

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230215

改进的径流曲线数模型在洪水预报中的应用

孙 彤^{1,2}, 王 洁^{1,2}, 梁峰铭^{1,2}, 黄鹏年^{1,2}, 林诚杰^{1,2}, 季静静^{1,2}, 谈松林^{1,2}

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044;
2. 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 精确、适用性强的水文模型是洪水预报的重要手段,是防灾减灾的有力支撑。考虑前期土壤湿度和雨强因子改进 SCS-CN 产流模型,并增加汇流模块开发出新型 SCS-CN 水文模型,从不同气候区、不同量级洪水等角度出发,在韩村、马村两个半干旱流域,胜利河、恭城两个湿润流域,对 SCS-CN 水文模型的流量模拟进行研究。结果表明,相对于新安江模型,SCS-CN 水文模型在不同气候区均具有较好的适用性,在半干旱流域模拟效果更佳;模型对各种量级洪水模拟精度整体较优,尤其对中低量级洪水的模拟效果最佳。

关键词: 洪水预报;模型改进;SCS-CN 水文模型;模型对比

中图分类号: TV214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0068-05

1 概况

韩村、马村流域位于河北省西南部,属于海河流域南部子牙河流域。韩村流域地势平坦,马村起伏较大,由西南逐渐向东北递减(图 1(a)、(b))。两流域均为温带半干旱大陆性季风气候,降水集中在汛期,年降水量约 500 mm,年均径流系数约 0.15,常出现洪涝灾害。胜利河流域位于南京市东南部,是秦淮河流域的上游流域,地势起伏不大,由西南向东北递减(图 1(c)),年降雨量 1 100 mm,年均径流系数约 0.28,为亚热带湿润

气候,受长江水位和秦淮河流域降雨的影响,流域内洪涝灾害频发,人类活动影响较大;恭城流域位于广西东北部,是珠江流域上游子流域(图 1(d)),地势陡峭,以山地、丘陵为主,年降雨量约 1 001 mm,年均径流系数约 0.54,属亚热带湿润气候,近年来夏季降水增势明显,强降水、强对流极端天气事件频发,给当地的生态和经济造成严重损失。各流域参数见表 1。水文模型是洪水预报的重要手段,现已涌现出众多洪水预报模型,但多数模型结构复杂、数据需求量大,且适应性受气候及下垫面条件的影响,限制了其应用范围^[1]。因此,优化水文模型、提高水文预报精度对减缓洪水灾害至关重要。径流曲线数模型(SCS-CN)具有输入参数少、预测精度较高等优点,已广泛应用于不同气候区的径流预报^[2-3]。但原始的 SCS-CN 模型仅依据降雨量计算径流量,简单概化前期产流条件,未考虑降雨特征因子,限制了模型预

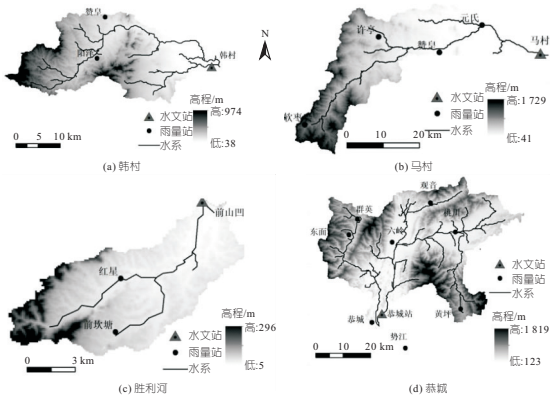


图 1 研究流域位置示意图

Fig. 1 Distribution map of the study basins

表 1 研究流域概况

Tab. 1 Overview of the study basins

研究区	流域面积/km ²	气候类型	土壤类型	主要土地利用	数据范围	场次/次
韩村流域	459.5	温带半干旱气候	棕壤	林地	1955~2000年	16
马村流域	707.8	温带半干旱气候	棕壤	林地	1957~2004年	22
胜利河流域	60.8	亚热带湿润气候	砂质壤土	耕地	2016~2021年	8
恭城流域	2 010.0	亚热带湿润气候	石灰岩	林地	2009~2012年	9

收稿日期: 2023-02-18, 修回日期: 2023-04-04

基金项目: 河北省省级科技计划项目(19275408D); 江苏省水利科技项目(2020040); 国家自然科学基金项目(41877158); 江苏省大学生创新创业训练项目(202210300131Y); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23-1375)

作者简介: 孙彤(2001-),女,硕士研究生,研究方向为水文模型,E-mail:suntong_nuist@163.com

通讯作者: 王洁(1984-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为水文水资源,E-mail:wangjie0775@163.com

报的准确性^[4],为此对 SCS-CN 产流模型进行了改进^[5-6]。但已有研究仅评估了 SCS-CN 产流模型的适应性或改进产流模型以提高地表产流模拟精度,改进产流模块同时增加汇流模块的研究较少。不同气候区及下垫面条件下,产汇流机制各不相同,而水文模型的洪水模拟精度大相径庭^[7]。因此,本文在考虑雨强、土壤湿度等因子改进模型产流模块的基础上,采用三水源汇流和滞后演算方法进行汇流计算,提出了一套全新的 SCS-CN 水文模型改进方案,并将改进后的模型与成熟的新安江模型进行对比,评估其在不同气候区的模拟性能,旨在为洪水预报提供更加准确的技术手段。

2 研究方法

2.1 改进的 SCS-CN 水文模型

2.1.1 改进产流模块

原 SCS-CN 模型未充分考虑前期土壤湿度和降雨强度^[4],而这两个因素对流域产流影响较大,为此对产流模块改进如下:①调整前期土壤湿度条件。原模型依据前 5 d 总降雨量将土壤湿度划分为 3 个等级,但对于不同气候条件的流域,采用前 5 d 降雨量不够准确^[6],因此采用前 14 d 降雨量确定前期土壤湿度条件,并采用 K-均值聚类重新划分扣除蒸散发量后的降雨量。②增加降雨强度因子。原模型仅考虑总降雨量而未考虑强度等因素,基于此,引入最大 60 min 雨强因子、平均降雨强度等降雨特征因子,以提高模型产流量的估算精度,修改后的产流公式为:

$$Q = \begin{cases} \frac{[P(I_{60}/\bar{I})^\beta - I_a]^2}{P(I_{60}/\bar{I})^\beta - I_a + S} & P(I_{60}/\bar{I})^\beta > I_a \\ 0 & P(I_{60}/\bar{I})^\beta \leq I_a \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{60} 为场次降雨过程中最大 60 min 雨强,mm/h; \bar{I} 为场次降雨的平均雨强,mm/h; β 为雨强修正因子; $P(I_{60}/\bar{I})^\beta$ 为表征总降雨量、降雨强度等降雨特征的综合因子。

2.1.2 增加汇流模块

SCS-CN 模型本身未包含汇流模块,本文增加应用范围较广的三水源汇流模块和滞后演算法构建 SCS-CN 水文模型。SCS-CN 水文模型需要率定的产流参数分别为雨强修正因子(β)、曲线数(CN)、初损率(λ),汇流模块所率定的敏感参数包括自由水容量(SM)、地下水出流系数(KG)、地下

水消退系数(CG)、壤中流消退系数(CI)、河网水流消退系数(CS)、河网汇流滞时(L)。

2.2 新安江模型

新安江水文模型精度较高,已应用于众多流域进行洪水预报。其模型结构分为 4 个层次,其中蒸散发量采用三层蒸散发模式计算,流域产流量采用蓄满产流模式计算,水源划分为 3 种,包括地面径流、壤中流和地下径流,最终利用线性水库和马斯京根法进行汇流计算^[7]。

2.3 模拟评价指标

为了评价改进模型水文预报的精度,选取确定性系数(D_{DC})、洪峰流量误差(δ_p)、洪量误差系数(δ_v)和洪峰出现时间误差(T_e)作为模型模拟评判标准,使用合格率(Q_{QR})作为综合评估指标。其中 δ_p 、 δ_v 、 T_e 表示模型总体预报的精度水平,趋于 0 表明模型预报精度最高; D_{DC} 表示各场洪水预报过程与实测过程之间的拟合程度, D_{DC} 接近 1 为模型评估的最佳拟合效果。各指标计算公式分别为:

$$\delta_p = [(Q_{sim,m} - Q_m) / Q_m] \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta_v = [(Q_{sim} - Q) / Q] \times 100\% \quad (3)$$

$$T_e = T(Q_{sim,m}) - T(Q_m) \quad (4)$$

$$Q_{QR} = (n/m) \times 100\% \quad (5)$$

$$D_{DC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

式中, $Q_{sim,m}$ 为模拟的洪峰流量, m^3/s , Q_m 为实测的洪峰流量, m^3/s ; Q_{sim} 为模拟洪量, m^3 ; Q 为实测洪量, m^3 ; n 为合格预报洪水场次; m 为预报总场次; Q_{sim_i} 为模拟序列的时段平均流量, m^3/s , Q_i 为观测序列时段平均流量, m^3/s ; \bar{Q} 为实测流量的均值, m^3/s ; N 为时间步长总数; $T(Q)$ 为洪峰流量出现时间。

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)^[8],洪量相对误差、洪峰相对误差在 20% 以内,峰现时间误差在 3 h 以内为合格,并将水文预报精度等级分为 3 类,见表 2。

表 2 水文精度评价等级

Tab. 2 Hydrological accuracy evaluation grades

指标	精度等级		
	甲	乙	丙
确定性系数	$D_{DC} > 0.90$	$0.90 \geq D_{DC} \geq 0.70$	$0.70 > D_{DC} \geq 0.50$
合格率/%	$Q_{QR} \geq 85.0$	$85.0 > Q_{QR} \geq 70.0$	$70.0 > Q_{QR} \geq 60.0$

3 应用

3.1 数据来源

研究所需的数据资料包括降雨、径流、蒸发数

据,其中径流和蒸发数据来自水文站(图 1),时间间隔为 1 h;降雨数据来自各雨量站(图 1),时间间隔为 1 min,经累加将数据时间尺度处理为 1 h。土壤和土地利用类型等空间数据来自中国地理空间数据云。水文气象资料均通过三性审查,数据可靠。在每个流域筛选出不同量级的场次洪水,共 55 场次洪水过程,部分典型洪水场次信息见表 3。

表 3 部分典型洪水场次信息

Tab.3 Typical flood information

流域	洪水编号	洪水起止时间		洪峰流量	场次洪量	峰现时间
		开始时间	结束时间			
韩村	1982080800	08-08 00:00	08-10 11:00	454	4 158	08-08 07:00
马村	1996080400	08-04 00:00	08-07 20:00	4 520	31 773	08-04 19:00
胜利河	2020061311	06-03 11:00	06-17 13:00	147	1 438	06-15 17:00
恭城	2010061309	05-07 04:00	05-12 04:00	1 580	1 833	05-09 00:00

注:洪峰流量、场次洪量单位分别为 m^3/s 、 $10^4 m^3$ 。

3.2 不同气候区洪水预报结果

在建模过程中,韩村流域选用 11 场洪水用于参数率定,5 场用于模型验证;马村流域 15 场洪水用于率定,7 场用于验证;胜利河流域 5 场洪水用于率定,3 场用于验证;恭城流域 5 场洪水用于率定,4 场用于验证,参数率定过程均采用累计绝对偏差或粒子群优化方法选取最优参数组合。总体来看,在 4 个流域,两模型总体模拟结果均较好,各评价指标结果和分布见表 4、图 2。图 2 中交叉十字图案代表各误差绝对值均值及确定系数均值所在位置。

针对半干旱流域,总体来看,相比新安江模型,改进的 SCS-CN 水文模型各项指标分布更加集中(图 2),整体模拟效果更优(表 4)。具体来看,在马村流域,改进的模型模拟的各项指标均更优,仅对洪峰预报误差的中位数,改进的模型(5%)较新安江模型(-10%)略微偏大(图 2),此处正负表示正负偏离,表明改进的模型模拟误差更小。

针对湿润流域,总体来看,改进的 SCS-CN 水文模型与新安江模型对洪峰、洪量及峰现时间的模拟精度接近,两者的预报偏差均值不超过 18%,整体模拟精度均较高:模拟期平均峰现时间误差均小于 1.8 h(表 4),平均洪峰/洪量误差均在 20%以内(图 2)。具体来看,与新安江模型相比,改进的模型在胜利河流域洪峰模拟误差均值偏大,在恭城流域洪量模拟精度较低、洪水过程拟合较差(图 2),且该模型在胜利河流域模拟效果优于恭城流域(表 4)。

图 2、表 4 表明,改进的模型在半干旱流域和湿润流域均具有较好的适用性,且在半干旱流域表现出比新安江模型更好的模拟效果,这可能是由于改进的模型考虑了前期土壤湿度和雨强,提高了原模型在超渗产流为主的半干旱流域的洪水模拟水平。恭城流域主要为岩溶地貌,改进的 SCS-CN 水文模型对土壤湿度估算不准确,从而导致模拟结果较差,说明在岩溶流域洪水预报时,需综合考虑地形地貌因素。

表 4 模型模拟结果

Tab.4 Model simulation results

气候区	流域名称	水文模型	洪峰合格率/%		洪量合格率/%		峰现时间误差均值/h		确定性系数均值		模型评价等级	
			率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
半干旱区	韩村	改进的 SCS-CN 模型	100.0	80.0	81.8	60.0	0.6	1.0	0.73	0.64	乙	丙
		新安江模型	100.0	80.0	72.7	60.0	3.9	4.4	0.61	0.61	丙	丙
	马村	改进的 SCS-CN 模型	100.0	100.0	93.3	85.7	0.9	1.3	0.71	0.57	乙	丙
		新安江模型	100.0	85.7	86.7	71.4	1.3	1.9	0.64	0.52	丙	丙
湿润区	胜利河	改进的 SCS-CN 模型	100.0	100.0	100.0	100.0	0.4	1.3	0.61	0.55	丙	丙
		新安江模型	100.0	100.0	100.0	66.7	0.4	0.3	0.65	0.53	丙	丙
	恭城	改进的 SCS-CN 模型	80.0	75.0	80.0	50.0	1.3	2.3	0.66	0.47	丙	丙
		新安江模型	80.0	75.0	100.0	50.0	1.8	1.8	0.73	0.75	乙	乙

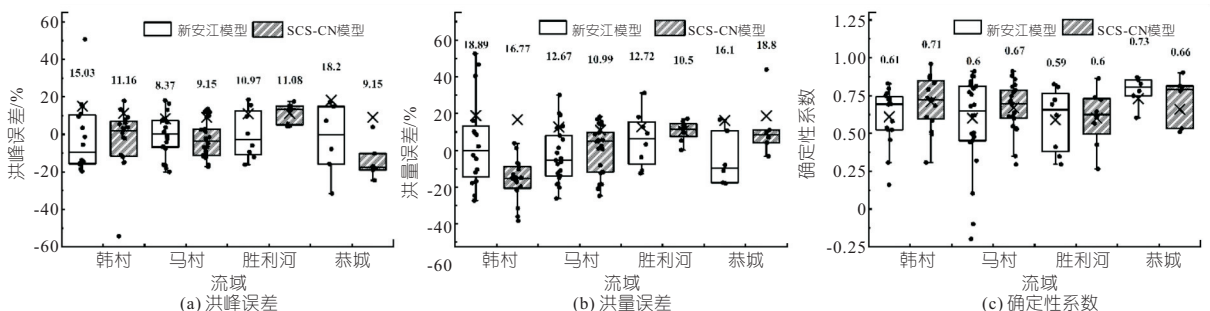


图 2 各评价指标分布情况

Fig.2 Distribution of evaluation indicators

3.3 不同量级洪水预报结果

为评估改进的 SCS-CN 水文模型是否适用于模拟不同量级洪水,依据面积不同的研究区量级洪水划分方法^[9],将实测场次洪水划分为高中低三类,见表 5。

表 5 各流域洪水等级划分标准及对应场次数

Tab. 5 The number of different magnitude floods and the division criteria

流域名称	高洪水(场次数)	中洪水(场次数)	低洪水(场次数)
韩村	>130 m ³ /s(3)	[50,130] m ³ /s(5)	<50 m ³ /s(8)
马村	>140 m ³ /s(4)	[40,140] m ³ /s(7)	<40 m ³ /s(11)
胜利河	>56 m ³ /s(2)	[10,56] m ³ /s(2)	<10 m ³ /s(4)
恭城	>380 m ³ /s(2)	[190,380] m ³ /s(3)	<190 m ³ /s(4)

图 3 为不同量级洪水模拟误差统计结果,表 6 为两种水文模型各量级洪水精度分析。由图 3、表 6 可知,从峰现时间和确定性系数来看,对于 3 种量级的洪水,改进模型的结果均优于新安江模型,峰现时间在 1.1 h 以内,确定性系数在 0.6 以

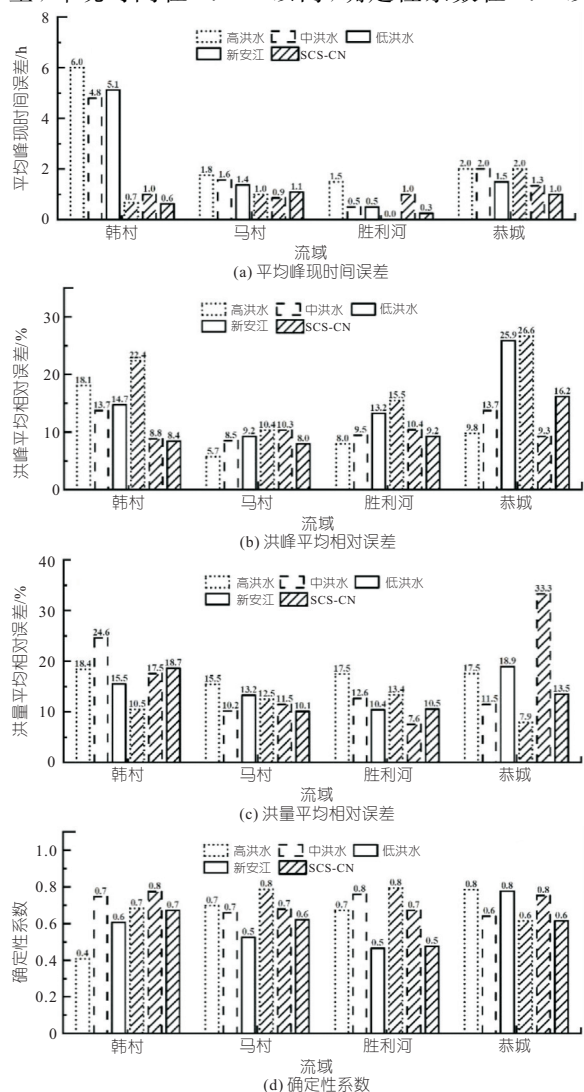


图 3 不同量级洪水模拟误差统计结果

Fig. 3 Statistics results of simulation error of different magnitude floods

表 6 两个水文模型各量级洪水精度分析

Tab. 6 Flood accuracy analysis of two hydrological models for various floods

洪水量级	水文模型	平均峰现时间误差/h	洪峰平均相对误差/%	洪量平均相对误差/%	确定性系数均值
高洪水	改进的模型	0.9	18.7	11.1	0.73
	新安江模型	2.8	10.4	17.2	0.65
中洪水	改进的模型	1.1	9.7	17.5	0.75
	新安江模型	2.2	11.4	14.7	0.70
低洪水	改进的模型	0.8	10.4	13.2	0.60
	新安江模型	2.1	15.8	14.5	0.60

上;从洪峰平均相对误差来看,两模型对不同量级洪水的模拟效果不尽相同,对高洪水,新安江模型的误差较小;对中、低洪水,改进模型的误差相应减小。从洪量平均相对误差来看,对中洪水,改进的模型误差较高,且误差主要集中在马村和恭城流域(图 3);对高、低洪水,改进的模型误差较小。总之,改进的模型在模拟高洪水时洪峰预报误差较大。在模拟中洪水时,整体效果较好,但其在流域面积较大区域(马村、恭城)模拟的洪量偏大;在模拟低洪水时,改进的模型整体模拟精度高,但其在湿润区洪水过程拟合结果一般,确定性系数为 0.6。

3.4 洪水模拟流量过程线对比分析

在模型评估指标结果相近的情况下,流量也会呈现出不一致的变化过程线,因此在 4 个不同流域,从半干旱和湿润区两方面对流量过程线进行对比分析。综合分析发现,改进的模型和新安江模型与实测过程拟合度均较高(图 4(a)~(d))。但在半干旱区,新安江模型的峰现时间差较大,存在整体偏离的情况,两模型在马村流域拟合程度均优于韩村流域;在湿润区,两模型对洪水过程的拟合程度相近。具体来看,在韩村流域,两模型模拟的洪水过程线在高洪水时出现“毛边”(相邻数值相差较大、不光滑)的情况,影响预报结果准确性,其中改进模型的结果略好(图 4(a));在恭城流域,改进的模型对于首场洪水的峰值模拟结果偏小,洪量的模拟结果偏大;新安江模型对峰值模拟结果整体偏大,而最后一场洪水的模拟结果偏小,两者的过程线均较为“光滑”(图 4(d))。

4 结论

在改进 SCS-CN 模型产流模块的基础上增加了汇流模块,使产流模块更加合理通用,新模型在不同气候区、不同量级洪水的模拟结果均较好,适应性更强,尤其提高了超渗产流为主的半干旱流域的模拟效果。但新模型对地形地貌等因素考虑欠佳,导致出现一定的模拟误差,今后将针对性对模型进一步改进优化。

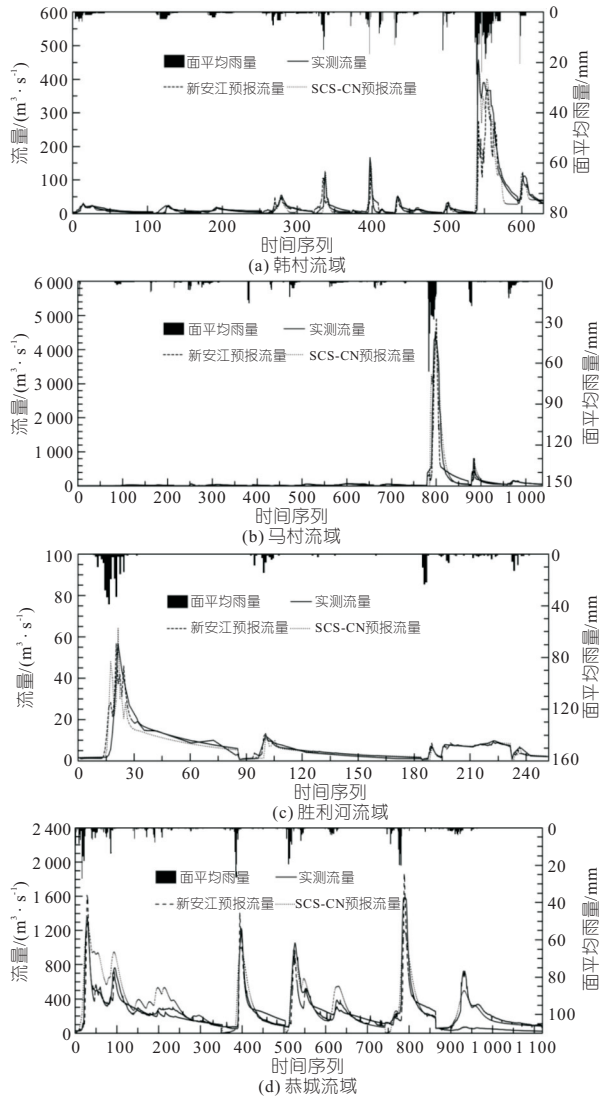


图 4 洪水过程线对比

Fig. 4 Comparison of flood hydrograph

参考文献:

[1] WANG X X, BI H X. The effects of rainfall intensities and duration on SCS-CN model parameters under simulated rainfall[J]. *Water*, 2020, 12(6): 1595.

[2] AMATYA D, WALEGA A, CALLAHAN T, et al. Storm event analysis of four forested catchments on the Atlantic coastal plain using a modified SCS-CN rainfall-runoff model [J]. *Journal of hydrology*, 2022, 608: 127772.

[3] KUMAR A, KANGA S, TALOOR A K, et al. Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques [J]. *Hydro-Research*, 2021, 4: 61-74.

[4] SURESH B P, MISHRA S K. Improved SCS-CN-inspired model[J]. *Journal of hydrologic engineering*, 2012, 17(11): 1164-1172.

[5] 吴艾璞, 王晓燕, 黄洁钰, 等. 基于前期雨量和降雨历时对 SCS-CN 模型的改进[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 85-94.

[6] 梁峰铭, 王洁, 蒿萌, 等. 不同土壤湿度和雨强下径流曲线模型的改进[J]. *水力发电学报*, 2022, 42(1): 52-64.

[7] 刘佩瑶, 郝振纯, 王国庆, 等. 新安江模型和改进 BP 神经网络模型在闽江水文预报中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 40-44.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范: GB/T 22482-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[9] 马亚楠, 李巧玲, 胡友兵, 等. 考虑中小水库/塘坝影响的洪水预报研究[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(4): 78-82.

The Improvement of SCS-CN and Its Application in Flood Prediction

SUN Tong^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, LIANG Feng-ming^{1,2}, HUANG Peng-nian^{1,2},
LIN Cheng-jie^{1,2}, JI Jing-jing^{1,2}, TAN Song-lin^{1,2}

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing 210044, China)

Abstract: An accurate hydrological model with strong adaptability is crucial for predicting floods and preventing disasters. The antecedent soil moisture and rain intensity factors are considered to improve the SCS-CN runoff generation model. Then the new SCS-CN hydrological model is developed by adding the watershed concentration module. From the perspectives of different climate zones and magnitude floods, the new model is applied in four basins to flow simulation, which include semiarid basins of Hancun and Macun, and humid basins of Shenglihe and Gongcheng. The results demonstrate that new SCS-CN hydrological model has good applicability in both semi-arid and humid basins, with better performance in semi-arid basins. Generally, the model shows better accuracy in simulating floods of different magnitudes, especially for small and medium floods.

Key words: flood forecasting; model improvement; SCS-CN hydrological model; model comparison