

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. (in Chinese)

山丘区小流域 SCS 广义单位线产汇流模型

邵嘉佳¹, 李彬权^{1,2}, 孟健³, 任泽凌¹, 黄华平⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210024;
3. 杭州市水文水资源监测中心, 杭州 310016; 4. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广州 510610)

摘要:以山丘区小流域洪水预报为研究对象, 耦合改进后的美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)产流模型与广义单位线汇流模型, 模型参数意义明确、容易确定。选取东江流域西枝江水系上游九洲水文站以上集水区域场次洪水资料, 将 SCS 广义单位线模型与三水源新安江模型进行次洪模拟应用对比。结果表明: SCS 广义单位线模型和新安江模型在研究流域场次洪水模拟中均具有适用性, 洪峰、洪量及过程线均满足许可误差要求, 两个模型的合格率分别为 69% 和 77%, 整体上新安江模型的模拟精度更优。新提出的 SCS 广义单位线模型结构简单, 参数易于确定, 能够提供可接受精度的模型结果, 为山丘区小流域洪水预报提供新的模型选择, 同时也能为广义单位线参数区域化规律研究提供支撑。

关键词:山丘区小流域; 新安江模型; SCS 模型; 广义单位线; 洪水预报

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2024.0063

山丘区小流域由于设站条件差, 实测水文资料相对匮乏, 其水文预报预测属于典型的 PUB (prediction in ungauged basins) 问题, 传统的集总式或分布式水文模型均应用受限^[1]。同时山丘区小流域源短流急, 洪水陡涨陡落, 洪水预警的时间短、难度大, 因此, 开展山丘区小流域洪水预报的研究具有重要意义^[2]。赵人俊等^[3]提出的新安江模型是我国第一个完整的流域水文模型, 在南方湿润与半湿润地区^[4-6]以及北方部分流域^[7-8]均得到广泛应用, 常在模型比较中作为基准模型^[9-10]。SCS 模型具有模型易懂、计算简单等优点, 参数值大小取决于流域下垫面情况, 对水文资料的依赖性低, 在国内外得到广泛研究与应用^[11]。但由于下垫面条件的差异, 该模型在应用于我国流域时通常需要根据实际情况调整相关参数^[12-13]或对模型进行修正^[14-15]。例如, 姚蕾^[16]采用前期影响雨量代替原模型中的前 5 日降雨指标, 更符合我国流域下垫面土湿条件, 在淮黄泥庄流域取得较好的应用效果。HEC-HMS 模型拥有灵活的框架, 结合遥感影像和 GIS 技术, 在

缺资料地区具有应用可行性, 邢子康等^[17]以桃河阳泉小流域为例, 验证了 HEC-HMS 作为缺资料山洪预报模型的适用性。以 HAND 地形因子为基础构建的 HSC 模型, 充分考虑了土壤水蓄水容量的空间分布: Gao 等^[18-19]在美国 323 个流域的洪水模拟研究证明该模型在偏干旱流域表现优异; 张博美等^[20]耦合 HSC 模型与 MCT 方法, 以避免参数率定产生的过拟合问题, 并应用于东北典型半干旱丘陵区叶柏寿流域; 王璟京等^[21]开发 FLEX-Global 模型, 将 HSC 模块扩展到全球尺度。采用相似性流域的参数移植或建立模型参数与流域特征因子之间的关系来确定参数, 也是解决缺资料地区模型参数率定难题的有效途径之一。关铁生等^[22]利用核密度估计和蒙特卡罗随机模拟等方法, 定量评估无资料地区参数移植的不确定性, 旨在识别和选取无资料地区径流模拟的最优参数移植方法。

综上所述, 如何改进已有的流域水文模型, 降低模型对实测资料的依赖程度, 提高山丘区模型精度仍是山洪预报预警领域重要的研究内容之一。SCS

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-03-19 网络出版时间: 2024-05-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240520.1100.006>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3209204); 广州市南沙区水务局重大科技项目(2022-263)

作者简介: 邵嘉佳(2001—), 女, 浙江宁波人, 主要从事流域水文模拟研究。E-mail: sjj20010726@126.com

通信作者: 李彬权(1984—), 男, 江苏淮安人, 副教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: libinquan@hhu.edu.cn

模型参数与流域下垫面条件关系密切,且存在较好的区域可移植性。Guo^[23-25]于2022年提出的广义单位线汇流计算方法仅有3个参数,该方法与传统的离散方法相比需要的实测数据更少,是一种简单且准确的单位线方法,在美国一些流域案例中得到验证,但目前这一方法在国内流域少有研究,需要更多实例加以验证。因此,本文以珠江东江流域西枝江水系上游九洲监测站以上集水区域为例,将改进的SCS产流模型与广义单位线汇流计算方法进行耦合,建立山丘区小流域产汇流模型,并选择三水源新安江模型作对比,检验所建立的产汇流模型在山丘区小流域场次洪水模拟中的适用性,为建立更广泛区域的广义单位线参数数据库、推求参数与流域特征的相关关系提供支撑。

1 研究方法

将改进后的SCS产流模型^[16]与广义单位线汇流模型^[23-25]进行耦合,建立SCS广义单位线产汇流模型。模型原理简要介绍如下。

1.1 改进 SCS 产流模型^[16]

原SCS模型采用径流曲线数 C_N 表征下垫面条件,推求 C_N 与反映降雨径流关系的参数 S 之间的定量关系,以减少对实测径流资料的依赖。产流模型计算公式为

$$Q = \begin{cases} \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S}, & P \geq I_a \\ 0, & P < I_a \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为时段产流量,mm; P 为时段降雨量,mm; I_a 为初损量,mm; S 为流域可能滞留量,mm。 S 与 C_N 的经验关系为

$$S = \frac{25\,400}{C_N} - 254 \quad (2)$$

针对原SCS模型在我国山区流域应用效果不佳的缺陷,姚蕾^[16]采用30d前期影响雨量 P_a 代替前5d降雨来表征前期土湿条件,制定新的分级标准,增加 C_N 分级,缩小级差,重新修订径流曲线数查算表(原模型将 C_N 分为干旱、正常、湿润3个等级),修正了 $S \sim C_N$ 经验关系式中的常数项。

前期影响雨量计算公式为

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t), K = 1 - \frac{E_m}{W_m} \quad (3)$$

式中: $P_{a,t}$ 表示 t 日的前期影响雨量,mm; P_t 表示 t 日的降雨量,mm;参数 K 为土壤含水量的日消退系数; E_m 代表流域日蒸散发能力,mm; W_m 为张力水蓄水

容量,mm。

1.2 广义单位线汇流模型

2022年,Guo^[23-25]提出3个假设以消除瞬时单位线的缺陷,推导出广义单位线 $g(t)$ 的一般表达式,用于直接径流或壤中流的汇流计算。

$$g(t) = 1 - (1 + mx)^{-1/m} \quad (4)$$

$$x(t) = \exp[\mu(t/t_p - 1)] \quad (5)$$

式(4)和(5)中: $x(t)$ 代表流域特征; m 是无因次递减系数; μ 为上升系数 $[T^{-1}]$; t_p 为峰现时间。该方法包含的3个基本假设为:(1)在单位线上升段 $\frac{dg}{dt} = \mu g$,即 $u(t) = \mu g$;(2)在下降段 $\frac{dg}{dt} = -\frac{\mu}{m} g$,即 $u(t) = -\frac{\mu}{m}$;(3)当 $t \rightarrow \infty$ 时, $u(t) = \frac{dg}{dt} = 0$, $g(t) = 1$,可将下降段等式改为 $u(t) = \frac{dg}{dt} = \frac{\mu}{m}(1 - g)$ 。

广义单位线共有3个参数,即峰现时间 t_p 、上升常数 μ 和下降常数 m 。由于SCS产流模型计算的产流过程不进行径流成分划分,计算结果直接作为汇流模型总输入,因此,在应用广义单位线方法时仅需要确定一套参数。

2 应用实例

2.1 流域概况

选取珠江东江流域西枝江上游九洲监测站以上集水区域为研究区(图1),流域面积385 km²,属于典型的南方湿润山丘区小流域,多年平均降水量为1 948 mm,降雨年内分配不均,存在明显的季节性变化,汛期4—9月降水量约占全年降水量的80%。

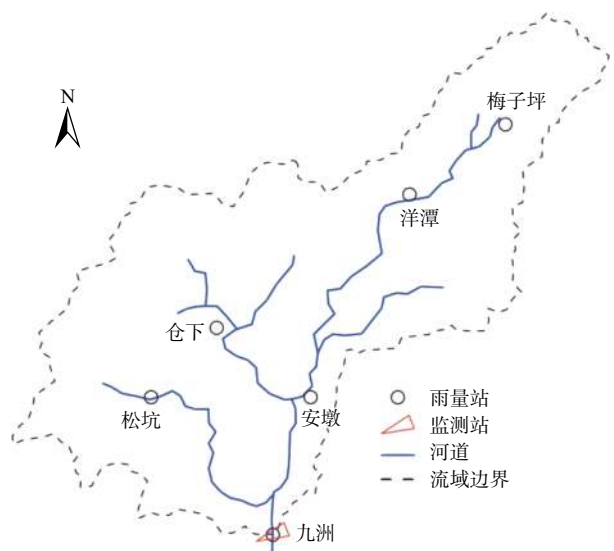


图1 研究区地面站点位置及水系

Fig. 1 Location of ground stations and river network

收集到 2012—2016 年和 2019 年 6 个雨量站的小时尺度降雨资料,以及九洲站逐小时流量、逐日蒸发皿蒸发资料。采用泰森多边形方法对雨量资料进行面平均处理,选取 8 场次洪用于率定,5 场次洪用于验证。

2.2 产汇流模型构建

C_N 值分级。SCS 模型以最小下渗率为依据,根据 FAO90 土壤分类系统 (<https://www.fao.org/soils-portal>) 的数据源,将土壤按照水文性质分为 4 组,可得到九洲流域各类型土壤的砂粒含量并计算最小下渗率,对应土壤分组为 B(14.63%)、C(87.37%);处理九洲流域 DEM 可得到其土地利用类型及对应面积权重,查询美国农业部水文手册^[26]中的 C_N 值得到对应类型的 C_N 值(表 1),面积加权得到正常($P_a=0.5W_m$)前期土壤湿润程度下的 C_{N_2} 为 69.8,经换算得到前期土壤湿润条件分别为干旱、湿润状态的 C_{N_1} 、 C_{N_3} 值($C_{N_1}=49.2$ 、 $C_{N_3}=84.2$)。

表 1 九洲流域 C_{N_2} 计算表
Tab. 1 The calculation of C_{N_2} in the Jiuzhou basin

土壤分组	土地利用方式						权重/%
	耕地	林地	草地	灌木地	水体	住宅区	
B	71	55	60	73	100	74	14.63
C	78	70	73	82	100	83	85.37
权重/%	10.31	77.74	5.57	5.81	0.09	0.48	100

选取九洲流域久旱不雨、突发暴雨的实测资料分析后,取 W_m 为 130 mm,由此假定九洲流域 P_a 的取值范围为 0~130 mm,进一步按 $\Delta P_a=10$ mm 步长内插增加 C_N 取值分级,得到修订后的 C_N 值。

常数项修订。以 $W_m/2=65$ mm 作为起算点,根据式(3)计算 13 场洪水的 30 d 前期影响雨量 P_a ,得到相应的 C_N 值,通过次降雨量和实测径流深计算得到 S 值。拟合 S 与 $1/C_N$ 的线性关系,见图 2。得到修订后的 SCS 模型常数项,将式(2)修正为

$$S = \frac{17000}{C_N} - 170 \quad (6)$$

结合公式(1)即可计算得到场次洪水的径流深。

汇流参数确定。由于 SCS 模型计算得到的径流量为单次降雨的总径流量,因此需要将相邻时段的累计径流量相减,得到计算时段的径流量,获得逐时段产流量序列。以率定期 8 场洪水计算得到的时段产流量为输入,采用粒子群算法率定广义单位线汇流模型的参数,分别为: $t_p=6.47$, $\mu=1.67$, $m=2.42$ 。

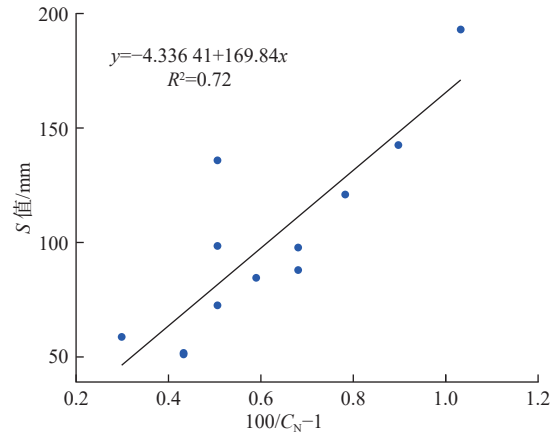


图 2 SCS 模型中 S 与 C_N 线性拟合
Fig. 2 Linear fit of S and C_N of the SCS model

2.3 次洪模拟结果分析

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008),采用洪量相对误差 E_{vol} 、洪峰相对误差 E_{peak} 、峰现时间误差 T_{lag} 和纳什效率系数 E_{NS} 等指标进行次洪模拟结果的精度评定,结果见表 2。在率定期 8 场次洪中,满足 $|E_{vol}| \leq 20\%$ 、 $|E_{peak}| \leq 20\%$ 、 $|T_{lag}| \leq 3$ h、 $E_{NS} \geq 0.6$ 的洪水场次分别为 8 场、7 场、7 场和 7 场;在验证期 5 场次洪中,满足相应指标许可误差的洪水场次分别为 5 场、5 场、4 场和 4 场;在所有 13 场次洪中,平均 E_{NS} 为 0.70,4 项指标均符合精度要求的有 9 场,合格率为 69%。

表 2 SCS 广义单位线模型精度统计结果
Tab. 2 Model accuracy statistical results of the SCS-CN general unit hydrograph

时期	洪号	实测洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	$E_{vol}/\%$	$E_{peak}/\%$	T_{lag}/h	E_{NS}
率定期	20120724	147.0	135.1	-19.7	-8.1	0	0.70
	20130816	396.0	428.1	12.2	8.1	1	0.73
	20140330	165.0	149.6	0.6	-9.3	12	0.75
	20150709	154.0	142.3	-20.0	-7.6	-2	0.66
	20160128	227.1	214.3	-8.2	-5.6	3	0.86
	20160409	234.8	227.6	-10.0	-3.1	2	0.49
	20161021	421.1	337.7	-7.5	-19.8	0	0.90
	20190825	400.0	283.3	-2.9	-29.2	1	0.74
验证期	20120621	195.4	195.8	10.5	0.2	-2	0.62
	20130519	499.0	462.0	6.1	-7.4	0	0.79
	20130922	181.0	154.9	-3.5	-14.4	1	0.93
	20140718	68.2	56.0	0.8	-18.0	4	0.21
	20160801	420.8	336.8	16.5	-20.0	2	0.71

在山丘区小流域的洪水预报中,洪峰预报的量级与出现时间是否准确对防洪减灾尤为重要,因此选择 20140330、20190825 两场次洪进行误差分析,实测与模拟的洪水过程线见图 3。由于次洪 20140330 是复式洪峰,所以对模型的产汇流预报能力要求较高;模拟洪水过程线在洪量与洪峰误差均较小,但 2 个洪峰的相对大小识别有误,造成峰现时间误差过大;若计算 2 个洪峰的峰现时间误差,则分别为 4 h 和 -4 h,误差大幅减小。山丘区小流域降雨产汇流过程急速,受地形下垫面影响剧烈,对于模拟率定

期洪峰高于 400 m³/s 的场次,SCS 方法模拟洪峰流量偏小。次洪 20190825 是雨峰偏前的尖瘦型单峰洪水,洪量相对误差满足许可误差要求,但模拟洪峰偏小(-29.2%),可能原因:一是 SCS 产流模型缺乏表征产流过程不均匀性的能力,采用时程均化处理方式,没有划分不同水源成分,会带来汇流模型的输入资料过程性误差;二是暴雨中心位于流域中下游时易形成尖瘦型洪水过程,但本次建模均未考虑降雨空间不均匀性,而是采用面平均雨量作为模型输入,会造成模拟洪峰偏小的问题。

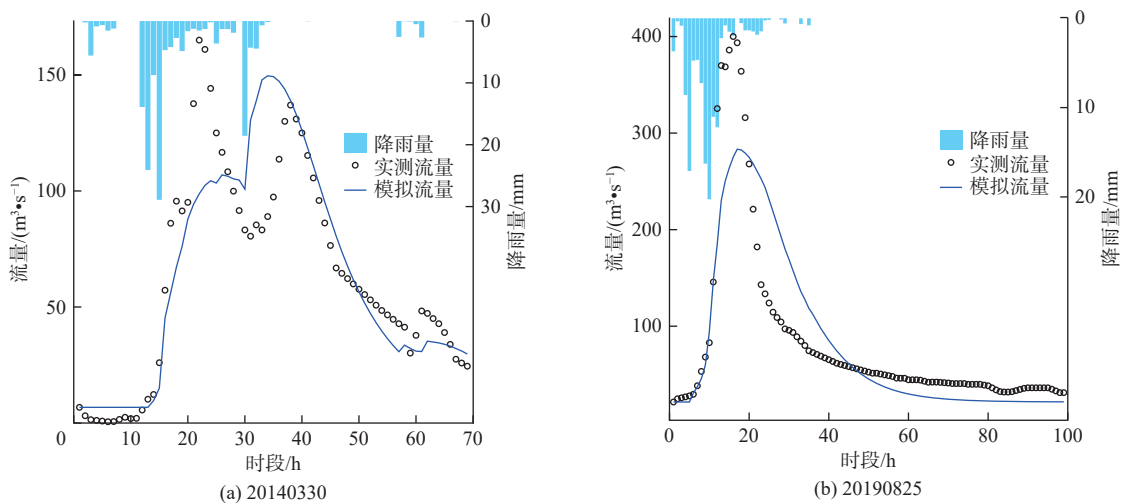


图 3 两场次洪(20140330、0190825)模拟过程线

Fig. 3 Examples of simulated hydrograph of two flood events (20140330, 20190825)

2.4 与新安江模型的对比分析

选择三水源新安江模型在九洲流域洪水模拟结果作对比,结果表明:新安江模型在率定期 8 场次洪中,满足 $|E_{vol}| \leq 20\%$ 、 $|E_{peak}| \leq 20\%$ 、 $|T_{lag}| \leq 3$ h、 $E_{NS} \geq 0.6$ 的洪水场次分别为 7 场、7 场、7 场和 8 场;在验证期 5 场次洪中,满足相应指标许可误差的洪水场次分别为 4 场、5 场、5 场和 5 场;在所有 13 场次洪中,平均 E_{NS} 为 0.79,4 项指标均符合精度要求的有 10 场,合格率为 77%。由于建模过程未划分子流域,以整个流域面平均雨量驱动模型,即未考虑降雨空间不均匀性问题,而山丘区小流域暴雨中心对洪峰流量、峰现时间的影响较大,峰现时间误差容易造成洪水过程线的整体偏移,这种假定不可避免带来模型结果的不确定性。此外,九洲监测站下游设有水电站和混凝土拦河坝,低水位时可能导致水位流量关系变动,影响利用观测水位推求流量资料的精度。

对比可知,新安江模型的次洪模拟结果总体上优于 SCS 广义单位线模型,但 SCS 广义单位线模型整体精度在研究流域也有一定适用性,考虑到该模

型结构简单,在山丘区小流域山洪预报预警方面具有一定的应用价值,同时提供的参数值与场次洪水模拟结果也能够为广义单位线参数区域化研究提供实例验证。图 4 给出 2 种模型 2 场次洪的模拟过程线对比。

3 结论

耦合 SCS 产流模型与广义单位线汇流模型,构建了可根据下垫面条件确定参数的小流域产汇流模型。选择新安江模型作对比,以典型山丘区小流域九洲流域为例,验证了所建立模型的适用性。

SCS 广义单位线模型在九洲流域次洪模拟中平均合格率为 69%,低于新安江模型的 77%;但新建的 SCS 广义单位线模型结构简单,已知部分模型参数与流域下垫面特征关系密切,能够更好地体现流域下垫面对产汇流的影响。同时,广义单位线是全新的通用分析模型,需要更多的实例验证,所提供的场次洪水模拟结果具有重要的参考价值,可为研究流域下垫面特征与广义单位线参数的相关关系提供支撑。

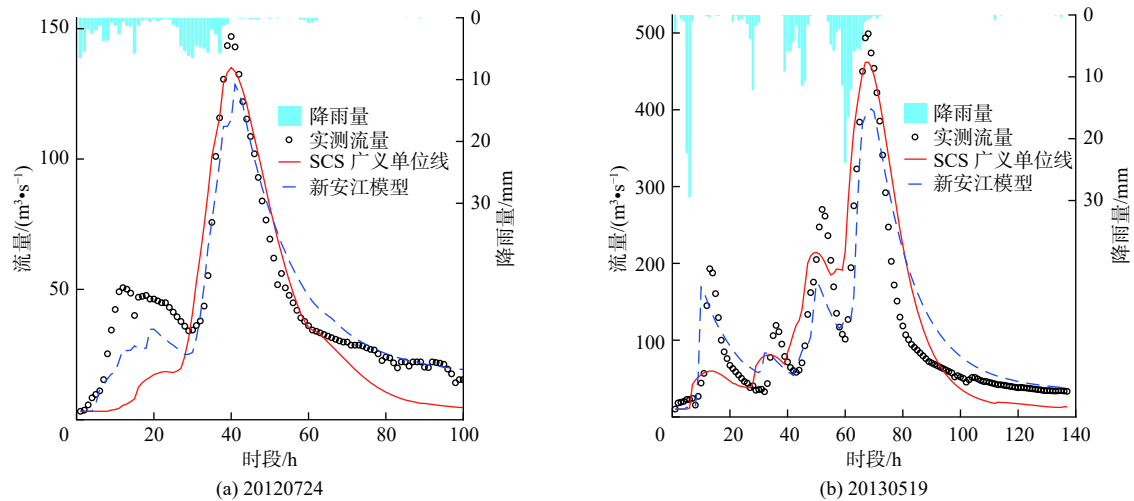


图4 2种模型在两场次洪(20120724、20130519)过程模拟中的对比

Fig. 4 Comparison of simulated hydrograph of two flood events (20120724, 20130519) with two models

山丘区小流域洪水情况复杂,复式洪峰过程的洪水事件或有较大人工扰动的流域对模型预报能力要求较高;同时,SCS广义单位线模型在处理分水源产汇流及时空不均匀性等方面还存在不足,如何提高模型精度还需进一步探究。

参考文献:

- [1] 侯东儒,张怡雯,王金星,等.无资料地区Nash瞬时单位线参数推求方法探究[J].*水文*, 2023, 43(6): 8-13. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220303.
- [2] 栾承梅,梁忠民,仇少鹏,等.山丘区小流域SCS-Nash产汇流模型应用[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 246-254. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0026.
- [3] 赵人俊.流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M].北京:水利水电出版社,1984.
- [4] 陆旻皎.新安江模型研究的回顾与展望[J].*水利学报*, 2021, 52(4): 432-441. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200695.
- [5] ZHAO J F, DUAN Y N, HU Y M, et al. The numerical error of the Xinanjiang model[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129324. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129324.
- [6] 李琼,龚珺夫,王洪心,等.湿润地区山区小流域水文模型应用与比较[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 81-86. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0074.
- [7] 钟栗,汪院生,秦灏,等.基于地貌单位线汇流的新安江模型在洛阳河流域中的应用[J].*水电能源科学*, 2023, 41(1): 14-17. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20212388.
- [8] CHEN X Y, ZHANG K, LUO Y N, et al. A distributed hydrological model for semi-humid watersheds with a thick unsaturated zone under strong anthropogenic impacts: A case study in Haihe River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129765. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129765.
- [9] 任泽凌,夏栩,段雅楠,等.岩溶地貌流域洪水过程模拟研究[J].*水文*, 2023, 43(6): 45-50. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220386.
- [10] 魏博文,李玥康,漆宇豪,等.基于水动力与模糊综合模型的洪水风险评价[J].*水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(9): 45-56. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.09.005.
- [11] 唐中楠,杨国丽,李军,等.基于文献计量学的中国流域SCS模型研究现状分析[J].*人民长江*, 2021, 52(10): 95-100,106. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.10.014.
- [12] UPRETI P, OJHA C S P. Development and performance evaluation of SCS-CN based hybrid model[J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85(9): 2479-2502. DOI: 10.2166/wst.2022.145.
- [13] 付宇鹏,梁忠民,李彬权,等.SCS产流模型在渭河流域的修订研究[J].*人民黄河*, 2021, 43(5): 24-29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.05.005.
- [14] 李鑫川,贺巧宁,张友静.SCS-CN模型的改进及其空间尺度效应[J].*南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 64-70,130. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0111.
- [15] 赵登良,陈振江,刘建华,等.SCS-CN模型在济南市

- 南部山区径流估算中的优化应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 308-316. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0032.
- [16] 姚蕾. 缺资料地区产汇流模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.
- [17] 邢子康, 马苗苗, 文磊, 等. HEC-HMS模型在缺资料地区山洪预报的应用研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(1): 54-61. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.01.007.
- [18] GAO H K, HRACHOWITZ M, SRIWONGSI-TANON N, et al. Accounting for the influence of vegetation and landscape improves model transferability in a tropical savannah region[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(10): 7999-8022. DOI: 10.1002/2016WR019574.
- [19] GAO H K, BIRKEL C, HRACHOWITZ M, et al. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(2): 787-809. DOI: 10.5194/hess-23-787-2019.
- [20] 张博美, 高红凯, 余敦先, 等. 以地形为基础的HSC产流模型在辽西半干旱丘陵流域的适用性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1072-1082. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0110.
- [21] 王璟京, 高红凯, 刘敏, 等. 参数区域化在全球水文模型FLEX-Global中的应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 805-823. DOI: 10.1360/SSTe-2020-0188.
- [22] 关铁生, 鲍振鑫, 贺瑞敏, 等. 无资料地区水文模型参数移植不确定性分析[J]. *水科学进展*, 2023, 34(5): 660-672. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.002.
- [23] GUO J K. General and analytic unit hydrograph and its applications[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(2): 04021046. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002149.
- [24] GUO J K. Application of general unit hydrograph model for baseflow separation from rainfall and streamflow data[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(11): 04022027. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002217.
- [25] GUO J K. General unit hydrograph from Chow's linear theory of hydrologic systems and its applications[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2022, 27(10): 04022020. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002184.
- [26] SERVICE E. Hydrology[M]. Washington: United States Department of Agriculture, 1972.

Runoff generation and confluence model coupling SCS-CN and general unit hydrograph for small mountainous watersheds

SHAO Jiajia¹, LI Binquan^{1,2}, MENG Jian³, REN Zeling¹, HUANG Huaping⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Hangzhou Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Hangzhou 310016, China; 4. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The rainfall generation and confluence in small mountainous watersheds exhibit short and rapid runoff response, characterized by abrupt rises and falls during flood events. The short duration and complexity of flood processes pose challenges for flood forecasting in these regions. Moreover, some remote small mountainous watersheds lack well-equipped monitoring stations, resulting in limited hydrological data availability. These areas are considered to appertain lacking or without data regions, where traditional lumped or distributed hydrological models face limitations. Therefore, it is of great significance to conduct the research on the runoff generation and confluence model in small mountainous watersheds.

The improved SCS-CN runoff model and the general unit hydrograph confluence method were coupled, and a case at the upper reaches of the Jiuzhou hydrological station in the Xizhijiang River basin, Pearl River basin, was selected for the validation of the proposed model. The three sources Xin'anjiang model was chosen as a reference model for comparison. The flood relative error (E_{vol}), peak relative error (E_{peak}), peak occurrence time error (T_{lag}), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (D_e) as evaluation indicators for model performance. The applicability of the established runoff model in flood simulation in small mountainous watersheds was examined.

Results showed that both models demonstrated the applicability in flood simulation in the study basin, with the Xin'anjiang model exhibiting higher accuracy than the SCS-CN general unit hydrograph model. For all 13 flood events, the Xin'anjiang model produced the average D_c was 0.79, with 10 events meeting all accuracy requirements ($|E_{vol}| \leq 20\%$, $|E_{peak}| \leq 20\%$, $|T_{lag}| \leq 3h$, and $D_c \geq 0.6$), achieving a pass rate of 77%. Regarding the proposed SCS-CN general unit hydrograph model, the average D_c was 0.70, with 9 events meeting all accuracy requirements, achieving a pass rate of 69%.

Overall, the accuracy of the Xin'anjiang model was better than the proposed model in the study basin. However, considering of the newly proposed SCS-CN general unit hydrograph model featured a straightforward structure, with parameters that were easy to determine, and was capable of yielding results with acceptable accuracy. It presented a new modeling option for flood forecasting in small mountainous watersheds. Simultaneously, it also provided support for the research of the regionalization law of parameters in general unit hydrograph model.

Key words: small mountainous watershed; Xin'anjiang model; SCS-CN model; general unit hydrograph; flood forecast