

从江县汛期暴雨频率时空特征及地形关系分析

赖小红^{1*}, 陈家辉¹, 莫平孝², 马锦涛¹, 李一鑫^{1#}

¹从江县气象局, 贵州 从江

²榕江县气象局, 贵州 榕江

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

为研究从江县汛期暴雨, 基于1985~2024年从江县长序列气象观测数据与高分辨率地形数据, 采用小波分析、最小二乘法(OLS)、地理加权回归(GWR)等方法, 系统分析了区域汛期暴雨的时空分布特征, 定量解析了海拔、坡度等地形因子对汛期暴雨频率的局地影响。从江县暴雨事件时空分布非均匀性显著, 空间上呈“西多东少”的分布格局, 时间上, 从江国家站年际变化存在显著的15~20年准周期震荡, 且近20年该周期信号的震荡强度显著增强。地形对暴雨的影响存在明显的空间异质性, 全局尺度下海拔对暴雨频率存在边缘显著的正影响, 而地理加权回归模型有效捕捉到了局地差异: 县域西部山区海拔与坡度对暴雨频率存在显著的正影响, 东部丘陵区域该影响则较弱。相较于传统的回归模型, 地理加权回归模型的拟合优度提升近2倍, 能够更好地刻画复杂山地地形对汛期暴雨的局地影响。

关键词

暴雨, 地理加权回归, 地形

Spatiotemporal Characteristics of Rainstorm Frequency in Flood Season and Its Relationship with Topography in Congjiang County

Xiaohong Lai^{1*}, Jiahui Chen¹, Pingxiao Mo², Jintao Ma¹, Yixin Li^{1#}

¹Congjiang County Meteorological Bureau of Guizhou Province, Congjiang Guizhou

²Rongjiang County Meteorological Bureau of Guizhou Province, Rongjiang Guizhou

Received: June 18, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 28, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 赖小红, 陈家辉, 莫平孝, 马锦涛, 李一鑫. 从江县汛期暴雨频率时空特征及地形关系分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(4): 813-819. DOI: 10.12677/ccrl.2026.154086

Abstract

To investigate rainstorms during the flood season in Congjiang County, based on the long-term meteorological observation data and high-resolution topographic data of Congjiang County from 1985 to 2024, methods including wavelet analysis, Ordinary Least Squares (OLS), and Geographically Weighted Regression (GWR) were adopted to systematically analyze the spatiotemporal distribution characteristics of regional flood-season rainstorms, and quantitatively explore the local impacts of topographic factors (e.g., elevation and slope) on rainstorm frequency in the flood season. The spatiotemporal distribution of rainstorm events in Congjiang County presents remarkable heterogeneity. Spatially, rainstorms follow a distribution pattern of “higher frequency in the west and lower frequency in the east”. Temporally, the interannual variation of rainstorms at Congjiang National Meteorological Station shows a significant quasi-periodic oscillation of 15~20 years, and the oscillation intensity of this periodic signal has increased significantly in the past 20 years. The impact of topography on rainstorms has obvious spatial heterogeneity. At the global scale, elevation exerts a marginally significant positive effect on rainstorm frequency, while the GWR model effectively captures local differences: elevation and slope show significant positive correlations with rainstorm frequency in the mountainous areas of the western county, whereas this effect is weak in the eastern hilly regions. Compared with traditional regression models, the goodness of fit of the GWR model is nearly doubled, which can better characterize the local impacts of complex mountainous topography on flood-season rainstorms.

Keywords

Rainstorm, Geographically Weighted Regression Analysis, Topography

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. 引言

从江县位于贵州省东南部，地处黔桂两省交界处，属于云贵高原向广西丘陵过渡的边缘地带。境内地形地貌变化多样，九万大山与苗岭山脉的余脉交错分布，都柳江贯穿全境[1]。区域高差较大，达 1500 米以上。受中亚热带湿润季风气候影响，年均降水量超过 1200 毫米，降水分布呈现显著的时空差异。由于地形复杂，局部地区频繁出现强降水[2]，给防汛减灾及农业生产带来了较大压力。

随着高分辨率气象数据的不断积累，学者们对降水的时空特性及其与地形之间的关系进行了深入探讨。以往的研究多采用最小二乘法构建回归模型，如舒守娟等人[3]运用偏最小二乘法分析了降雨与地形之间的关联。针对复杂地形下降水的时空特征，已有诸多研究[4]-[6]，但对从江县这一特定区域的精细化降水与地形关系研究仍较为有限。当前研究多集中于大尺度区域的分析，难以满足县域尺度精细化气候服务的需求。地理加权回归(GWR)模型通过将空间位置融入回归系数，能够有效捕捉变量间关系的局部变化，为定量分析复杂地形对降水的非平稳影响提供了有力工具。近年来，该模型在地形与降水关系的研究中得到了广泛应用[7]-[10]。因此，本文借鉴现有研究框架，结合长序列逐日降水观测数据与高分辨率地形数据，系统分析从江县降水的时空演变特征，并运用 GWR 模型，定量探讨海拔、坡度等地形因子对降水的局地影响，旨在为区域气候资源开发及山洪灾害防御提供科学依据。

传统全局回归方法通常假设变量间的联系在研究区域内保持一致，难以反映小尺度复杂地形下，地形因子对降水影响的局部变化；相比之下，GWR 模型将观测点的空间位置纳入回归方程，使回归参数能够随空间位置动态调整，从而更准确地捕捉空间异质性特征。GWR 模型的基本表达式为：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i + v_i) x_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad (1)$$

式中： y_i 为因变量， (u_i, v_i) 为第 i 个站点的空间坐标， $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项， $\beta_k(u_i + v_i)$ 为局部回归系数， x_{ik} 为第 k 个变量自变量， ε_{ik} 为第 k 个变量的随机误差项。

模型采用高斯距离权重函数来确定空间权重，权重计算公式为：

$$w_{i,j} = \exp\left[-(d_{i,j}/b)^2\right] \quad (2)$$

$w_{i,j}$ 为样本 j 对回归点 i 的空间权重，距离越近权重越大； $d_{i,j}$ 为两个样本点之间的地理距离； b 为模型的带宽，本研究采用最小化 Akaike 信息准责(AICc)来确定最优带宽，以平衡模型的偏差与方差，保证模型的拟合效果。

3. 结果分析

3.1. 暴雨频率时空分布特征

如图 2 所示，通过 ArcGIS 进行普通克里金插值法，可以绘制出暴雨日数的空间分布情况。从江县汛期的暴雨分布存在明显差异，暴雨分布总体呈西高东低的形式，西部暴雨日数在 4.8 年/天以上，东部则多小于 3.6 年/天。

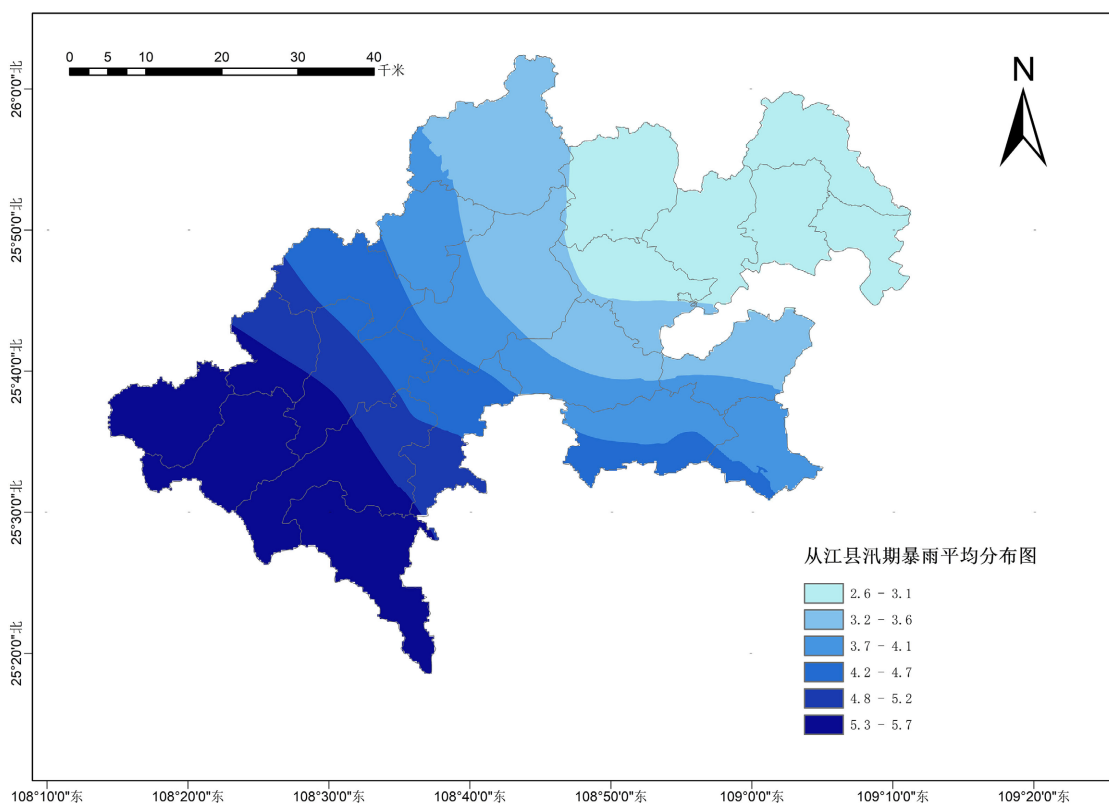


Figure 2. Spatial distribution map of average rainstorm days in flood season of Congjiang County

图 2. 从江县汛期平均暴雨日数空间分布图

3.2. 小波分析结果

小波系数的实部等值线能够揭示不同时间尺度下暴雨日数的周期性波动及其相位变化特征。图 3(a) 中, 从江国家站汛期暴雨日数在 15~20 年时间尺度下的准周期震荡尤为明显, 这一周期在 1985 至 2024 年的研究期间保持稳定, 呈现出明显的正负相位交替。负相位代表暴雨日数较少的时期, 正相位则对应暴雨日数较多的阶段。具体而言, 1992 年、2005 年、2014 年以及 2024 年前后为偏少期, 而 1985 年、1998 年、2010 年以及 2020 年前后则为偏多期, 同时, 还可以发现, 1985~1995 年存在 8~12 年的年际周期波动, 1987~2004 存在 4~5 年的周期波动。

小波模方分析(图 3(b))表明, 研究序列的能量主要集中在 15~20 年的时间尺度上。同时, 该尺度的能量呈现出持续增强的趋势: 1985~1995 年 8~12 年和 1987~2004 存在 2~3 年的周期波动较为清晰, 但 2000 年以后, 该短周期的能量明显减弱, 不再主导序列的变化。30a 年以上的长周期波动能量始终较弱, 无显著的周期特征, 且受小波变换边界效应的影响, 长周期结果可靠性较低。

总而言之, 2000 年之前以 4~5, 8~12 年, 15~20 年三种周期为主, 2000 年之后则以年 15~20 年的长周期波动为主导。

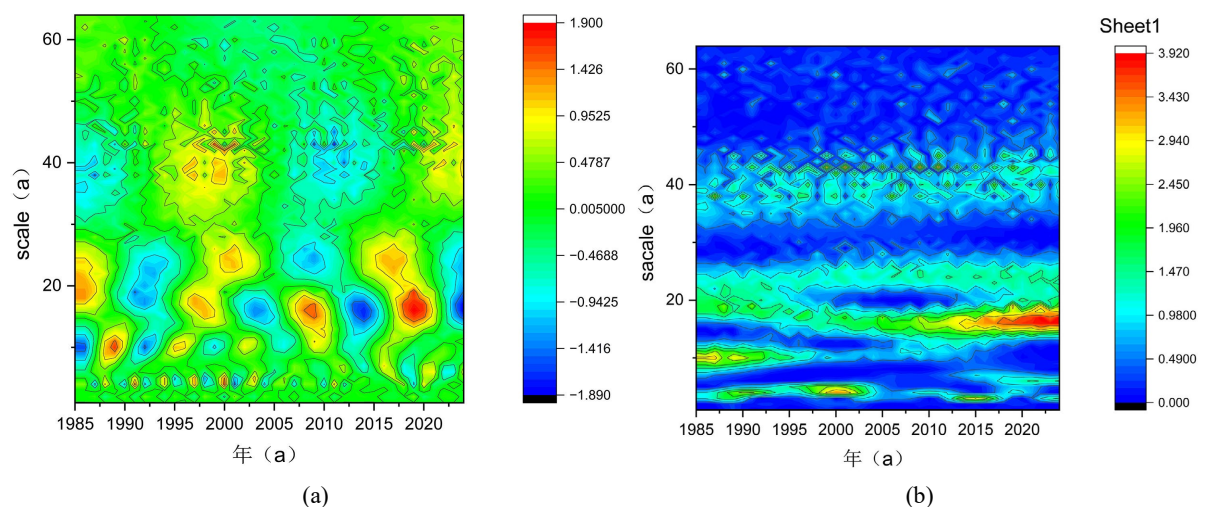


Figure 3. Real part (a) and Modulus squared (b) of rainstorms in flood season at national meteorological stations
图 3. 从江县国家站汛期暴雨实部(a) 及模方(b) 分布特征

3.3. 暴雨频率与地形的关系

3.3.1. OLS 模型

OLS 回归结果(表 1)显示, 海拔与汛期暴雨频率呈现显著的正相关关系, 回归系数为 0.002。普通 OLS 检验下, 该影响的 p 值为 0.021, 通过了 95%的显著性检验; 经过稳健标准误调整异方差后, p 值进一步降至 0.004, 说明海拔对暴雨频率的正向影响具有较强的稳定性, 普通 OLS 的标准化误差受异方差的影响, 一定程度上低估了该影响的显著性。另一方面, 坡度的回归系数为 0.085, 同样为正值, 但其 p 值为 0.209, 经过稳健标准误调整后仍为 0.211, 均未通过显著性检验, 方差膨胀因子(VIF)检验显示, 海拔与坡度的 VIF 值均为 1.121, 说明两个变量之间不存在多重共线性, 变量间不存在相互干扰, 回归结果具有可靠性。全局 OLS 模型的调整后 R^2 为 0.169, 表明该模型仅能解释研究区约 16.9%的汛期暴雨频率的空间变异, 解释能力有限。同时, OLS 模型假设地形对暴雨的影响在整个研究区是空间平稳的, 无法有效捕捉山区复杂的局部空间异质性; 此外, Jarque-Bera 检验的 p 值为 0.873, 大于 0.05, 表明模型残差符合

正态分布假设。

鉴于此，本研究进一步采用地理加权回归(GWR)方法，以捕捉地形对暴雨频率影响的局部异质性。

Table 1. Results of OLS analysis on rainstorm frequency
表 1. 暴雨频率 OLS 分析结果

变量	系数	标准差	T 统计量	概率	Rbust SE	Rbust_T	Rbust Pr	VIF
截距	1.080	1.015	1.063	0.294	1.044	1.033	0.308	-----
海拔	0.002	0.001	2.402	0.021*	0.0009	2.977	0.004*	1.121
坡度	0.085	0.067	1.276	0.209	0.067	1.271	0.211	1.121

注：*表示通过 0.01 的显著性检验。

3.3.2. GWR 模型结果

如表 2 所示，与普通最小二乘(OLS)模型相比，基于地理加权回归(GWR)的模型在 R^2 和调整后的 R^2 上有所提升，增幅接近两倍；AICc 作为评估模型拟合程度与复杂度的重要指标，数值越小表明模型表现越优。GWR 模型在 AICc 指标上优于 OLS 模型。从残差平方和的角度来看，OLS 模型的残差平方和为 77.031，而 GWR 模型的残差平方和仅为 63.242，说明 GWR 模型的残差更小，预测精度更高。因此，相较于 OLS 模型，GWR 在捕捉暴雨频率及地形特征方面表现出显著的提升效果。

Table 2. Metrics of OLS and GWR models
表 2. OLS 和 GWR 模型指标

拟合系数	OLS	GWR
R^2	0.208	0.392
R^2 Adjusted	0.169	0.300
AICc	158.982	153.787
残差平方和	77.031	63.242

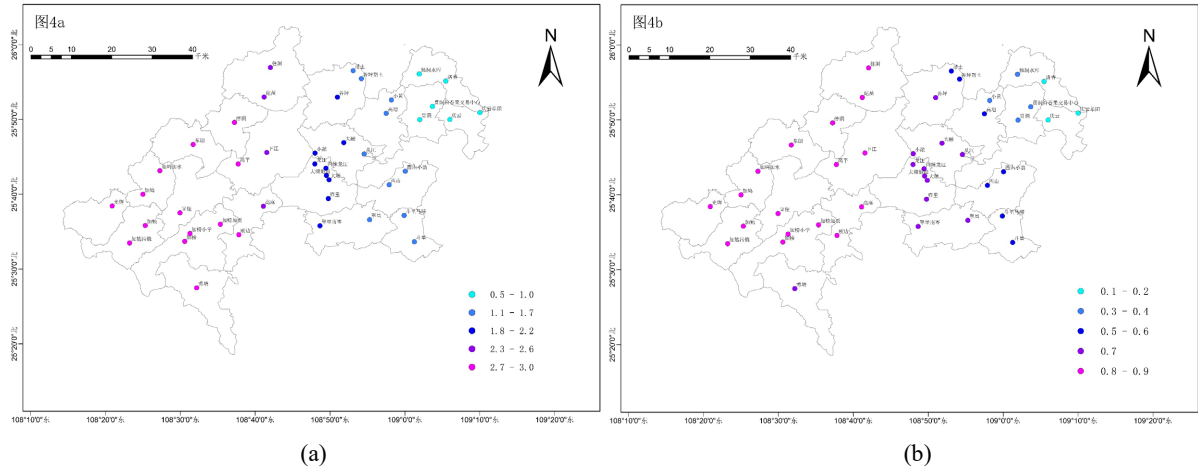


Figure 4. Spatial distribution maps of GWR regression coefficients between rainstorm frequency and elevation (a) & Slope (b)
图 4. 暴雨频率和海拔(a)、坡度(b)的 GWR 回归系数分布图

暴雨频率与地形的 GWR 回归分析结果均为显著。将暴雨频率与地形的 GWR 回归分析结果乘以 1000

后如图 4(a), 回归系数大值区域主要集中在县西部, 其中加鸠加水站的回归系数值最大, 为 2.998, 表明海拔每上升 1000 米, 暴雨频率增加 2.998 次/年。相比之下, 东部和北部的回归系数则较小, 其中庆云单阳站最小, 为 0.5。暴雨频次与坡度的 GWR 回归系数与地形结果基本一致, 但坡度回归结果均不显著, 将暴雨频率与坡度的 GWR 回归分析结果乘以 10, 如图 4(b), 大值区域仍主要位于从江县西部, 整体呈西高东低的形式分布。

4. 结论

本研究以 1985~2024 年从江县长序列气象观测数据与高分辨率地形数据为基础, 系统探讨了汛期暴雨日数的时空分布特征, 并分析了地形因素对暴雨频率影响。得出主要结论如下:

(1) 从江县汛期暴雨的时空分布存在显著的非均匀性, 且周期特征存在明显的年代际转型。空间上, 暴雨日数整体呈“西多东少”的格局: 西部山区的年平均暴雨日数可达 4.8 天以上, 高于东部丘陵区域 3.6 天的水平。时间上, 1985~2000 年, 暴雨频率以 4~5 年、8~12 年和 15~20 年的波动为主; 2000 年之后, 15~20 年的年代际周期成为主导, 且该周期的波动能量持续增强, 相位上呈现出清晰的正负交替震荡, 表明近 20 年年代际尺度的波动, 已经成为暴雨频率年际变化的核心驱动。

(2) 地形因子对暴雨频率的影响具有显著的空间异质性。回归分析表明, 海拔对暴雨频率有显著的正相关, 即海拔越高, 暴雨发生频率越高, 但坡度的全局影响未通过显著性检验。

(3) 相比传统的全局回归模型, GWR 模型在刻画复杂山地地形对暴雨影响方面更具优势, 模型的拟合优度提升近 2 倍, AICc 和残差平方和降低, 相较于 OLS, 更有效解释了县域尺度暴雨频率的空间变异。

参考文献

- [1] 邵子叶. 谈从江县地质灾害发育分布特征及形成条件[J]. 山西建筑, 2015, 41(7): 43-44.
- [2] 周志晖, 顾欣, 陈杨, 等. 近 10a 黔东南区域站与国家站降水时空对比分析[J]. 山地气象学报, 2021, 45(5): 88-93.
- [3] 舒守娟, 王元, 熊安元, 等. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1703-1712.
- [4] 王烁, 陈早阳, 张东海, 等. 1981-2023 年贵州省汛期小时强降水时空变化特征分析[J]. 山地气象学报, 2025, 49(6): 64-70.
- [5] 谢亚玲, 刘金洋, 龙宇芸, 等. 基于黔南区域站暴雨天气分布特征及成因分析[J]. 山地气象学报, 2025, 49(6): 93-97.
- [6] 杜小玲, 蓝伟, 陈波. 2000 年以来贵州最强梅汛期降水异常成因分析[J]. 山地气象学报, 2024, 48(3): 1-11.
- [7] Kumari, M., Singh, C.K., Bakimchandra, O. and Basistha, A. (2016) Geographically Weighted Regression Based Quantification of Rainfall-Topography Relationship and Rainfall Gradient in Central Himalayas. *International Journal of Climatology*, 37, 1299-1309. <https://doi.org/10.1002/joc.4777>
- [8] 谌伟, 刘佩廷, 徐枝芳, 等. 湖北强降水频次时空特征及基于 GWR 模型的地形关系分析[J]. 热带气象学报, 2022, 38(2): 216-226.
- [9] 张铭明, 李建, 甘玉婷, 等. 基于 GWR 模型的中国中东部降水与海拔高度关系特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 1-11.
- [10] 汪红, 严乔顺, 赵祖军, 等. 基于 GWR 降尺度的哀牢山 2000-2020 年降水时空变化特征研究[J]. 高原气象, 2025, 44(3): 643-656.