

基于 HEC-HMS-SVM 的鄱阳湖流域 平江山洪模拟研究

刘惠英, 朱怀涛, 吴祥宇

(江西水利电力大学 水利工程学院, 南昌 330099)

摘要: [目的] 探究机器学习这一新方法在山洪模拟方面的应用, 提高平江流域山洪模拟及早期预警精度。[方法] 选取了山洪发生区 1997—2018 年共 25 场典型洪水事件及对应的 5 min 高分辨率降雨数据, 分别构建基于 HEC-HMS 水文模型、支持向量机(SVM)模型及 HEC-HMS-SVM 耦合模型, 对比评估了 3 类模型在洪水过程模拟中的精度及稳定性。[结果] (1) HEC-HMS 模型对“单峰型”洪水模拟效果优异, 外延性良好, 整体合格率达 92% (甲级精度); (2) SVM 模型总体合格率为 84% (乙级精度), 但对峰现时间敏感性较高, 率定期与验证期差异显著, 稳定性较弱; (3) 耦合模型综合性能最优, 验证期合格率提升至 100% (较 SVM 提高 25%), 整体合格率较 HEC-HMS 和 SVM 分别提高 8% 和 16%, 且洪水过程拟合度显著改善。[结论] HEC-HMS-SVM 耦合模型可有效提升山洪模拟精度, 为山洪灾害防治提供更可靠的技术支持。

关键词: 山洪模拟; 山洪灾害; HEC-HMS; SVM; 机器学习

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0115-08

Study on flash flood simulation in Pingjiang River of Poyang Lake Basin based on HEC-HMS and SVM

Liu Huiying, Zhu Huaitao, Wu Xiangyu

(College of Water Conservancy, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the application of machine learning as a novel method in flash flood simulation and improve the accuracy of flash flood simulation and early warning in the Pingjiang River Basin. [Methods] A total of 25 typical flood events and their corresponding 5-minute high-resolution rainfall data from 1997 to 2018 in the flash flood occurrence area were selected. Three models—based on the HEC-HMS hydrological model, the support vector machine (SVM) model, and the HEC-HMS-SVM coupled model were constructed to compare and evaluate their accuracy and stability in flood hydrograph simulation. [Results] (1) The HEC-HMS model demonstrated excellent performance in simulating “single-peak type” floods, with good extrapolation capability, and the overall qualification rate reached 92% (Class A accuracy). (2) The SVM model had an overall qualification rate of 84% (Class B accuracy), but it showed high sensitivity to the time of peak occurrence, with a significant difference between the calibration period and the validation period, and its stability was relatively weak. (3) The coupled model exhibited the best overall performance. The qualification rate during the validation period increased to 100% (25% higher than SVM), the overall qualification rate increased by 8% and 16% compared with HEC-HMS and SVM, respectively, and the fit of the flood process was significantly improved. [Conclusion] The HEC-HMS-SVM coupled model can effectively improve the accuracy of flash flood

收稿日期: 2025-03-24

修回日期: 2025-06-17

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 长江科学院 2023 年开放研究基金(CKWV20231187/KY); 南昌工程学院高层次人才科研启动金资助项目(2023kyqd004)

第一作者: 刘惠英(1973—), 女, 陕西凤翔人, 博士, 副教授, 主要从事流域水沙变化、气候变化方面研究。E-mail: huiyingliu@juwp.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

simulation and provide more reliable technical support for flash flood disaster prevention and control.

Keywords: flash flood simulation; flash flood disaster; HEC-HMS; SVM; machine learning

山洪是由强降雨引发的突发性山区洪水,具有破坏力强、预警时间短的特点,是当前防灾减灾研究的重点和难点^[1]。受人类活动和极端气候影响,山洪发生频率和危害性持续增加^[2]。我国山地丘陵广布,山洪影响范围大、危害严重,对社会经济发展和人民生命财产安全构成的威胁也日趋严重^[3]。模拟山洪的发生时间及强度,是评估山洪风险的关键技术,亦是减少灾害损失的有效手段^[4]。

水文模型是山洪模拟的重要工具之一,常通过采用流域水文、气候和地形特征来预测径流过程,被广泛应用于洪水管理、水资源规划等领域^[5-6],如新安江、SWAT和HEC-HMS等模型为山洪研究提供了有力支撑^[7]。新安江模型因其蒸发发计算和水源划分优势具有广泛适用性;SWAT模型基于下垫面特征,适用于多尺度流域模拟^[8-9];HEC-HMS模型因其综合性强、适用性广等特点成为研究热点,并在不同气候和地貌条件下得到验证^[10-12],尤其对连续和短历时降雨均表现出良好的适应性。然而,HEC-HMS模型内部调用的产汇流方法不同会影响模拟表现:SCS-CN曲线法在洪峰流量模拟方面优于Initialand Uniform法和Green-Ampt法;Horton法能够反映植被覆盖随时间变化对水文过程的影响;而单位线法则可通过调整单位线形状来适应不同流域特征^[13-14]。同时该模型受限于水文数据质量,其模拟结果易受网格大小、产汇流方法选择和时间步长等因素影响,存在明显的数据依赖性和不确定性,使其应用受限^[15-17]。

随着科技发展,诸如支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、反向传播(Back Propagation, BP)神经网络、LSTM(长短时记忆网络)在内的诸多机器学习方法为山洪模拟提供了新途径^[18-19]。与传统水文模型相比,机器学习在山洪模拟方面优势明显^[20]。在洪水预报方面,将萤火虫算法与SVM结合的SVM-FA, CNN-BiLSTM-attention模型在捕获关键数据、优化模型参数方面表现均好于传统水文模型,但机器学习的“黑箱”特性还有待进一步研究^[21]。

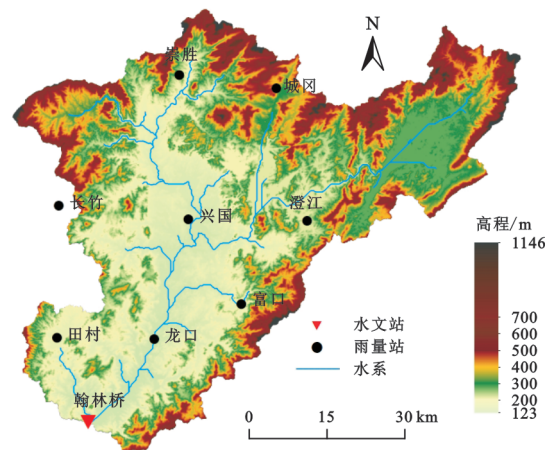
HEC-HMS模型对基础数据(如降雨、土壤、土地利用等)精度及完整性要求高,参数率定对流域特征参数要求高,且部分参数难以直接获取,易引入主观误差,尤其在无资料地区或下垫面变化剧烈区域(如快速城市化区域)适用性较差。基于以上原因,本文将水文模型与机器学习耦合,赋予机器学习模型以水文模型的特性,使其能够考虑现实流域中下

垫面的状态,并将大数据背景下的新技术引入研究,对山洪进行模拟,以期为山洪模拟预警技术提供更为坚实的理论支撑与科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于鄱阳湖流域最大支流赣江的上游平江,涵盖宁都、兴国和赣县^[22-23];主河道长148 km,流域总面积2 663.19 km²,纵比降为1.26‰。流域主要为低山和丘陵,东、西、北高,南面低。地质主要由石炭纪、白垩纪砂岩、变质岩及第四纪松散堆积物构成^[24]。流域多年平均气温18.8℃,年降水量1 585 mm,其中4—6月占48.5%。降雨主要以锋面雨和台风雨为主,雨量大且强度高。平江卡口站翰林桥站的多年径流量为25.3亿m³。流域内共8个雨量站(崇胜、城冈、长竹、兴国、澄江、富口、龙口、田村),1个水文站(翰林桥水文站),流域概况见图1。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号GS(2019)3333号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

洪水数据选用1997—2018年内25场典型洪水,21场划分为率定期,4场为验证期(表1)。

2 研究方法

2.1 HEC-HMS

HEC-HMS(The Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System)模型通过模拟自然或人工状态下流域水文过程,分产流、直接径流、基流、河道汇流4个模块。其中产流模块主要模拟降水在流域内的完整物理过程,包括植被截留、下渗、填洼

及地表径流形成等,通过设定土壤类型、土地利用等下垫面参数,精确刻画不同地表条件对产流的影响;直接径流模块用于模拟降水在地表及浅层地下的运动过程,能够结合降水数据、下垫面条件等参数计算直接径流量;基流模块能够详细地描述地下水向河流的补给过程,反映流域长期水文特征;河道汇流模块涉及河道几何特征(宽度、深度、坡度)、糙率及水流动力特性,模拟洪水演进过程。

表1 研究数据
Table 1 Study data

数据分类	时间步长/ 分辨率	数据来源	用途
雨量数据	5 min	江西省水文年鉴	模型模拟
径流数据	5 min	江西省水文年鉴	模型模拟
洪水数据	1 h	江西省水文年鉴	模型模拟
DEM数据	30 m×30 m	地理空间据云	模型参数计算
土壤类型数据	1 km×1 km	世界土壤数据库	模型参数计算
土地利用数据	30 m×30 m	武汉大学	模型参数计算

在模型构建过程中,结合平江流域的水文特性及数据条件,针对HEC-HMS模型的各项计算模块进行适应性选择。产流计算采用SCS曲线数法,该方法基于流域的土地利用类型、土壤属性和前期土壤湿度等关键参数确定曲线数,具有计算简便、效率高且适用于复杂地形等优势,能够有效反映流域的产流特征;对于直接径流模拟,选用SCS单位线法,其依据线性系统理论和流域汇流原理,通过单位时段内的均匀净雨量推求出口断面的径流过程线,该方法概念清晰、操作便捷且参数需求较少,便于实际应用;基流计算采用退水曲线法,该技术已在多个地区得到验证,能够稳定模拟地下径流的消退过程。河道汇流则采用马斯京根法,这一经典方法在国内外流域水文模拟中表现可靠,能够准确刻画洪水波的演进过程。具体计算公式见参考文献^[25]。

2.2 SVM方法

SVM(Support Vector Machine)是一种强大的机器学习算法,适用于分类、回归预测、异常检测和特征选取^[26]。模型基于高质量的数据预处理和核函数优化选择,构建最优超平面实现预测,其目标是使样本点尽可能位于边界带内。模型在MATLAB平台上采用fitsvm函数实现,其中该函数包含3个关键参数:Kernel Scale(核尺度参数)用于调节核函数的特征空间映射;Box Constraint(盒约束参数)用于控制支持向量机的边界约束强度;Epsilon(ϵ 参数)则定义了不敏感损失函数中的容许误差范围。模型的数学表达式如下所示:

$$f(x) = \text{sgn}\{a_i^* y_i k(x_i \cdot x) + b_i^*\} \quad (1)$$

式中: x 为输入值; y_i 与 x_i 为对应的输出值; $\text{sgn}()$ 为符号函数; $k(x_i \cdot x)$ 为核函数; a_i^* 、 b_i^* 为调控SVM确定最优分类平面的参数。

2.3 模型耦合方法及输入输出设置

通过串联耦合方法将带有水文特征的HEC-HMS模型与SVM模型进行耦合。

输入输出设置:SVM模型进行洪水模拟,以9个站的雨量数据以及($T-1$)时刻径流数据作为SVM模型的特征输入,共计10个特征,以(T)时刻的径流量作为输出;进行模型耦合时,以9个站的雨量数据、前一时刻的径流数据以及HEC-HMS模型模拟出来的径流量作为特征进行输入,将HEC-HMS模型与SVM模型进行串联耦合,构建HEC-HMS-SVM模型。具体模型构建方式如下:

$$Q_t^{\text{Forecast}} = F_{\text{reaitime}}(P_{\text{tcs}}, \dots, P_{\text{thlq}}, Q_{t-1}^{\text{Obs}}) \quad (2)$$

式中: Q_t^{Forecast} 为 t 时刻预测流域出口断面流量(m^3/s); F_{reaitime} 为输入输出映射函数; $P_{\text{tcs}}, \dots, P_{\text{thlq}}$ 为崇胜站到翰林桥站9个站的 t 时刻雨量(mm); Q_{t-1}^{Obs} 为前一时刻径流量(m^3/s)。

将模型预测目标的前一时刻数据作为输入因子,可令模型捕捉数据趋势,体现序列依赖关系,提升模型精度。根据《水文情报预报规范》(GB/T22482—2008),选举甲级精度要求对洪峰流量、径流深和峰现时间的相对误差用于模型精度评价。洪峰、径流深预报的许可误差为实测洪峰流量的20%;峰现时间许可误差为实测时间的3h内;洪水预报与实测的吻合程度通过确定性系数DC确定。

3 结果与分析

3.1 HEC-HMS模型率定与验证

对平江流域DEM进行河网提取及子流域划分,并结合流域土地利用和土壤类型,将整个研究区划分为7个子流域(表2)。使用泰森多边形确定各雨量站权重后将所有数据导入模型,根据洪水时间设置模型运行时间。选取25场洪水进行模拟,其中率定期21场,验证期4场。率定期和验证期均有各频率洪水,具有较好的代表性。

在率定期,HEC-HMS模型模拟洪峰流量的误差范围为-17.64%~33.56%,21场洪水绝对值均值为9.67%。其中20140523号洪水的误差达到33.56%,未达标;径流深的误差范围为13.04%~24.02%,绝对值均值为7.55%,20111014号洪水的误差为24.02%,未达标;21场洪水峰现时间均满足精度要求;HEC-HMS模型总体合格率为90.48%,模型可用于验证。在

验证期的4场洪水中,洪峰流量误差范围为-16.50%~9.25%;径流深误差在-11.29%~3.07%;峰现时间总体相差仅2.25 h。确定性系数范围为0.74~0.90,均值为0.85,符合精度要求。与率定期相比,验证期洪峰流量误差均值减少2.45%,径流深误差减少3.14%,峰现时间增加0.63 h确定性系数均值提升0.01,合格率提升9.52%,整体表明HEC-HMS模型的验证期结果优于率定期。图2为HEC-HMS模型运行结果绘制的散点图。

3.2 SVM模型率定与验证

SVM模型选用径向基核(RBF)作为模型核函数进行模型模拟。采用麻雀搜索优化算法对模型参数

进行优化,Kernel Scale和Box Constraint范围为0.01~16,Epsilon范围为0.001~1。模型率定期与验证期的散点图见图3。

表2 流域水文基本特征

Table 2 Basic hydrological characteristics of river basin

子流域编号	面积/km ²	坡度/(°)	河道长度/m
W740	416.48	12.92	162651
W850	278.32	11.89	117826
W860	256.35	9.19	118280
W870	377.96	10.18	137065
W1060	404.64	9.12	163817
W1080	481.44	8.06	178910
W1300	448.00	8.14	144320

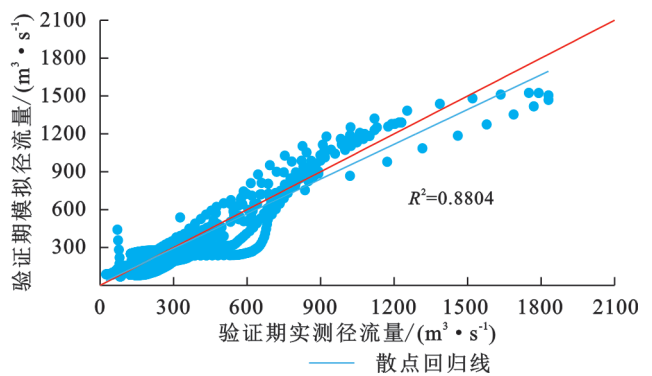
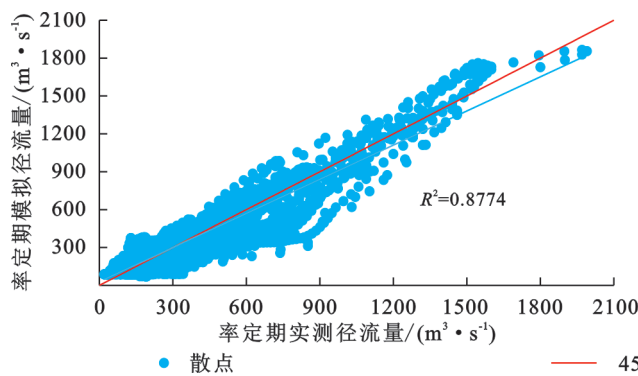


图2 HEC-HMS模型实测径流与模拟径流散点图

Fig. 2 Scatter plots of measured and simulated runoff under HEC-HMS model

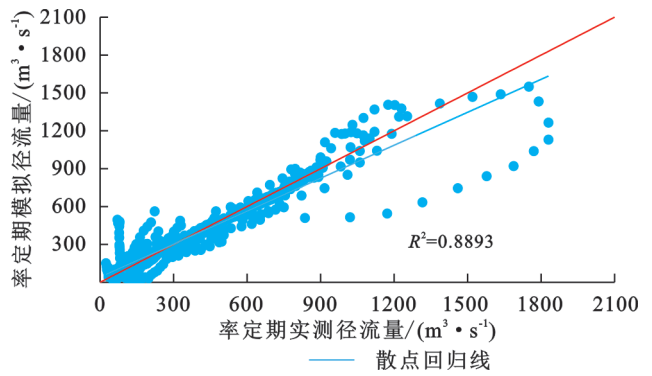
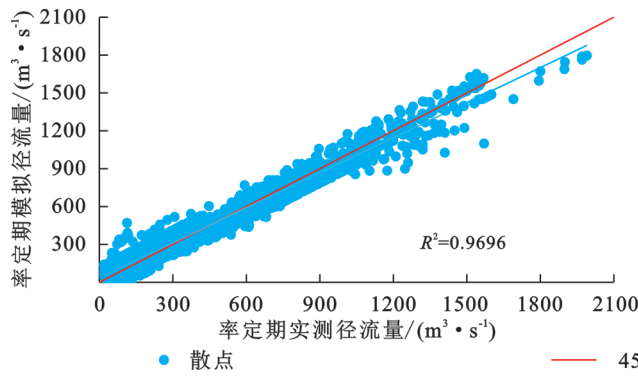


图3 SVM模型实测径流与预测径流散点图

Fig. 3 Scatter plots of measured and predicted runoff under SVM model

从图3上发现,在率定期,SVM模型模拟的洪峰流量绝对值均值为4.78%;径流深相对误差绝对值均值为6.96%,仅20111014号洪水不满足精度要求;峰现时间误差20120307,20120307号两场洪水不满足精度要求,总体模拟误差为1.62 h,即SVM模型可用于模拟。验证期4场洪水洪峰流量误差,绝对值均值为7.31%;径流深误差绝对值均值为4.70%,洪峰流量及径流深误差均满足精度要求;峰现时间方面,1场洪水与实际峰现时间相差5 h,不满足精度要求,总体差距为3.25 h。模型验证期确定性系数,符合精度要求。对比率定期与验证期,洪峰流量误差均值增加

2.53%,径流深误差减少2.26%,峰现时间增加1.63 h,确定性系数和合格率均有所降低。

3.3 HEC-HMS-SVM模型耦合

将HEC-HMS模型模拟出来的径流量作为SVM模型因子进行输入,构建HEC-HMS-SVM耦合模型,主函数和径向基函数的设置与SVM模型相同,同样采用麻雀搜索优化算法进行参数优化,率定期与验证期对照图如图4所示。

HEC-HMS-SVM耦合模型率定期洪峰流量误差、径流深误差、峰现时间误差、确定性系数绝对值均值分别为1.58%,1.69%,0.62,0.9819。验证期4种

精度误差绝对值均值分别为 10.95%, 3.13%, 1.25, 0.934 8。对比率定期与验证期,洪峰流量的均值误差增加 9.37%,径流深的误差增加 1.44%,而峰现时间增加了 0.54 h,确定性系数的均值降低 0.047 1。率定期 R^2 为 0.995 8,验证期 R^2 为 0.924 8,衰减比为

0.928 7,模型延续 SVM 模型的性质,模型的外延性较低。模型精度误差统计见表 3。与前文的图 2、图 3 相比,图 4 耦合模型的模拟精度不管是在率定期还是验证期,均得到了极大提升,洪峰流量、径流深和峰现时间的合格率均为 100%。

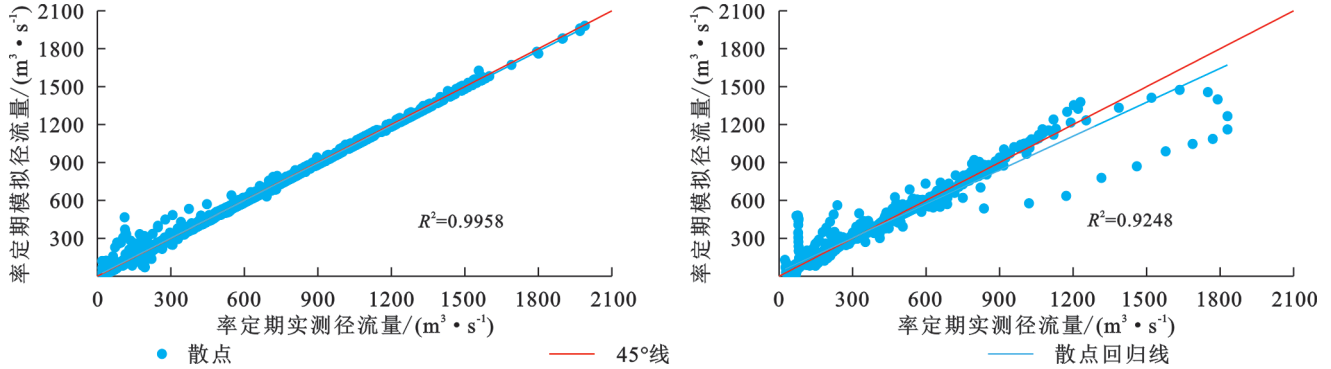


图 4 HEC-HMS-SVM 模型实测径流与预测径流散点图

Fig. 4 Scatter plots of measured and predicted runoff under HEC-HMS-SVM model

表 3 各模型精度误差统计

Table 3 Accuracy error statistics of each model

序列	洪水编号	HEC-HMS				是否合格	SVM				是否合格	HEC-HMS-SVM				是否合格
		洪峰流量 相对差/%	径流深相 对误差/%	峰现 时差/h	DC		洪峰流量 相对差/%	径流深相 对误差/%	峰现 时差/h	DC		洪峰流量 相对差/%	径流深相 对误差/%	峰现 时差/h	DC	
	19971221	-17.39	16.67	3	0.82	是	2.74	19.08	1	0.8718	是	-1.80	1.83	1	0.9824	是
	19980514	9.04	-2.09	2	0.85	是	10.03	5.22	0	0.9620	是	2.06	1.19	0	0.9890	是
	19980619	-3.40	1.86	2	0.77	是	6.17	-0.78	2	0.8587	是	2.17	0.15	0	0.9719	是
	19990421	-11.40	7.28	2	0.88	是	-1.86	9.36	0	0.9531	是	-1.86	0.76	0	0.9816	是
	19990525	13.16	-8.93	1	0.81	是	9.85	-1.02	3	0.9836	是	1.56	-0.52	3	0.9953	是
	19990904	8.33	-6.28	-2	0.84	是	1.44	0.60	1	0.9606	是	-0.88	-0.49	1	0.9932	是
	20010610	12.22	-8.76	1	0.82	是	5.27	-2.20	-2	0.9856	是	0.94	-0.79	-1	0.9942	是
	20020615	-0.05	-1.45	-1	0.91	是	-7.00	-4.21	0	0.9803	是	-1.11	-0.81	0	0.9973	是
	20020729	-3.78	1.88	-2	0.77	是	3.98	7.88	2	0.9515	是	0.60	2.28	1	0.9908	是
	20030516	-12.94	6.88	0	0.94	是	3.47	4.26	0	0.9613	是	-1.62	-0.47	0	0.9860	是
率定期	20050619	7.93	-0.45	-2	0.82	是	0.52	-0.94	0	0.9803	是	0.18	0.22	1	0.9953	是
	20070613	2.98	-3.85	1	0.92	是	4.32	4.84	0	0.9605	是	1.45	-0.36	1	0.9897	是
	20070819	-17.64	6.46	-2	0.92	是	5.05	5.92	2	0.9549	是	-0.43	1.44	1	0.9913	是
	20100422	3.78	-11.08	3	0.80	是	2.47	2.36	2	0.9690	是	1.06	-1.56	1	0.9849	是
	20111014	-10.12	24.02	0	0.86	否	3.86	38.04	3	0.7187	否	2.05	9.16	1	0.9743	是
	20120307	16.76	-1.87	0	0.91	是	3.28	0.47	-5	0.9596	否	-0.75	0.15	1	0.9934	是
	20120425	9.77	-11.55	3	0.83	是	5.87	9.84	2	0.8828	是	2.56	1.35	0	0.9762	是
	20120513	-0.39	-13.04	3	0.79	是	4.85	3.74	4	0.8735	否	1.02	-0.67	1	0.9702	是
	20120624	-4.01	1.92	-1	0.83	是	-9.73	-3.55	0	0.9718	是	-0.39	-0.15	0	0.9911	是
	20130714	-4.45	10.39	2	0.93	是	3.44	15.56	2	0.9385	是	-1.21	7.30	0	0.9638	是
	20140523	33.56	-11.83	1	0.55	否	5.28	6.19	3	0.8598	是	7.54	3.95	1	0.9077	是
	20150519	-16.50	3.07	3	0.89	是	-15.31	-2.91	2	0.8586	是	-19.45	-3.03	3	0.8868	是
验证期	20151119	2.00	-3.22	-1	0.90	是	0.85	-3.39	-5	0.9303	否	-0.95	-0.16	1	0.9805	是
	20160716	9.25	-11.29	-2	0.74	是	8.12	3.34	3	0.9446	是	4.91	2.70	0	0.9560	是
	20180610	1.14	0.05	3	0.87	是	4.97	9.17	3	0.8545	是	18.47	6.63	-1	0.9160	是

3.4 模型对比分析

图 5 为验证期内 4 场洪水在 3 种模型中的表现,可以发现:HEC-HMS 模型能够模拟出洪水变化趋势,洪水曲线较为平滑,但退水段与实际洪水相差较大,对洪水副峰的模拟效果较差,适用于单峰洪水;SVM 模型能够较好地模拟场次洪水的曲线变化,对于涨水段、退水段、副峰的把控相较于 HEC-HMS 模

型更优,但对于洪水过程的模拟较为敏感,“小洪峰”过于突出,导致洪水曲线不平滑;HEC-HM-SVM 模型与前两者相比,在 20150518 的大洪水、20151119、20160714 的中等洪水及 20180610 的小洪水,模拟洪水过程均与实测洪水过程贴合最好,在涨水及退水阶段几乎与实测洪水曲线重合,即 HEC-HM-SVM 模型在洪水过程线模拟方面最好。

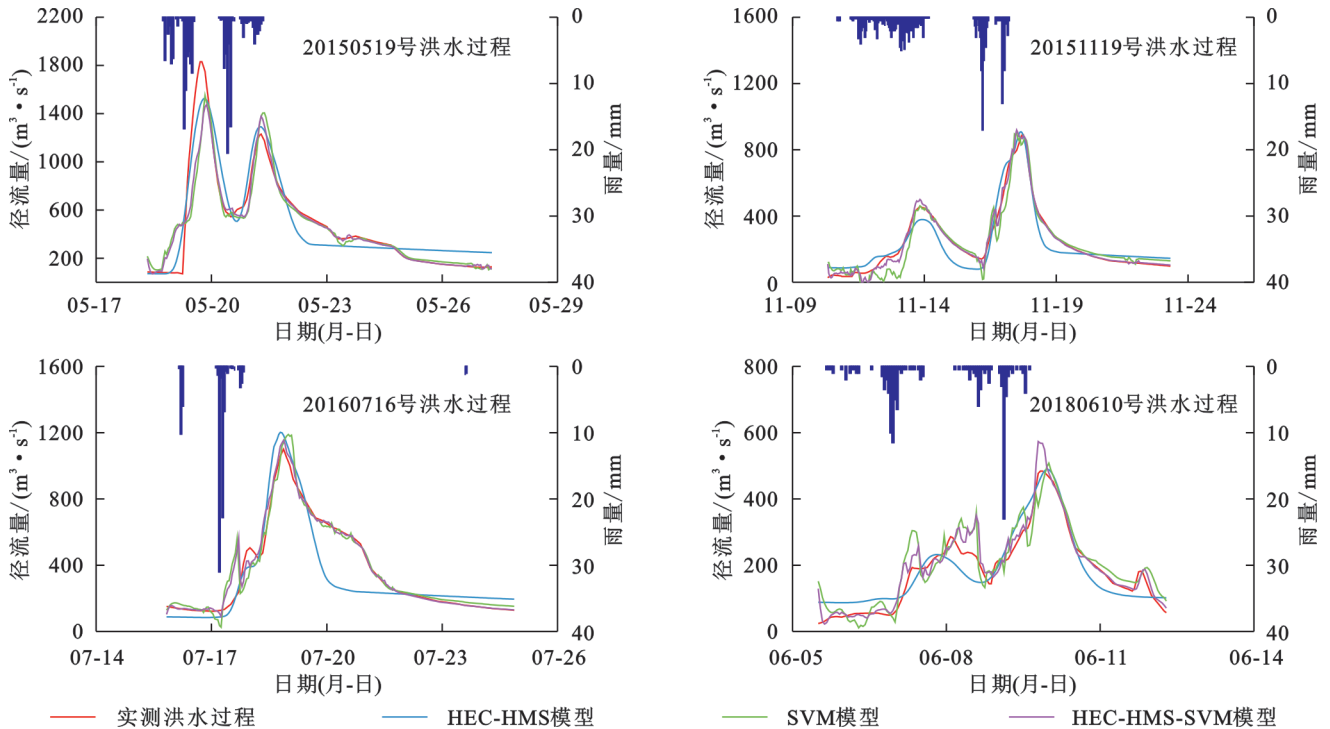


图 5 模型洪水过程线对比图

Fig. 5 Comparison of model flood hydrographs

3.5 分析与讨论

HEC-HMS 模型下不满足精度要求的洪水有 20111014 号洪水(径流深误差)和 20140523 号洪水(洪峰流量误差、确定性系数);SVM 模型下不满足精度要求的洪水有 20111014 号洪水(径流深误差), 20120307, 20120513, 20151119 号洪水(峰现时间误差)。对于洪水模拟误差来源,除了 DEM 数据、土壤数据及土地利用数据空间分辨率稍显不足以外,还有下面原因值得关注。

模拟发现 HEC-HMS 模型中参数取值对于模型精度影响较大,大量文献研究表明:在 HEC-HMS 模型的产流计算模块中,CN 值对洪峰流量和洪水总量的影响最为显著,二者呈正相关;初损的影响仅次于 CN 值,且与洪峰流量和洪水总量呈负相关。不透水率同样与二者呈正相关。在直接径流模块中,流域滞时与洪峰流量和洪水总量呈负相关。基流模块的衰减系数 k 和退水拐点比率对洪峰流量影响较小,但与洪水总量呈正相关。河道洪水演进模块的汇流时间 K 与洪峰流量和洪水总量均呈负相关, K 值越大,洪

水传播时间越长;而流量比重因子 x 对二者的影响不明显。综合表明,对洪峰流量最敏感的参数依次为 $CN > \text{初损} > K > \text{流域滞时} > \text{不透水率} > x > \text{衰减系数} k$;对洪水总量最敏感的参数排序则为 $CN > \text{初损} > \text{不透水率} > \text{退水拐点比率} > \text{流域滞时} > \text{衰减系数} k > K > x$ 。直接径流模块中的流域滞时和河道洪水演进模块中的 K 为峰现时间的最敏感参数。随着流域滞时和 K 值的增加峰现时间推后,反之则峰现时间提前,且 K 值的反应比流域滞时更加敏感^[27-30]。

4 结论

(1) HEC-HMS 模型适用于“单峰型”场次洪水的模拟,模型外延性较好,整体合格率为 92%,甲级精度;洪峰流量和径流深误差波动较大,峰现时间误差多以 2 h 为主。

(2) SVM 模型能够较好地模拟场次洪水的变化过程,对于多峰型洪水的模拟相较于 HEC-HMS 模型更好,整体合格率为 88%,为甲级精度;洪峰流量和径流深误差波动较小,对于峰现时间的模拟精度

较低;模型外延性较差,对洪水过程较为敏感,洪水曲线不平滑,验证期合格率为75%。

(3) HEC-HMS-SVM模型相比于前两个模型各项精度均有所提升,对场次洪水径流过程模拟吻合度更高。表明新特征量的加入,使仅考虑数据关系的机器学习融入了水文模型的特征,提高山洪模拟精度。

参考文献(References):

- [1] 帅伟,占锡华,吕伟力.山洪灾害防御暴雨分析评价系统应用研究[J].科技与创新,2024(1):187-189.
Shuai W, Zhan X H, Lv W L. Study on the application of torrential rain analysis and evaluation system for mountain torrential disaster prevention[J]. Science and Technology & Innovation, 2024(1):187-189.
- [2] 熊联,田宏岭.我国山洪灾害监测现状与发展趋势[J].灾害学,2019,34(3):140-145.
Xiong Z, Tian H L. A review and trend: flash flood disaster monitoring in China[J]. Journal of Catastrophology, 2019,34(3):140-145.
- [3] 葛柯焱,万新宇,徐洪军,等.基于HEC-HMS的资料匮乏山区洪水模拟研究[J].水力发电,2024,50(3):19-24.
Ge K Y, Wan X Y, Xu H J, et al. Study on flood simulation of data deficient mountainous areas based on the HEC-HMS model[J]. Water Power, 2024,50(3):19-24.
- [4] 翟晓燕,郭良,刘荣华,等.前期土壤湿度和降雨对小流域山洪预警指标的影响评估[J].地理研究,2019,38(12):2957-2965.
Zhai X Y, Guo L, Liu R H, et al. Impact assessment of antecedent soil moisture conditions and rain-fall variability on flash flood warning index at catchment scale[J]. Geographical Research, 2019,38(12):2957-2965.
- [5] He M X, Hogue T S. Integrating hydrologic modeling and land use projections for evaluation of hydrologic response and regional water supply impacts in semi-arid environments[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(6):1671-1685.
- [6] Khalid K, Ali M F, Abd Rahman N F, et al. Application on one-at-a-time sensitivity analysis of semi-distributed hydrological model in tropical watershed[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2016, 8(2):132-136.
- [7] 刘化芳,张成福,冯霜,等.水文模型研究进展[J].绿色科技,2023,25(18):49-53,61.
Liu H F, Zhang C F, Feng S, et al. Research progress of hydrological models[J]. Journal of Green Science and Technology, 2023,25(18):49-53,61.
- [8] 刘雪妍,张会兰,罗泽宇,等.基于SWAT模型的涪江流域土地利用变化的水沙响应研究[J].水土保持研究,2024,31(3):79-89,100.
Liu X Y, Zhang H L, Luo Z Y, et al. Response of runoff and sediment yields to land use change in Fu River watershed based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):79-89,100.
- [9] 庄秋雨,崔艳欣,张玉虎,等.基于SWAT的乌伦古河流域气候和土地利用变化对径流和总磷的影响[J].水土保持研究,2024,31(6):1-10.
Zhuang Q Y, Cui Y X, Zhang Y H, et al. Effects of climate and land use change on runoff and total phosphorus in the Ulungu River basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):1-10.
- [10] 冯世伟,邓芳芳,李静.hec-hms模型在漓江上游流域洪水预报中的应用[J].广西水利水电,2023(3):19-23.
Feng S W, Deng F F, Li J. Application of HEC-HMS model in flood forecasting for upper reaches of Lijiang River basin[J]. Guangxi Water Resources & Hydro-power Engineering, 2023(3):19-23.
- [11] 王雨潇,刘波,王文鹏,等.基于HEC-HMS模型的三峡区间洪水模拟[J].长江科学院院报,2024,41(6):76-83.
Wang Y X, Liu B, Wang W P, et al. Simulation of flood in Three Gorges Region based on HEC-HMS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(6):76-83.
- [12] 钟芳倩,霍艾迪,赵志欣,等.基于HEC-HMS的黄土高原沟壑区流域城市化对洪水情势的影响[J].人民黄河,2024,46(2):67-72,79.
Zhong F Q, Huo A D, Zhao Z X, et al. Impact of urbanization on flood regime in gullied Loess Plateaus based on HEC-HMS[J]. Yellow River, 2024,46(2):67-72,79.
- [13] 陈峨印,张素云,张博.基于HEC-HMS水文模型的太行山前流域洪水模拟[J].水科学与工程,2023(2):14-16.
Chen E Y, Zhang S Y, Zhang B. Flood simulation using HEC-HMS hydrological model at watershed in Taihang Mountain[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2023,(2):14-16.
- [14] 赵直,冯民权,侯梓良.hec-hms水文模型不同降雨损失方法对比研究[J].水文,2024,44(2):83-88.
Zhao Z, Feng M Q, Hou Z L, et al. Comparative study on different rainfall loss methods of the HEC-HMS hydrological model[J]. Journal of China Hydrology, 2024,44(2):83-88.
- [15] 包瑾,李国芳.秦淮河流域城镇化的洪水响应研究[J].水电能源科学,2020,38(7):73-77.
Bao J, Li G F. Study on flood response of urbanization in Qinhuai River basin[J]. Water Resources and Power, 2020,38(7):73-77.
- [16] 段现辉,李磊菁,李建柱.地形格网大小对小流域洪水模拟影响研究[J].水文,2024,44(1):33-36,49.

- Duan X H, Li L J, Li J Z. Study on the influence of topographic data accuracy on watershed flood simulation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2024,44(1):33-36,49.
- [17] 李建柱,李磊菁,张婷,等. DEM数据源及分辨率对流域洪水模拟影响研究[J]. *水力发电学报*, 2023,42(3):26-40.
- Li J Z, Li L J, Zhang T, et al. Effect of DEM data sources and resolutions on watershed flood simulations [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023,42(3):26-40.
- [18] 张然,柴志勇,张婷,等. 基于机器学习模型的洪水预报研究进展[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023,54(11):89-101.
- Zhang R, Chai Z Y, Zhang T, et al. Research progress of flood forecasting based on machine learning models [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023,54(11):89-101.
- [19] 姬战生,章国稳,黄薇. 基于LS-SVM的东苕溪洪水过程预报方法[J]. *浙江水利科技*, 2021,49(2):5-8.
- Ji Z S, Zhang G W, Huang W. Flood process forecasting method of east Tiaoxi based on LS-SVM[J]. *Zhejiang Hydropower Engineering*, 2021,49(2):5-8.
- [20] Sahoo A, Samantaray S, Ghose D K. Prediction of flood in Barak River using hybrid machine learning approaches: a case study [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2021,97(02):186-198.
- [21] 朱豪,胡圆昭,尹明财,等. 基于优化算法的CNN-BiLSTM-attention的月径流量预测[J]. *人民长江*, 2023,54(12):96-104.
- Zhu H, Hu Y Z, Yin M C, et al. Monthly runoff forecast based on CNN-BiLSTM-attention-FA-SSA [J]. *Yangtze River*, 2023,54(12):96-104.
- [22] 李喻鑫,刘惠英. 赣江上游平江流域降雨侵蚀力的时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2020,40(1):1-8,23.
- Li Y X, Liu H Y. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity at Pingjiang basin in upstream of Ganjiang River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(1):1-8,23.
- [23] 田浪屿,刘惠英,王永文. 基于分位数回归的赣江章水流域径流特征研究[J]. *南昌工程学院学报*, 2023,42(1):19-27.
- Tian L Y, Liu H Y, Wang Y W. Research on runoff characteristics of Zhangshui basin of Ganjiang River based on quantile regression [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2023,42(1):19-27.
- [24] 刘声洪,刘惠英,罗萍,等. 赣江上游平江流域近30年不同量级降雨时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2022,29(3):106-114.
- Liu S H, Liu H Y, Luo P, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall of different magnitudes in Pingjiang basin of upper Ganjiang River in recent 30 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(3):106-114.
- [25] 杨欢. 基于HEC-HMS模型的半干旱黄土沟壑区小流域设计洪水研究[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- Yang H. Research on design flood of small watershed in semi-arid Loess Gully Region based on HEC-HMS model [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [26] 崔东文,金波. 基于改进的回归支持向量机模型及其在年径流预测中的应用[J]. *水力发电学报*, 2015,34(2):7-14.
- Cui D W, Jin B. Improved support vector machine regression model and its application to annual runoff forecasting [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015,34(2):7-14.
- [27] 陈芬,陈兴伟,谢剑斌. HEC-HMS模型次洪模拟的参数敏感性分析及应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012,23(5):119-122.
- Chen F, Chen X W, Xie J B. Sensitivity analysis of parameters of the rainflood simulation by using HEC-HMS hydrological model and its application [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012,23(5):119-122.
- [28] 程旭,马细霞,王武森,等. HEC-HMS模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J]. *水文*, 2022,42(1):40-46,102.
- Cheng X, Ma X X, Wang W S, et al. Applicability research of HEC-HMS model parameter regionalization in small basin of Henan Province [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022,42(1):40-46,102.
- [29] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN径流模型中CN值确定方法研究[J]. *干旱区地理*, 2012,35(3):415-421.
- Fu S H, Wang X L, Wang H Y, et al. Method of determining CN value in the SCS-CN method [J]. *Arid Land Geography*, 2012,35(3):415-421.
- [30] 佟海涛. 基于HEC-HMS与机器学习的洪水模拟对比研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2023.
- Tong H T. Comparative study of flood simulation based on HEC-HMS and machine learning [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.