

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.004

HEC-HMS 模型在不同水文气象分区中的改进

杨子菁¹, 刘攀², 王起峰², 李致家¹, 黄迎春¹, 童睿轩¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要:采用前期影响雨量 P_a 替换前 5 d 降水量以评估前期土壤湿润程度、线性内插增加 CN 值的分级以及根据不同水文气象分区选用适宜初损率 λ 等改进措施对 HEC-HMS 半分布式水文模型产流模块中的 SCS-CN 方法进行改进,并于县北沟、呈村、平和 3 个中小流域进行验证,探讨了反算法率定 SCS 模型参数的局限性;通过率定不同流域前期影响雨量下的最适宜 CN 值(C_x)并回归 C_x-P_a 关系,分析了实际湿润程度随前期影响雨量变化的规律。研究表明,当湿润区和半湿润区流域初损率取值 0.05 和 0.20 时 HEC-HMS 模型能取得较好的模拟精度。

关键词:SCS-CN 法;HEC-HMS 模型;径流曲线数;初损率;反算法;水文气象分区

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)02-0026-09

Application of HEC-HMS model in different hydrometeorological regions

YANG Zijing¹, LIU Pan², WANG Qifeng², LI Zhijia¹, HUANG Yingchun¹, TONG Ruixuan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In order to make the HEC-HMS model universally applied in different hydrometeorological regions, the SCS-CN method in the HEC-HMS's director runoff module was improved according to the small and medium-sized watersheds of Xianbeigou, Chengcun and Pinghe. The improvement measures include replacing the previous 5 days' rainfall with the antecedent impaction precipitation P_a to evaluate the previous soil wetness, adopting the linear interpolation to increase the classification of CN (C_x) and selecting the appropriate initial loss rate λ according to the different meteorological and hydrometeorological region. The limitation of the inverse algorithm in the calibration of SCS model parameters is discussed. By calibrating the optimal C_x under the pre-affected rainfall in different watersheds and regressing the C_x-P_a relationship, we explored the law of the change of actual wetness with the pre-affected rainfall. The results show that when the optimal initial loss rate is 0.05 in the humid region and 0.20 in the sub-humid region, a better simulation accuracy can be achieved. The improved method can effectively improve the application effect of HEC-HMS, and provide a reference for the rainfall and runoff simulation in the region with insufficient data.

Key words: SCS-CN method; HEC-HMS model; curve number of runoffs; initial loss rate; back calculation; hydrometeorological regions

美国陆军工程兵团 (USCE) 开发的 HEC-HMS 半分布式水文模型通过划分自然子流域,综合考虑了下垫面的空间差异^[1-2],已广泛应用于世界各地。由于影响模拟径流量的主要因素为产流,本文对 HEC-HMS 产流模块中普遍使用的 SCS-CN 方法进行改进,坡面汇流、基流、河道汇流等模块分别选用 SCS 单位线法、指数衰退法和马斯京根法进行演算^[3-5]。

SCS-CN 方法是针对 SCS 模型^[6]的参数率定方法。SCS 模型是原美国农业部水土保持局 (USDA-SCS) 开发的一个产流模型,常嵌套于其他水文模型 (如 HEC-HMS、SWAT、CREAMS 等) 作为模拟地表径流的基本模块^[7]。为简化模型参数的选取步骤,引入径流曲线数 (curve number, CN) 概化流域产流能力,即 SCS-CN 法。传统的 SCS-CN 法在预测降雨-径流时,由于下垫面条件的差异性,精度有待提高,需修订公式或对参数

基金项目: 国家自然科学基金 (52079035, 51909059); 江苏省自然科学基金 (BK20190492)
作者简介: 杨子菁 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域水文模拟与洪水预报研究。E-mail: yangzijing1016@163.com
通信作者: 李致家 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水文模拟与洪水预报研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com
引用本文: 杨子菁, 刘攀, 王起峰, 等. HEC-HMS 模型在不同水文气象分区中的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 26-34.
YANG Zijing, LIU Pan, WANG Qifeng, et al. Application of HEC-HMS model in different hydrometeorological regions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 26-34.

进行适应性取值。

当前对 SCS 模型的改进主要包括优化前期土壤湿度程度(antecedent moisture condition, AMC) 指标、修正 CN(或当时可能最大滞留量 S)、修正初损率 λ 等多个方向。在优化 AMC 指标方面,刘兰岚^[8]认为 AMC 分级是导致模型不稳定性的最终原因;高蕴钰等^[9]最早提出了用前期影响雨量 P_a 代替前 5 d 降水量,并增加分级以减小 CN 值的离散度;俞彦等^[10-11]利用 P_a 反推动态临界雨量;卜慧等^[12-13]将 P_a 与湿润程度简单地概化为线性正比关系,其准确性有待探讨。在修正 λ 方面,国内已有诸多研究,如张钰娴等^[14]对 λ 与坡度的关系进行了定量分析;周淑梅等^[15]采用反算法和事件分析法确定 λ 。有关 λ 的修正始终是 SCS 模型改进的重要方向,但其研究方法的合理性还需进一步论证。

基于已有研究,本文对 SCS-CN 法进行改进,讨论通过反算法率定参数的局限性;改进后率定 P_a 下的最适宜 CN 值(C_x),用二次曲线回归 C_x - P_a ,探究实际湿润程度随 P_a 的变化规律;对比湿润区流域在不同 λ 取值条件下的模拟效果,获取最适宜的 λ 。

1 SCS 模型简介

1.1 模型原理

SCS 模型的建立基于水量平衡方程以及两个基本假设,即比例相等假设、初损量-当时可能最大滞留量关系假设。按水量平衡原理有:

$$P = I_a + F + Q \tag{1}$$

式中: P 为降水量,mm; I_a 为初损量,mm; F 为后损量,mm; Q 为直接径流量,mm。

比例相等假设为

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \tag{2}$$

即

$$\frac{P - I_a}{S} = \frac{Q}{F} \tag{3}$$

对于一场洪水而言,次洪降水量与前期土壤湿度是既定值,即 P 与 S 固定,则适宜的 λ 直接决定了 Q 与 F 的比例关系。因此,比例相等假设表示产流能力的大小,式(3)更为合理。

假设 I_a 与 S 具有以下经验关系:

$$I_a = \lambda S \tag{4}$$

可导出产流计算公式:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & P \geq \lambda S \\ Q = 0 & P < \lambda S \end{cases} \tag{5}$$

由于 S 的变化范围较大,引入一个无因次变量 C ,两者经验关系为

$$S = 254 \left(\frac{100}{C} - 1 \right) \tag{6}$$

CN 的实际取值范围为 $[30, 100]$,取值由雨强、持续时间、总降水量、前期土壤湿度、土地利用等因素决定。

1.2 基于反算法的参数率定方法及其局限

近年来,国内对于 SCS 模型参数的率定常采用反算法。反算法假定其余变量取值为常数,基于实测数据反推所求变量。以求解 S 为例,反算法在 λ 取标准值 0.20 的情况下,代入实测降雨-径流数据,反推得逐场次洪水对应的 S :

$$S = 5 [P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{1/2}] \tag{7}$$

该方法虽能直接算出逐场次参数,但在理论设计与计算取值中存有缺陷。一方面,反算法未考虑产流机制对初损的影响。SCS 模型更接近蓄满产流机制^[16],对于超渗产流地区,流域在降水量达到计算初损量之前,由于降雨-径流过程的快速响应,仍有可能产流,反算过程中代入的比例相等假设也因此不成立。另一方面,算法中 λ 的取值仍有待研究。以 S 值取 254(CN 值取 50,SCS-CN 关系中的一般湿润)为例,将 λ 标准值

代入公式,计算得降水量需达到 50.8 mm 才会产流,这明显与实际情况不符。因此,使用 λ 取 0.20 反算得到 S 会出现极大误差。

综合以上因素,只有雨强小于土壤下渗率(即产流方式为蓄满产流)且降水量大于初损,才能直接使用反算法计算参数。鉴于反算法确定 SCS 模型参数的局限性,采用 SCS-CN 法确定产流模块参数值。

1.3 SCS-CN 法的改进

SCS 模型是基于美国小流域雨洪资料设计的经验性模型,其参数的选取需与当地下垫面条件相匹配。根据我国的特点,对参数确定方法从 3 个方面进行改进。

a. 用 P_a 替换前 5 d 降水量,以评估前期土壤湿润程度。降雨开始时流域土壤湿润程度是判定径流形成条件的一个重要指标,SCS 原模型中使用的前 5 d 降水量较模糊且不准确,划分标准不具备普适性推广条件^[17]。一方面,某一定值的前 5 d 降水量作用于不同水文气象区应代表不同的湿润程度;另一方面,如在湿润地区,影响土壤湿度的降雨可前推 20 d 甚至 30 d,同一降水量发生在前 5 d 和前 1 d,对土壤湿度的影响有较大差别。综上,计算公式为

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t)$$

(8)

式中: $P_{a,t}$ 为第 t 日的前期影响雨量,mm; $P_{a,t+1}$ 为第 $t+1$ 日的前期影响雨量,mm; P_t 为第 t 日的降水量,mm; K 为土壤含水量日消退系数。

b. 增加 P_a 对应 CN 值的分级,采用线性内插法对 CN 进行插值。SCS 原模型将前期土壤湿润程度分为干旱、一般和湿润 3 个等级,分别对应 CN_1 、 CN_2 、 CN_3 。改进的方法中,假定 CN 为 P_a 的函数。通过线性内插,可推求任一 P_a 对应的 CN 值。

c. 根据不同流域的水文气象特征,选用适宜的 λ 。 λ 取值与水文气象特征密切相关,对 CN 精度有显著的影响^[18]。相比于美国实验区,我国中小流域多位于山地、丘陵地带,流域平均坡度大;季风气候区季节性降水集中,洪水前期土壤更加湿润;不同水文气象区产流模式区分较明显^[19]。鉴于 λ 对于 Q 与 F 比例关系的重要性, λ 取值遵循半湿润区较大、湿润区较小的原则。

2 模型构建

2.1 研究区概况

2.1.1 自然地理概况

针对不同水文气象分区的差异,选取半湿润区的河北省县北沟流域、湿润区的安徽省呈村流域和福建省平和流域,基于改进的 SCS-CN 法构建 HEC-HMS 模型。

县北沟流域位于河北省西部山区,大清河水系支流沙河上游段,洪水暴涨暴落;呈村流域位于安徽省南部山区,钱塘江水系干流新安江上游段,下垫面植被完好,调蓄能力强;平和流域位于福建省西南部山区,九龙江水系支流花山溪上游段。3 个流域中,县北沟、呈村、平和流域面积由小到大;年降水量呈村流域最大,为 2329.4 mm,县北沟流域最小,仅为 614.1 mm,各流域基础信息见表 1。采用精度为 30 m 的 DEM 高程数据提取地形地貌特征,各流域水系及站点分布见图 1。

表 1 各流域基础信息
Table 1 Basic information of watersheds

流域	流域面积/km ²	平均海拔/m	流域平均坡度/%	年平均气温/℃	年平均降水量/mm	水文气象分区
县北沟	37	426.3	11.49	12.7	614.1	半湿润区
呈村	290	581.6	22.39	17.0	2329.4	湿润区
平和	631	393	15.04	20.5	1926.6	湿润区

注:年平均降水量数据统计自《中华人民共和国水文年鉴》,起止年限为各流域场次降水所对应的年限。

2.1.2 下垫面特征

下垫面特征中,土地利用、土壤类型数据用于查表并赋予 CN 值,表征不同下垫面的产流能力。SCS 模型土地利用分类是从美国《国家工程手册》中选取,本文采用 UMD 数据集。由于两个数据集之间无明确的对应关系,现根据描述将两个数据集进行比对,见表 2。SCS 模型土壤类型分类参考了美国农业部土壤质地分类,根据土壤的最小饱和水力传导率将土壤划分为 4 组。本文采用国际研究中常用的世界土壤数据库(HWSD)划分标准,见表 3。

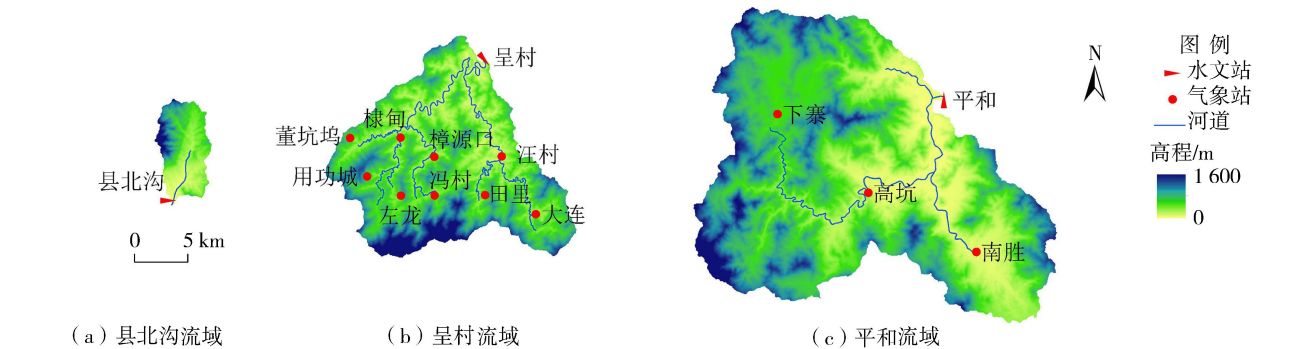


图 1 流域水系及站点分布

Fig.1 River system and station distribution of watersheds

表 2 UMD 土地覆盖数据集与 CN 取值

类别		不同水土土壤分组的 CN 值				CN 取值条件
		A	B	C	D	
耕地	种植并管理的植被	51 ~ 72	67 ~ 81	76 ~ 88	80 ~ 91	无水保措施取值偏大;有水保措施取值偏小
林地	常绿/落叶针叶树	30 ~ 57	55 ~ 73	70 ~ 82	77 ~ 86	混合树林(果园)取值偏大;树林取值偏小
	常绿阔叶树					
	落叶阔叶树					
	混合/其他树木					
草地	草本植物	30	58	71	78	无
灌木	灌木	30 ~ 48	48 ~ 67	65 ~ 77	73 ~ 83	无
水域、沼泽、冰雪	开放水域	90	92	94	95	参考高不透水率
	经常被淹的植被雪/冰					
未利用土地	荒芜	59	74	82	86	参考农场
建筑用地	城市	57	72	81	86	参考不透水面积比 30% 的城区

2.2 模型构建

由于土地利用类型下 CN 值存在取值范围,分别将表 2 中不同类别 CN 值上下限代入,得到各流域 CN₂可能的取值范围(图 2)。遵循 CN 值越大流域越湿润、易产流的原则,合理选定各流域 CN 取值标准,见表 4。

各流域土地利用类型、水文土壤分组、流域平均 CN₂值见图 3 ~ 5。

CN₂值经过换算可得 CN₁值、CN₃值,SWAT 模型中采用的函数如下^[20]:

$$C_1 = C_2 - \frac{20(100 - C_2)}{100 - C_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - C_2)]}$$

9

$$C_3 = C_2 \exp[0.00673(100 - C_2)]$$

10

式中 C₁、C₂、C₃分别为 CN₁、CN₂、CN₃的取值。

选取各流域久旱不雨、突发暴雨的实测资料,分析流域最大蓄水容量 W_m,并假定为 P_a 的上限。P_a 相关参数参考各省暴雨图集,见表 5。

SCS 模型中 λ 的标准值 0.20 是根据美国小流域试验得出,对应坡度约为 5%。国内学者对 λ 进行研究得到的数值多数分布于 0.05 ~ 0.10 区间^[21]。对比各流域的水文气象特征,鉴于县北沟流域坡度较小、初损量占降水量的比例较大,故 λ 取 0.20;呈村、平和流域位于湿润区,洪水前期土壤缺水水量通常较小,故 λ 取 0.05、0.10。

表 3 USDA 土壤类型

Table 3 Soil Classification by USDA					
流域	土壤质地分类 (美国农业部)	中文名称	土壤质地	占全流域 比例/%	水文土壤 分组
县北沟	sl	砂壤土	粗糙	59	A
	l	壤土	中等	41	B
呈村	l	壤土	中等	90	B
	ls	壤砂土	粗糙	10	A
平和	sl	砂壤土	粗糙	57	A
	ls	壤砂土	粗糙	26	A
	c	黏土	细密	12	C
	l	壤土	中等	5	B

表 4 土地利用类型、土壤类型 CN 取值标准

Table 4 CN value standards of land utilization type and soil type

流域	水文 土壤 分组	CN 值						
		耕地	林地	草地	灌木	水域、沼泽、冰雪	未利用 土地	建筑 用地
县北沟	A	51	30	30	30	90	59	57
	B	67	55	58	48	92	74	72
	C	76	70	71	65	94	82	81
	D	90	77	78	73	98	86	86
呈村	A	72	45	30	48	90	59	57
	B	81	66	58	67	92	74	72
	C	88	77	71	77	94	82	81
	D	91	83	78	83	98	86	86
平和	A	72	43	30	48	90	59	57
	B	81	65	58	67	92	74	72
	C	88	76	71	77	94	82	81
	D	91	82	78	83	98	86	86

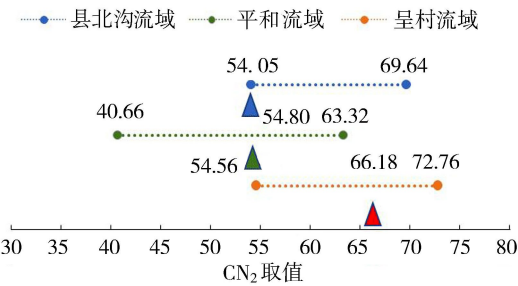


图 2 平均 CN_2 取值与可能取值范围
Fig. 2 Average value of CN_2 and range of possible values

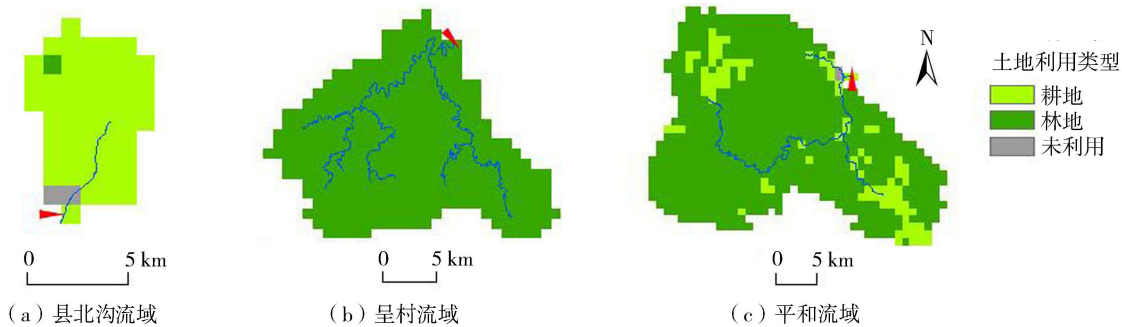


图 3 土地利用类型对比
Fig. 3 Comparison of land utilization type

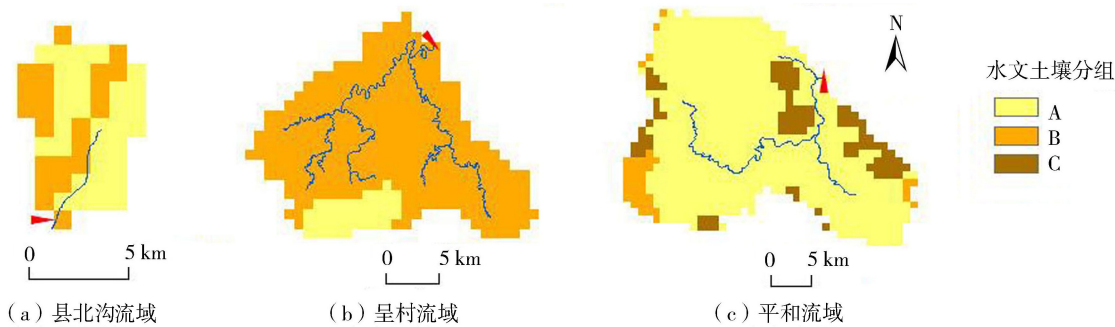


图 4 水文土壤分组对比
Fig. 4 Comparison of hydrological soil groups

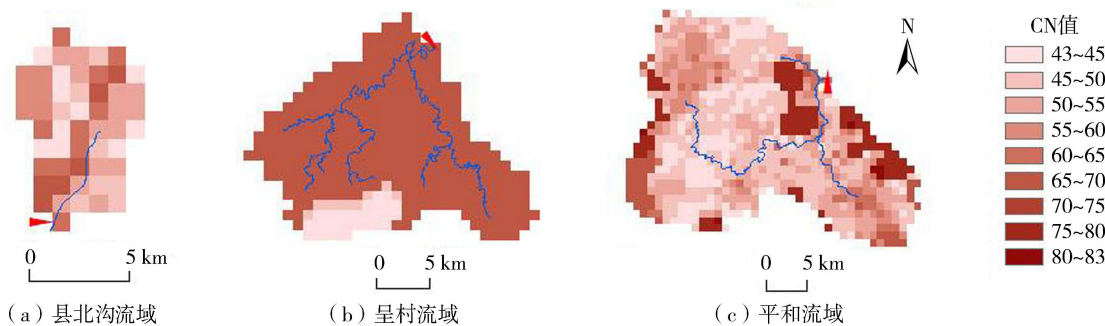


图 5 各流域 CN_2 分布对比
Fig. 5 Comparison of CN_2 in different basins

对各流域固定初损率,以 Nash 效率系数为目标函数,率定不同前期影响雨量下的 C_x ,用二次曲线回归 C_x - P_a 关系,探究不同初损率下 C_x 的曲线特征,根据拟定关系探究不同水文气象分区初损率的适用性。

3 模型验证

使用改进的 SCS-CN 法对各流域实测洪水资料进行模拟验证、对比分析,资料选取信息见表 6。

3.1 流域最适宜初损率

由于县北沟流域场次洪水径流深多不足 3 mm,径流系数小,径流量反映的参数取值差距具有较大的不确定性,因此仅对呈村、平和流域进行不同初损率取值效果对比研究。

图 6 为呈村、平和流域在 λ 取 0.05、0.10 下的 C_x - P_a 回归曲线。从图 6 可以看出:①曲线整体呈抛物线变化趋势,流域越湿润, C_x 的变化越缓慢;② λ 分别取 0.05、0.10,在最湿润状态下,呈村流域 C_x 趋近于 2.56、2.82,平和流域趋近于 2.29、2.54,即在流域蓄满时次洪对应的 C_x 均未达到 CN_3 ;③ λ 取 0.05 时曲线曲率更大。从 C_x - P_a 对应关系分析, λ 取 0.05 在干旱状态($P_a = 0$ mm)下, C_x 中所对应的 x 接近 1.0,更符合通过 AMC 划分 C_x 的定义。

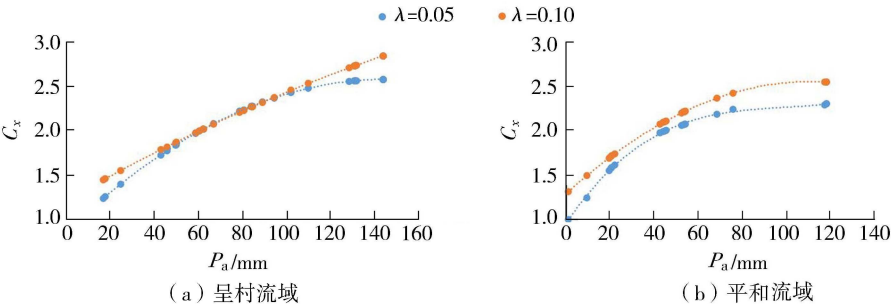


图 6 呈村、平和流域 C_x - P_a 回归曲线
Fig. 6 Optimal regression curve of C_x - P_a in Chencun and Pinghe Basin

表 7 为湿润区流域不同初损率下模拟效果对比。从模拟结果分析,两种初损率取值下,呈村流域的模拟结果差距并不明显,Nash 效率系数均值均高于 0.90, λ 取 0.05 略优于 0.10,模拟效果优良;平和流域的模拟结果有所差异,在 λ 取 0.05 时,洪峰、径流深平均相对误差更小,Nash 效率系数均值从 0.82 提高到 0.85,模拟结果较好。综合评价,更适用于湿润地区的 λ 取值为 0.05。

表 7 湿润区流域不同初损率下模拟效果对比

Table 7 Comparison of simulation results under different initial loss rates in humid area						
λ	呈村流域			平和流域		
	洪峰相对 误差均值/%	径流深相对 误差均值/%	Nash 效率系数 均值	洪峰相对 误差均值/%	径流深相对 误差均值/%	Nash 效率系数 均值
0.05	9.25	4.61	0.94	14.23	10.35	0.85
0.10	9.17	5.00	0.93	17.57	11.26	0.82

3.2 不同水文气象分区流域模拟结果分析

SCS 模型是以水量平衡原理为基础的径流量计算模型,评价指标中的径流深误差最能客观反映 λ 取值的合理性。图 7 为 3 个流域典型次洪模拟过程。由图 7 可见,各流域的雨洪特征为:①县北沟流域洪峰基本为单峰,退水过程明显,无基流。②呈村流域洪峰形态不一,且常伴多峰现象,基流量较大时洪水形态普遍臃肿。③平和流域洪峰形态尖瘦型居多,退水过程明显且规律。图 7 反映了各流域在降水量较大时的雨洪特征,对流域次洪调参、模拟效果评价具有重要意义。

表 5 P_a 相关参数
Table 5 Parameters P_a of antecedent
impaction precipitation

流域	K	W_m /mm
县北沟	0.85	80
呈村	0.90	160
平和	0.85	140

表 6 各流域次洪资料统计
Table 6 Statistics of secondary flood data in each river basin

流域	资料时段	场次数	率定期 场次	验证期 场次	时间分辨率/ min
县北沟	1986—1999 年	13	10	3	20
呈村	1983—2004 年	31	24	7	60
平和	2004—2010 年	19	15	4	60

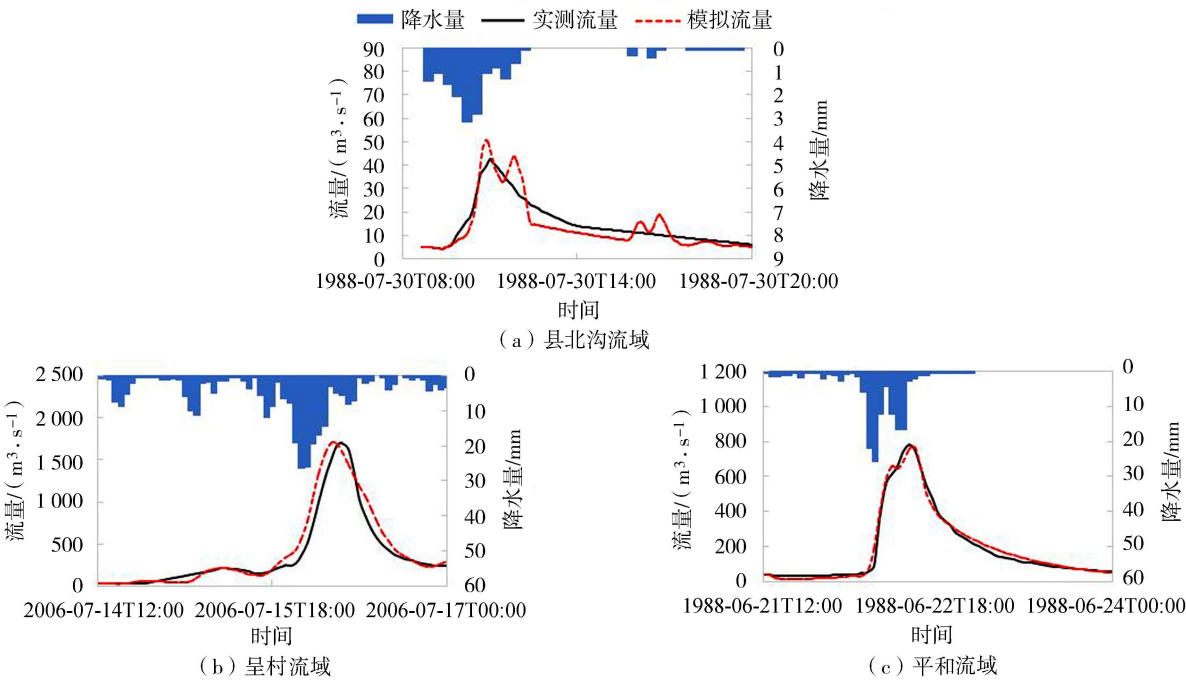


图 7 各流域典型场次洪水模拟过程

Fig. 7 Simulation process diagram of typical flood events in each watershed

表 8~10 为 3 个流域在最适宜 λ 下的模拟结果。根据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》评价模拟效果,以实测洪峰流量的 $\pm 20\%$ 、实测径流深的 $\pm 20\%$ (3 mm 以下以 3 mm 为许可误差)、Nash 效率系数大于 0.7 为合格标准,县北沟、呈村、平和流域所选场次中,合格率分别达到 76.9%、90.3%、68.4%。对比评价指标,洪峰相对误差均值分别为 0.73%、2.80%、1.95%,径流深相对误差均值分别为 1.91%、0.28%、4.88%,Nash 效率系数均值分别为 0.84、0.94、0.85。

分析模拟结果偏差的原因主要为:①县北沟流域入渗量占总降水量比例较高,产流量较小,径流响应迅速。由于雨型单一,Nash 效率系数主要反映径流量的模拟效果,从结果来看模拟效果良好。

②呈村流域雨型多变,但整体模拟情况优良。③平和流域场次洪水间雨量差异较大,径流深相对误差较大,雨量与径流深两者间有正相关趋势,反映在产流能力上可解释为降水量较小时应对应更小的初损量,即降水量与初损率或存在相关性。此外,平和流域下垫面相比呈村流域更加多样,产流能力不均一,合格率结果从侧面印证了多样化下垫面对产流影响的复杂性和不同土地利用类型下 CN 取值的不确定性。综合评价,初损率在半湿润地区取值 0.20、湿润地区取值 0.05 可得到良好的模拟结果。

4 结 语

本文基于前期影响雨量、CN 分级、初损系数配置,对 HEC-HMS 半分布式水文模型产流模块的 SCS-CN 法进行了改进。相比于 SCS 传统产流计算方法,改进的 HEC-HMS 模型首先用前期影响雨量代替了前 5 d 累计降水量,以流域蓄水容量为度量重新界定了判定前期土壤湿润程度的条件。同时,级差的减小避免了不同土壤湿度下 CN 值存在明显跳跃性的缺陷。最后,考虑到不同水文气象分区产流模式的差异,通过 λ 不同的取值对蓄满、超渗产流机制进行了合理区分。

表 8 县北沟流域模拟结果

Table 8 The simulation results of Xianbeigou Basin

时期	洪号	降水量/ mm	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	Nash 效率 系数
率 定 期	198507082300	21.4	-4.17	4.00	0.90
	198508171900	19.72	-8.77	0.00	0.96
	198607181900	15.4	-17.71	-15.48	0.91
	198608040920	24.6	-10.42	18.37	0.79
	198807300840	69.8	18.41	-8.48	0.85
	198808021640	44.04	-15.46	-5.54	0.89
率 定 期	198907220000	47.88	6.71	2.64	0.80
	199008011720	28.24	30.61	6.07	0.86
	199008260300	42.2	-21.74	-11.04	0.69
检 验 期	200008121040	32.36	4.76	-7.01	0.76
	200207181800	36.48	15.00	30.00	0.89
	200407221620	35.12	-17.19	-0.81	0.96
	200708020700	17.88	29.41	12.07	0.67

表 9 呈村流域模拟结果

Table 9 The simulation results of Chencun Basin

时期	洪号	降水量/ mm	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	Nash 效率 系数	时期	洪号	降水量/ mm	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	Nash 效率 系数
率 定 期	1986061101	153.3	7.39	9.54	0.93	率 定 期	1996062906	271.5	11.45	-6.17	0.94
	1987062220	85.5	2.20	-3.46	0.98		1997070621	148.8	14.28	-4.62	0.95
	1987082013	114.7	16.90	14.31	0.87		1997070917	106.9	14.96	2.37	0.87
	1988062102	147.7	-1.46	-0.59	0.99		1997080307	112.9	-24.97	-5.92	0.92
	1989041102	123.6	3.48	0.96	0.94		1998061200	89.1	11.39	8.14	0.96
	1989061600	191.6	25.68	14.86	0.82		1998061723	113.6	-7.41	-5.16	0.96
	1990061405	110.5	2.99	-0.80	0.97		1998062312	323.3	-1.13	2.26	0.95
	1990070106	126.4	-3.21	-7.07	0.95		1998072105	120.1	10.31	3.42	0.98
	1991051821	160.5	-10.18	7.82	0.91	检 验 期	1998072202	126	-7.44	-4.96	0.97
	1992051617	79.8	4.68	-1.65	0.97		1998072502	128	-1.67	0.88	0.99
	1992070305	130.9	0.33	-3.28	0.97		1999041502	133	-13.93	-2.89	0.84
	1993062920	212	26.66	3.62	0.93		1999042415	95.1	8.70	-3.26	0.97
	1993070214	247.9	20.07	2.54	0.90		1999062803	166.2	-2.77	-2.79	0.97
	1994060914	186.8	-3.23	-0.22	0.97		1999062917	121	-12.16	-6.22	0.88
	1995051915	122.6	-7.97	-2.71	0.92		1999082916	183	5.31	5.07	0.95
	1995053102	98.7	-2.33	-5.50	0.91						

表 10 平和流域模拟结果

Table 10 The simulation results of Pinghe Basin

时期	洪号	降水量/ mm	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	Nash 效率 系数	时期	洪号	降水量/ mm	洪峰相对 误差/%	径流深相对 误差/%	Nash 效率 系数
率 定 期	2004072704	141.8	-24.50	-1.37	0.78	率 定 期	2008061301	185	33.08	20.63	0.73
	2005082503	70.6	-6.69	-1.26	0.84		2008070702	103	-3.80	-5.28	0.82
	2005090104	101.5	-13.81	-3.82	0.80		2008070804	93.4	3.09	-6.40	0.89
	2006051607	338.5	8.30	2.09	0.98		2008080513	117	13.58	3.74	0.92
	2006052105	77.5	-11.72	0.15	0.94		2008100605	162.6	25.53	39.21	0.75
检 验 期	2006071404	397.9	0.02	5.45	0.90	检 验 期	2009041823	81	25.43	11.39	0.91
	2006072509	324.3	7.90	17.95	0.82		2009062620	70.1	-15.88	-15.37	0.86
	2007060900	104.5	-2.48	6.23	0.94		2010062500	126.1	-17.95	4.01	0.89
	2007081412	113.5	23.37	2.97	0.75		2010092002	319	13.35	30.89	0.85
	2007092314	122.3	-19.84	-18.50	0.84						

结果表明,改进的 SCS-CN 法在 HEC-HMS 模型能够取得较好的模拟效果。比较湿润区流域初损率取 0.05、0.10 下的模拟效果,得到最佳初损率为 0.05,半湿润区初损率取 0.20 能达到满意精度。改进的方法在县北沟、呈村、平和流域的降雨-径流模拟中具有较好的适用性,可为其他无资料地区提供参考。

SCS 模型中的 λ 根据水文气象特性取值,应用效果良好,但在理论和流域数量上仍不足以说明 λ 的变化特征,取值的合理性还需大量的研究数据支撑。此外,由于 C_x 在流域不同土壤湿度下的变化范围小于 CN_1 、 CN_3 ,如采用原模型中 S-C 的对应关系,需进一步探讨 AMC I、AMC III 所对应的 CN_1 、 CN_3 换算公式,以提高 SCS 模型在不同地区的适用性。

参考文献:

[1] 李致家,李兰茹,黄鹏年,等. 流域分块对汇流参数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):283-288. (LI Zhijia,LI Lanru,HUANG Pengnian,et al. Effect of watershed subdivision on confluence parameter[J]. Journal of Hohai University(Natural Science),2014,42(4):283-288. (in Chinese))

[2] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):471-480. (LI Zhijia,YAO Cheng,ZHANG Ke,et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(6):471-480. (in Chinese))

[3] 李致家,何蒙,闫凤翔,等. 河道洪水演算方法在淮河及滹沱河中游的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):95-101. (LI Zhijia,HE Meng,YAN Fengxiang,et al. Applications of channel flood routing methods in middle part of Huaihe River and Hutuo River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):95-101. (in Chinese))

- [4] 李致家,黄鹏年,张建中,等. 新安江-海河模型的构建与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):189-195. (LI Zhijia,HUANG Pengnian,ZHANG Jianzhong,et al. Construction and application of Xin'anjiang-Haihe model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(3):189-195. (in Chinese))
- [5] 李致家,臧帅宏,刘志雨,等. 新安江模型中河道汇流方法的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):189-194. (LI Zhijia,ZANG Shuaihong,LIU Zhiyu,et al. Improvement of channel routing method for Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(3):189-194. (in Chinese))
- [6] Service Natural-Resources-Conservation. National Engineering Manual Section 4 Hydrology[M]. Washington DC: USDA, 1986.
- [7] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):11-19. (ZHANG Ting,XU Binxin,KANG Aiqing,et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):11-19. (in Chinese))
- [8] 刘兰岚. 降雨产流计算中径流曲线法(SCS模型)局限性的探讨[J]. 环境科学与管理,2013,38(5):64-68. (LIU Lanlan. Discussion on limitations of SCS model in runoff calculation[J]. Environmental Science and Management,2013,38(5):64-68. (in Chinese))
- [9] 高蕴珏,许有鹏. SCS 遥感水文模型在曹娥江流域应用研究[J]. 南京大学学报(自然科学),1992,28(1):150-159. (GAO Yunyu,XU Youpeng. An application research of SCS model based on remote sensing information in Caoe River Basin[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences),1992,28(1):150-159. (in Chinese))
- [10] 俞彦,张行南,张鹏,等. 基于 SCS 模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. 水资源保护,2020,36(3):28-33. (YU Yan,ZHANG Xingnan,ZHANG Peng,et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xin'anjiang model[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):28-33. (in Chinese))
- [11] 龚云柱,周兰庭,柳志坤. 基于降雨资料的雨量预警指标阈值求解模型[J]. 水资源保护,2021,37(6):13-19. (GONG Yunzhu,ZHOU Lanting,LIU Zhikun. Model for solving rainfall early-warning index threshold based on rainfall data[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):13-19. (in Chinese))
- [12] 卜慧,邵骏,欧阳硕,等. 改进 SCS 模型在老挝南乌河流域中的应用[J]. 人民长江,2018,49(22):88-92. (BU Hui,SHAO Jun,OUYANG Shuo,et al. Application of modified SCS model in runoff calculation in Nam Ou Basin,Laos[J]. Yangtze River,2018,49(22):88-92. (in Chinese))
- [13] 郭晓军,王道杰,庄建琦. SCS 模型在干热河谷区坡面产流模拟中的应用[J]. 中国水土保持科学,2010,8(5):14-18. (GUO Xiaojun,WANG Daojie,ZHUANG Jianqi. Application of SCS model on simulation of the slope-runoff process in dry-hot valley[J]. Science of Soil and Water Conservation,2010,8(5):14-18. (in Chinese))
- [14] 张钰娴,穆兴民,王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区率定[J]. 干旱地区农业研究,2008,110(5):124-128. (ZHANG Yuxian,MU Xingmin,WANG Fei. Calibration and validation to parameter λ of soil conservation service curve number method in hilly region of the loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2008,110(5):124-128. (in Chinese))
- [15] 周淑梅,雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-CN 方法初损率取值研究[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4240-4247. (ZHOU Shumei,LEI Tingwu. Calibration of SCS-CN initial abstraction ratio of a typical small watershed in the loess hilly-gully region[J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(20):4240-4247. (in Chinese))
- [16] 董小涛,李致家,李利琴. 不同水文模型在半干旱地区的应用比较研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(2):132-135. (DONG Xiaotao,LI Zhijia,LI Liqin. Application and comparison of three hydrological models in semi-arid region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2006,34(2):132-135. (in Chinese))
- [17] HUANG Mingbin,GALLICHAND J,WANG Zhanli,et al. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Processes,2006,20(3):579-589.
- [18] FU S,ZHANG G,WANG N,et al. Initial abstraction ratio in the SCS-CN method in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the Asabe,2011,54(1):163-169.
- [19] 路洁,王学风,曹永强. 气候和人类活动对辽宁省植被变化的影响[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):7-14. (LU Jie,WANG Xuefeng,CAO Yongqiang. Analysis of the impact of climate and human activities on the vegetation change in Liaoning Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):7-14. (in Chinese))
- [20] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. College Station:Texas Water Resources Institute, 2011.
- [21] 何杨洋,王晓燕,段淑怀. 密云水库上游流域径流曲线模型的参数修订[J]. 水土保持学报,2016,30(6):134-138. (HE Yangyang,WANG Xiaoyan,DUAN Shuhuai,et al. Revision of CN value and initial abstraction ratio in the SCS-CN model in upper reaches of Minyun Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(6):134-138. (in Chinese))