与此同时, 在川西高原的东北部以及川东北地区, 这两个区域则呈现出明显的低值区。川东北地区的雨季降水特点为夜雨占日降水量的比例相对较小, 发生概率也偏低, 但是强度却相对较大。而川西高原的夜雨发生的频次虽然不是特别高, 但是强度和比例都相对较大。范江琳及其研究团队[5]通过深入分析和研究, 作出了四川地区夜雨率的 EOF (经验正交函数)展开的第一特征向量, 其占据了总方差的 17.1%。卢萍和杨康权[6]对 2015 至 2018 年间四川盆地西部边缘的 27 个典型强降水事件进行了研究, 通过统计分析揭示了不同区域强降水环境条件的差异。他们从夏季大气日变化的

角度,探讨了该地区夜间降水频发的原因。冉津江等[7]通过分析 2011~2020 年四川盆地的降水数据,揭示了短时强降水的时空分布特征及其与地质灾害的关联。研究发现,短时强降水在西南部和西北部地区频发,且降水量大。强度和雨强极值的高值区域分布较为分散,其中强度高值中心位于南部和西北部,雨强极值高值中心则在西北部和南部。周秋雪等人[8]利用 2008~2022 年四川省 1008 个站点的逐小时雨量数据和高精度地形数据,分析了四川省强降雨的时空分布特征。研究发现,四川省强降雨量 ≥ 500 mm 和强降雨日 > 9 d 的站点主要分布在盆周沿山地区和凉山州。随着强降雨量或强降雨日数的增加,站点趋向于山脉迎风坡集中,持续性大雨、暴雨和极端降水多在此发生。盆地东北部、西南部和西北部的大值站点分布形态存在差异,降雨强度峰值中心位于盆地东北部的大巴山南侧边缘。最大日雨量 ≥ 250 mm/d 的站点主要集中在 30°N 以北的山区迎风坡。

随着经济社会的持续发展和进步,气象灾害所带来的损失和影响也在不断增大。四川地区夏季汛期降水十分集中,且以夜间降水为主,这种降水模式极易在夜间引发山洪暴发、泥石流以及其他类型的地质灾害。这些灾害不仅会造成更为严重的损失,而且会给防灾减灾工作带来了极大的挑战和困难。2020 年 8 月 10 日夜间,雅安市芦山县经历了一场暖区特大暴雨天气过程。位于芦山县的阳磨刀站记录到了高达 429.2 毫米的降水量,在四川省的历史日降水量中位列第二。芦山县地处邛崃山脉的南段分支沿线,位于青衣江的中游地带,而且它坐落在一个“入”字形的峡谷地形之中,很可能是导致极端降水事件发生的一个重要因素[9]。在更早的 2012 年 8 月 30 日至 9 月 1 日发生的区域性暴雨天气过程中,暴雨的落区主要集中在人口分布密集的四川东部盆地地区,有 229 个站(包括区域气象观测站)的降雨量超过 100 mm,54 个站的降雨量超过 250 mm [10]。且强降水时段集中在夜间。这些不利因素的叠加,导致了严重的经济损失和人员伤亡。开展关于四川夏季夜雨的时空分布特征及其相关研究工作,对于深入理解四川地区夜雨变化的规律具有极其重要的意义。这不仅有助于我们更准确地掌握该地区降水的时空分布特性,而且对于提高汛期强降水事件的预警预报能力和确保防灾减灾工作的有效性也具有不可忽视的指导作用。

2. 资料和方法

2.1. 资料概括

本文数据来源于四川全省 126 个国家基本气象站(见图 1)的逐日气象观测数据。研究涵盖了 1961~2021 年 1 月 1 日至 12 月 31 日这段时间,其中北京时间 08:00~20:00 为昼雨,20:00~08:00 为夜雨,6~8 月为夏季。

2.2. 研究方法

旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)分析。

REOF 分析[11]

本文 REOF 是在传统经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析基础上,通过因子旋转优化的统计方法,主要用于分析气象要素(如温度、降水、气压等)的空间分布模态及其时间演变特征。传统 EOF 分析将时空数据矩阵分解为空间模态(EOF, 表征空间分布)和对应时间系数(PC, 表征时间变化)。但是其高阶模态可能包含混合信号,物理意义不清晰。而 REOF 对前几个主成分的空间模态进行旋转(常用 Varimax 旋转),使每个模态的载荷集中在局部区域,增强可解释性。旋转后模态的物理意义更明确,减少不同模态间的重叠信息。即旋转后模态 = 原始 EOF 模态 $\times$ 旋转矩阵。

(1) 数据预处理

输入数据为时空场矩阵 $X_{m \times n}$, 其中 m 为空间点(如格网点或站点), n 为时间序列长度。对每个空间点的时序数据进行去均值化和标准化:

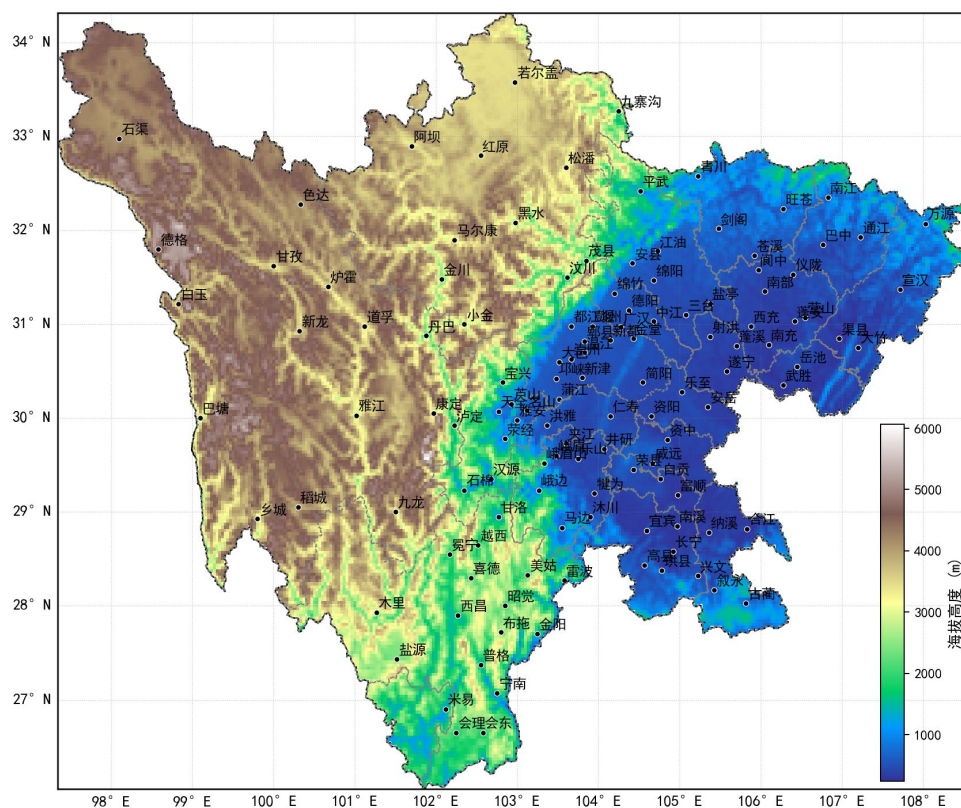


Figure 1. Distribution and altitude topographic map of meteorological stations in Sichuan
图 1. 四川省气象站点分布及海拔高度地形图

$$X'(i,t) = \frac{X(i,t) - \mu_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

μ_i : 第 i 个空间点的均值; σ_i : 标准差。目的: 消除量纲差异, 突出相对变化, 剔除或插补极端异常值(如传感器故障导致的离群值)。

(2) 传统 EOF 分析步骤

计算标准化后的时空数据矩阵的协方差矩阵:

$$C = \frac{1}{n-1} X^T X \quad (2)$$

对协方差矩阵 C 进行特征分解:

$$C = V \Lambda V^T \quad (3)$$

Λ : 特征值对角矩阵(按降序排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$); V : 特征向量矩阵, 每一列为空间模态(EOF)。时间系数(主成分)通过投影得到:

$$PC = XV \quad (4)$$

(3) REOF 改进步骤

截取前 k 个 EOF 模态(通常保留累计方差贡献 $\geq 70\%$ 或通过 North 检验确定)。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:

$$V_r = V_T \quad (5)$$

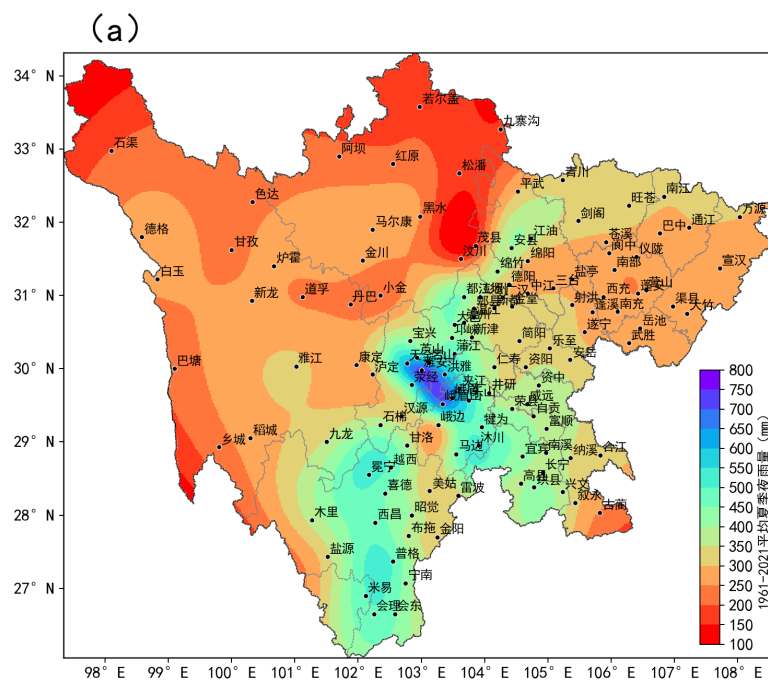
T : 旋转矩阵, 满足 $TTT = I$ (正交性约束, 旋转后的时间系数需重新计算):

$$PC_r = XV_r \quad (6)$$

3. 四川省夏季夜雨空间变化特征

3.1. 四川省夏季夜雨特征量的空间分布

根据 1961~2021 年 6~8 月四川省夜雨的空间分布(图 2(a)), 我们可以观察到四川的夏季夜雨降水量分布是非常不均匀的, 总体上呈现出南部相对较多, 北部相对较少; 盆地与高原交界的山区明显多, 盆地和高原内部相对少的分布特征。降水量通常在 200~600 mm 之间, 其中川西高原地区的降水量是 200~500 mm, 而四川盆地地区的降水量则是 250~700 mm。并且, 在雅安天全县到乐山市区一带, 降水量呈现出显著的最大值, 普遍超过 500 mm 甚至局地达到了 700 mm; 其次在川西南地区, 降水量大值区沿着安宁河谷呈带状分布, 降水量普遍在 400~550 mm 之间。而根据 1961~2021 年 6~8 月四川省夜雨日数的空间分布(图 2(b)), 四川的夏季夜雨平均降水日数分布要明显均匀很多, 总体呈经向分布, 从东部四川盆地地区到西部川西高原地区的降水日数逐渐增加。夜雨日数通常在 25~60 天之间, 其中四川盆地地区普遍小于 40 天, 而川西高原普遍在 45 天以上。其中, 甘孜州东南部和凉山州北部一带和雅安天全县到乐山市区一带为降水日数最大值区域, 降水日数普遍在 50 天以上, 局地甚至可以接近 60 天。将四川省各站点 1961~2021 年 6~8 月四川省夏季夜雨日数(图 2(b))结合图 2(a)可以发现, 除开局地降水量明显大值区外, 四川省的夏季夜雨量在纬向没有明显的变化, 但是同纬度夜雨平均出现日数有明显的西高东低变化特征, 即川西高原地区降水日数明显高于四川盆地地区。故可以推测, 四川盆地地区夏季夜雨特征为出现频次相对较低但是降水强度更大, 而川西高原地区夏季夜雨特征为出现频次相对较高但是降水强度较小, 而图 2(c)良好地印证了这一点。其次, 在四川盆地地区和川西高原地区的交界地带, 特别是在雅安至乐山一带, 降水量、降水日数和平均降水强度均为大值区, 故此地带的夏季夜雨不仅出现频次较高, 而且降水强度较强。此外, 该地区地质结构破碎, 断裂带广布, 为地质灾害的频繁发生提供了基础地质条件[12]。



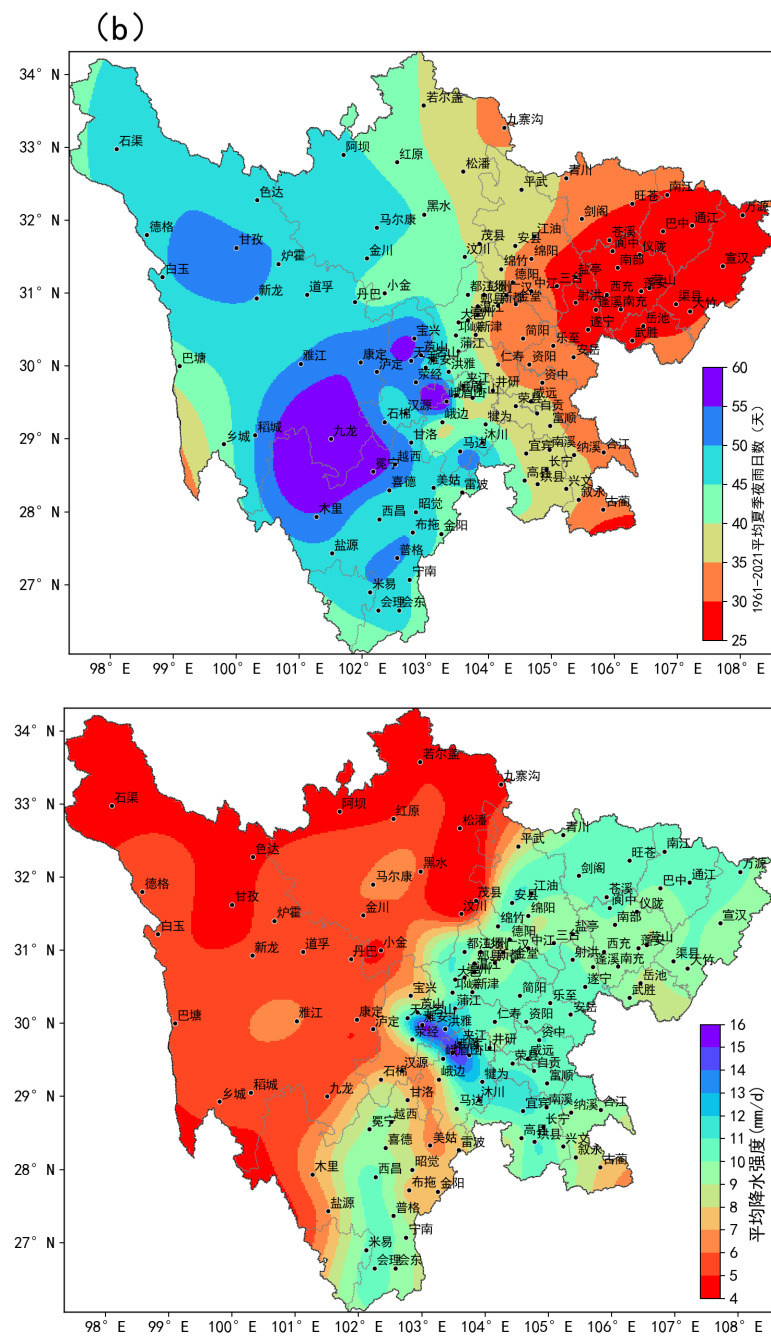


Figure 2. Spatial distribution of characteristic quantities of summer night rain in Sichuan from 1961 to 2021 ((a) Night rain (unit: mm), (b) Night rain days (unit: d), and (c) Night rain intensity)
图 2. 1961~2021 年四川夏季夜雨特征量的空间分布((a) 夜雨(单位: mm)、(b) 夜雨日数(单位: d)和(c) 夜雨强度)

3.2. 四川省夏季夜雨与日雨、昼雨比率的空间分布

图 3 中的(a)、(b)分别展示了四川地区夏季夜雨量与日雨量比例、夏季夜雨量与昼雨量比例的空间分布图。可以看到,四川省绝大部分地区夜雨量与日雨量比例都在 0.5 以上(夏季夜雨量与昼雨量比例在 1.0 以上),即夜雨降水多于昼雨降水,因此,四川地区被认为是典型的夜雨区。在四川省境内,夏季夜雨量普遍占日雨量的 50%~80%,即夜雨量是昼雨量的 1~4 倍。川西高原中部和东南部、四川盆地西南部夜雨

量占比较大, 普遍在 65% 以上; 而川西高原北侧和西南侧、四川盆地东北部夜雨量占比较小, 普遍在 60% 以下, 局地甚至不到 50%, 夜雨量小于昼雨量。其中安宁河谷的夜雨量占比呈现出显著的最大值, 能达到 75% 以上, 局地超过 80% (夜雨量超过昼雨量的 4 倍)。这表明, 安宁河谷地区特有的地形环流现象的昼夜变化对很可能夜雨比例的增加起到了显著的作用。这种地形环流是由宽谷地形所特有的热力和动力效应共同作用的结果。白天, 由于太阳辐射的加热作用, 地表温度升高, 导致空气上升形成热力环流; 而到了夜晚, 地表迅速冷却, 空气下沉, 形成与白天相反的环境模式。这种昼夜交替的环流变化, 增大了夜雨的比例[13]。

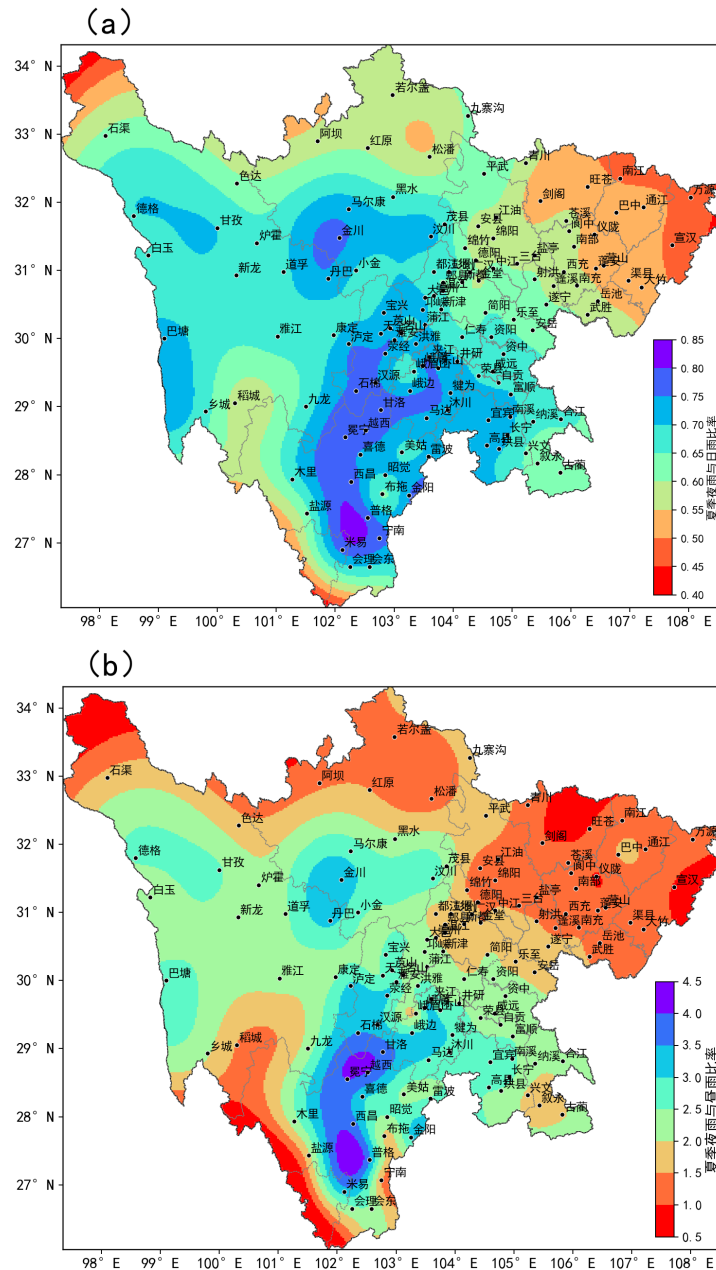


Figure 3. Spatial distribution of the ratio of night rain to day rain (a) and the ratio of day rain (b) in Sichuan summer from 1961 to 2021

图 3. 1961~2021 年四川夏季夜雨与日雨比例(a)、昼雨比例(b)的空间分布

3.3. 四川省夏季夜雨趋势系数的空间分布

为了能够更加直观地观察到四川地区各站点在 1961 年至 2021 年的时间跨度内不同区域夏季夜雨量呈现出的变化趋势, 本文采取了基于各个气象观测站点所提供的数据, 计算出了每个站点的夜雨量趋势系数。随后, 通过插值方法将这些趋势系数绘制成图(图 4), 以便于直观地分析四川省内不同地区夏季夜雨量随着时间的增减变化趋势。由(图 4)可以观察到, 四川省内各区域的夏季夜雨降水量趋势系数分布是非常不一致的。在四川盆地内部, 北部地区总体呈增加趋势, 趋势系数普遍处于 0.1~0.3 之间, 其中在巴中、达州和南充三市交界附近超过了 0.3, 表明在研究的时间跨度内这个地区夏季夜雨降水量增加明显; 盆地西南部地区则与北部地区相反, 趋势系数普遍处于-0.1~-0.3 之间, 夏季夜雨降水量呈减少趋势。而川西高原地区夏季夜雨降水量增减趋势分布则更加不规则, 大体上为甘孜州中东部、阿坝州西南部、凉山州东北部和东南部呈上升趋势, 凉山州西部呈减少趋势。其中在凉山州东北部的甘洛县附近趋势系数超过了 0.4。在上述未提到的四川省其余地区夏季夜雨降水量增减趋势系数在 ± 0.1 之内, 可以认为在研究的时间跨度内无明显增减趋势。此外, 我们可以观察到, 在大小相岭的两侧, 夏季夜雨降水量增减呈相反趋势且梯度大, 其西南侧的甘洛附近为明显增多趋势, 而其东北侧的乐山、眉山西部为明显减少趋势。这表明, 此处的东北-西南走向的大小相岭很可能是导致其两侧夏季夜雨降水量增减呈相反趋势的一个重要因素。

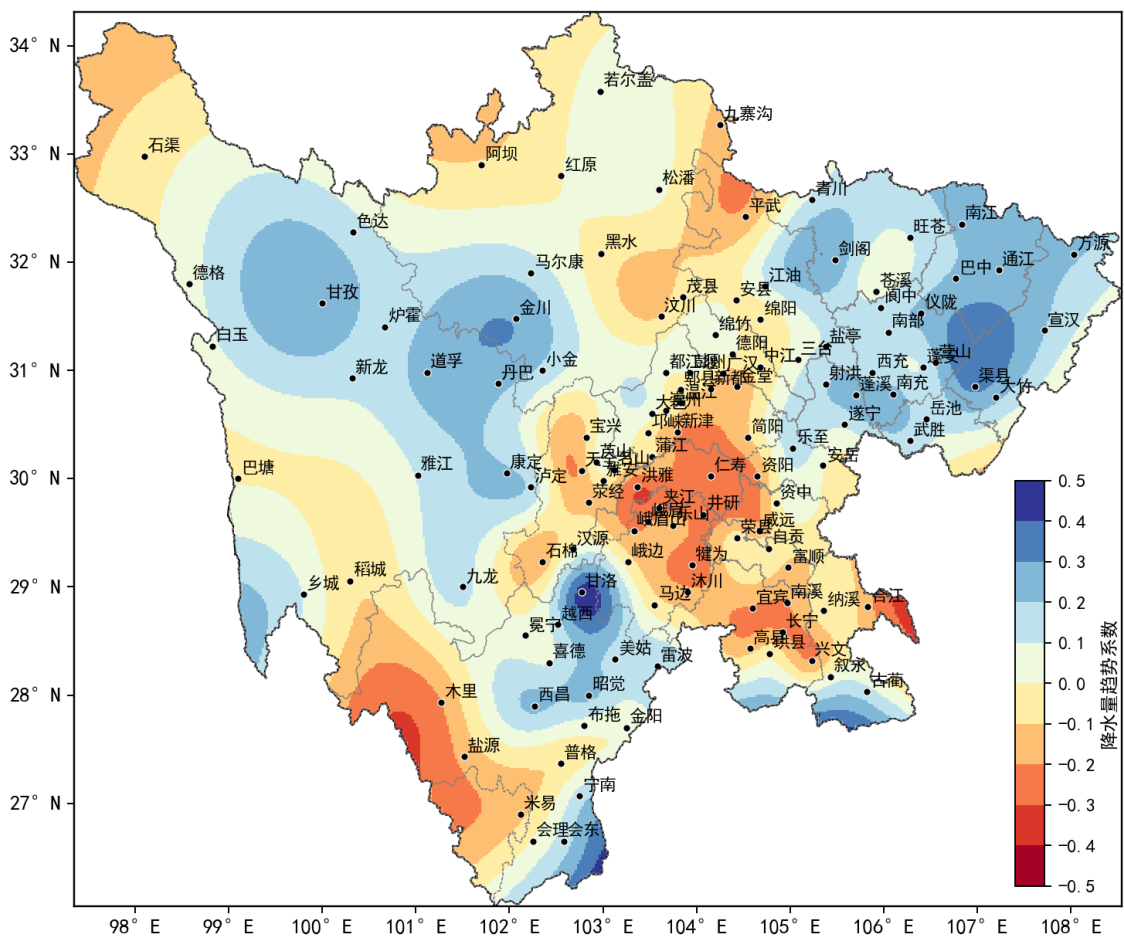
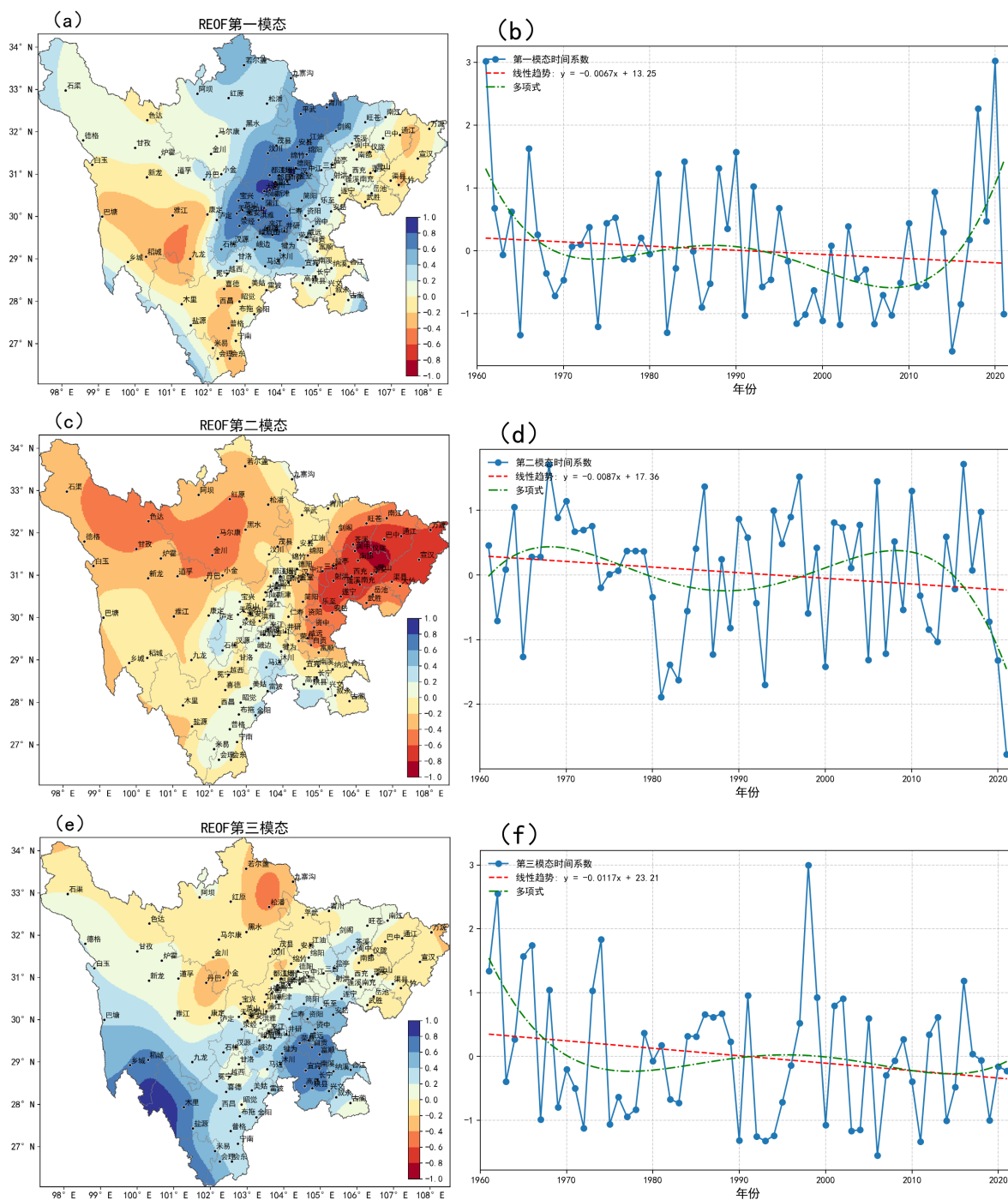


Figure 4. Spatial distribution of the trend coefficient of the average night rainfall in summer in Sichuan from 1961 to 2021
图 4. 1961~2021 年四川夏季夜雨平均夜雨量的变化趋势系数空间分布

3.4. 四川省夏季夜雨的 REOF 分解

为了更深入地研究四川省不同区域夏季夜雨降水量在空间上的特性, 本文使用了旋转经验正交函数 (REOF) 展开方法来处理 1961~2021 年期间四川省各区域的夏季夜雨降水数据。在 REOF 分析中, 通过显著性检验得出的几个特征向量所揭示的空间分布模式, 正是该变量场在区域上的典型分布模式。如图 5 展示的处理结果揭示了四个降水量分布模态及其时间系数变化的折线图。基于这四种空间模态的载荷空间分布, 把四川省夏季夜雨的四种分布模式命名为: 盆地西北型、川东北型、南北相反型和高原盆地相反型。



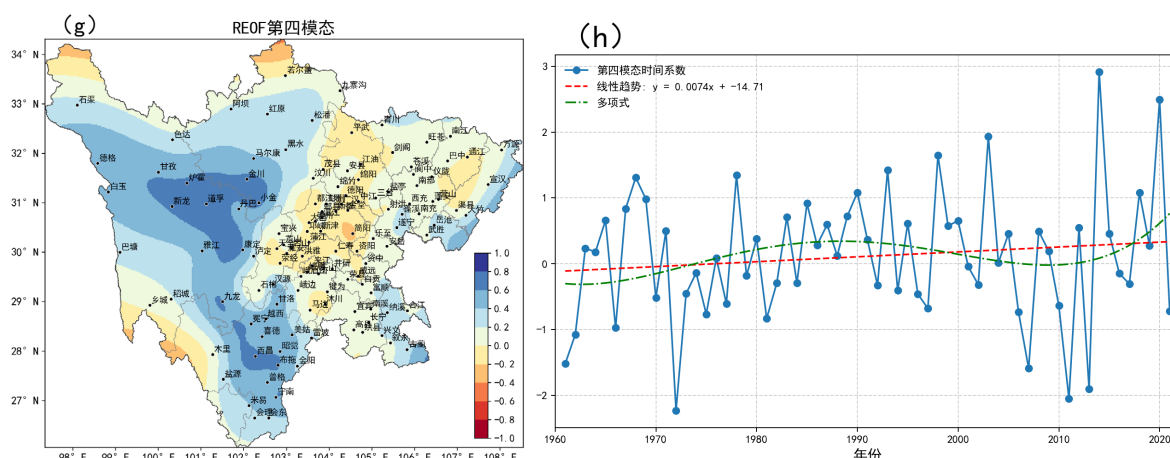


Figure 5. Spatial distribution and corresponding time coefficients of the first four modes of normalized anomaly REOF for summer night rain in Sichuan from 1961 to 2021(a) (b) The first mode and its corresponding time coefficient, (c) (d) The second mode and its corresponding time coefficient (e) (f) Third mode and corresponding time coefficient, (g) (h) Fourth mode and corresponding time coefficient

图 5. 1961~2021 年四川夏季夜雨标准化距平 REOF 前 4 个模态的空间分布及相应的时间系数(a) (b) 第 1 模态及相应时间系数, (c) (d) 第 2 模态及相应时间系数(e) (f) 第 3 模态及相应时间系数, (g) (h) 第 4 模态及相应时间系数

图 5 展示的第 1 模态是盆地西北型, 贡献率为 25.7%。此模态中四川省夏季夜雨的降水变化趋势显示, 盆地西北部及周边地区, 包括成都平原和乐山市的大部地区均为较大正值载荷区域, 其中在成都西部山区为正值载荷极值区。这些地区的载荷值普遍超过 0.4, 局地甚至超过 0.8。甘孜州南部和凉山州的安宁河谷地区, 载荷值为负值, 在-0.2 到-0.6 之间。而其余的大部分地区的载荷值较小, 范围在-0.2 到 0.2 之间。与第 1 模态相匹配的时间系数中, 它在过去的 61 年里以 $0.067 \cdot (10a)^{-1}$ 的速度递减。四川省的夏季夜雨量在 1961~2021 年期间, 平均降水量最高的两年是 1961 年和 2020 年, 降水最少的三年是 1963 年、1988 年和 2004 年, 均与第 1 模态时间系数的最高和最低年份相对应。这表明, 在那些夜雨量异常偏多的年份里, 四川省的夏季夜雨量的高值区域主要集中在盆地西北部及其周边的地区; 而那些夜雨量极端偏少的年份中, 上述地区则成为了雨量偏少的主要区域, 并可能会导致干旱事件的发生。第 2 模态为川东北型, 贡献率为 17.3%。这一模态揭示了四川省夏季夜雨的降水在除川西高原东南部 and 四川盆地西南部的局地为较小正值之外, 其余大部分地区均为负值的分布模式。川西高原中北部的载荷值主要集中在-0.2 至-0.6 之间, 而四川盆地中北部的负值载荷更大, 在-0.4 到-1.0 之间, 其中负值载荷中心位于四川盆地北部的南充与巴中之间, 局地负值载荷超过-0.8。而正值区域仅分布于川西高原东南部与四川盆地交界的狭小地带, 且正值载荷仅有 0.0 到 0.4 之间。可见, 此模态中负值区域的覆盖范围和极值大小都明显超过了正值区域。与第 2 模态相匹配的时间系数中, 它在过去的 61 年里以 $0.087 \cdot (10a)^{-1}$ 的速度递减。在第 2 模态时间系数中, 1978 年和 2017 年是最大的两年, 而 1981 年和 2021 年则是最小的两年。第 3 模态是南北相反型, 贡献率为 13.6%。这一模态揭示了四川省夏季夜雨的降水在南北方向上呈现出相反的空间分布模式, 也就是说, 当北方的降水量偏多(或偏少)时, 南方的降水量则偏少(或偏多)。这种模态大致以 30.5°N 作为其南北的界限, 其正数中心主要集中在四川盆地西南部和川西高原西南部, 其范围较广, 极值相对较大, 载荷值范围在 0.4 至 0.8 之间。而负值中心则主要出现在阿坝州北部, 载荷值位于-0.2 至-0.6 的范围内。与第 3 模态相匹配的时间系数中, 它在过去的 61 年里以 $0.117 \cdot (10a)^{-1}$ 的速度递减。1962 年、1974 年和 1998 年是最大的三年, 其中, 1998 年是长江流域发生大洪水的年份[14]。而 1993 年、2006 年和 2011 年则是最小的三年, 其中, 2006 年[15]和 2011 年[16]是川渝地区发生较严重伏旱的年份。第 4 模态是高原盆地相反型, 贡献率为 8.5%。这一模态揭示了四川省夏季夜雨的降水在川西高原地区为正值

载荷,而在盆地有小幅负载荷的分布模式。川西高原地区的载荷普遍在 0.2 至 0.8 之间,并以甘孜州东北部和凉山州中部为载荷中心。但四川省内的四川盆地地区有少量负载荷,大部分地区在 0 至-0.4 之间。在第 4 模态时间系数中,它在过去的 61 年里以 $0.074 \cdot (10a)^{-1}$ 的速度递增,并通过多项式拟合可以看出大致以 40 年为周期波动。其中,2003、2014 和 2020 年是最大的三年,1972、2011 和 2013 年是最小的三年。

经过四川省夏季夜雨量的 REOF 分析,可以据此将四川省的夏季夜雨分为 4 个区域(图 6)。其中,雅安市、成都市、眉山市、德阳市、绵阳市、广元市为区域一(盆地西北部);南充市、达州市、巴中市、广安市、遂宁市为区域二(盆地东北部);资阳市、泸州市、内江市、宜宾市、乐山市、自贡市为区域三(盆地南部);甘孜藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、凉山彝族自治州和攀枝花市为区域四(川西高原)。

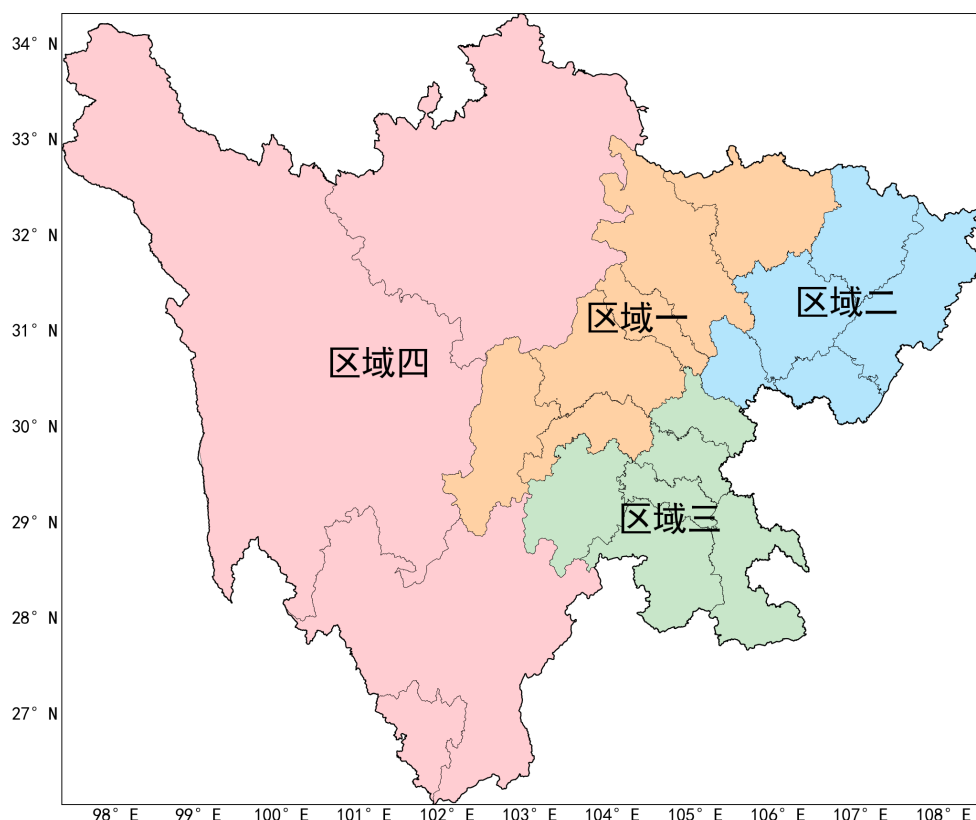


Figure 6. Schematic diagram of REOF zoning results for summer night rain in Sichuan Province
图 6. 四川省夏季夜雨 REOF 分区结果示意图

4. 结论

(1) 受复杂地形动力抬升与局地环流共同影响,四川省夏季夜雨量呈“南多北少、高原与盆地交界区突出”的分布格局。降水量普遍在 200 到 700 mm 之间,盆地西南缘的雅安至乐山一带为高值区(>500 mm),安宁河谷次之(400 至 550 mm);而夜雨日数基本上呈“西多东少”的经向分布,川西高原普遍>45 天,盆地大部<40 天,高值区与降水量大值区空间吻合。这表明地形过渡带(盆地与高原交界)是夜雨分布的核心区域。

(2) 四川地区雨季降水量日数分布表明:四川盆地夜雨频次相对较低(<40 天)但强度大(>8 mm/d),易触发短时强降水事件;而川西高原夜雨频次高(>45 天)但强度相对较弱(<6 mm/d),盆地高原交界带(特别

是雅安至乐山): 兼具高频次(>50 天)与高强度(>10 mm/d), 成为夜间暴雨引发地质灾害的核心风险区。

(3) 四川省绝大部分地区夜雨降水多于昼雨降水。在四川省境内, 夏季夜雨量普遍占日雨量的 50%~80%。川西高原中部和东南部、四川盆地西南部夜雨量占比较大, 普遍在 65%以上; 而川西高原北侧和西南侧、川盆地东北部夜雨量占比较小, 普遍在 60%以下, 局地甚至不到 50%, 夜雨量小于昼雨量。其中安宁河谷的夜雨占比呈现出显著的最大值, 能达到 75%以上, 局地超过 80%(夜雨量超过昼雨量的 4 倍)。

(4) REOF 结果表明四川省夏季夜可划分为四个区域, 分别为: 分盆地西北型(方差贡献率为 25.7%)、川东北型(方差贡献率为 17.3%)、南北相反型(方差贡献率为 13.6%)和高原盆地相反型(方差贡献率为 8.5%)。其中, 盆地西北型的增长速度是 $-0.067 \cdot (10a)^{-1}$, 川东北型的增长速度是 $-0.087 \cdot (10a)^{-1}$, 南北相反型的增长速度是 $-0.117 \cdot (10a)^{-1}$, 高原盆地相反型的增长速度是 $0.074 \cdot (10a)^{-1}$ 。

注 释

本文图片由使用 Anaconda 内核的 PyCharm 软件制图。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李川, 陈静, 何光碧. 青藏高原东侧陡峭地形对一次强降水天气过程的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 442-450.
- [3] 曾庆存, 宇如聪, 彭贵康, 等. “雅安天漏”研究III: 特征、物理量结构及其形成机制[J]. 大气科学, 1994, 18(6): 649-659.
- [4] 胡迪, 李跃清. 青藏高原东侧四川地区夜雨时空变化特征[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 161-179.
- [5] 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.
- [6] 杨康权, 卢萍. 四川盆地西部边缘不同落区暴雨的气象场差异及夜雨浅析[J]. 大气科学, 2024, 48(5): 1783-1795.
- [7] 冉津江, 齐玉磊, 龙治平, 等. 基于高密度站点的四川盆地短时强降水特征分析[J]. 高原气象, 2023, 42(4): 949-961.
- [8] 周秋雪, 龙柯吉, 王皓, 等. 2008-2022 年四川省强降雨的时空特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2025, 19(1): 174-181.
- [9] 黄楚惠, 李国平, 牛金龙, 等. 2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J]. 大气科学, 2022, 46(4): 989-1001.
- [10] 周春花, 张驹. 2012 年 8 月四川盆地东部一次持续性暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007(6): 108-113.
- [11] Cheng, X., Nitsche, G. and Wallace, J.M. (1995) Robustness of Low-Frequency Circulation Patterns Derived from EOF and Rotated EOF Analyses. *Journal of Climate*, 6, 1709-1713.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1709:ROLFCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1709:ROLFCP>2.0.CO;2)
- [12] 费晓燕等. 四川省降雨诱发滑坡灾害的气象预警模型[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 315-327.
- [13] 林之光. 我国的地形性夜雨[J]. 气象, 1982(6): 18-20.
- [14] 李小泉, 宋连春, 周自江. 1998 年长江流域特大洪水的降水分析[J]. 应用气象学报, 2011, 11(3): 287-296.
- [15] 刘银峰, 徐海明, 雷正翠. 2006 年川渝地区夏季干旱的成因分析[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 686-694.
- [16] 李泽明, 陈皎, 董新宁. 重庆 2011 年和 2006 年夏季严重干旱及环流特征的对比分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(8): 113-122.