



基于3种降水产流方案的洪水过程模拟研究 ——以西南地区孙水河流域为例

吕小余^{1,2}, 李占玲^{1,2}, 李昕潼^{1,2}, 叶瀛韬^{1,2}

(1. 中国地质大学[北京] 水资源与环境学院, 北京 100083;
2. 中国地质大学[北京] 水利部地下水保护重点实验室[筹], 北京 100083)

摘要 精确模拟洪峰流量和洪水过程线对防洪减灾分析至关重要,其中涉及的降雨损失和产汇流计算往往对洪水过程的模拟最为关键。为评估不同降雨损失模型和产流模型在我国西南地区孙水河流域的适用性,设计了3套降雨产流方案。方案1:SCS曲线数法+Snyder单位线法;方案2:初始常速率法+Clark单位线法;方案3:Green-Ampt法+SCS单位线法,使用HEC-HMS模型对我国西南地区孙水河流域2007—2018年15场洪水过程进行模拟和分析。结果表明,方案1、方案2对研究区洪水过程线的模拟效果最优,其中方案1对单峰洪水过程的模拟效果更好,方案2对复峰洪水过程的模拟效果更好;方案3模拟效果偏差。论文结果可为相似地区的洪水模拟、预报预警提供参考。

关键词 HEC-HMS;孙水河;降雨损失;产汇流模型

中图分类号:P338 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-03-003

Simulation on flood processes based on three rainfall runoff schemes: A case study of Sunshui River Basin in Southwest China

LYU Xiaoyu^{1,2}, LI Zhanling^{1,2}, LI Xintong^{1,2}, YE Yingtao^{1,2}

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences [Beijing], Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources,
China University of Geosciences [Beijing], Beijing 100083, China)

Abstract Accurate simulation of floodpeak and its hydrograph is crucial for flood control and disaster reduction analysis. The selection of rainfall loss and runoff generation model is often critical for flood process simulation. To evaluate the applicability of different rainfall loss and runoff generation models in the Sunshui River Basin in Southwest China, this study constructed three rainfall-runoff modeling schemes (scheme 1: SCS Curve Number method + Snyder Unit Hydrograph method, scheme 2: Initial Constant Rate method + Clark Unit Hydrograph method, scheme 3: Green-Ampt method + SCS Unit Hydrograph method). The HEC-HMS model was used to simulate 15 flood events from 2007 to 2018. The results showed that Schemes 1 and 2 demonstrated satisfactory performance in simulating the flood hydrographs in the study area, with Scheme 1 performing better for single-peak flood events and Scheme 2 performing better for double-peak flood events. In

收稿日期:2023-10-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171047)

第一作者:吕小余,男,从事水文学及水资源研究,xiaoyulv2022@163.com。

通信作者:李占玲,女,副教授,博士,从事水文学及水资源研究,zhanling.li@cugb.edu.cn。

comparison, Scheme 3 exhibited inadequate simulation performance. The findings of this study can provide reference for flood simulation and prediction in similar areas.

Keywords HEC-HMS; Sunshui River Basin; rainfall loss model; runoff generation model

洪水是地球上最具破坏性的自然灾害之一,对其及时准确地模拟和预报是降低洪水风险、减少洪灾损失的重要措施^[1]。水文模型集成了水文分析、计算和预报等多个功能,在洪水预警、径流预报、工程规划和设计等多个领域发挥着重要作用。美国陆军工程兵团水文工程中心开发的基于物理机制的半分布式水文模型 HEC-HMS (the hydrologic engineering center's hydrologic modeling system) 基于河流水动力学过程,能够较好地将输入的各类物理变量与实际水文过程联系起来,近几年来被广泛应用于洪水模拟与预报、洪水预警系统规划等方面^[2]。

当前已有较多学者基于 HEC-HMS 模型做了大量研究。例如, Cacal 等人结合 GIS 技术与 HEC-HMS 模型对菲律宾巴拉望 Irawan 流域进行了极端事件降雨径流模拟,发现 CN 值越大,径流系数越高^[3]。Cheah 人等基于 HEC-HMS 模型,以马来西亚 Selangor 流域为研究区,得出了考虑流域面积、降水量、土壤容重和土地利用的洪峰估算方程^[4]。Dai 等人采用 HEC-HMS 模型探讨了气候变化与土地利用变化对漓江洪水过程的影响^[5]。Bekele 等人采用该模型以及 4 个气候模式情景数据对埃塞俄比亚的 Arjo-Didessa 流域进行了径流预测,发现 RCP4.5 情景下流域年平均流量将减少 1% ~ 3%^[6]。马天航等人基于 HEC-HMS 模型对通口河流域的临界雨量进行了估算,并将其用于洪水预警,结果表明可以提高洪水预报的精度^[7]。司巧灵等人采用该模型探讨了城市化对洪水过程的影响,结果表明秦淮河流域城市化后不透水面积明显增加,洪峰流量增大,峰现事件提前 2 h^[8]。程红等人建立了 HEC-HMS 模型参数中的初损率与起涨流量、波速与最大 1 h 平均雨强的经验关系,为台风暴雨影响下的洪水预报提供了新方法^[9]。以上研究极大丰富了 HEC-HMS 模型在降雨径流模拟中的应用,也为洪水预报预警等相关研究提供了借鉴。然而,当前研究多基于单一的降雨产汇流方案,缺乏对模型不同内在结构适用性的探讨,且对流域特征与洪水特征关系方面的探究也较少^[4]。

雅砻江二级支流孙水河流域位于我国西南山

区,该流域暴雨频发,下垫面条件复杂,由暴雨引发的山洪事件在近些年频繁发生,造成了严重的经济损失^[10]。2012 年 8 月 31 日,孙水河流域日降雨达 149.2 mm,形成两百年一遇特大暴雨,影响到 19 个乡镇、11.15 万群众、57.33 km² (86 000 亩)良田,直接经济损失高达 31 亿元^[11]。

本文以孙水河流域为研究区,以场次洪水为研究对象,通过设计 3 种降雨产流方案,采用 HEC-HMS 模型对流域洪水过程进行模拟,为孙水河流域基于事件的洪水预报提供最佳的降雨损失产流模型,并通过将适用方案中的参数与洪峰流量和洪水总量进行相关分析,探讨该流域特征因素与洪水特征之间的关系。本文可为该流域洪水灾害预警提供数据支持,也为类似的山区小流域洪水预报提供借鉴和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 流域概况

孙水河流域位于四川省凉山州境内,是安宁河上游左岸最大的支流,属于雅砻江二级支流,流域内河长 92 km,流域面积 1 600.8 km²,地处于东经 102°11' ~ 102°42'、北纬 27°54' ~ 28°29'。多年平均流量 35.35 m³/s,最大年均流量 52.39 m³/s,自然落差 1 251 m^[12]。多年平均降水量为 1 149.8 mm,且降水集中于 5—9 月,是我国降水分区的湿润带和径流分区的多水地区^[13]。孙水河流域地貌属于云贵高原区,地形表现为边缘高、中间低的特点,居民住宅区沿河而居。

流域内有 8 个雨量站(米市、波洛、喜得、项姑、则约、冕山、登向荣、孙水关)和 2 个水文站(孙水关、喜得)。研究区地理位置及站点分布见图 1。

1.2 数据来源

DEM 数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn);土地利用数据来源于中科院资源环境数据云平台(www.resdc.cn),精度为 1 km × 1 km;土壤类型数据来源于世界土壤数据库 HWSD(www.fao.org);水文气象数据选取自研究区 2007—2018 年 15 场降雨洪水资料,数据均来源

于历年《中华人民共和国水文年鉴长江流域水文资料》;降雨数据为流域内 8 个雨量站(米市、波洛、喜得、项姑、则约、冕山、登向荣、孙水关)的实测数据,洪水流量过程为孙水关水文站实测数据。

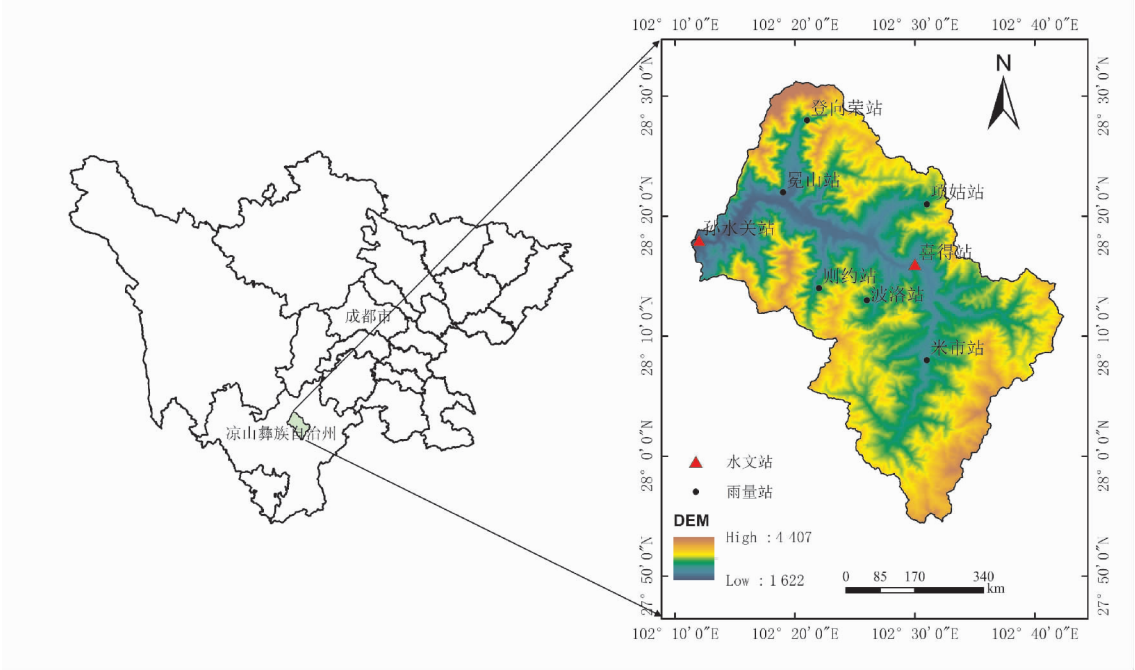


图 1 孙水河流域地理位置及站点分布示意图
Fig. 1 Geographical location and site distribution diagram of Sunshui River Basin

方便起见,下文中采用洪水发生的日期为各场次洪水进行编号,例如 20070912 场次洪水即表示 2007 年 9 月 12 日发生的洪水事件。

2 研究方法

2.1 HEC-HMS 模型构建

采用 HEC-HMS 模型结合 ArcGIS10.6 软件进行流域建模。在 ArcGIS 中利用 HEC-Geohms 扩展模块对流域数字高程模型(DEM)进行填洼、流向、流量、河流定义、河流划分,将流域划分成 11 个子流域,所有子流域的径流全部流向子流域 W140, W140 出口作为孙水河流域的最终出口,子流域划分见图 2。经过地形处理后,可以得到模型的初始参数,包括子流域面积大小(area)、子流域坡度(slope)、出口到分水点的主河道长度(L)、出口沿着主河道到集水区质心最近的点长度(L_c),详细数据见表 1。

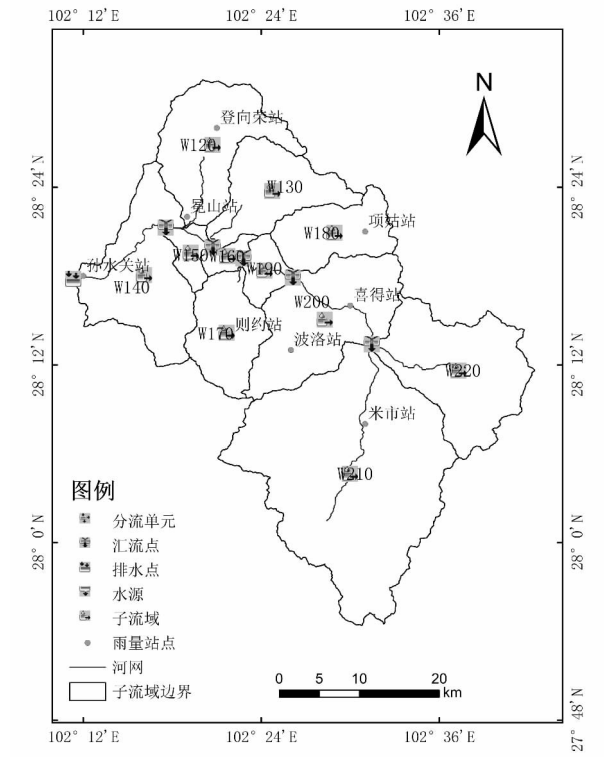


图 2 研究区子流域划分
Fig. 2 Study area sub-basin division

表 1 研究区各子流域对应的 HEC-HMS 模型参数
Tab. 1 Parameters of the HEC-HMS model for each sub-basin in the study area

子流域	area/km ²	L/km	L _c /km	slope
W120	152.02	28.69	12.75	0.05
W130	115.92	26.54	14.09	0.04
W140	176.78	24.90	10.88	0.07
W150	26.05	11.24	5.79	0.16
W160	17.02	7.57	2.16	0.13
W170	96.86	22.27	10.93	0.07
W180	90.42	19.40	8.92	0.06
W190	32.59	9.97	3.75	0.08
W200	187.25	22.75	7.20	0.07
W210	510.49	45.13	19.95	0.03
W220	195.25	27.22	12.77	0.04

表 2 各雨量站在各子流域所占的面积权重
Tab. 2 Area weights of each rainfall station in each sub-basin

子流域	雨量站	控制面积/km ²	雨量站权重/%	子流域	雨量站	控制面积/km ²	雨量站权重/%
W120	登向荣	112.00	0.74	W180	喜得	7.35	0.08
	冕山	40.02	0.26		冕山	6.94	0.21
	登向荣	41.61	0.36		项姑	0.45	0.01
W130	冕山	39.30	0.34	W190	则约	19.56	0.60
	项姑	35.01	0.30		波洛	1.53	0.05
	冕山	62.29	0.35		喜得	4.10	0.13
W140	则约	40.08	0.23	W200	项姑	14.20	0.08
	孙水关	74.40	0.42		则约	3.80	0.02
W150	冕山	24.13	0.93		波洛	79.45	0.42
	则约	1.92	0.07	W210	喜得	89.80	0.48
W160	冕山	16.25	0.95		则约	3.64	0.01
	则约	0.77	0.05		波洛	54.47	0.11
	冕山	0.23	0.00	W220	喜得	9.16	0.02
W170	则约	95.15	0.98		米市	443.22	0.87
	波洛	1.48	0.02		喜得	70.41	0.36
W180	冕山	0.69	0.01		米市	124.84	0.64
	项姑	82.39	0.91				

2.2 降雨径流模拟方案

2.2.1 降雨损失模拟

降雨损失模型主要用于计算降雨量减去损失水量后的径流量。SCS 曲线数法用于估算流域中渗入土壤的降雨量和地表径流量,其净雨量与累积降雨量、土地利用类型、土地覆盖、前期湿度有关^[14],净降雨的计算公式为

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

(1)

将 HEC-Geohms 扩展模块生成的文件导入到 HEC-HMS 模型中,建立气象模块、控制模块、时间序列模块和流域模块。采用泰森多边形法对各子流域面降水量进行计算,其中,各雨量站在各子流域所占的面积权重见表 2。

HEC-HMS 模型中模拟降雨径流过程有不同的方法。考虑到我国西南山区气候和土地利用方式的特点以及数据的可得性,选择 3 种降雨损失模型和 3 种产流模型,共设计 3 种降雨产流模拟方案。方案 1 使用 SCS 曲线数法计算累积损失雨量,使用 Sndyer 单位线法模拟地表径流;方案 2 使用初始常速率法计算降雨损失,使用 Clark 单位线法模拟地表径流;方案 3 则采用 GreenAmpt 法计算降雨损失,SCS 单位线法模拟地表径流。3 种方案均使用指数衰减法和马斯京根法进行基流和河道水流演进的模拟。

式中: P_e 为累积净降雨; P 为降雨深度; I_a 为初始降雨损失; S 为潜在的最大截留。潜在最大截流(S)是曲线数(CN,式中简记 N_c)的函数,且与 CN 值成反比。

许多研究表明,初始降雨损失与潜在的最大截留存在如下经验公式^[15],

$$I_a = 0.2 S$$

(2)

$$S = \frac{25\ 400}{N_c} - 254$$

(3)

CN 值是水文学中用于预测径流的经验参数,其值率定的好坏将对模拟的精度有重要影响^[16]。CN 值是与土壤湿度、土地利用情况、土壤类型有关的无量纲常数。查看 SCS 手册的 CN 值参考表,可以得到不同土地利用情况和不同土壤类型在中等土壤湿度下(AMC-II)的 CN(II)初始值^[17](见表 3)。土壤水文分组根据入渗特征分为 A、B、C、D 共 4 类,在相似的降水和覆盖条件下具有相似产流能力的土壤定义为一类水文分组。本文通过 ArcGIS 软件将土地利用重分类,在世界土壤数据库中提取该流域土壤类型中的参数(T_SAND、T_CLAY、T_OC、T_ECE),利用 SPAW 软件计算饱和导水率,根据其值计算得到孙水河流域属于 A 类、B 类土壤水文分组。土地利用类型分为耕地、林地、草地、房屋建筑(区)、裸土地。结合土地利用类型和水文分组即可得到每一个像元的 CN 值。对于不同土壤类型的流域,计算加权 CN 值即可得到每一个子流域的 CN 值,取四舍五入的整数为最终加权 CN 值,如图 3 所示。再根据土壤湿润转换关系得到不同土壤湿度下的 CN 值。

表 3 CN 值查询表
Tab. 3 Curve number lookup table

土地利用类型	A	B	C	D
耕地	59	70	78	81
林地	36	60	73	79
草地	49	69	79	84
房屋建筑(区)	61	75	83	87
裸土地	77	86	91	94

初始常速率法是指在整个降雨过程中,最大的潜在降雨损失 f_c 都是常量。该方法在模型中敏感参数主要为恒定损失速率(constant rate)。恒定损失速率主要由土壤分类决定^[18],其初始值见表 4。Green-Ampt 法作为一种基于物理机制的模型,因其对各种非均匀场景的适用性而被广泛研究^[18]。该模型的参数主要包括渗透系数(conductivity)、浸润面负压(suction)和湿度亏欠量(saturated content)。孙水河流域主要由壤土组成,通过查看土性分类估算值表可以得出以上参数的初始值^[19](见表 4)。

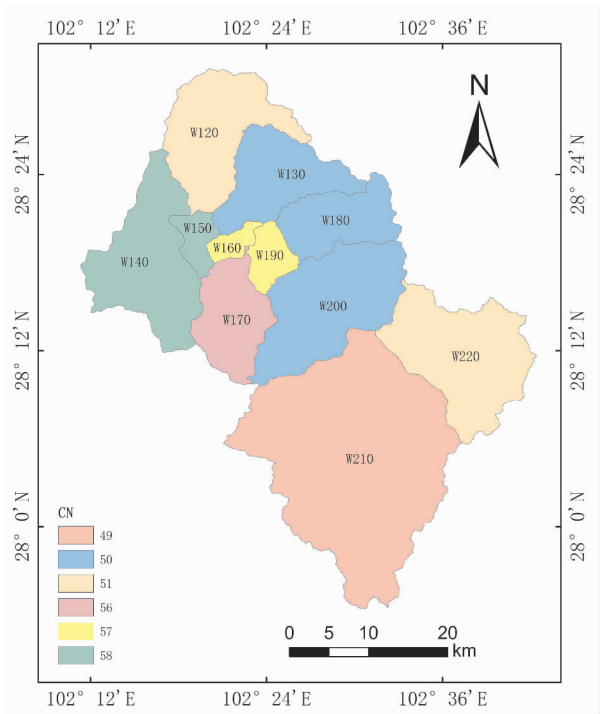


图 3 研究区 CN 值分布

Fig. 3 CN value distribution of the study area

2.2.2 地表径流模拟

地表径流模型主要模拟将降雨转化为某个位置处径流的过程。Snyder 单位线法通过收集某个集水区的降雨和径流数据,计算出该区域的单位线,并将其转化为参数,与实际可测得的流域特征相联系,进而导出流域滞时的计算公式^[20]。该方法的输入参数包括洪峰延时 t_p 和系数 C_p , t_p 的计算公式为

$$t_p = CC_t(LL_c)^{0.3} \tag{4}$$

式中: C_t 为集水区系数; L 为出口到分水点的主河道长度; L_c 为出口沿着河道到集水区质心最近的点长度; C 为转换常数。 C_p 为经验参数,取值范围为 0.4 ~ 0.8,采用试错法可得到参数 C_p 的最优值。孙水河流域地形的具体信息见表 1,经过计算可得出各子流域单位线洪峰延时 t_p 的初始值(见表 4)。

Clark 单位线法是一种利用瞬时单位线的综合流量过程线方法,不需要通过分析过去观测到的水文过程线来获得单位水文过程线^[21]。该模型主要包括汇流时间和蓄水量系数 R ,汇流时间可用 SCS 单位线法进行估算,蓄水量系数 R 根据经验方程求得^[4],计算公式如下,

$$R = 2.976A^{-0.1943}L^{0.9995}s^{-0.4588} \tag{5}$$

式中: A 、 L 、 s 分别为流域面积、主河道长度、子流域平

均坡度。通过计算得到各参数的初始值(见表4)。

表4 3个方案对应的模型参数初始值
Tab.4 Initial values of model parameters for three schemes

子流域	方案1		方案2			方案3		
	CN(II)	t_p	constant rate	T_{lag}	R	saturated content	suction /mm	conductivity /(mm·h ⁻¹)
W120	51.39	7.93	1.46	2.41	18.46	0.463	315	13.2
W130	49.68	7.98	1.44	1.54	17.33	0.463	315	13.2
W140	58.20	7.25	1.38	1.02	16.18	0.463	315	13.2
W150	58.14	4.72	1.31	1.14	15.28	0.463	315	13.2
W160	57.00	3.12	1.23	4.69	14.37	0.463	315	13.2
W170	56.21	7.02	1.17	5.72	14.48	0.463	315	13.2
W180	49.83	6.33	1.07	5.77	15.53	0.463	315	13.2
W190	57.20	4.00	0.98	5.65	16.03	0.463	315	13.2
W200	49.91	6.23	0.90	5.22	17.02	0.463	315	13.2
W210	49.20	10.39	0.79	5.55	12.85	0.463	315	13.2
W220	50.78	7.81	0.79	5.36	12.98	0.463	315	13.2

SCS 单位线法是一个参数化的单位流量过程线模型,该方法的主要参数是流域滞时(T_{lag}),其值为汇流时间的 0.6 倍^[22]。流域滞时是有效降雨在流域内的延迟时间,汇流时间是降雨从最远点流到控制点(下游点)的持续时间。汇流时间是根据子流域特征估算的,包括地形坡度和河段长度^[6],计算公式如下,

$$T_c = \frac{l^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1\ 140s^{0.5}}$$

(6)

$$T_{lag} = 0.6T_c$$

(7)

式中: T_c 为汇流时间; S 为潜在的最大截留; s 为子流域平均坡度; l 为在一个子流域中最大的流动长度。通过计算 SCS 单位线法的流域滞时,计算结果见表 4。

2.2.3 基流模拟

基流是由前期降雨产生的径流,常用来表示集水区蓄水量的自然排水过程^[22]。计算公式如下,

$$Q_t = Q_0 k^t$$

(8)

式中: Q_0 表示初始流量,在模拟中可采用河道的年平均流量表示; k 表示指数衰减常数; t 表示时间的离散步长。

2.2.4 河道水流模拟

河道水流模拟是根据计算的边界条件、河道测量资料,采用水力学或水文学方法,计算得到设

计断面出流流量过程。马斯京根方法因简单和参数较少而被广泛应用^[23]。马斯京根方法包括 3 个参数:洪水波通过演进段的运动时间 K 、无量纲常数 X 和子河段数。 X 是入流和出流对槽蓄影响的相对比重,取值范围为 0~0.5。

2.3 模型性能评价指标

采用纳什效率系数(NSE,式中简记 C_{NSE})、均方根误差(RMSE,式中简记 E_{RMSE})、最大洪峰流量误差(R_{REP})、洪峰峰现时间差(ΔT)4 个评价指标对观测和模拟流量的拟合优劣程度进行评估。计算公式如下,

$$C_{NSE} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \right)$$

(9)

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_i^N 1(Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{n}}$$

(10)

$$R_{REP} = \frac{|Q_s - Q_o|}{Q_o} \times 100\%$$

(11)

$$\Delta T = |T_s - T_o|$$

(12)

式中: $Q_{s,i}$ 、 $Q_{o,i}$ 、 Q_o 、 Q_s 分别表示第 i 时刻的观测流量、模拟流量、整个时段观测流量的平均值、模拟流量的平均值; N 表示时间总步长; n 代表流量观测值的样本数量; T_s 、 T_o 分别为模拟和实测洪峰出现的时间。

NSE 的值越接近 1,说明模型的模拟效果越

好。RMSE 用于衡量预测值与真实值之间的偏差,对数据中的异常值比较敏感,该值越大表示误差越大。根据《水文情报预报规范》对洪峰流量误差、洪峰峰现时间差可接受范围的界定^[14],本文以 NSE 高于 0.7、RMSE 小于 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ 、 R_{REP} 小于 20%、 ΔT 在 3 h 内表示模型模拟精度是可以被接受的,即模型模拟结果合理。

3 结果分析与讨论

3.1 参数优化

选择孙水河流域出口站(孙水关水文站)

表 5 3 个方案对应的模型参数优化值

Tab. 5 Initial values of model parameters for three schemes

子流域	方案 1		方案 2			方案 3		
	CN(II)	t_p	constant rate	T_{lag}	R	saturated content	suction /mm	conductivity /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
W120	44.30	7.81	1.46	2.41	18.46	0.3	300	1.5
W130	43.77	10.39	1.44	1.54	17.33	0.3	300	1.5
W140	52.45	6.23	1.38	1.02	16.18	0.3	300	1.5
W150	52.50	4.00	1.31	1.14	15.28	0.3	300	1.5
W160	51.82	6.33	1.23	4.69	14.37	0.3	300	1.5
W170	50.82	7.02	1.17	5.72	14.48	0.3	300	1.5
W180	44.18	3.12	1.07	5.77	15.53	0.3	300	1.5
W190	53.28	4.72	0.98	5.65	16.03	0.3	300	1.5
W200	44.17	7.25	0.90	5.22	17.02	0.3	300	1.5
W210	43.80	7.98	0.79	5.55	12.85	0.3	300	1.5
W220	45.36	7.93	0.79	5.36	12.98	0.3	300	1.5

3.2 不同方案的模拟性能

图 4 和图 5 分别给出了率定期和验证期 3 个方案模拟出的洪峰流量和洪水过程线、实测洪峰流量和洪水过程线,以及对应的降水量。可以看出,实测洪峰均位于降雨中心之后,说明选取的场次降雨洪水比较可靠。从 15 场洪水过程线大致可以看出,3 个方案模拟的洪峰流量和洪水过程线多数与实测值都比较吻合,说明 HEC-HMS 模型对该流域的洪峰以及洪水过程模拟的效果总体较好。但对于 20110621、20140816、20160704、20170621 等场次洪水,方案 3 对于第 1 个洪峰流

2007—2014 年 9 场实测洪水过程用于 HEC-HMS 模型参数率定,2014—2018 年 6 场实测洪水过程用于模型参数验证。使用前文计算得到的参数作为模型参数初始值,为了更好地实现模拟值和观测值的拟合,利用单纯形法对 HEC-HMS 模型中的参数进行优化,选定洪峰均方根误差作为目标函数,考虑到参数的物理意义,在优化范围内选择合理的优化区间,避免优化后的参数不符合物理意义。表 5 给出了各方案对应的优化参数。

量的模拟值普遍偏高。

表 6、表 7 给出了率定期和验证期不同场次洪水对应的 4 个评价指标值。对于方案 1,15 场洪水事件中模型模拟结果皆在合理范围内的场次为 13 场,占总场次的 86.7%;对于方案 2,模拟结果在合理范围内的场次为 13 场,占总场次的 86.7%;对于方案 3,模拟结果在合理范围内的场次为 8 场,占总场次的 53.3%。按评价指标的合格率来看,方案 1 和方案 2 更适用于孙水河流域场次降雨径流关系的模拟,而方案 3 模拟效果不是很理想。

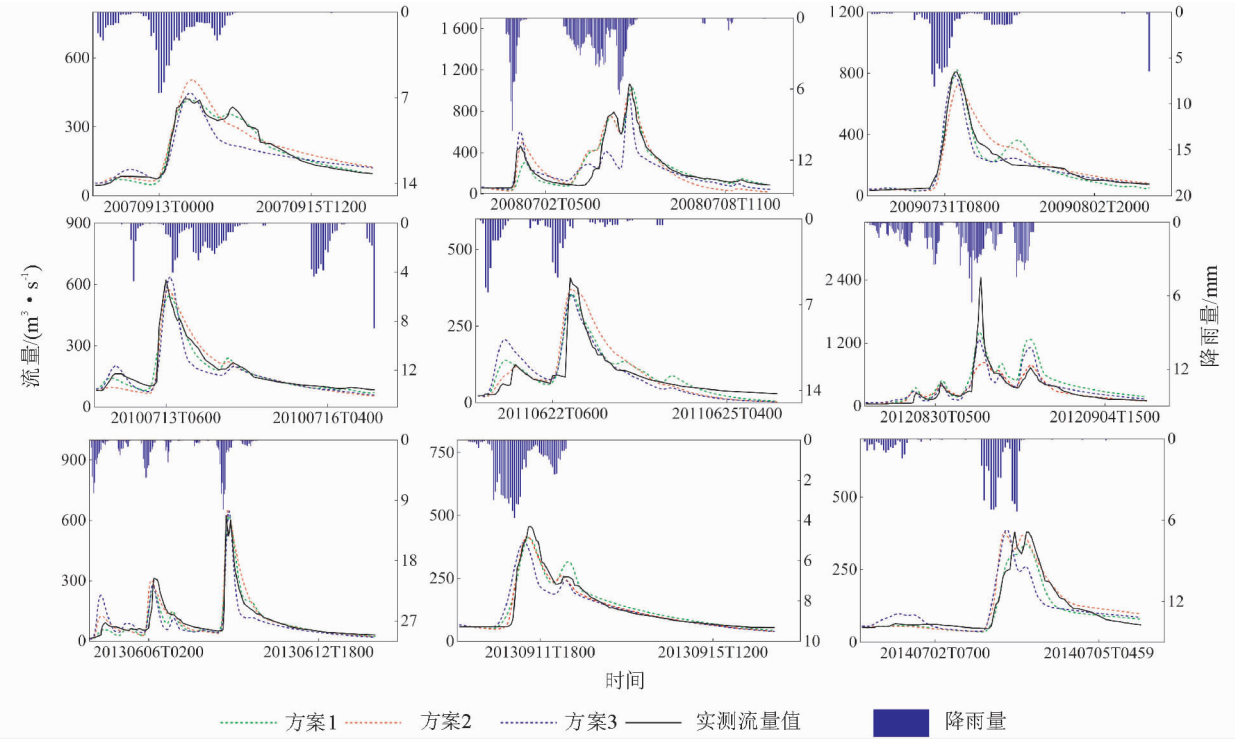


图4 3个方案率定期模拟结果

Fig. 4 Simulation results of three schemes during calibration period

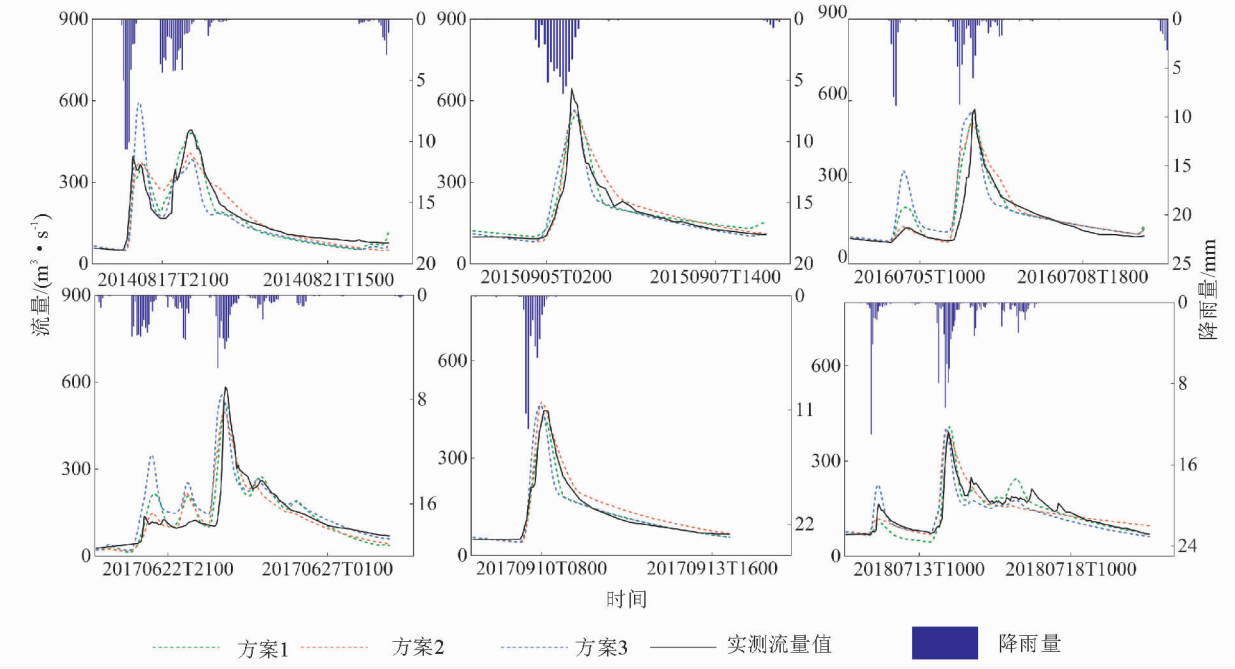


图5 3个方案验证期模拟结果

Fig. 5 Simulation results of three schemes during validation period

为比较不同方案的模拟效果,进一步利用箱型图分析3个方案中4个评价指标的分布(见图6)。其中,红色箱体表示率定期结果,蓝色箱体表示验证期结果,箱体左侧散点展示了评价指标的数据分布。通过对比这些指标在各个方案率定期和验证期模拟结果,可以看出,在NSE指标上,方案1的模拟结果在率定期和验证期都表现出较高的数值,并且数据分布集中,而方案3在验证期的NSE有2场小于0.6,并且分布更为离散;在 ΔT 指标上,方案1和方案2的模拟结果基本相

同,但都优于方案 3;在 RMSE 指标上,方案 1 对应的均方根误差最小,并且数据分布最为集中;在 R_{REP} 指标上,3 个方案的洪峰误差多数都分布在 20% 以内,表明它们都能较好地模拟洪峰流量。综合考虑各项指标可知,方案 1 的模拟精度最高,其次是方案 2,方案 3 的模拟效果最差。

表 6 率定期 HEC-HMS 模型的模拟效果
Tab. 6 Simulation results of HEC-HMS model during calibration period

场次洪水	NSE			$\Delta T/h$			RMSE/($m^3 \cdot s^{-1}$)			$R_{REP}/\%$		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
20070912	0.98	0.90	0.81	2	3	2	0.2	0.3	0.4	0.95	19.60	6.04
20080630	0.88	0.79	0.69	2	0	1	0.3	0.5	0.6	3.25	1.00	8.98
20090730	0.93	0.90	0.95	1	2	0	0.3	0.3	0.2	1.82	10.97	2.41
20100708	0.94	0.91	0.85	1	1	2	0.2	0.3	0.4	12.80	7.15	2.45
20110621	0.83	0.71	0.67	1	1	0	0.4	0.5	0.6	12.57	8.96	13.14
20120828	0.62	0.66	0.74	1	2	1	0.6	0.6	0.5	42.50	66.17	48.53
20130603	0.91	0.85	0.77	2	2	3	0.3	0.4	0.5	0.35	5.44	3.53
20130910	0.95	0.97	0.81	1	2	3	0.2	0.2	0.4	9.82	8.49	13.96
20140701	0.94	0.84	0.65	5	4	3	0.2	0.4	0.6	10.92	0.34	2.14

表 7 验证期 HEC-HMS 模型的模拟效果
Tab. 7 Simulation results of HEC-HMS model during validation period

场次洪水	NSE			$\Delta T/h$			RMSE/($m^3 \cdot s^{-1}$)			$R_{REP}/\%$		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
20140816	0.86	0.84	0.73	1	0	4	0.4	0.4	0.5	9.35	16.89	20.53
20150904	0.92	0.92	0.89	2	1	1	0.3	0.3	0.3	15.21	12.71	12.26
20160704	0.80	0.75	0.41	1	1	1	0.4	0.5	0.8	5.33	8.73	0.85
20170621	0.81	0.76	0.40	0	1	2	0.4	0.5	0.8	9.47	14.65	4.36
20170909	0.96	0.93	0.83	1	2	3	0.2	0.3	0.4	4.33	5.92	3.70
20180711	0.86	0.75	0.72	1	1	1	0.4	0.5	0.5	4.13	1.33	2.96

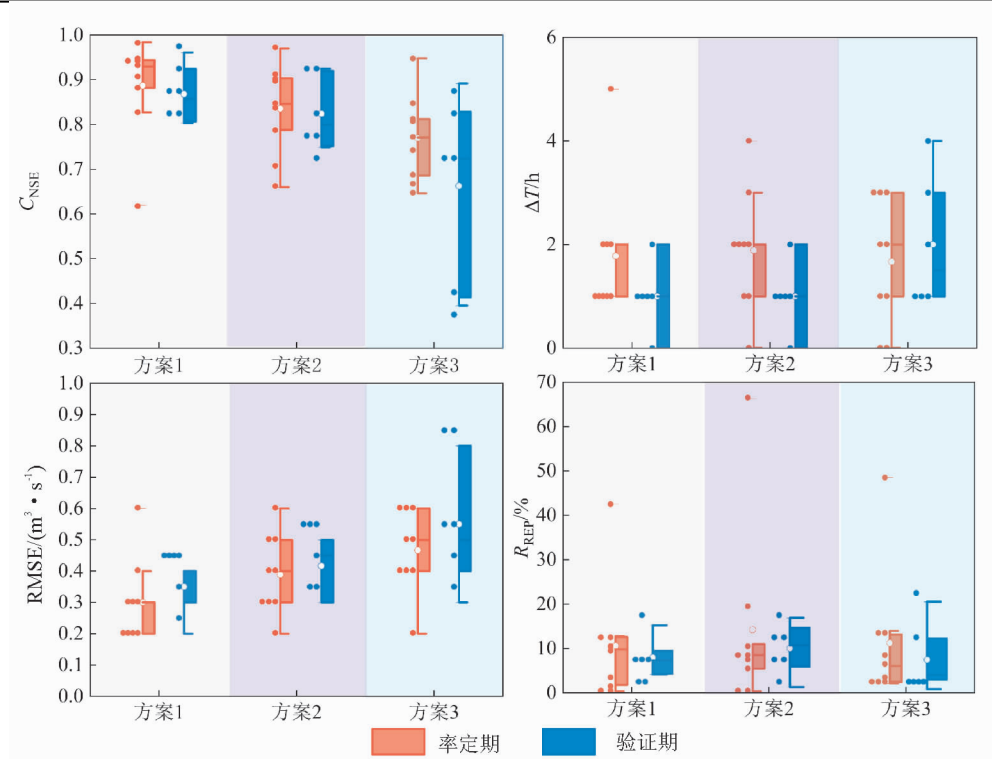


图 6 模拟结果的统计箱型图
Fig. 6 Box plot of simulation results

观察模拟的洪水过程线(见图4和图5)以及各评价指标(见表6和表7)还可发现,对于6场单峰型洪水(20090730、20100708、20150904、20170621、20170909、20180711),3个方案对应的 ΔT 、RMSE、 R_{REP} 都有不错的模拟效果,但对于NSE,方案1在大多数场次中都最高,其次是方案2,方案3的表现相对较差,因此方案1的模型拟合度最好,这表明方案1对于单峰型洪水模拟效果最优。对于9场复峰场次洪水(20070912、20080630、20110621、20120828、20130603、20130910、20140701、20140816、20160704),分析3个方案模拟的次峰流量最大值和实际次峰流量相对误差,结果显示,方案2有6场次峰误差值小于10%,方案1有4场,方案3仅有1场,这表明方案2能较好地拟合复峰的流量过程线。

分析其原因,这可能是因为方案1产流机制相对简单,方案1中Snyder单位线法的核心是一个标准的单峰单位线^[25],降雨主要集中在流域的某一部分,然后逐渐通过水流流向其他地区,最终形成一个峰值,也就是雨后响应曲线只有1个峰值。方案2(初始常速率+Clark单位线法)对于复峰型洪水的模拟效果较好,这可能是因为Clark单位线法模拟雨后多个子流域所产生的径流响应有所不同,而这些子流域之间相互作用,会导致总的径流响应具有2个或多个峰值。相比之下,方案3(Green-Ampt法+SCS)对于孙水河流域场次降雨径流过程模拟效果较差,可能是由于所采用的土壤数据库精度不够高,在孙水河流域没有体现出土壤参数的空间差异性。

需要说明的是,对于20120828场次洪水,3个方案的洪峰误差均超过了20%,误差分别达到45.5%、66.8%、48.5%,模拟结果为不合格。分析其原因,这应该与获取到的降水数据时间分辨率不够精细以及本次洪水的量级有关。结合研究区历年降水洪水资料,2012年8月31日孙水关水文站发生了建站以来的最大洪水,最大洪峰流量超过2500 m³/s,重现期200年以上^[26]。查阅水文年鉴实测站点数据可知,20120828场次洪水最大洪峰发生时间是2012年8月31日16:12,整场洪水洪峰记录的时间间隔平均12 min,最短间隔为6 min,时间分辨率很高。而对应的实测降雨数据时间间隔均大于1 h,尽管对降雨数据进行了插值处理(插值为小时数据),但插值后的降雨数据仍无法捕捉到更精细的降水时程分配。采用1

h时间步长降雨进行洪水模拟,会导致模拟的洪水过程线有坦化现象,即不能准确模拟出最大洪峰流量。因此,对于量级较大的洪水事件,需要有更高时间分辨率的降雨数据驱动模型。

4 结语

论文采用3种降水产流方案通过HEC-HMS模型对孙水河流域洪水过程进行了模拟。根据流域形态参数对3个方案的输入参数进行率定,并采用单纯形优化算法对初始参数进行优化。通过对15场洪水模拟结果的NSE、RMSE、 R_{REP} 、 ΔT 这4个评价指标进行分析,可以得出以下结论。

1)使用SCS曲线数法计算累积损失雨量、使用Snyder单位线法模拟地表径流(即方案1),或者使用初始常速率法计算降雨损失、使用Clark单位线法模拟地表径流(即方案2),这2种方案合格率为86.7%,而采用GreenAmpt法计算降雨损失、SCS单位线法模拟地表径流(即方案3)的合格率为53.3%,即基于方案1和方案2构建的HEC-HMS模型在孙水河流域适用性良好,而方案3模拟效果较差。

2)方案1和方案2对于孙水河流域不同洪水过程线类型模拟结果存在差异,方案1更适合模拟单峰的洪水过程线,而方案2更适合模拟复峰的洪水过程线。这些发现对于提高洪水模拟和预测的准确性具有重要意义。

论文通过探讨不同降雨损失模型和产流模型的适用性,以及流域特征与洪水特征的关系,为山区流域洪水过程模拟和防洪减灾分析的理论和实践研究提供参考。本文也存在不足之处:①尚未针对多种降雨损失模型和产汇流模型的组合进行更深入的探讨;②获取到的场次洪水数据有限,可能会导致模型模拟效果存在一定的不确定性。

参考文献

- [1] SAHU M K, SHWETHA H R, DWARAKISH G S. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: A review[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2023, 9(3): 3029-3051.
- [2] MISHRA B K, RAFIEI EMAM A, MASSAGO Y, et al. Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta[J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11(S2): S1105-S1115.

- [3] CACAL J C, AUSTRIA V C A, TABOADA E B. Extreme event-based rainfall-runoff simulation utilizing GIS techniques in irawan watershed, Palawan, Philippines[J]. Civil Engineering Journal, 2023, 9(1): 220-232.
- [4] CHEAH R, BILLA L, CHAN A, et al. Geospatial modelling of watershed peak flood discharge in Selangor, Malaysia[J]. Water, 2019, 11(12): 2490.
- [5] DAI J F, RAD S, XU J X, et al. Impacts of climate change versus land use change on recent Lijiang River flood regime, South China[J]. Tecnología y Ciencias Del Agua, 2021, 12(3): 257-303.
- [6] BEKELE W T, HAILE A T, RIENTJES T. Impact of climate change on the streamflow of the Arjo-Didessa catchment under RCP scenarios[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(6): 2325-2337.
- [7] 马天航, 丁锐, 黄尔, 等. 基于 HEC-HMS 模型的通口河流域洪水预警研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 80-89.
MA T H, DING R, HUANG E, et al. Research on flood warning of Tongkou River basin based on HEC-HMS model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 80-89.
- [8] 司巧灵, 杨传国, 顾荣直, 等. HEC-HMS 模型在城市化流域洪水模拟中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(4): 17-22.
SI Q L, YANG C G, GU R Z, et al. Flood simulation of typical urbanized watershed by HEC-HMS model[J]. Yangtze River, 2018, 49(4): 17-22.
- [9] 程红, 陈兴伟. 东南沿海典型流域台风暴雨洪水预报的 HEC-HMS 模型[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(3): 61-65.
CHENG H, CHEN X W. The HEC-HMS model for typhoon and rainstorm flood forecasting in typical river basins in the southeast coast[J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(3): 61-65.
- [10] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报 2012[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [11] 白永健, 倪化勇, 王德伟. 孙水河流域地质灾害时空分布及链式规律研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(S): 156-163.
BAI Y J, NI H Y, WANG D W. Research on the space-time distribution and chain patterns of geohazards in Sunshui River basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(S): 156-163.
- [12] 李婉欣, 熊东红, 张素, 等. 四川凉山州孙水河流域近 60 年来径流趋势特征分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 130-137.
LI W X, XIONG D H, ZHANG S, et al. Trends analysis of Sunshuihe river basin for the last six decades in Liangshan Prefecture, Sichuan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 130-137.
- [13] 曾义. 孙水河流域水文特征分析[J]. 江苏水利, 2018(3): 69-72.
ZENG Y. Analysis on hydrological characteristics of Sunshui River watershed[J]. Jiangsu Water Resources, 2018(3): 69-72.
- [14] 王瑞敏, 李红霞, 黄琦, 等. 基于 HEC-HMS 的西南山区中小河流洪水预报研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 79-82.
WANG R M, LI H X, HUANG Q, et al. Flood forecasting of small-medium rivers in Southwest China using HEC-HMS model[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 79-82.
- [15] EBRAHIMIAN A, GULLIVER J S, WILSON B N. Estimating effective impervious area in urban watersheds using land cover, soil character and asymptotic curve number[J]. Hydrological Sciences Journal, 2018, 63(4): 513-526.
- [16] 史利杰, 陈真, 张国栋. HEC-HMS 模型在黄河中游大理河流域适用性研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(8): 21-24.
SHI L J, CHEN Z, ZHANG G D. Applicability of HEC-HMS model in Dali River basin in the middle reaches of the Yellow River[J]. Yellow River, 2020, 42(8): 21-24.
- [17] MOCKUS V. SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology[M]. Washington: Soil Conservation Service, 1972.
- [18] BELAY Y Y, GOUDAY Y A, ALEMNEH H N. Comparison of HEC-HMS hydrologic model for estimation of runoff computation techniques as a design input: Case of Middle Awash multi-purpose dam, Ethiopia[J]. Applied Water Science, 2022, 12(10): 237.
- [19] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, SAXTONN K E. Estimation of soil water properties[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(5): 1316-1320.
- [20] 王瑞滢, 胡静, 周末, 等. 基于 HEC-HMS 模型的西南地区典型中小河流洪水预报研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 79-82.
WANG R Y, HU J, ZHOU M, et al. Flood forecasting of typical small-middle rivers in Southwest China based on HEC-HMS model[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(5): 79-82.
- [21] KAZEYILMAZ-ALHAN C M, YALÇIN I, JAVANSHOUR K, et al. A hydrological model for Ayamama

watershed in Istanbul, Turkey, using HEC-HMS[J]. Water Practice and Technology, 2021, 16(1): 154-161.

[22] 梁彦宽, 祝雪萍, 孙小平, 等. HEC-HMS 模型在岷岗流域的应用研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 53-56.

LIANG Y K, ZHU X P, SUN X P, et al. Research and application of HEC-HMS model in Kelan Basin [J]. Yellow River, 2022, 44(4): 53-56.

[23] GUDURU J U, JILO N B, RABBA Z A, et al. Rain-fall-runoff modeling using HEC-HMS model for Meki River watershed, rift valley basin, Ethiopia[J]. Journal of African Earth Sciences, 2023, 197: 104743.

[24] 彭楚杰. HEC-HMS 模型在青山河流域洪水模拟中的应用[J]. 人民珠江, 2021, 42(3): 87-93.

PENG C J. Application of HEC-HMS model in flood simulation of Qingshan River basin [J]. Pearl River, 2021, 42(3): 87-93.

[25] 陈涛, 王文彬, 陈壮志. 四川省孙水河流域旱涝周期分析[J]. 四川水利, 2014, 35(4): 37-40.

CHEN T, WANG W B, CHEN Z Z. Analysis of drought and flood cycles in Sunshuihe River basin, Si-chuan Province [J]. Sichuan Water Resources, 2014, 35(4): 37-40.

(编辑 李 静)