

梁峰铭, 谭超, 黄锋华, 等. 基于 K-means 聚类的降雨时空特征提取对水文模型预测结果的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 192-204. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.015

LIANG Fengming, TAN Chao, HUANG Fenghua, et al. The impact of precipitation spatiotemporal feature extraction based on K-means clustering on hydrological model predictions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 192-204. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.015

基于 K-means 聚类的降雨时空特征提取 对水文模型预测结果的影响

梁峰铭^{1,2,3,4}, 谭超^{1,2,3,4}, 黄锋华^{1,2,3,4}, 赵璧奎^{1,2,3,4}, 刘志敏^{1,2,3,4},
程涛^{1,2,3,4}, 李泽君^{1,2,3,4}, 左斌斌^{1,2,3,4}

- (1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510610; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510610; 4. 广东省水安全科技协同创新中心, 广东 广州 510610)

摘要:【目的】降雨作为水文模型的重要输入变量, 其时空特性对模型的预测能力具有重要影响。研究降雨在不同时空尺度下的变化特征, 对提高水文模型稳定性和预测精度具有重要意义。【方法】选择河南省下孤山流域为研究对象, 利用 SCS-CN 水文模型和新安江模型模拟历史较大洪水场次, 统计分析洪水场次的降雨时空特征和模型模拟精度, 探讨降雨的时空变化对水文响应和水文模型模拟能力的影响。【结果】新安江模型和 SCS-CN 水文模型平均确定性系数分别为 0.83 和 0.85, SCS-CN 水文模型略优于新安江模型。两种水文模型对历时短、暴雨中心集中的洪水模拟效果最佳, 而对暴雨中心接近流域出口的洪水模拟精度较低。【结论】低洪水条件下, 两种水文模型精度受平均降雨强度影响较大。中洪水条件下, 新安江模型受平均降雨强度和降雨空间变异系数影响较大, 而 SCS-CN 水文模型主要受降雨位置指数影响。高洪水条件下, 降雨位置指数是影响两种模型模拟能力的主要因素, 贡献率分别为 30.23% 和 33.97%。因此, 可根据不同降雨的时空特征优化模型参数, 以提升模型的模拟精度和可靠性。

关键词: SCS-CN 水文模型; 新安江模型; 降雨雨型; 降雨时空分布特征; 时空变化; 气候变化; 洪水预报; 全球水文循环

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.015

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV214

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0192-13



收稿日期: 2025-02-12; 修回日期: 2025-02-27; 录用日期: 2025-02-28; 网络出版日期: 2025-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52309014); 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515010898); 广东省水利科技创新项目(2023-05, 2024-04)

作者简介: 梁峰铭(1999—), 男, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liangfm1999@163.com

通信作者: 谭超(1985—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源等研究。E-mail: gdsky_tanchao@foxmail.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

The impact of precipitation spatiotemporal feature extraction based on K-means clustering on hydrological model predictions

LIANG Fengming^{1,2,3,4}, TAN Chao^{1,2,3,4}, HUANG Fenghua^{1,2,3,4}, ZHAO Bikui^{1,2,3,4}, LIU Zhimin^{1,2,3,4},
CHENG Tao^{1,2,3,4}, LI Zejun^{1,2,3,4}, ZUO Binbin^{1,2,3,4}

(1. Guangdong Research Institute Of Water Resources And Hydropower, Guangzhou 510610, Guangdong, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510610, Guangdong, China; 3. State Joint Engineering Laboratory of Estuary Hydraulics, Guangzhou 510610, Guangdong, China; 4. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Water Safety, Guangzhou 510610, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Rainfall, as an important input variable in hydrological models, significantly affects the prediction capabilities of these models. Studying the temporal and spatial variation characteristics of rainfall at different scales is crucial for enhancing the stability and prediction accuracy of hydrological models. [Methods] The Xiagushan watershed in Henan Province was selected as the study area. Historical flood events were simulated using the SCS-CN and Xin'anjiang models. The temporal and spatial characteristics of rainfall and the simulation accuracy of the models were statistically analyzed to explore the impact of rainfall variability on the modeling capabilities of these hydrological models and hydrological response. [Results] The average coefficient of determination for the Xin'anjiang model and the SCS-CN model were 0.83 and 0.85, respectively, with the SCS-CN model slightly outperforming the Xin'anjiang model. Both models showed the best performance in simulating floods with short durations and concentrated rainfall centers, whereas the simulation accuracy was lower when the rainfall center was closer to the watershed outlet. [Conclusion] Under low flood conditions, the accuracy of both hydrological models is significantly influenced by the average rainfall intensity. Under moderate flood conditions, the Xin'anjiang model is most affected by the average rainfall intensity and the rainfall spatial variability coefficient, while the SCS-CN model is mainly influenced by the rainfall location index. Under high flood conditions, the rainfall location index becomes the main factor affecting the simulation performance of both models, with contribution rates of 30.23% and 33.97%, respectively. Therefore, model parameters can be optimized based on the temporal and spatial characteristics of rainfall to improve the simulation accuracy and reliability of the models.

Keywords: SCS-CN hydrological model; Xin'anjiang model; rainfall pattern; temporal and spatial distribution characteristics of rainfall; spatiotemporal changes; climate change; flood forecasting; global hydrological cycle

0 引言

全球气候变化与城市化的共同作用对自然生态系统产生深远影响, 不仅改变水文循环的自然状态, 还增加了极端天气事件的频率、强度和持续时间^[1-2]。水文模型作为研究流域植被蒸散发、土壤水分下渗和运移、降雨水文响应及河道水量传输的数学物理模型, 在洪水预报、径流模拟和水资源管理等领域中发挥着重要作用^[3-5]。

洪水事件的发生概率本质上取决于降雨强度和土壤湿度^[6-7]。然而, 由于不透水区域面积占比、土地利用、土壤类型、地形、土壤湿度、地下水亏缺等多种水文因素的影响, 降水的再分配过程受到影响^[8-9]。此外, 由于在短时间内难以测量或估计这些参数, 加上降雨事件的随机性, 加大了洪水预警的难度^[10]。MIAO 等^[11]通过 GBHM 分布式水文模型在 4 个验证流域得到较好的模拟效果, 并通过耦合 IMERG 实时降雨产品, 构建了全国 1849 个小流域预

警系统。ZHANG 等^[12]基于小流域的降雨和下垫面资料, 发现了洪水生成阈值和上升阈值对山区洪水发展的影响, 并评估了在不同降雨强度和前期土壤湿度下, 洪水量级和两个阈值之间的水动力关系。DETTY 等^[13]认为前期土壤湿度指数和降雨量之和可代表降雨前和降雨期间土壤整体湿度状况, 可用于表征洪峰流量、暴雨强度和流域土壤湿度阈值关系的综合指标。虽然该指标仅应用于气候湿润的研究区域, 但对于半干旱半湿润气候区或存在地表入参与超渗产流机制的流域仍具有重要意义。

降雨作为水文模型的重要输入变量, 其时空变化特征对模型的模拟能力有显著影响^[14-15]。已有研究表明, 降雨峰值时间、雨型及其空间分布特征显著影响洪峰流量和流域的产汇流过程。梁峰铭等^[16]通过分析不同降雨雨型下临界雨量的变化规律, 发现降雨峰值时间越晚, 洪峰流量越大。WANG 等^[17]通过评估多种降雨产品对水文模型模拟的影响, 发现降雨产品对总降雨量的持续低估是影响模拟结果的重要因

素。刘薇等^[18]利用新安江模型探究设计暴雨的空间变化对模型模拟的影响,发现暴雨中心越接近流域出口,其洪峰流量越大,此外,若暴雨空间异质性越高,小雨也可能产生较大的洪峰。王雪梅等^[19]利用中国山洪水文模型分析不同设计降雨对模型洪峰出现时间的影响,发现均匀分布降雨的洪峰流量较小、峰现时间较晚,而非均匀降雨的洪峰流量越大、峰现时间越晚。然而,现有研究多集中于降雨时间或空间分布对水文模型的单方面影响,对降雨时空特性综合作用的探讨较少,且缺乏对其影响程度及贡献率的量化分析。

暴雨中心点的移动速度、方向或轨迹等特征同样会对洪水的产汇流阶段产生影响。由于水文响应对降雨变化存在滞后效应,暴雨中心的变化可能加快或减缓这一过程^[20-21]。已有学者逐步探讨了暴雨逐时变化与水文响应之间的关系, YANG 等^[22]发现随着降雨量的增大,降雨的空间异质性会对城市小流域洪峰流量的影响逐渐降低。李冰雪等^[23]通过分析不同台风移动路径所产生的城市内涝,发现台风移动路径会对城市内涝的时间过程产生明显影响,而对城市内涝积水特征的影响程度相对较低,且双峰型降雨对城市内涝的影响低于单峰型降雨。杨玲玲等^[24]发现降雨移动方向显著影响流域洪峰,在相同雨强和降雨量条件下,沿汇流路径减少方向移动会产生更高的洪峰,降雨路径越长,洪峰越高。在一定条件下,低雨强的洪峰可能超过高雨强。GHIMIRE 等^[20]发现流域水文响应主要取决于暴雨峰值、暴雨中心移动方向和流域的下垫面特征。刘业森等^[25]基于雨强和暴雨移动方向的资料,构建了多个设计降雨,发现降雨移动方向对洪峰的影响显著,洪峰流量减少的情况远多于增加的情况,且雨强越大,其影响越小。在河流下游,洪峰变动幅度明显大于上游,且单断面的洪峰受影响程度与降雨过程的移动方向呈现出较强相关性。综上,暴雨中心的运动特征与洪水产汇流过程存在显著关联,不同降雨变化特征对水文响应的影响表现出区域性和时段性差异。因此,深入探讨降雨时空特性与水文响应之间的内在联系,对于优化和提高水文模型结构的稳定性具有重要意义。

基于此,本文以河南省下孤山流域为例,利用两种不同产汇流机理的水文模型,结合研究区历史洪水场次的降雨时空特征指标、暴雨移动路径、降雨强度等特征,系统分析研究区的降雨类型特征,并探讨降雨时空特性对水文响应及不同洪水量级下水文模型模拟能力的影响规律,为流域洪水管理和水资源调度提供科学参考。

1 研究区域及数据来源

下孤山流域位于沙河支流荡泽河,属淮河流域沙颍河水系。气候类型以大陆性季风气候为主,受高空西风带影响,冷暖气团频繁交汇,易形成局地或大范围暴雨。流域面积为 354 km²,落叶阔叶林分布广泛,植被类型以华山松、油松、板栗树为主,森林覆盖率达 90%左右,土壤类型以半淋溶土和初育土为主。流域多年平均降水量约为 800 mm,70%~80%的降雨量集中于汛期,主河段顺直,河底坡度大,汇流迅速,山洪频发。本文获取下孤山流域 1980 至 2012 年的汛期降雨径流资料,包括 5—10 月逐小时径流量、降雨量、蒸散发等数据,流域范围内有土门、背孜街、井河口、叶坪、瓦屋 5 个雨量站,雨量站空间分布较为均匀。

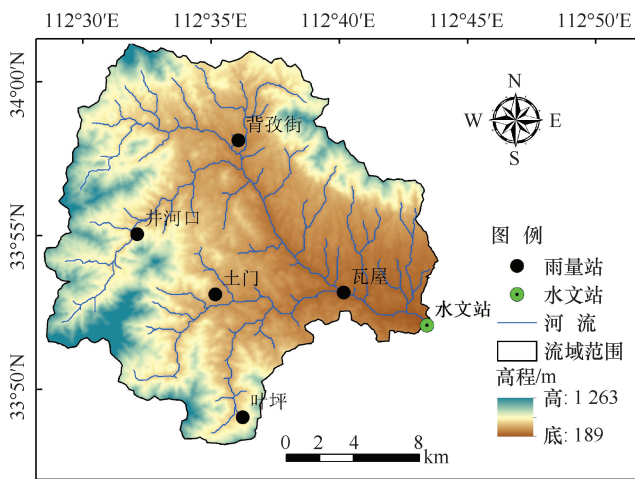


图 1 研究区概况

Fig. 1 Schematic diagram of the research area

2 研究方法

2.1 水文模型

本文选择两种水文模型,一是广泛应用于气候湿润区的三水源新安江模型。该模型将流域水文过程划分为地表径流、壤中流和地下径流三种水源。不少学者已将其应用于珠江流域、新安江流域、长江流域等不同下垫面和气候特征的研究区域^[26],具体水文模型原理可参考张晓菁等^[27]的研究成果。二是综合考虑了降雨强度因子的 SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) 水文模型^[28]。该模型以美国农业部水土保持局的径流曲线产流模型为基础,在产流模块中通过考虑场次降雨过程中最大 60 min 雨强的影响,有效提高水文模型在强降雨情形下的模拟能力。通过耦合滞后演算法和马斯京根法来建立 SCS-CN 水文模

型, 该模型已在多个研究区得到验证和应用^[16,29]。公式为

$$P = F + Q + I_a \quad (1)$$

$$Q = \begin{cases} \frac{\left(P\left(\frac{I_{60}}{\bar{I}}\right)^\beta - I_a\right)^2}{P\left(\frac{I_{60}}{\bar{I}}\right)^\beta - I_a + S}, & P\left(\frac{I_{60}}{\bar{I}}\right)^\beta > I_a \\ 0, & P\left(\frac{I_{60}}{\bar{I}}\right)^\beta \leq I_a \end{cases} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

$$S = 254(100/CN - 1) \quad (4)$$

式中, Q 为径流深(mm); P 为降雨量(mm); I_a 为初损量; F 为实际入渗量; I_{60} 为场次降雨过程中最大 60 min 雨强 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); \bar{I} 为场次降雨的平均雨强 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); β 为雨强修正参数, 需要通过前期洪水场次的降雨过程进行率定; S 为潜在蓄水能力; CN 为曲线数, 可反映流域下垫面特征、土壤渗透性和土地利用类型对径流的影响。

SCS-CN 水文模型包括考虑降雨特征因子的 SCS-CN 产流模块、滞后演算法和马斯京根法。基于流域河流和气象站的空间分布信息, 将研究区划分多个子流域, 利用泰森多边形法得到子流域面降雨量。对于各子流域的产汇流阶段, 利用优化的 SCS-CN 产流模块模拟各个子流域的产流量, 再通过滞后演算法和马斯京根法按不同路径汇流至流域出口断面, SCS-CN 水文模型主要参数的取值范围如表 1 所列。

表 1 SCS-CN 水文模型参数的取值范围

Table 1 The range of values for SCS-CN hydrological model parameters

序号	参数名称	参数缩写	取值范围
1	曲线数	CN	(0, 100)
2	初损率	λ	(0, 0.4)
3	雨强修正因子	β	(-0.05, 0.05)
4	蒸发折算系数	K_c	(0.8, 1.2)
5	河网汇流历时	L	(0, 2)
6	马斯京根法参数	x	(0, 0.5)
7	河网消退系数	CS	(0, 1)

2.2 降雨时空变异评价指标

山区流域的降雨特征受天气系统与地形相互作用的影响, 暴雨的空间分布、运动和强度特征复杂多变, 单一指标难以全面表征其特征^[2,30]。此外, 流域在不同地理位置发生暴雨的量级、频率和时空分布不一致, 存在多种不确定性的情景, 可能导致流域上下

游或干支流产生的洪水在河道演进过程中会发生多种洪水过程线叠加。因此, 本文采用降雨空间变异系数、降雨位置指数和降雨时间变差系数等多种指标来综合分析降雨的时空变化特征。

降雨空间变异系数反映了降雨在流域空间尺度上的变异性。空间变异系数越大, 表明降雨的空间离散程度越高, 而接近 0 则表示降雨更加集中。公式为

$$C_{v, s} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i (P_i - P_m)^2}}{P_m} \quad (5)$$

式中, P_m 为累积面雨量; a_i 为站点 i 泰森多边形法的权重占比; P_i 为站点 i 的累积雨量; N 为站点数。

降雨位置指数表示累计强降雨中心与流域出口之间的距离。尽管强降雨的位置会因时间、雨量站监测和地形等因素而发生变化, 但通过流域的地理质心和降雨质心, 可以评估不同强降雨时段与流域出口的位置关系。 $C_{pcp, t}$ 为降雨质心, $I_{pcp, t}$ 为降雨质心与流域质心的比值。当 $I_{pcp, t}$ 小于 1 时, 表明该时段强降雨的位置接近流域出口; 当 $I_{pcp, t}$ 大于 1 时, 表明强降雨的位置远离流域出口, 其计算可表示为

$$C_{pcp, t} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i a_i L_i}{\sum_{i=1}^N P_i A_i} \quad (6)$$

$$I_{pcp, t} = \frac{C_{pcp, t}}{C_{usn}} \quad (7)$$

$$I_L = \frac{\sum_{t=1}^T I_{pcp, t} P_t}{\sum_{t=1}^T P_t} \quad (8)$$

式中, P_i 为第 i 站的降雨量; L_i 为第 i 站到流域出口距离; a_i 为站点 i 的泰森多边形权重; C_{usn} 为流域质心; $I_{pcp, t}$ 和 P_t 代表为每小时的降雨位置指数和面积平均降雨量。

降雨时间变差系数可表示场次降雨的时间分布均匀程度。其定义与径流变差系数相似, 均反映时间尺度上的变化程度, 但相较于径流的变化, 降雨时间变差系数通常更大。 $C_{v, t}$ 越小, 表明降水的时间分布越均匀。公式为

$$C_{v, t} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (P_t - \bar{P})^2}{n-1}}}{\bar{P}} \quad (9)$$

式中, P_t 为第 t 小时的面雨量; n 为降雨事件持续时

间; \bar{P} 为平均降雨强度。

2.3 基于方差分析的 Sobol 分析法

Sobol 分析法是一种全局敏感性分析法^[31-32]。基于方差分解的理念, 将方差的变化量转化为单参数和多参数之间相互作用的函数关系。通过采用样本点的方式进行参数抽样, 分解计算每个参数对模型输出方差的贡献, 以及参数之间相互作用导致的方差。

Sobol 分析法可定量计算参数或影响因子对输出量的影响。对于一个定义在 n 维单位的可积函数 $f(X) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, 可以将其分解为

$$D(Y) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{i,j} + \sum_{i < j < k} D_{i,j,k} + \dots + D_{1,2,\dots,N} \quad (10)$$

式中, D_i 为模型参数 X_i 的方差; $D_{i,j}$ 为模型参数 X_i 和 X_j 相互作用的方差。

2.4 水文模型精度评价指标

为评估水文模型的模拟能力, 本文采用洪峰相对误差 (δ_p)、洪量相对误差 (δ_v)、峰现时间误差 (T_e) 和确定性系数 (DC) 等指标, 分析新安江模型和 SCS-CN 水文模型在不同洪水量级下的模拟精度^[33]。洪峰相对误差和洪量相对误差反映了模型整体的模拟能力, 越接近于 0 则表示模型模拟精度最高。确定性系数是衡量模拟洪水与实测洪水的拟合程度, 越接近于 1 则代表模型模拟效果越好。公式为

$$\delta_p = \frac{Q_{sim,m} - Q_{obs,m}}{Q_{obs,m}} \quad (11)$$

$$\delta_v = \sum_{i=1}^M \frac{Q_{sim,i} - Q_{obs,i}}{Q_{obs,i}} \quad (12)$$

$$T_e = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N T(Q_{sim,m}) - T(Q_{obs,m}) \right| \quad (13)$$

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^M (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (14)$$

式中, $Q_{sim,m}$ 为模型模拟的洪峰流量 (m^3/s); $Q_{obs,m}$ 为实测的洪峰流量 (m^3/s); $Q_{sim,i}$ 为模型第 i 个时段的模拟流量 (m^3/s); $Q_{obs,i}$ 为模型第 i 个时段的实测流量 (m^3/s); N 为总场次数; M 为洪水场次总时长; $\overline{Q_{obs}}$ 为观测序列的平均值 (m^3/s)。

3 结果与分析

3.1 水文模型的模拟结果及分析

基于 1980—2012 年下孤山流域降雨径流资料, 筛选出了 25 场较大洪水, 以进行水文模型的参数率定。前 20 场洪水数据作为水文模型参数率定的测试

集, 而剩余 5 场洪水用于模型验证。水文模型的参数率定采用粒子群优化算法, 目标函数为综合评价指标, 该指标包括纳什效率系数、洪峰系数和洪量系数, 权重分别为 0.5、0.3 和 0.2^[26-29]。水文模型的模拟结果如图 2 所示, 模型精度评价指标如表 2 所列。

表 2 新安江模型和 SCS-CN 水文模型模拟结果的评价指标

Table 2 Evaluation indicators for simulation results of Xin'anjiang model and SCS-CN hydrological model

时期	评价指标	新安江模型	SCS-CN 水文模型
率定期	洪峰相对误差/%	14.87	13.40
	洪量相对误差/%	14.37	16.47
	确定性系数	0.85	0.87
验证期	洪峰相对误差/%	14.57	14.47
	洪量相对误差/%	13.75	14.52
	确定性系数	0.76	0.78

由图 2 分析可知, 经参数率定后, 两个水文模型的模拟结果与实测径流数据表现出良好的一致性。在率定期, 新安江模型的平均确定性系数为 0.85, 平均洪峰相对误差为 14.87%, 平均洪量相对误差为 14.37%。整体上, 新安江模型的平均确定性系数为 0.83, 平均洪峰相对误差为 14.81%。而 SCS-CN 水文模型的平均确定性系数为 0.85, 洪峰相对误差为 13.60%, 洪量相对误差为 16.11%。总体而言, 两个模型对研究区大部分洪水的模拟效果较好。在综合模拟能力上, SCS-CN 水文模型略优于新安江模型。然而, 两个水文模型对于洪峰和洪量的模拟能力有所不足, 平均相对误差均高于 10%, 常常出现显著低估现象。这可能是由于水文模型目标函数中洪峰系数的权重相对较低, 模型对极端降雨情况下高流量值的敏感性不足。根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008), 新安江模型和 SCS-CN 水文模型的模拟精度均可达到乙级标准, 因此, 两个水文模型均可用于下文分析降雨时空变化特征与水文模型模拟精度的关系。

3.2 基于 K-means 聚类的降雨时空特征分析

降雨的多变性不仅体现在时间特征或空间特征上, 暴雨的移动方向或速度同样也是重要因素^[34-35]。基于下孤山流域多站点雨量数据, 通过提取场次降雨的降雨空间变异系数、降雨位置指数和时间变差系数等特征, 并采用 K-means 聚类方法对洪水场次降雨事件进行分类, 进而识别降雨时空特征的内在关系。聚类分组数可通过轮廓系数和 Calinski-Harabasz 指数来确定。经聚类分析后, 下孤山流域的降雨类型可划分为三类(I类、II类和III类)。降雨类型空间分布如

图 3 所示, 其特征参数统计结果如表 3 所列和图 4 所示。

由图 3 可知, I 类、II 类和 III 类雨型的暴雨中心

分别位于土门雨量站、背孜街雨量站以及瓦屋雨量站, 其中土门和背孜街分别位于迎风坡, 而瓦屋则靠近流域出口。在降雨空间变异系数方面, II 类雨型的

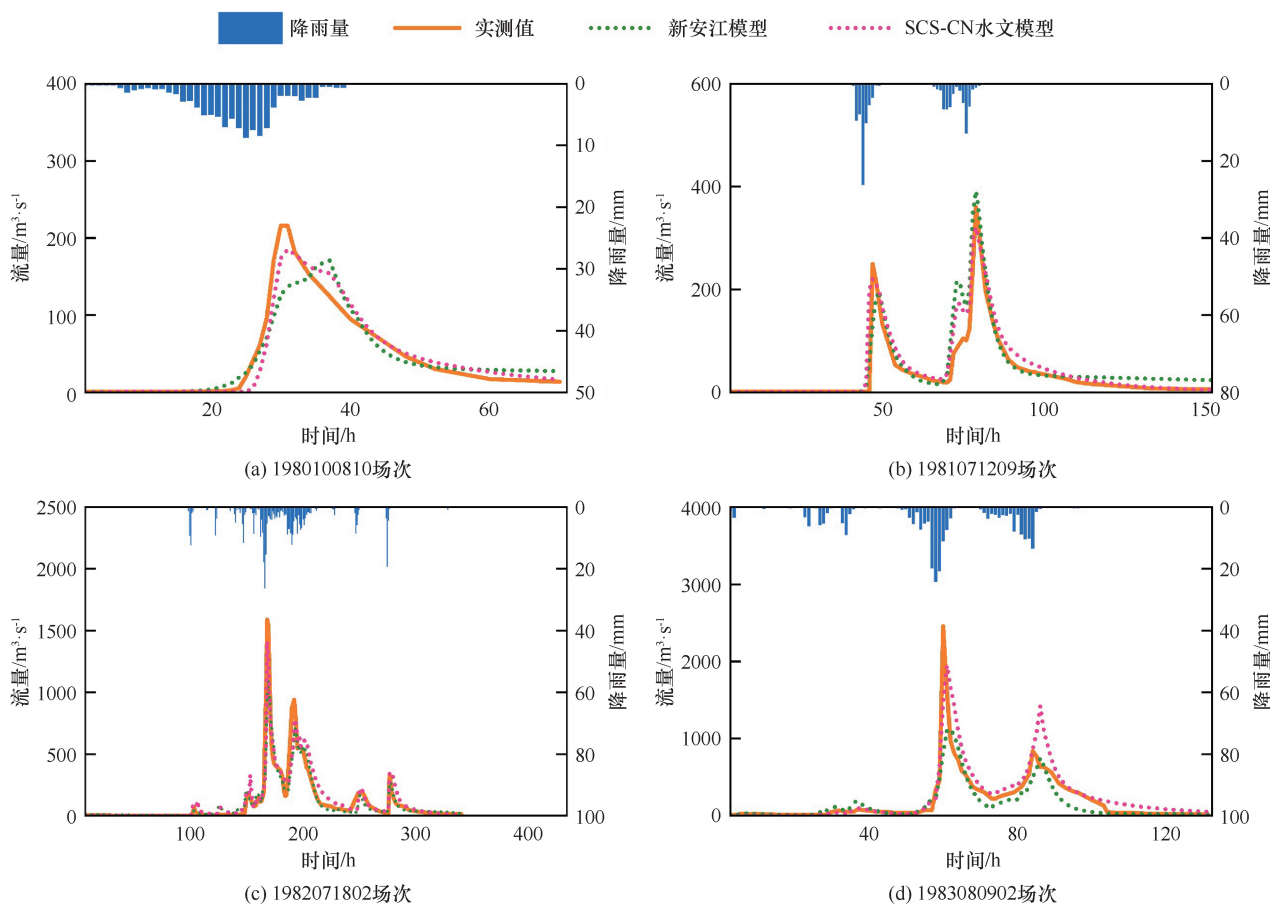


图 2 新安江模型和 SCS-CN 水文模型部分洪水场次的模拟结果

Fig. 2 Simulation results of partial flood events in Xin'anjiang model and SCS-CN hydrological model

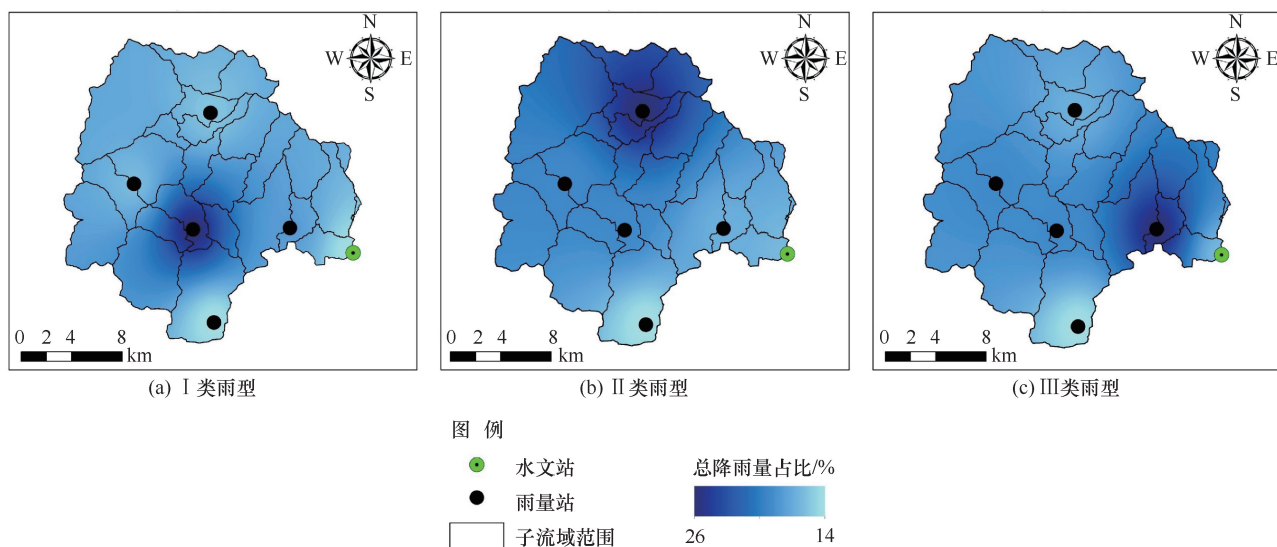


图 3 三种降雨雨型的空间分布 (总降雨量占比代表该站点降雨量占全部观测站降雨量的比值)

Fig. 3 Spatial distribution of three types of rainfall patterns (The proportion of total rainfall represents the weight of the rainfall at this station compared to the total rainfall at all observation stations)

表 3 降雨时空特征指标统计

Table 3 Statistical summary of spatiotemporal rainfall characteristics indicators

降雨特征指标	最大值			最小值			平均值		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
降雨时间变差系数	3.59	1.73	2.62	2.76	1.06	2.06	3.07	1.48	2.31
降雨空间变异系数	0.36	0.61	0.43	0.07	0.05	0.08	0.24	0.25	0.21
降雨位置指数	1.09	1.09	1.05	0.93	0.98	0.91	0.97	1.02	1.00
总降雨量/mm	471.57	175.35	433.95	84.96	55.69	59.79	193.69	112.68	195.73
最大降雨强度/mm · h ⁻¹	44.02	23.93	31.32	12.07	7.51	7.99	25.29	10.99	17.19
平均降雨强度/mm · h ⁻¹	2.66	4.12	2.75	0.62	0.96	0.56	1.28	1.80	1.31

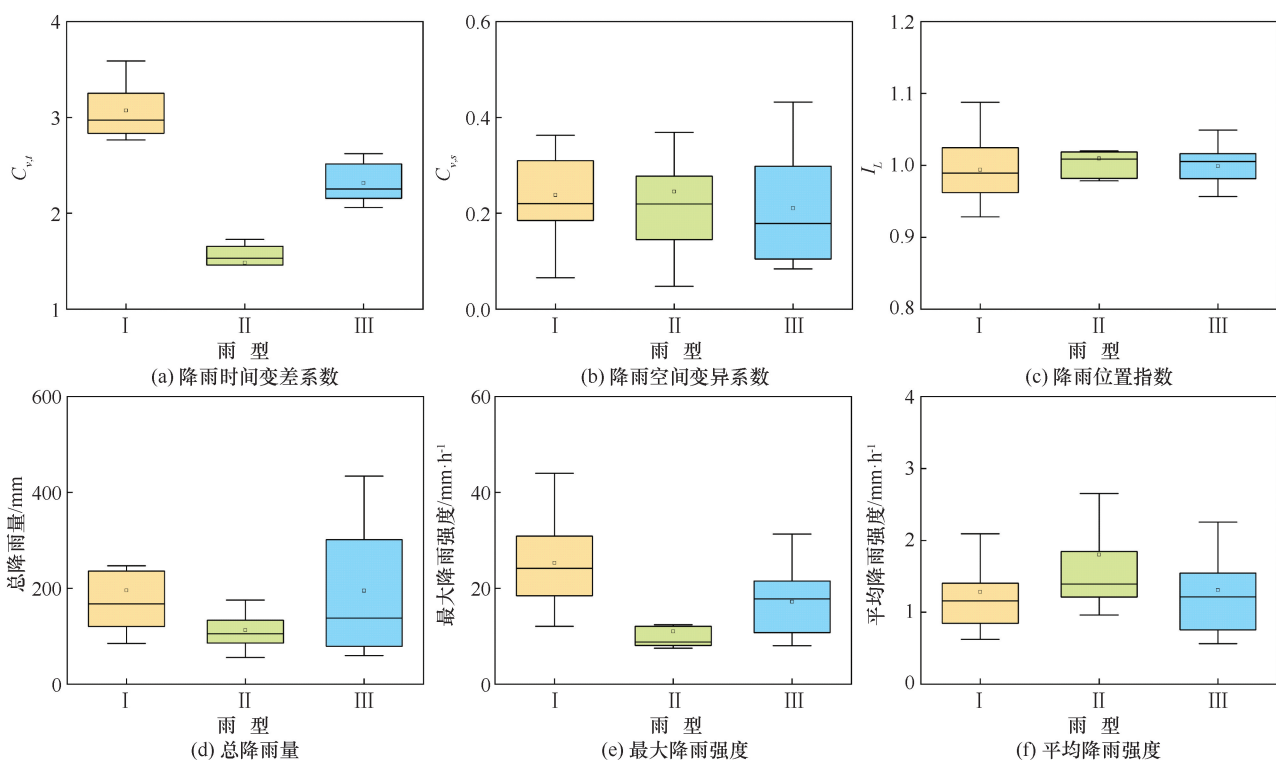


图 4 三种降雨类型的特征指标

Fig. 4 Rainfall characteristic indicators for three types of rainfall

平均空间变异系数为 0.24, I 类次之, III 类最低, 表明 II 类雨型的降雨空间差异性较大。在降雨位置指数方面, II 类雨型的平均降雨位置指数最大为 1.02, I 类次之为 1.00, III 类最低为 0.97, 表明 II 类雨型暴雨中心距离流域出口最远, III 类雨型最近。在降雨时间变差系数方面, I 类雨型的平均时间变差系数为 3.07, 降雨在时间上的波动最显著; III 类次之为 2.31, II 类最低为 1.48, 说明 I 类雨型降雨在时间尺度上变化程度最大。I 类雨型的平均总降雨量为 193.69 mm, 最大降雨强度为 44.02 mm · h⁻¹, 降雨峰值特征比较明显。II 类雨型的平均总降雨量为 112.68 mm, 平均降雨强度为 1.80 mm · h⁻¹, 可代表山区发生历时短、暴雨中心远离流域出口的强降雨。III 类雨型的平均降雨强度为 1.35 mm · h⁻¹, 可代表

在降雨空间上较为集中且接近流域出口的降雨。

上文通过对降雨特征因子进行聚类分析, 确定了下孤山流域三种特征显著的降雨雨型。三种降雨雨型特征对水文模型的模拟精度会产生影响, 在同一种降雨雨型条件下, 不同水文模型的模拟精度也有差异。基于此, 本文分别统计分析在三种降雨雨型下新安江模型和 SCS-CN 水文模型模拟精度变化, 其结果如图 5 所示。

从图 5 分析可知, 新安江模型和 SCS-CN 水文模型在 II 类雨型下的模拟性能最优, 平均确定性系数分别为 0.86 和 0.88, 洪峰相对误差和洪量相对误差均低于 10%, 表明水文模型对降雨历时短且暴雨中心远离流域出口时具有较高适应性。III 类雨型的模拟效果相对较好, 其次是 I 类雨型, 这说明在降雨空间分

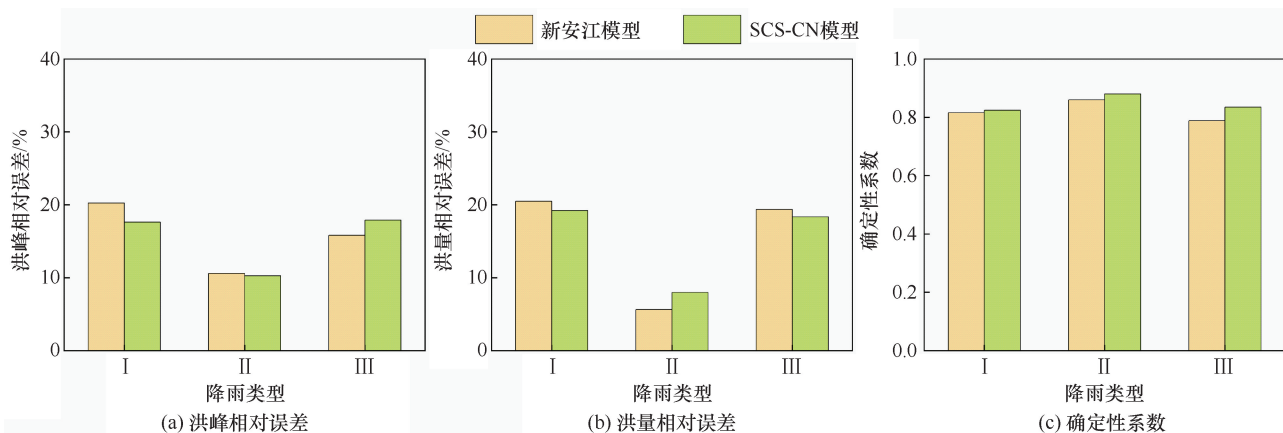


图5 不同降雨类型下水文模型的模拟精度

Fig. 5 Simulation accuracy of hydrological models under different rainfall types

布不均且暴雨中心接近流域出口时,水文模型对洪峰流量及洪水过程的模拟能力有所下降,即水文模型模拟精度对降雨位置指数的敏感性较高^[36]。在II类雨型下,SCS-CN水文模型的模拟能力优于新安江模型约3.4%,这可能是由于SCS-CN水文模型在产流模块中考虑了降雨强度因子的影响,从而提高模型在强降雨时的模拟能力。峰前型、峰中型和峰后型降雨分别占总降雨场次的39.13%、34.78%和21.74%,而双峰型降雨占比13.04%,表明下孤山流域以峰前型降雨为主。相比于峰前型降雨,峰中型和峰后型降雨由于降雨峰值时间延迟,下垫面土壤含水量较高,洪峰相应增大。在峰前型、峰中型和峰后型降雨条件下,两个水文模型的平均确定性系数分别为0.83、0.80和0.77,因此,水文模型在峰前型降雨的模拟精度相对较高。

3.3 降雨时空特征对水文模型在不同洪水量级的影响

不少学者表明降雨的时空分布特征不仅影响洪水量级,还对水文模型的模拟精度产生一定影响^[35-37]。为此,通过分析不同洪水量级与降雨特征的关系,以及水文模型模拟能力与降雨特征之间的联系,探讨降雨时空特征对水文模型在不同洪水量级上的影响。

基于下孤山流域场次洪水的洪峰流量(Q_{\max}),利用频率分析法,以2 a一遇洪峰和5 a一遇洪峰作为划分标准,将洪水划分为低洪水、中洪水和高洪水

三种^[29],划分场次数如表4所列。为分析降雨特征与洪水量级之间的成因及变化趋势,通过Person相关性分析法分别评估不同洪水量级与降雨特征指标之间的关系,结果如图6所示。

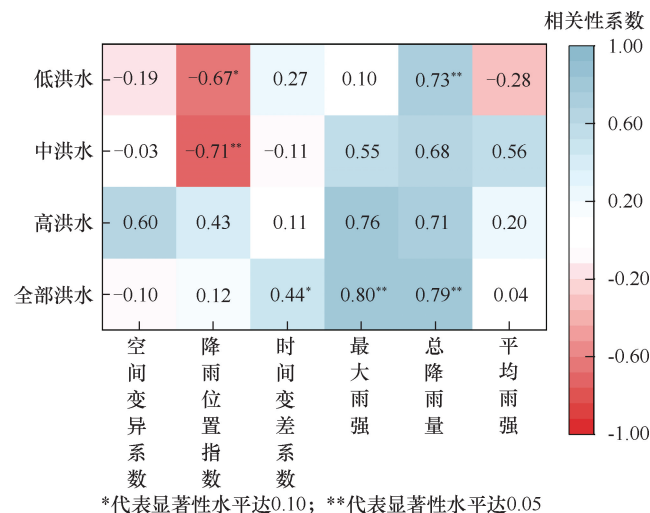


图6 不同洪水量级的洪峰流量与降雨特征指标的相关关系

Fig. 6 The correlation between peak discharge and rainfall characteristic indicators at different flood levels

从图6分析可知,全部洪水场次的洪峰流量与最大雨强、总降雨量存在显著的正相关,说明降雨强度和降雨量越大,洪水峰值越高。对比不同量级的洪水,在中洪水时,洪峰流量与降雨位置指数呈显著负相关,表明暴雨中心越接近流域出口,洪峰流量越大。然而,对于高洪水,降雨位置指数与洪峰流量的

表4 高中低洪水场次划分标准

Table 4 Classification standards for high, medium, and low flood events

洪水量级	低洪水	中洪水	高洪水
划分标准	$Q_{\max} \leq 450 \text{ m}^3/\text{s}$	$450 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{\max} < 1\ 620 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\max} \geq 1\ 620 \text{ m}^3/\text{s}$
划分场次数	12	8	5

关系未达到显著性水平, 这可能是因为高洪水雨量十分充沛, 降低了流域对暴雨中心位置的敏感性。在低洪水时, 降雨位置指数与洪峰流量的相关性系数略低于中洪水, 这可能是因为仅当降雨量达到一定阈值时, 暴雨中心的空间变化特征才会影响洪水峰值, 否则大部分的降雨量会主要满足于研究区土壤的缺水[16,38]。综上所述, 对比三个降雨时空特征指标, 降雨位置指数与洪峰流量的关系最为紧密。结合水文模型在不同降雨雨型下的模拟结果可知, 暴雨中心与

流域出口之间的距离是影响水文模型模拟能力和洪峰流量的重要因素。

为具体量化降雨时空特征对水文模型和洪水量级的影响, 本文采用了基于方差分析的 Sobol 分析法, 定量评估在不同洪水量级下, 各种降雨特征指标对水文模型模拟精度的贡献率。Sobol 指数可表示单个参数变化对模型输出的影响, 通过对其标准化后, 即可分析出每个降雨特征指标对水文模型模拟精度的影响及贡献率, 其结果如图 7 所示。

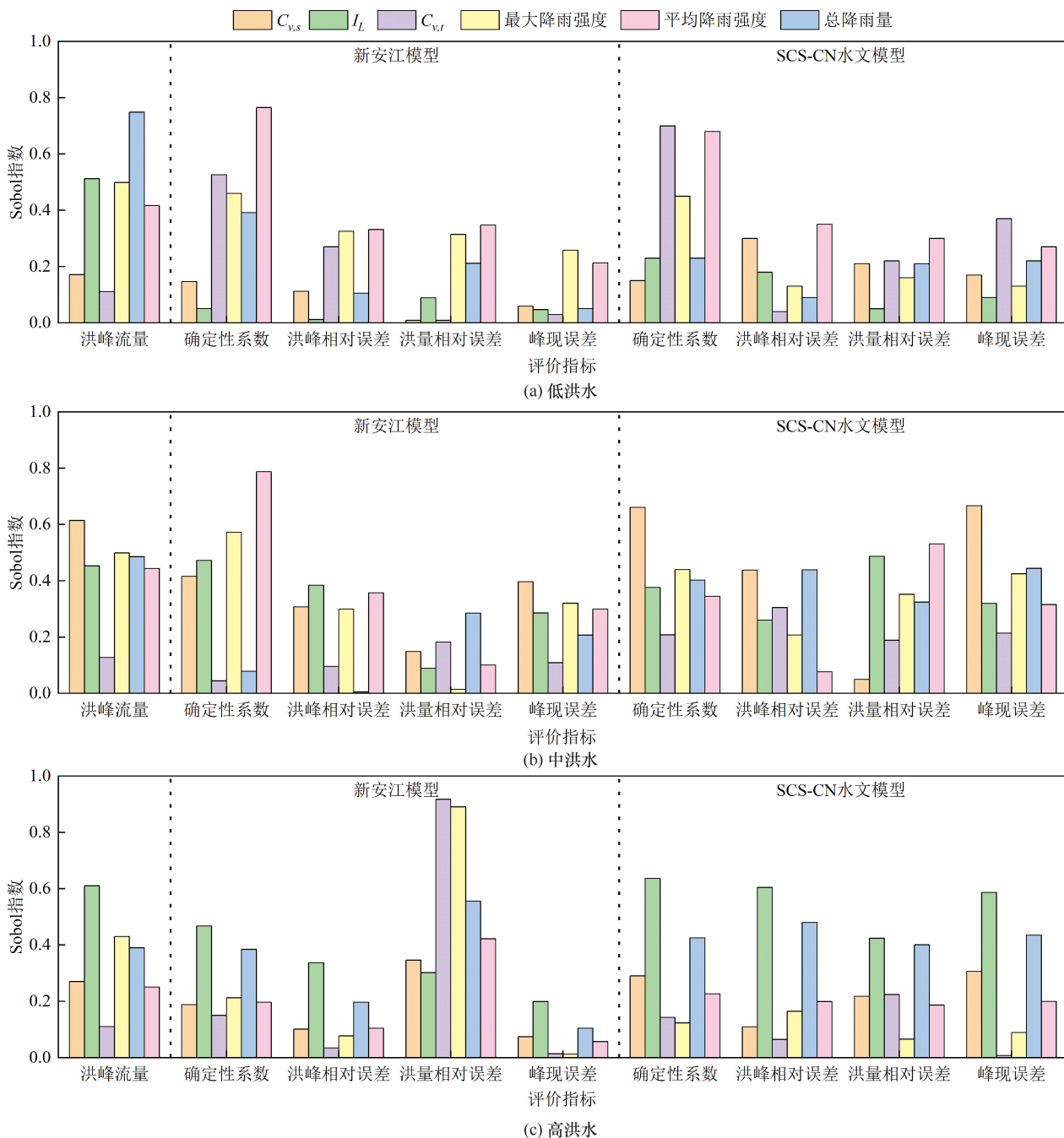


图 7 降雨特征指标对水文模型模拟精度的影响

Fig. 7 The influence of rainfall characteristic indicators on the accuracy of hydrological model simulation

由图 7 分析可知, 在不同洪水量级中, 降雨特征参数对不同水文模型模拟能力的影响程度存在一定差异性。在低洪水时, 影响洪峰流量的主要因素是总降雨量、降雨位置指数和最大降雨强度, 其贡献率分别达到了 30.44%、20.84% 和 20.30%。在中洪水时, 影响洪水的主要因素是降雨空间变异系数, 其贡献率为 25.01%。在高洪水时, 影响洪峰的主要因素为降雨位置指数, 其贡献率为 24.82%。对于不同的水文模型, 低洪水的平均降雨强度对水文模型的精度影响较大, 新安江模型和 SCS-CN 水文模型的贡献率分别达到 32.30% 和 26.86%。对于中洪水, 新安江模型主要受到平均降雨强度和降雨空间变异系数影响, SCS-CN 水文模型模拟精度主要受到降雨空间变异系数的影响。降雨位置指数是影响新安江模型和 SCS-CN 水文模型在高洪水模拟能力的主要因素, 平均贡献率分别达 30.23% 和 33.97%。

综合而言, 降雨位置指数和降雨空间变异系数是影响水文模型模拟精度的主要影响因子, 特别是对于下孤山流域而言, 流域四周山体高, 中间河口低, 降雨的空间差异性较大。例如, 在“1988080803”特大洪水中, 洪峰流量达到 $6\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$, 井河口雨量站和瓦屋雨量站总降雨量分别为 418 mm 和 207 mm, 两个雨量站分别位于下孤山流域的左右两侧, 降雨时空特征分布差异较为明显^[38-39]。此外, 降雨是水文模型重要的输入变量, 其变化特征会导致水文模型在模拟产汇流阶段出现较大的不确定性, 从而影响模型的稳定性。

4 结果讨论

4.1 产汇流模拟分析

本文基于下孤山流域较大洪水场次的降雨径流资料, 利用 SCS-CN 水文模型和新安江模型两种水文模型, 探究降雨的时空变化特征对水文模型模拟精度的影响。新安江模型是基于蓄满产流理论而构建的, 即只有当前期降雨量满足土壤的缺水量时, 才会产生地表径流。SCS-CN 水文模型则是需要满足植被截流等初损量, 当场次洪水的降雨量超过初损量时, 才产生地表径流。对比两个模型的模拟精度, 水文模型对下孤山流域的场次洪水模拟效果相对较好, 但对洪峰流量的模拟效果不佳, 常常出现低估。孙彤等^[29]对比 SCS-CN 水文模型和新安江模型在多个不同气候区的模拟效果, 发现 SCS-CN 水文模型在气候干旱区域的模拟效果优于新安江模型。在湿润区域, 两种水文模型的模拟效果较为接近, 但 SCS-CN 水文模型对于大

洪水的洪峰流量结果优于新安江模型, 该结果与本文较为一致。综合而言, 新安江模型适用于气候充沛且土壤含水量较高的研究区。SCS-CN 水文模型考虑了降雨强度、土壤类型、土地利用类型等下垫面因素的影响, 比较适用于降雨强度较大、气候干燥的流域。

4.2 降雨的时空特征对模型模拟的影响分析

不少学者通过分析研究区站点的降雨数据, 以探讨区域主要的降雨类型。例如, 李雨欣等^[40]利用 DTW 聚类分析法, 统计分析了河北省多年的站点资料, 发现该地区的降雨类型主要为峰前型和峰中型。凌敏华等^[34]通过探究河南省降雨中心与雨量站的空间分布关系, 发现降雨中心有向南移动的趋势。而本研究通过提取多个洪水场次的降雨时间和空间特征参数, 采用 K-means 聚类分析法对下孤山流域的降雨时空特征进行了分析, 识别出三类降雨类型。与单一降雨类型划分方法相比, 本研究综合考虑了降雨的时间和空间特征, 得到的结果更加合理。

降雨不仅仅作为水文响应的关键驱动因子, 同样也是水文模型模拟的重要输入变量。本研究通过采用了多种降雨时空特征参数, 利用相关性分析和 Sobol 分析法, 分析在不同洪水量级上降雨对水文模型和洪峰流量的影响。研究发现, 降雨位置指数对水文模型模拟影响较大, 其次是降雨空间变异系数, 降雨时间变差系数的影响最小。尽管降雨时间变差系数的影响较小, 但已有研究表明降雨峰值的出现时间对水文模型的精度有显著影响, 这可能与时间尺度的差异有关。本文的分析涵盖了整场降雨, 且各时段权重相等, 而不是仅聚焦于降雨峰值的几个时段, 因此结果有所不同。

4.3 局限性和未来研究方向

尽管本文对下孤山流域的降雨时空特征与水文模型模拟精度进行了深入的研究, 但由于流域内的雨量站数量较少, 可能不能真实反映降雨的空间分布特性, 会对模型模拟精度产生一定影响。同时, 流域地形地貌、坡度坡向等特征也可能影响水文模型的模拟结果, 特别是在地形复杂的流域, 地形因素对降雨分布和产汇流过程可能有较大影响。下一步研究中会将降雨位置指数、降雨时间变差系数等关键降雨特征因子纳入水文模型参数率定或模型结构优化中, 以进一步提升洪水模拟精度。

5 结论

(1) SCS-CN 水文模型和新安江模型对下孤山流域的洪水模拟效果较好, 新安江模型的平均确定性系

数为 0.83, 平均洪峰相对误差为 14.81%。SCS-CN 水文模型的平均确定性系数为 0.85, 洪峰相对误差为 13.60%, 其模拟精度略优于新安江模型。

(2) 基于场次降雨的降雨空间变异系数、降雨位置指数和时间变差系数等特征参数, 利用 K-means 聚类分析法将下孤山流域的雨型划分为三类。新安江模型和 SCS-CN 水文模型在 II 类雨型下的模拟性能最优, 代表水文模型对降雨历时短且暴雨中心远离流域出口时具有较高适应性。但对于降雨空间分布不均且暴雨中心接近流域出口时, 水文模型对洪峰流量及洪水过程的模拟能力有所下降。

(3) 对低洪水和中洪水, 降雨位置指数与洪峰流量之间存在显著的负相关关系, 暴雨中心越接近流域出口, 洪峰流量越大。然而, 对于高洪水, 降雨位置指数与洪峰流量的关系未达到显著性水平, 这可能是因为高洪水雨量十分充沛, 降低了流域对暴雨中心位置的敏感性。

(4) 低洪水的平均降雨强度对水文模型的精度影响较大, 新安江模型和 SCS-CN 水文模型的贡献率分别达 32.30% 和 26.86%。对于中洪水, 新安江模型主要受到平均降雨强度和降雨空间变异系数影响, SCS-CN 水文模型模拟精度主要受到降雨空间变异系数的影响。降雨位置指数是影响新安江模型和 SCS-CN 水文模型在高洪水模拟能力的主要因素, 平均贡献率分别为 30.23% 和 33.97%。因此, 对于降雨时空特征参数而言, 降雨位置指数和降雨空间变异系数是影响水文模型的模拟精度主要因子。

参考文献 (References):

[1] CHENG T, HUANG B S, YANG Z F, et al. On the effects of flood reduction for green and grey sponge city measures and their synergistic relationship: Case study in Jinan sponge city pilot area[J]. *Urban Climate*, 2022, 42: 101058.

[2] LI N N, CHEN X H, QIU J, et al. Spatio-temporal characteristics and trend prediction of extreme precipitation: Taking the Dongjiang River Basin as an example [J]. *Water*, 2023, 15(12): 2171.

[3] 左凌峰, 邹磊, 夏军, 等. 汉江上游白河流域洪水类型辨识与模拟[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(4): 641-650.

ZUO L F, ZOU L, XIA J, et al. Identification and simulation of flood types in Baihe basin of the upper Han River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(4): 641-650.

[4] NEARING G, COHEN D, DUBE V, et al. Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds [J]. *Nature*, 2024, 627

(8004): 559-563.

- [5] ZHOU S, YU B, LINTNER B R, et al. Projected increase in global runoff dominated by land surface changes [J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(5): 442-449.
- [6] QI W C, MA C, XU H S, et al. Urban flood response analysis for designed rainstorms with different characteristics based on a tracer-aided modeling simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355: 131797.
- [7] BREINL K, LUN D, MILLER-THOMY H, et al. Understanding the relationship between rainfall and flood probabilities through combined intensity-duration-frequency analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126759.
- [8] 刘波, 戎贵文, 陈情情, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 930-939.
- LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(5): 930-939.
- [9] KULLER M, SCHOENHOLZER K, LIENERT J. Creating effective flood warnings: A framework from a critical review[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126708.
- [10] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 6-15.
- ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 6-15.
- [11] MIAO Q H, YANG D W, YANG H B, et al. Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 371-386.
- [12] ZHANG G, CUI P, GUALTIERI C, et al. Stormflow generation in a humid forest watershed controlled by antecedent wetness and rainfall amounts[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127107.
- [13] DETTY J M, MCGUIRE K J. Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): 759-768.
- [14] SOKOL Z, SZTURC J, ORELLANA-ALVEAR J, et al. The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling: A review [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 351.
- [15] COSTABILE P, COSTANZO C, KALOGIROS J, et al. Toward street-level nowcasting of flash floods impacts based on HPC hydrodynamic modeling at the watershed scale and high-resolution weather radar data[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(10): e2023WR034599.

- [16] 梁峰铭, 王洁, 林诚杰, 等. 基于临界雨量不确定性的山洪概率预报研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43(9): 35-46.
LIANG Fengming, WANG Jie, LIN Chengjie, et al. Study on probabilistic forecasting of flash flood events based on critical rainfall uncertainty [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43 (9): 35-46.
- [17] WANG J, ZHUO L, HAN D, et al. Hydrological model adaptability to rainfall inputs of varied quality [J]. Water Resources Research, 2023, 59(2): e2022WR032484.
- [18] 刘薇, 贾菁菁, 刘阳, 等. 考虑降雨空间异质性的流域洪水过程模拟研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(11): 53-56.
LIU Wei, JIA Jingjing, LIU Yang, et al. Simulation of flood processes in watersheds considering spatial heterogeneity of rainfall [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2023, 41 (11): 53-56.
- [19] 王雪梅, 郭良, 翟晓燕. 降雨时空不确定性对小流域洪峰模拟的影响评估[J]. 人民黄河, 2024, 46(4): 49-54.
WANG Xuemei, GUO Liang, ZHAI Xiaoyan. Assessing the impact of rainfall spatial-temporal uncertainty on flood peak simulation in small mountainous catchment [J]. Yellow River, 2024, 46 (4): 49-54.
- [20] GHIMIRE G R, JADIDOLESLAM N, GOSKA R, et al. Insights into storm direction effect on flood response [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126683.
- [21] YU J R, ZOU L, XIA J, et al. Investigating the spatial-temporal changes of flood events across the Yangtze River Basin, China: Identification, spatial heterogeneity, and dominant impact factors [J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129503.
- [22] YANG L, SMITH J A, BAECK M L, et al. Flash flooding in small urban watersheds: Storm event hydrologic response [J]. Water Resources Research, 2016, 52(6): 4571-4589.
- [23] 李冰雪, 史超, 侯精明, 等. 沿海城市台风暴雨时空变化致涝特征模拟[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 440-452.
LI Bingxue, SHI Chao, HOU Jingwei, et al. Characteristics of urban waterlogging induced by spatiotemporal variations of typhoon rainfall in a coastal city [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (3): 440-452.
- [24] 杨玲玲, 覃光华, 张利平, 等. 降雨移动方向对山区小流域洪水过程的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 76-78.
YANG Lingling, QIN Guanghua, ZHANG Liping, et al. Effect of rainfall movement direction on flood processes in small watershed in mountain region [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2022, 40 (5): 76-78.
- [25] 刘业森, 刘舒, 刘媛媛, 等. 降雨移动对河道洪峰影响研究: 以深圳为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(4): 306-314.
LIU Yesen, LIU Shu, LIU Yuanyuan, et al. Influence of rainfall movement direction on flood peak in urban river with Hewan district in Shenzhen as a case study [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20 (4): 306-314.
- [26] 梁忠民, 赵建飞, 段雅楠, 等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 374-386.
LIANG Zhongmin, ZHAO Jianfei, DUAN Yanan, et al. Differential-form Xin'anjiang model [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (3): 374-386.
- [27] 张晓菁, 刘攀, 周丽婷, 等. 考虑水文模型参数时变的水库水位多预见期实时预报: 以水布垭水库为例[J]. 水利学报, 2023, 54(4): 426-438.
ZHANG Xiaojing, LIU Pan, ZHOU Liting, et al. Real-time forecasting of reservoir water levels over multiple lead times considering time-varying hydrological model parameters and its application in the Shuibuya Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (4): 426-438.
- [28] 谭超, 黄本胜, 黄峰华, 等. 基于 SCS 水文模型的城市河涌设计洪水计算研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 167-171.
TAN Chao, HUANG Bensheng, HUANG Fenghua, et al. Research on the calculation method of design flood of urban stream based on SCS hydrological model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3): 167-171.
- [29] 孙彤, 王洁, 梁峰铭, 等. 改进的径流曲线数模型在洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 68-72.
SUN Tong, WANG Jie, LIANG Fengming, et al. The improvement of SCS-CN and its application in flood prediction [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2023, 41 (12): 68-72.
- [30] 张婷, 李怡, 李建柱, 等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 15-28.
ZHANG Ting, LI Yi, LI Jianzhu, et al. Research progress on multi-source rainfall data fusion and their hydrological application [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31 (1): 15-28.
- [31] NOSSENT J, ELSEN P, BAUWENS W. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1515-1525.
- [32] ZOUHRI W, HOMRI L, DANTAN J Y. Handling the impact of feature uncertainties on SVM: A robust approach based on Sobol sensitivity analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 189: 115691.
- [33] 邵嘉佳, 李彬权, 孟健, 等. 山丘区小流域 SCS 广义单位线产汇流模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 618-624.
SHAO J J, LI B Q, MENG J, et al. Runoff generation and confluence model coupling SCS-CN and general unit hydrograph for small mountainous watersheds [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 618-624.
- [34] 王元疆, 江善虎, 凌子涵, 等. 基于降雨时空变化的山洪预警临界雨量[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1):

90-98.

WANG Y J, JIANG S H, LING Z H, et al. Critical rainfall for flash flood warning based on rainfall uncertainty [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 90-98.

- [35] 李宁宁, 邱静, 陈晓宏, 等. 广东省东江流域降雨时空变化特征分析[J]. *水文*, 2023, 43(4): 74-80.

LI Ning Ning, QIU Jing, CHEN Xiaohong, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of rainfall in Dongjiang River Basin within Guangdong Province [J]. *Hydrology*, 2023, 43 (4): 74-80.

- [36] 孟泽坤, 王彬, MORIASI D. 次降雨时空分布对流域产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(4): 69-78.

MENG Zekun, WANG Bin, MORIASI D. Effect of the spatio-temporal pattern of single storm on the runoff and sediment yield at watersheds scale [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21 (4): 69-78.

- [37] 曹子恒, 李永坤, 胡义明, 等. 基于机器学习模型的数值降雨预报校正[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 843-861, 950.

CAO Z H, LI Y K, HU Y M, et al. Numerical rainfall forecast

correction based on machine learning model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(5): 843-861.

- [38] YUAN G, CHE A. Evolution and spatio-temporal characteristics of slope erosion due to rainfall in Southwest China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(7): 270.

[39] ZHU S, WEI J, ZHANG H, et al. Spatiotemporal deep learning rainfall-runoff forecasting combined with remote sensing precipitation products in large scale basins [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128727.

- [40] 李雨欣, 王瑛, 马庆媛, 等. 基于 DTW 与 K-means 算法的河北场雨及雨型分区特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(5): 860-868.

LI Yuxin, WANG Ying, MA Qingyuan, et al. Research on the characteristics of rain events and rain pattern zoning in Hebei based on data mining technology [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(5): 860-868.

(责任编辑 王海锋)