

川藏铁路沿线大到暴雨时空演变特征

安彤彤, 付冶怡, 李金建*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年12月2日; 录用日期: 2022年12月30日; 发布日期: 2023年1月6日

摘 要

基于1980~2019年川藏铁路沿线13个地面观测站逐日降雨资料, 应用经验正交函数分解、气候倾向率和小波分析等统计诊断方法, 分析川藏铁路沿线大到暴雨的暴雨量与暴雨天数的时空变化特征。结果表明: 川藏铁路沿线大到暴雨的各站逐年日数与累积暴雨量在空间分布上呈类似的空间分布, 即铁路东段与中段西段的数值相对于其他区域是较大的; 近40a川藏铁路沿线暴雨日与暴雨量的年际变化呈明显振荡特征, 月际变化则显示6月至9月是暴雨频发的月份; 川藏铁路沿线的暴雨日和暴雨量的EOF第一模态方差贡献率分别为37.39%和38.18%, 即在空间变化上呈整体一致性; 川藏铁路沿线暴雨量和暴雨日均存在4~6a和6~16a的振荡周期。

关键词

大到暴雨日, 大到暴雨量, 长期趋势, EOF, 小波分析, 川藏铁路沿线

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Heavy Rain to Rainstorm along Sichuan-Tibet Railway

Tongtong An, Yeyi Fu, Jinjian Li*

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

Received: Dec. 2nd, 2022; accepted: Dec. 30th, 2022; published: Jan. 6th, 2023

Abstract

Based on the daily rainfall data of 13 ground observation stations along the Sichuan-Tibet Railway

*通讯作者。

文章引用: 安彤彤, 付冶怡, 李金建. 川藏铁路沿线大到暴雨时空演变特征[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 1-10.
DOI: 10.12677/ccrl.2023.121001

from 1980 to 2019, the spatiotemporal variation characteristics of heavy rainfall and heavy rainfall days along the Sichuan-Tibet Railway were analyzed by applying empirical orthogonal function decomposition, climate propensity rate and wavelet analysis and other statistical diagnostic methods. The results show that the number of days per year and the cumulative rainfall of each station along the Sichuan-Tibet Railway show a similar spatial distribution in terms of spatial distribution, that is, the values of the eastern section and the western section of the central section of the railway are larger than other regions. In the past 40a, the interannual variation of heavy rainfall days and heavy rainfall along the Sichuan-Tibet Railway showed obvious oscillation characteristics, and the inter-monthly variation showed that June to September was a month with frequent heavy rainfall. The EOF first mode variance contribution rates of heavy rainfall days and heavy rainfall along the Sichuan-Tibet Railway were 37.39% and 38.18%, respectively, that is, the spatial variation was consistent as a whole. There are oscillation cycles of 4~6a and 6~16a along the Sichuan-Tibet Railway in heavy rainfall and heavy rainfall on a daily basis.

Keywords

Heavy Rain to Rainstorm Days, Heavy to Rainstorm Precipitation, Long-Term Trends, EOF, Wavelet Analysis, Along the Sichuan-Tibet Railway

Copyright © 2023 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. 引言

在全球气候变暖的背景下,暴雨等极端降水事件发生得越来越频繁,而且由暴雨引发的洪水、泥石流等自然灾害频频发生。如我国今年发生的7·20河南“千年一遇”暴雨导致河南多地受灾,秋粮作物产量受到严重影响[1],10·5山西暴雨造成了巨大的经济损失和人员伤亡。

国内外诸位学者对暴雨的时空演变特征及其环流背景已经有了大量的研究,大量统计研究表明,在全球尺度上,全球年际和年代际暴雨雨量和暴雨雨日在波动中都呈现增加趋势[2]。中国年代际暴雨和大暴雨的雨量、雨日和雨强均呈现出动态增加的趋势,且中国暴雨在向着极端化方向发展[3]。Ning and Qian分析了华南夏季暴雨的年代际变化特征,发现20世纪90年代初华南夏季暴雨的发生频数有明显增加[4]。西南地区极端暴雨降水事件各个指标均呈现增加的变化趋势[5]。

大量天气背景研究表明,中国许多暴雨都是出现在大尺度环流发生显著调整的时期,特别是中高纬度阻塞型的建立,南亚高压强度和位置的变化,西太平洋副高的西伸北跳异常等对触发中国暴雨发生都有很大影响[6]。已有研究[7][8]表明,影响中国夏季暴雨的大尺度环流系统主要包括:对流层高层的南亚高压、东亚上空对流层中层的中高纬度扰动和冷空气、西太平洋副热带高压、低层的热带季风涌等。陈栋等[6]分析了中国东部夏季暴雨分布的年代际跃变特征及其相关联的大尺度环流异常配置,指出中国东部夏季暴雨分布在20世纪70年代末和20世纪90年代初的年代际跃变转型可能受东亚夏季风变异和大尺度环流调整的影响。何光碧等[9]采用统计和天气学方法,分析了1961~2016年青藏高原周边地区持续性暴雨特征,研究表明,四川是区域性暴雨发生高频区,且持续性暴雨过程伴随高原低值系统活动,其中西南低涡是最主要的影响系统。肖红茹等[10]则对具有强度大、对流强、多发生于夜间且致灾性较强的四川盆地四类暖区暴雨的影响系统进行研究发现,四类暖区暴雨均易发于山脉迎风坡、喇叭口地形、平原和丘陵山地不均匀下垫面附近。除此之外,许多学者对在不同环流背景下形成的四川盆地暴雨进行

了研究,如四川盆地盆西(盆东)暴雨存在由副热带高压偏北(偏南)引起的水汽输送偏多及海温的影响[11]; 80 年代前后东亚气候系统的年代际变化使东亚主要大尺度环流发生的明显改变使近 20 年的环流特征更有利于四川盆地西部暴雨的发生[12]; 又有对由在西伸的西太平洋副热带高压、北上东进的伊朗高压及高原东部的弱高压、活跃的孟加拉低压和影响四川北部的中高纬长波分裂的低压槽共同作用形成的四川暴雨发生阶段的特殊的“鞍”型大尺度环流背景下盆地夏季暴雨大尺度环流背景的研究[13]; Cheng 等[14]对由青藏高原涡旋西南涡旋(中小尺度天气系统)耦合引起的一次暴雨进行了研究。

综上所述,四川盆地及青藏高原暴雨在时间和空间上都有向暴雨发生强度更大的趋势,其暴雨发生对应的环流背景相对复杂,且川藏铁路穿过这两个区域,但对于该铁路沿线暴雨的时空演变特征及环流背景的研究很少,因此,本文基于 1980~2019 川藏铁路沿线的 13 个站点的全年逐日降水数据计算大到暴雨日数及暴雨量,并利用大到暴雨日数及大到暴雨量的多年平均、月际及年际变化、EOF 分析、小波分析来得到川藏铁路沿线大到暴雨时空演变特征。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

川藏铁路东起四川省成都市、西至西藏自治区拉萨市,线路全长 1838 千米,呈东西走向,依次经过四川盆地、川西高山峡谷区、川西高山原区、川东南横断山区、藏南谷地区 5 个地貌单元,平均海拔 3800 m,地形起伏剧烈、地震活动高发,跨越大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等河流,被称为“最难建的铁路”。川藏铁路集合了山岭重丘、高原高寒、风沙荒漠、雷雨雪霜等多种极端地理环境和气候特征,具有高寒、大温差、强紫外线、气候干燥等特点。

2.2. 数据来源

本次研究选用 1980~2019 年川藏铁路沿线 13 个地面气象观测台站的逐日降水的实测资料,资料由四川省气象信息中心提供。经历了比较严格的质量控制,但本文并没有对可能由于台站变迁、观测仪器变更、观测方法改变等因素造成的气候资料非均一性进行检验与订正,仅对少量缺测数据进行了插补处理。台站分布情况如图 1 所示。

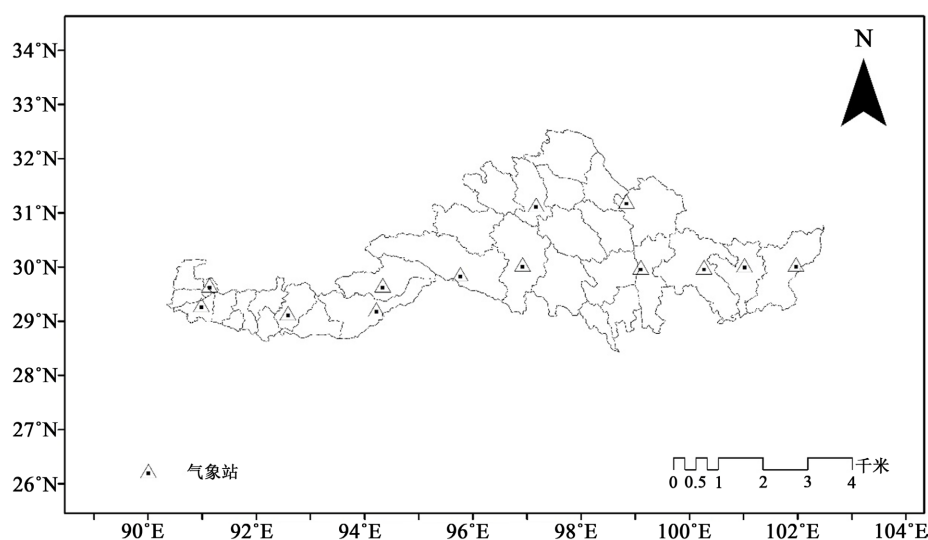


Figure 1. Distribution of meteorological stations along the Sichuan-Tibet Railway

图 1. 川藏铁路沿线气象站点分布

2.3. 研究方法

2.3.1. 大到暴雨标准

暴雨是指强度很大的降水, 气象业务中指 24 h 降雨量 50~100 mm 的降水, 或每小时降雨量 16 mm 以上, 或连续 12 h 降雨量 30 mm 以上为暴雨。在青藏高原地区, 海拔高, 且远离海洋, 24 h 降雨量 50 mm 以上的强降水极少发生。因此本文选取的大到暴雨是指 24 h 降水量大于等于 25 mm 的降水[15]。

2.3.2. 经验正交函数分析法

经验正交函数分析方法(后文均为 EOF 代替)的基本原理是把包含 p 个空间点(变量)的场随时间变化分解成空间模态和时间模态的乘积, 进而识别出主要空间型及其时间演变规律。该方法是统计天气分析中气象要素场最基础的研究模型。对 EOF 分解的详细方法, 在此不再赘述, 详细可参考《现代气候统计诊断与预测技术》[16]。对川藏铁路沿线各站年暴雨日数和年暴雨量处理成距平形式后, 计算得到特征向量对应的时间系数以及空间模态中各格点的方差贡献, 利用方差贡献进行模态分析。

2.3.3. 小波分析[17]

小波分析具有时频多分辨率功能, 局部分析性能优越, 可以展现时间序列的精细结构, 从而可以对不同时间尺度上的变化情况进行分析, 更准确地确定干旱的变化周期。小波方差反映波动随尺度的分布, 可以用来确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度。这里采用复值 morlet 小波进行周期分析, 其表达式为

$$\phi(x) = \sqrt{\pi} f_b e^{2\pi i f_c x} e^{-\frac{x^2}{f_b}}$$

3. 年大到暴雨日数与暴雨量时空分布特征

3.1. 大到暴雨日数与暴雨量空间特征

本研究根据各站逐日降水数据所求得各站逐年暴雨日数以及暴雨量, 将其中有暴雨发生的天数与所累积的暴雨量进行多年平均计算, 从而得到川藏铁路沿线各站逐年暴雨日数与累积暴雨量的平均特征。

由川藏铁路沿线 1980~2019 年这 40 年的大到暴雨的年均暴雨日图 2(a)及年均暴雨量图 2(b)空间分布情况可以发现, 年均暴雨日范围为 0~4 天, 说明在川藏铁路沿线暴雨并不频发, 同时对应于年均暴雨量来看, 一次暴雨发生的降水量没有出现异常多的情况。总体上来看, 暴雨日与暴雨量呈类似的空间分布, 即在铁路东段(康定、雅江、理塘)以及中段西段(波密、林芝、米林)的暴雨日与暴雨量是相对其他区域较大的, 其中暴雨日高值中心与暴雨量高值中心均位于波密(29.87°N, 95.77°E)。

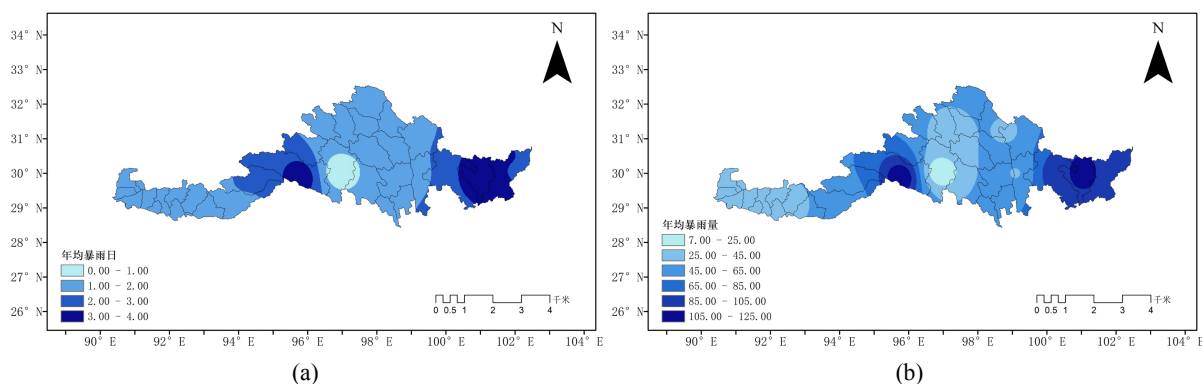


Figure 2. Spatial distribution map of average annual rainstorm days (a) and average annual rainstorm (b) along the Sichuan-Tibet Railway from 1980 to 2019

图 2. 川藏铁路沿线 1980~2019 年年均暴雨日(a)与年均暴雨量(b)空间分布图

3.2. 大到暴雨日数与暴雨量的月际变化与年际变化

本研究利用所求得的各站逐年以及逐月的暴雨日数与累积暴雨量，进行逐站平均计算，从而得到川藏铁路沿线 1980~2019 这 40 年的年际变化以及月际变化。

图 3(a)是川藏铁路沿线 1980~2019 年这 40 年的年均暴雨量与暴雨日的年际变化情况，可以发现年均暴雨日在 20 世纪 80 年代末至 20 世纪 90 年代末呈现出明显的振荡特征，在 1998 年达到最大值，在 01 年至 10 年则较为平缓，整体上年均暴雨日在这 40 年里呈增长的趋势。年均暴雨量同年均暴雨日呈现类似的年际变化，在 1998 年达到最大值 125 mm 左右，整体同样是增长的趋势。

图 3(b)是川藏铁路沿线 1980~2019 年这 40 年的月均暴雨量与暴雨日的月际变化情况，整体可以看出暴雨量与暴雨日是呈类似变化的，在 6 月至 9 月是暴雨频发的月份，最大值在 7 月，月均暴雨量达到 17.5 mm 左右。在 11 月、12 月和 1 月基本没有暴雨的发生。

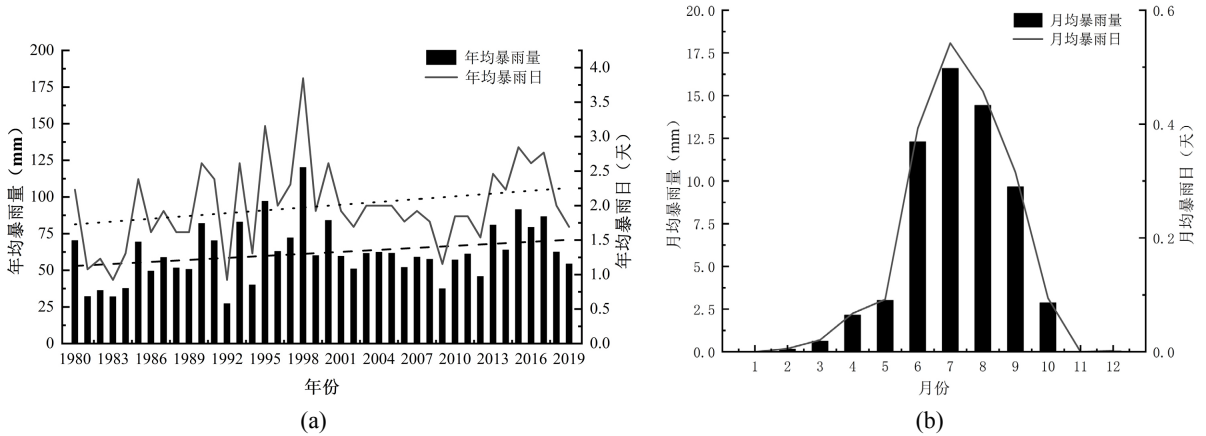


Figure 3. Interannual variation (a) and inter-monthly variation (b) of average daily heavy rainfall from 1980 to 2019 along the Sichuan-Tibet Railway

图 3. 川藏铁路沿线 1980~2019 年年均暴雨日年均暴雨量年际变化(a)与月际变化(b)

4. 年大到暴雨日数与暴雨量空间模态特征

4.1. 暴雨日空间模态特征

为了进一步了解川藏铁路沿线暴雨日的空间模态特征，本文对 1980~2019 年川藏铁路沿线的暴雨日进行了 EOF 分析，发现其前四个特征向量累计方差贡献率为 66.96% (表 1)，能够代表暴雨量的主要空间模态。因此，本节主要讨论前四个特征向量的时空特征。

Table 1. Analysis of variance contribution and cumulative variance contribution rate of the first four modes of rainstorm day EOF and rainstorm EOF along the Sichuan-Tibet Railway

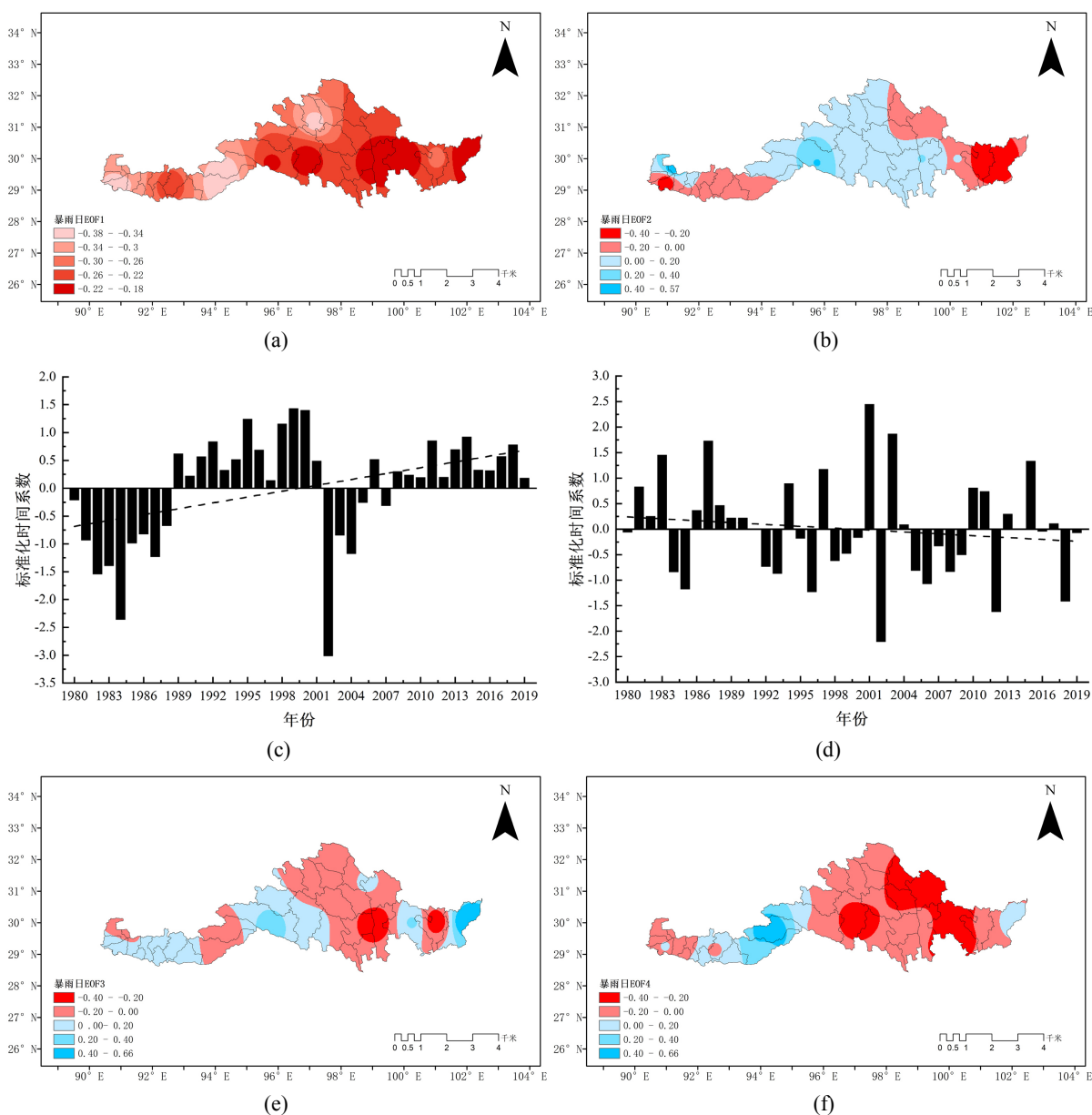
表 1. 川藏铁路沿线暴雨日 EOF 和暴雨量 EOF 分析前 4 个模态的方差贡献和累积方差贡献率

模态序号		1	2	3	4
暴雨日	方差贡献/%	37.39	11.52	9.26	8.79
	累计方差贡献/%	37.39	48.91	58.17	66.96
暴雨量	方差贡献/%	38.18	10.87	9.68	8.64
	累计方差贡献/%	38.18	49.05	58.73	67.37

图 4(a)是川藏铁路沿线暴雨日数 EOF 分解的第一特征向量场, 其方差贡献为 37.39%, 是暴雨日数最主要的空间模态。分析可知: 其特征向量整体载荷值全为负值, 即整个川藏铁路线的变化呈一致性变化; 绝对值高值中心区位于铁路线东段(雅江、理塘、巴塘)与中段部分区域(八宿、波密), 达到-0.22。由该特征向量所对应的时间系数(图 4(c))来看, 暴雨日数呈上升趋势, 且 20 世纪 80 年代与 20 世纪 90 年代呈现一个明显的年代际变化, 在 80 年代整体为负值, 90 年代则体现出整体为正值的特征。

图 4(b)是川藏铁路沿线暴雨日数 EOF 分解的第二特征向量场, 其方差贡献为 11.52%, 是暴雨日数的次要空间模态。分析可知: 川藏铁路线东段和西段载荷值为负值, 中段为正值, 呈现一个负正负分布; 这意味着当川藏线东段与西段暴雨日数减少(增多)时, 中段则会增多(减少)。图 4(d)是第二特征向量所对应的时间系数, 整体呈现下降趋势, 具有明显的振荡特征。

图 4(e)是川藏铁路沿线暴雨日数 EOF 分解的第三特征向量场, 其方差贡献为 9.26%。分析可知:



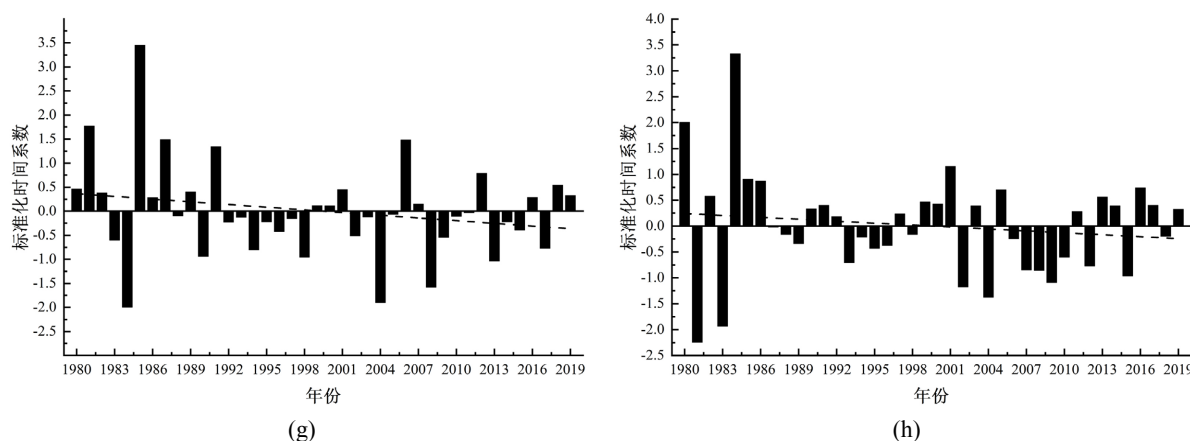


Figure 4. Eigenvectors of the first four modes of the EOF decomposition along the Sichuan-Tibet Railway and their corresponding time coefficients ((a), (c) first modal, (b), (d) second modality, (e), (g) third modality, (f), (h) fourth modality)

图 4. 川藏铁路沿线暴雨日数 EOF 分解前四个模态的特征向量及其对应的时间系数((a)、(c) 第一模态, (b)、(d) 第二模态, (e)、(g) 第三模态, (f)、(h) 第四模态)

川藏铁路线中段大部区域以及东段和西端小部分区域的载荷值为负值, 高值中心位于巴塘和雅江; 其余地区载荷值为正; 这意味着川藏铁路线暴雨日数在空间上呈现交错增减变化的特征。对应的时间系数(图 4(g))呈下降趋势。

图 4(f)是川藏铁路沿线暴雨日数 EOF 分解的第四特征向量场, 其方差贡献为 8.79%。分析可知: 川藏铁路线东段和中段大部区域载荷值呈负值, 高值区位于理塘、白玉和八宿; 铁路线西段载荷值为正值, 高值区位于林芝和米林; 这意味着川藏铁路线东段和中段与西段呈相反变化的特征。结合对应的时间系数(图 4(h))来看, 当铁路线东段与中段暴雨日数呈减少趋势时, 铁路线西段呈增多趋势。

4.2. 暴雨量空间模态特征

本节对 1980~2019 年川藏铁路沿线暴雨量进行了 EOF 分析, 得出前四个特征向量累计方差贡献率为 67.37% (表 1), 可以代表暴雨量的主要空间模态。

川藏铁路沿线暴雨量 EOF 分解的第一特征向量场(图 5(a))所占方差贡献率为 38.18%, 是最主要的空间模态, 其特征向量载荷值整体为正, 即整个川藏铁路线呈一致性变化, 高值区位于昌都、林芝和米林, 达到 0.39。对应的时间系数(图 5(c))呈现出明显的下降趋势, 同时 20 世纪 80 年代和 90 年代表现出明显的年代际振荡特征。

川藏铁路沿线暴雨量 EOF 分解的第二特征向量场(图 5(b))的方差贡献率为 10.87%, 呈现出铁路线东段载荷值为负值, 中段和西段载荷值为正值的偶极型空间分布; 负值中心位于雅江, 正值中心位于波密; 这意味着铁路线东段累积暴雨量减少(增加)时, 中段和西段会增加(减少)。对应的时间系数(图 5(d))呈弱减少趋势。

川藏铁路沿线暴雨量 EOF 分解的第三特征向量(图 5(e))的方差贡献率为 9.68%, 整体呈现载荷值正负交错的空间分布特征, 负值高值中心位于康定、理塘和加查, 正值高值中心位于林芝。对应的时间系数(图 5(g))具有明显的年际振荡, 且呈弱减小趋势。

川藏铁路沿线暴雨量 EOF 分解的第四特征向量(图 5(f))的方差贡献率为 8.64%, 表现为经向的偶极子分布, 约以 97°E 为界。铁路线东段和中段部分区域载荷值为正值, 其中康定例外为负值; 西段载荷值为负值, 其中拉萨例外呈现正值。结合第四特征向量的时间系数(图 5(h))来看, 铁路线东段和中段暴雨量呈增多趋势, 铁路线西段呈减少趋势。

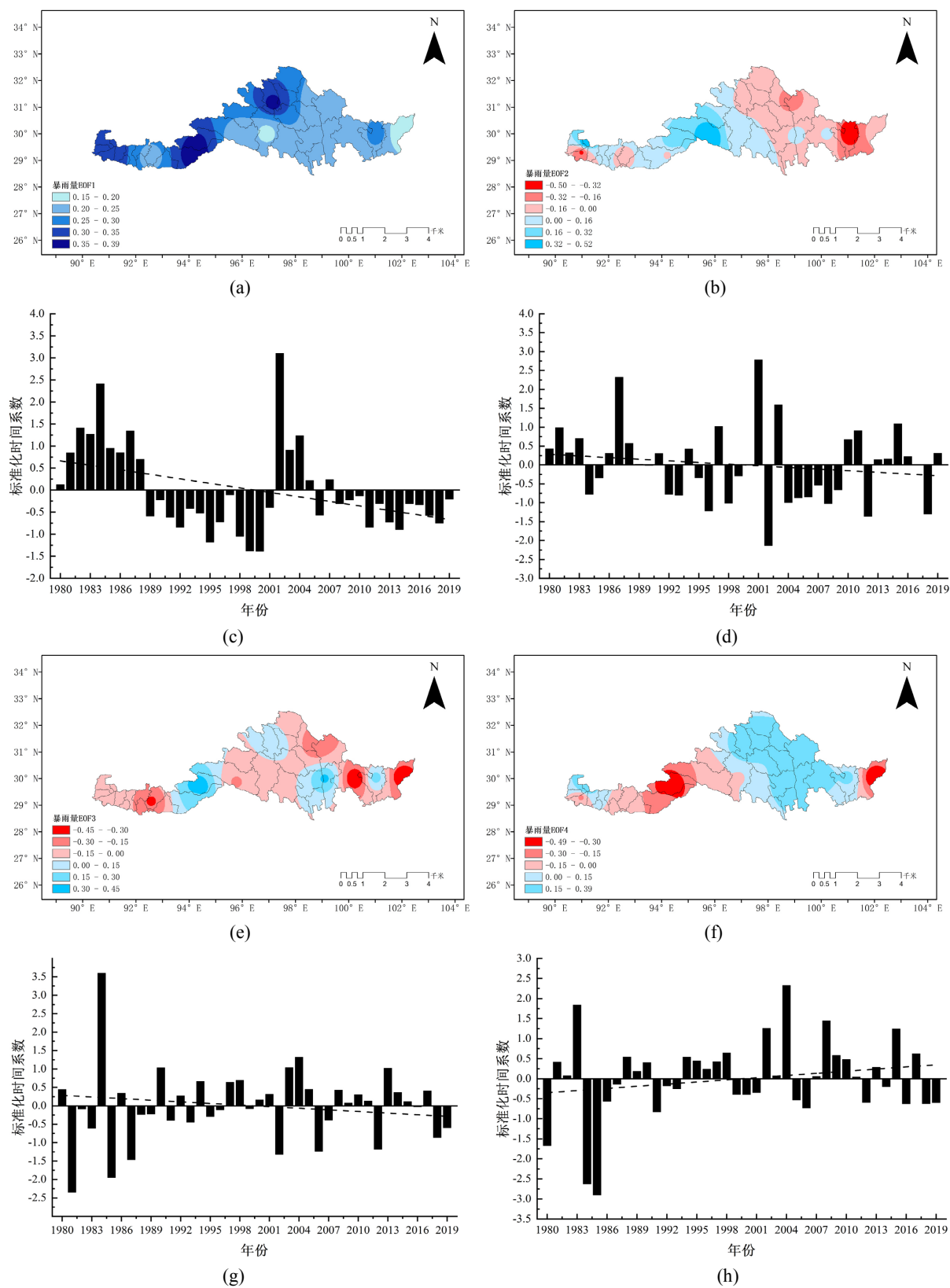


Figure 5. Same as Figure 4, but with heavy rainfall
图 5. 同图 4, 但为暴雨量

5. 周期变化特征

由以上对川藏铁路沿线年大到暴雨发生日数及暴雨量的 EOF 分析可以发现, 它们的第一特征向量能够表征年大到暴雨日和暴雨量的主要模态, 本文进一步对年大到暴雨日数及暴雨量的第一特征向量对应的时间系数进行小波分析, 图 6(a)和图 6(b)分别为该小波变换系数的实部分布图。

从图 6(a)可以看出, 在整个研究时段内, 主要有 4~6a、6~16a 及 18~26a 的周期变化, 20 世纪 90 年代及 20 世纪 10 年代存在 18~26a 的年代际周期震荡, 其中在 2019 年后等值线未闭合说明大到暴雨发生日数偏多仍会持续一段时间。在 20 世纪 80 年代初至 90 年代初存在 16~18a 的年代际周期振荡和 4~6a 的年际周期振荡, 6~16a 周期振荡在 90 年代中后期至 21 世纪初十分显著。

从图 6(b)可以看出, 在整个研究时段内, 主要存在 4~6a、6~16a 及 20~26a 的周期变化, 其中在整个研究时段内存在显著的 20~26a 的年代际周期震荡, 且在 2019 年后等值线也未闭合, 在 20 世纪 80 年代至 90 年代初存在 16~18a 的年代际周期振荡和 4~6a 的年际周期振荡, 6~16a 周期振荡在 90 年代前期至 21 世纪 20 年代初也十分显著。与暴雨发生日数相似, 20~26a 的周期尺度内的变化在整个研究时段都表现得十分稳定。

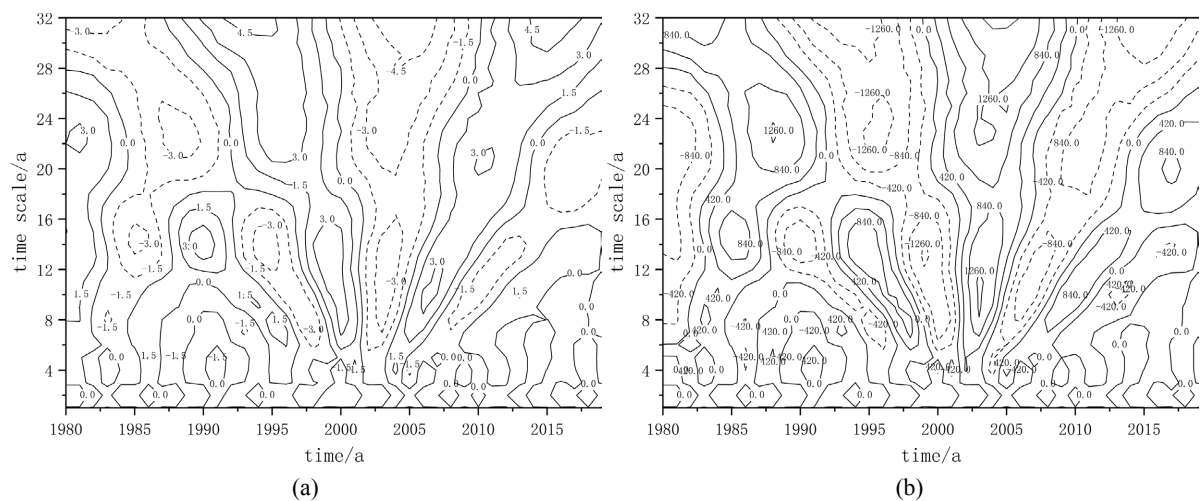


Figure 6. Wavelet coefficient real plot of rainstorm day (a) and rainstorm (b) time series along the Sichuan-Tibet railway
图 6. 川藏铁路沿线暴雨日(a)和暴雨量(b)时间序列的小波系数实部图

6. 结论

本文基于 1980~2019 年川藏铁路沿线 13 个地面观测站的逐日降水资料, 分析了近 40a 川藏铁路沿线大到暴雨的暴雨日与暴雨量的时空变化特征, 得到以下主要结论:

- 1) 川藏铁路沿线各站近 40a 的大到暴雨的年均暴雨日数与年均暴雨量在空间分布上呈类似的分布情况, 即铁路东段及中段西段相对其他区域的暴雨日和暴雨量是更大的, 且高值中心均位于波密;
- 2) 川藏铁路沿线近 40a 的年均暴雨量与暴雨日均呈增长的趋势, 月均暴雨量与暴雨日表明 6 月至 9 月是暴雨频发的月份, 其中最大值位于 7 月;
- 3) 暴雨量和暴雨日 EOF 分解前四个特征向量累计方差贡献均达到了 60%以上, 能够代表暴雨量和暴雨日的主要空间模态。其中暴雨量(日数) EOF 第一模态的方差贡献率为 38.18% (37.39%)其特征向量载荷值全为负值(正值), 即整个川藏铁路沿线的变化呈一致性。暴雨量与暴雨日的二、三表现出比较相似的空间特征, 第四模态则表现出相反的空间特征, 即第二模态表现为川藏铁路沿线“负正负”的分布特征,

第三模态表现为交错增减变化的分布, 第四模态暴雨量呈“西负东正”的反位相而暴雨日则是“西正东负”的反位相特征;

4) 小波分析表明, 近 40a 川藏铁路沿线大到暴雨的暴雨量和暴雨日均存在 4~6a 和 6~16a 的振荡周期。

基金项目

本文受到成都信息工程大学大学生创新创业训练计划(编号: 202210621013)的资助。

参考文献

- [1] 张颖, 郭婷婷, 黎世民, 等. 河南省主要农业自然灾害减灾抗灾思考——以河南“7·20”暴雨灾害为例[J]. 农业科技管理, 2021, 40(5): 10-11.
- [2] 孔锋, 王铸, 刘凡, 等. 全球、大洲、区域尺度暴雨时空变化格局(1981-2010) [J]. 北京师范大学学报, 2016, 52(2): 228-229.
- [3] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 中国不同强度暴雨年代际时空演变特征(1951-2010) [J]. 首都师范大学学报, 2017, 38(5): 75-83.
- [4] Ning, L. and Qian, Y.F. (2009) Interdecadal Change in Extreme Precipitation over South China and Its Mechanism. *Advances in Atmospheric Sciences*, **26**, 109-118. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-0109-x>
- [5] 李芸, 穆文彬. 西南地区暴雨时空分布特征分析[J]. 黑龙江大学学报, 2014, 5(2): 37-41.
- [6] 陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景[J]. 大气科学, 2016, 40(3): 581-590.
- [7] 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件[J]. 科学通报, 2002, 47(6): 467-473.
- [8] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1018-1030.
- [9] 何光碧, 曾波, 郁淑华, 等. 青藏高原周边地区持续性暴雨特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 865-874.
- [10] 肖红茹, 王佳津, 肖递祥, 等. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 2021, 47(3): 303-316.
- [11] 陈丹, 周长艳, 熊光明, 等. 近 53 年四川盆地夏季暴雨变化特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 197-206.
- [12] 蒋兴文, 王鑫, 李跃清, 等. 近 20 年四川盆地大暴雨发生的大尺度环流背景[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(Z1): 133-136.
- [13] 陈栋, 顾雷, 蒋兴文. 1981-2000 年四川夏季暴雨大尺度环流背景特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 443-450.
- [14] Cheng, X., Li, Y. and Xu, L. (2016) An Analysis of an Extreme Rainstorm Caused by the Interaction of the Tibetan Plateau Vortex and the Southwest China Vortex from an Intensive Observation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **128**, 373-399. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0420-2>
- [15] 湛芸. 青藏高原东北部地区大到暴雨天气过程的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京气象学院, 2004.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 99-104.
- [17] 王林, 陈文. 近百年来西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 21-26.