

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0032

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. ZHAO D L, CHEN Z J, LIU J H, et al. Optimal application of SCS-CN model in runoff estimation in the southern mountainous area of Jinan[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 308-316. (in Chinese)

SCS-CN模型在济南市南部山区径流估算中的优化应用

赵登良^{1,2}, 陈振江³, 刘建华³, 孟凡荣⁴, 徐征和¹, 桑国庆¹, 边振¹

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 济南 250013;
3. 山东济南市水文局, 济南 250100; 4. 山东省水利厅, 济南 250013)

摘要:济南市南部山区崮山流域地处我国北方土石山地丘陵区,以水力侵蚀为主的土壤侵蚀现象严重且生态环境脆弱,径流预测是水土保持监测和预报的重要基础,精度较高的径流计算模型可以为济南市南部山区更好地开展水土保持工作提供技术支撑与数据基础。根据径流曲线模型(SCS-CN)原理和崮山流域内5个雨量站、1个水文站近10年的实测降雨、径流资料,借助ArcGIS平台利用优度拟合统计分析法及Nash-Sutcliffe效率系数验证法对模型参数初损率(λ)和径流曲线数(CN)进行了优化检验,结果表明:参数优化后的模型精确度较高(实测值与计算值分析结果为回归直线斜率 $K=0.9058$ 、确定系数 $R^2=0.8127$ 、纳什效率系数 $E_{NS}=0.7969$)可以更好地适用于崮山流域径流测算;对2019年崮山流域29次侵蚀性降雨进行降雨产流估算,并累加计算得流域年径流量为0.53亿 m^3 ,年径流深处于34.15~371.52 mm,年均径流深为134.52 mm,汛期降雨产生的径流量占年径流量的90.27%。

关键词:径流曲线模型;模型优化检验;径流估算;多源遥感;济南市南部山区

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地表径流是水文过程模拟的重要环节,是水量平衡的关键组成部分^[1],地表径流的模拟为揭示人与自然因素共同作用下降雨-径流关系提供理论依据和科学方法^[2]。在以水力侵蚀为主要类型的水土流失监测区,土壤侵蚀的过程是主要由降雨产生的径流对土壤的冲刷并带动土壤以泥沙的形式进行迁移^[3]。因此,完整的水土流失监测技术不仅需要土壤侵蚀进行测算,还需要在同尺度下对地表径流进行计算,这样才能明确水土流失的过程、掌握水土流失的规律、更科学地提出水土流失治理的方案。径流曲线模型(SCS-CN)是由美国于20世纪50年代提出的径流计算模型,其综合考虑了流域土壤类型、土地利用类型、前期土壤湿

润程度与径流的耦合关系^[4]。凭借着结构简单、所需参数简单的优势,该模型被广泛应用于国内外水文资料不足流域的径流预测^[5]。卜慧等^[6]将改进的SCS模型应用于老挝南乌河流域;彭云等^[7]在内蒙古荒漠草原小流域对SCS模型进行了参数率定,并将该模型应用于区域山洪计算。不同区域SCS-CN模型的适用性需要进一步论证,其参数也需要根据研究区实际情况进行优化^[8],因此本研究在济南市南部山区崮山流域进行该模型的参数优化研究,相关研究成果可以为济南市南部山区的生态保护、水土保持监测工作提供数据支撑,相关方法也可以为其他流域类似问题的研究提供参考。

收稿日期:2021-02-03 修回日期:2021-11-10 网络出版时间:2021-11-18

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211118.0857.002.html>

基金项目:山东省水土保持学会重点领域创新项目(sdsbxh-2019-01;sdsbxh-2018-04)

作者简介:赵登良(1997—),男,山东聊城人,主要从事水土资源监测研究。E-mail:1186130931@qq.com

通信作者:边振(1983—),男,山东莱芜人,副教授,博士,主要从事水土资源监测研究。E-mail:stu_bianz@ujn.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

崮山流域(以下简称研究区)位于济南市南部山区,覆盖张夏镇、万德街道和崮云湖街道的部分区域,流域总面积 396.68 km²。研究区处于暖温带大陆性季风气候区,春季干旱少雨,夏季炎热多雨,地理坐标为东经 116°48'36"~117°5'23",北纬 36°14'40"~36°31'47"[9]。研究区位置见图 1。

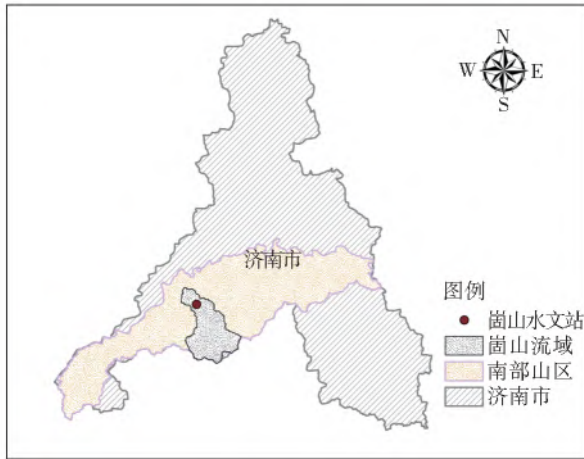


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location diagram of the study area

研究区位于泰山北麓,属于低山丘陵地区,地貌复杂,地势由东南向西北逐渐降低,海拔高度为 120~920 m^[10-11]。经查询《山东省土种志》,结合野外调查采集的土壤样品成分分析数据,确定了研究区土壤类型主要有褐土、棕壤、粗骨土、潮土 4 大类土壤,主要特征为土层浅薄,质地较粗,结构松散,砾石较多^[12]。研究区的植被类型可以分为天然植被和人工植被两大类。天然植被主要以荆条、酸枣等

灌木为主。人工植被主要是农作物和人工林:农作物以小麦、玉米、花生等为主;人工林则以侧柏、刺槐为主,还包括果园,以核桃、板栗为主^[13]。

1.2 研究方法

1.2.1 模型原理

SCS-CN 模型假定集水区的实际入渗量与实际径流量之比等于集水区该场次降雨前的潜在入渗量即后损上限与潜在径流量之比,再之假定初损量与后损上限成比例^[14],公式为

$$\frac{F}{R} = \frac{S}{P - I_a} \quad (1)$$

$$P = I_a + F + R \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

式中: F 为实际入渗量, mm; R 为实际径流量, mm; S 为潜在最大保持量, mm; P 为降雨量, mm; I_a 为初损, mm; λ 为初损率。

由公式(1)、(2)、(3)联合求解可得:

$$\begin{cases} R = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} & P \geq I_a \\ R = 0 & P < I_a \end{cases} \quad (4)$$

由上式可看出集水区径流量取决于降雨量与该场次降雨前的潜在入渗量,而潜在入渗量又与区域土壤类型、土地利用类型、前期土壤湿润程度有关,SCS 模型便通过其径流曲线数(CN 值)来反映上述因素的影响,潜在入渗量也通过该参数经由下式计算:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

在实际应用中,参考美国国家工程手册现行版本第九章的农业用地 CN 值选取表、城市地区的 CN 值选取表确定了本文所用到的标准 SCS-CN 模型 AMC II 状态下的 CN 值表^[15]见表 1。

表 1 崮山流域 CN 值取值

Table 1 Table of CN values in Gushan watershed

土地利用类型	覆盖类型及水文状态	CN 值	土地利用类型	覆盖类型及水文状态	CN 值
旱地	梯田措施	73	城镇建设用地	面积 ≤ 0.050 6 hm ²	85
	作物紧密排列	75		0.050 6 hm ² < 面积 ≤ 0.101 2 hm ²	75
果园	FVC < 0.50	66		0.101 2 hm ² < 面积 ≤ 0.134 9 hm ²	72
	0.50 ≤ FVC < 0.75	60		0.134 9 hm ² < 面积 ≤ 0.202 3 hm ²	70
	FVC ≥ 0.75	55		0.202 3 hm ² < 面积 < 0.809 4 hm ²	68
有林地	FVC < 0.50	73		面积 ≥ 0.809 4 hm ²	65
	0.50 ≤ FVC < 0.75	65	农村建设用地	居民区	74
	FVC ≥ 0.75	58	人为水土流失地块	工业区	88
灌木林地	FVC < 0.50	67	其他建设用地	工业区	92
	0.50 ≤ FVC < 0.75	56	其他交通用地	抗渗透区域	98
	FVC ≥ 0.75	48	河湖库塘	沟渠	89
其他林地	FVC < 0.50	66			
	0.50 ≤ FVC < 0.75	60			
	FVC ≥ 0.75	55			

注:表中 FVC 为植被覆盖度。

根据表 2 将土壤湿润程度按降雨发生前 5 日降雨总量划分为干旱(AMC I)、正常(AMC II)、湿润(AMC III)3 种状态,根据正常状态下的 CN 值计算其他两种状态下的 CN 值^[16]:

$$CN_I = \frac{4.2CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (6)$$

$$CN_{III} = \frac{23CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (7)$$

式中:CN_I、CN_{II}、CN_{III} 分别代表干旱、正常、湿润状态下的 CN 值。

表 2 前期土壤湿润条件(AMC)划分

Tab. 2 Division of soil moisture condition (AMC) in the early stage

前期土壤湿润程度等级	前 5 日累计降水总量/mm	
	休眠季节	生长季节
AMC _I (干旱)	<12.70	<35.56
AMC _{II} (正常)	12.70~27.94	35.56~53.34
AMC _{III} (湿润)	>27.94	>53.34

1.2.2 模型优化

径流曲线模型(SCS-CN)作为在世界范围内广泛运用的径流计算模型,是由美国农业部土壤保持局的研究人员在进行了数万次的降雨产流试验后提出的^[17]。该模型物理参数明确,当初损率 λ 固定为 0.2 时,无因次径流曲线数 CN 是其唯一的参数,这对于水文资料不全的监测区是非常适用的。但是,鉴于济南市南部山区处于石灰岩山地区且多是陡坡^[18],将在小于 5° 的美国平原地区推演出的初损率 λ 和参数 CN 值直接套用理论上是不合适的^[19]。故选取研究区 2009—2018 年内 50 次(M₁~M₅₀)降雨产流事件,对模型的初损率 λ 和参数 CN 值进行优化分析。研究区内 5 个雨量站和 1 个水文站是非均匀分布的,将站点坐标导入 ArcGIS 平台,对研究区 2009—2019 年的降水数据结合泰森多边形权重法进行筛选分析^[20],根据前期土壤湿润条件(AMC)划分表规定的标准进行判断,研究所选的 50 次典型降雨中有 23 次为 AMC I、6 次为 AMC II、21 次为 AMC III。50 次降雨和径流的分布关系见图 2。

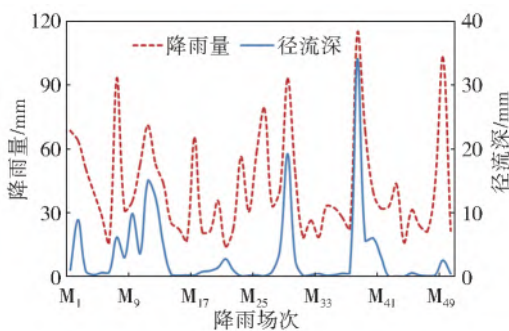


图 2 50 次典型降雨径流统计

Fig. 2 Statistical diagram of 50 typical rainfall runoff

2 结果与分析

2.1 模型优化分析

2.1.1 标准 SCS-CN 模型计算

初损率 λ 取值为 0.2,通过查表法获取研究区 CN 值分布栅格数据,计算 M₁~M₅₀ 次降雨的径流深,计算值与实测值的优度拟合统计分析^[21]见图 3,回归直线的斜率为 1.355,截距为 3.615 4,确定系数 R² 为 0.381 4,纳什效率系数 E_{NS} 为 -2.119 5。其中:在径流深范围处于 0~0.5 mm 时,模型计算结果大于实测值,有 8 次的计算结果大于 5 mm;在径流深范围处于 0.5~10 mm 时,模型计算值小于实测值,有 5 次的径流深计算接近于 0;在径流深大于 10 mm 时,模型仅有 1 次计算结果与实测值接近,其他均与实测值相差较大。

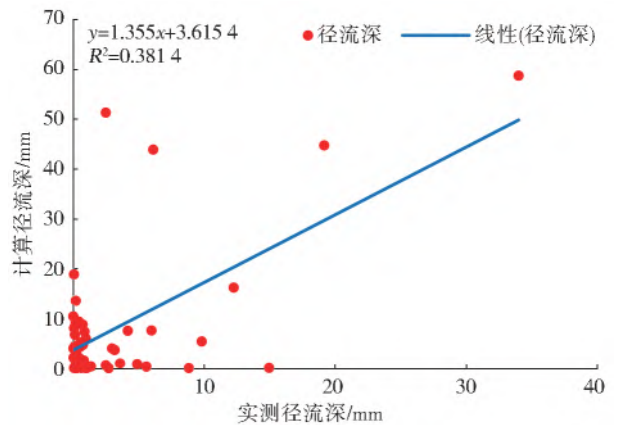


图 3 标准 SCS-CN 模型计算径流深与实测径流深拟合结果

Fig. 3 Fitting results of runoff depth calculated by standard SCS-CN model and measured runoff depth

以上分析表明,标准 SCS-CN 模型在计算研究区径流深时误差较大,造成这种结果的主要原因是 λ 取值为 0.2。已有相关研究^[22]表明,鲁中南低山丘陵区 λ 取值范围在 0.02~0.16 时,E_{NS} 已超过 0.5;王红艳等^[23]利用 SCS-CN 模型估算黄土高原径流时也对 λ 值 0.01~0.20 的取值进行了率定,其结果表明,当 λ 取 0.01 时,模型 E_{NS} 最大值为 0.516。由此可见,对 λ 值的率定是非常必要的。

2.1.2 Woodward 模型计算径流

以 Woodward 为代表的研究人员针对径流曲线模型的适用性问题在美国进行的大量研究结果表明, λ 取 0.2 并不适用于所有的流域,应根据流域的地域性特点对其取值。Woodward 等^[24]通过对美国的 307 个径流小区的研究得出了 λ 取 0.05 的模型效率要高于其取 0.2,并推演出 λ 为 0.05 时 CN

值的转换模型为

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879(100/CN_{0.2} - 1)^{1.15} + 1} \quad (8)$$

使用 Woodward 改进的 SCS-CN 模型对 $M_1 \sim M_{50}$ 降雨事件进行径流深计算,并对计算径流深和实测径流深进行优度拟合分析,结果见图 4。回归直线的斜率为 1.745 5,截距为 2.603 9, R^2 为 0.590 6, E_{NS} 为 0.435 5。与标准 SCS-CN 模型相比:该方法在径流深范围处于 $0 \sim 0.5$ mm 时,模型计算结果大于实测值,有 9 次的计算结果大于 5 mm;在径流深范围处于 $0.5 \sim 10$ mm 时,计算值与实测值较为接近,但是有 2 次的径流深计算接近于 0;在径流深大于 10 mm 时,模型仅有 1 次计算结果与实测值接近,其他均与实测值相差较大。

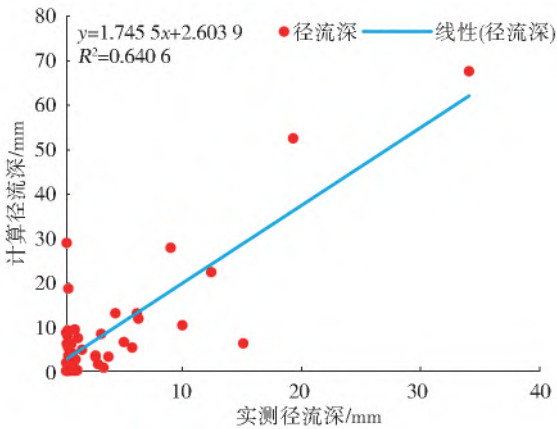


图 4 Woodward 模型计算径流深与实测径流深拟合结果

Fig. 4 Fitting result of runoff depth calculated by Woodward model and measured runoff depth

上述分析结果表明,在径流深处于 $0.5 \sim 10$ mm 时,Woodward 法的计算径流深结果更接近实测值,在径流深处于其他范围时,该方法仍具有较大

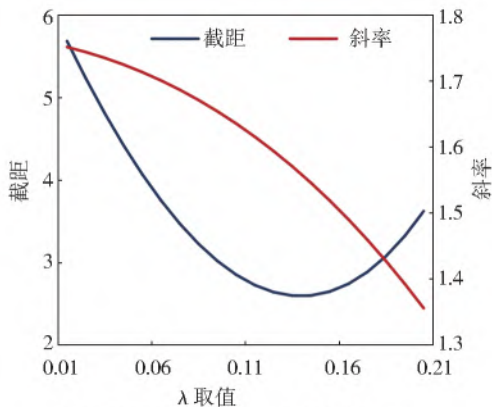
的误差。对于本研究选取的模型评价标准而言,该模型的效率整体上优于标准 SCS-CN 模型,为进一步提高模型的计算精度,继续对模型的参数进行优化。

2.1.3 优化 SCS-CN 模型计算径流

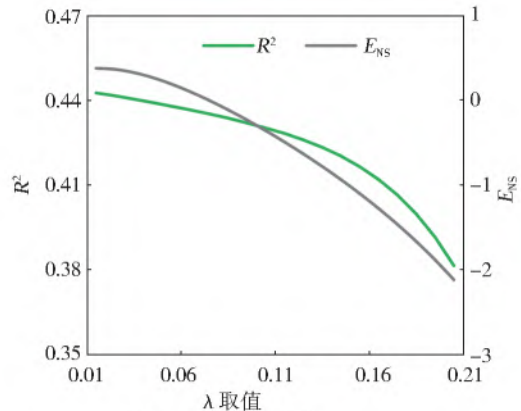
继以上研究结果,首先对标准 SCS-CN 模型中的参数 λ 进行优化分析。在此分析过程中,将 λ 取值范围定为 $0 \sim 0.20$,步长设置为 0.01, CN 值为标准 SCS-CN 模型中的查表值,不同 λ 取值的模型评价结果见图 5。图 5 中,随着 λ 值的增大,回归直线的斜率呈逐渐减少的趋势,其取值范围为 $1.355 0 \sim 1.750 8$;回归直线的截距呈先减少再增加的趋势,在 λ 为 0.13 时有最小值为 2.591 7,在 λ 为 0.01 时有最大值 5.678 3;优度拟合统计 R^2 呈减少趋势,取值范围为 $0.381 4 \sim 0.442 5$; E_{NS} 呈减少趋势,取值范围为 $-2.119 5 \sim 0.373 7$,在 $\lambda \leq 0.06$ 时, E_{NS} 取得正值。

以上结果表明:在 λ 处于 $0 \sim 0.20$ 时,模型的计算径流深整体会上会大于实测径流深,随着 λ 取值增大,计算径流深有减小的趋势,但计算径流深和实测径流深的相关性也会降低,模型精确度也随之降低; λ 取值越小,模型的精确度越高,尤其是在 $\lambda \leq 0.06$ 时,模型的效率相对较高。

将 CN 值取查表值时, λ 取值范围定在 $0 \sim 0.06$ 一定程度上提高了模型的精度,可以作为 λ 取值的最优区间。但是模型的误差仍不可忽略,这是由于 CN 值的选取也会影响模型的计算精度,有研究表明地形因素对 CN 值的选取是不可忽略的, Huang 等^[25] 在黄土高原陡坡区分析评价了标准径流曲线模型中边坡整合办法,并基于径流小区 11 年降雨径流数据提出了 CN 值的坡度修正公式见式(9)。



(a) 回归直线的截距、斜率优化结果



(b) R^2 、 E_{NS} 优化结果

图 5 初损率 λ 优化分析结果

Fig. 5 Initial loss rate λ optimization analysis results diagram

$$CN_{\alpha} = CN \frac{322.79 + 15.63\alpha}{\alpha + 323.52} \quad (9)$$

式中: CN_{α} 为修正后的 CN 值; α 为百分比坡度。

考虑到 Woodward 模型中 λ 值为 0.05 正处于上述对 λ 率定的最优结果区间内, 并且当 λ 取 0.05 时也有了较为成熟的 CN 值转换模型, 因此接下来模型优化的方向是在 Woodward 模型的基础上引入 CN 值坡度修正模型。

基于 ArcGIS 平台, 将研究区坡度图层、Woodward 模型提取的 CN 值栅格图层(CN_w)按照式(9)进行栅格运算, 得到优化后的 Woodward 模型 CN 值(CN_Y)。在计算径流深前先对计算得出的 50 组 CN 值栅格数据进行加权平均计算, 得出次降雨的研究区综合 CN 值, 与基于实测降雨径流数据反推计算的 CN 值进行拟合分析, 探讨优化 CN 值的适用性。

取 λ 为 0.05, 由式(3)、(4)、(5)可得:

$$CN = \frac{25\ 400}{20P + 190R - \sqrt{8\ 000PR + 36\ 100R^2}} + 254 \quad (10)$$

基于 $M_1 \sim M_{50}$ 场次降雨的实测径流数据及降

雨数据, 利用式(10)计算出各次降雨的 CN 值, 结合 SPSS 和 Excel 将优化后的 CN_Y 和反推法计算的 CN_F 进行线性、多项式、对数、指数、乘幂拟合分析, 其结果见表 3。由表 3 可知, 两组数据相关性较好, 指数函数拟合时 R^2 有最小值为 0.662 8, 多项式函数拟合 R^2 有最大值为 0.748 1。拟合分析表明 CN_Y 与 CN_F 有较好的相关性, 可以继续继续进行径流深计算。

表 3 CN_Y 与 CN_F 拟合分析结果
Tab. 3 Fit analysis results of CN_Y and CN_F

函数类型	函数关系式	相关系数 R^2
线性	$y = 2.509x - 67$	0.693 2
多项式	$y = -0.189 3 x^2 + 22.122 x - 572.96$	0.748 1
对数	$y = 130.72 \ln x - 452.75$	0.706 4
指数	$y = 7.051 8 e^{0.042 1x}$	0.662 8
乘幂	$y = 0.010 7 x^{2.198 3}$	0.678 3

使用参数优化后的 SCS-CN 模型对 $M_1 \sim M_{50}$ 场次降雨进行径流计算, 并将计算结果按照不同的前期土壤湿润程度进行分类统计, 对比 3 种方法计算径流深与实测径流深的分布关系, 其结果见图 6。

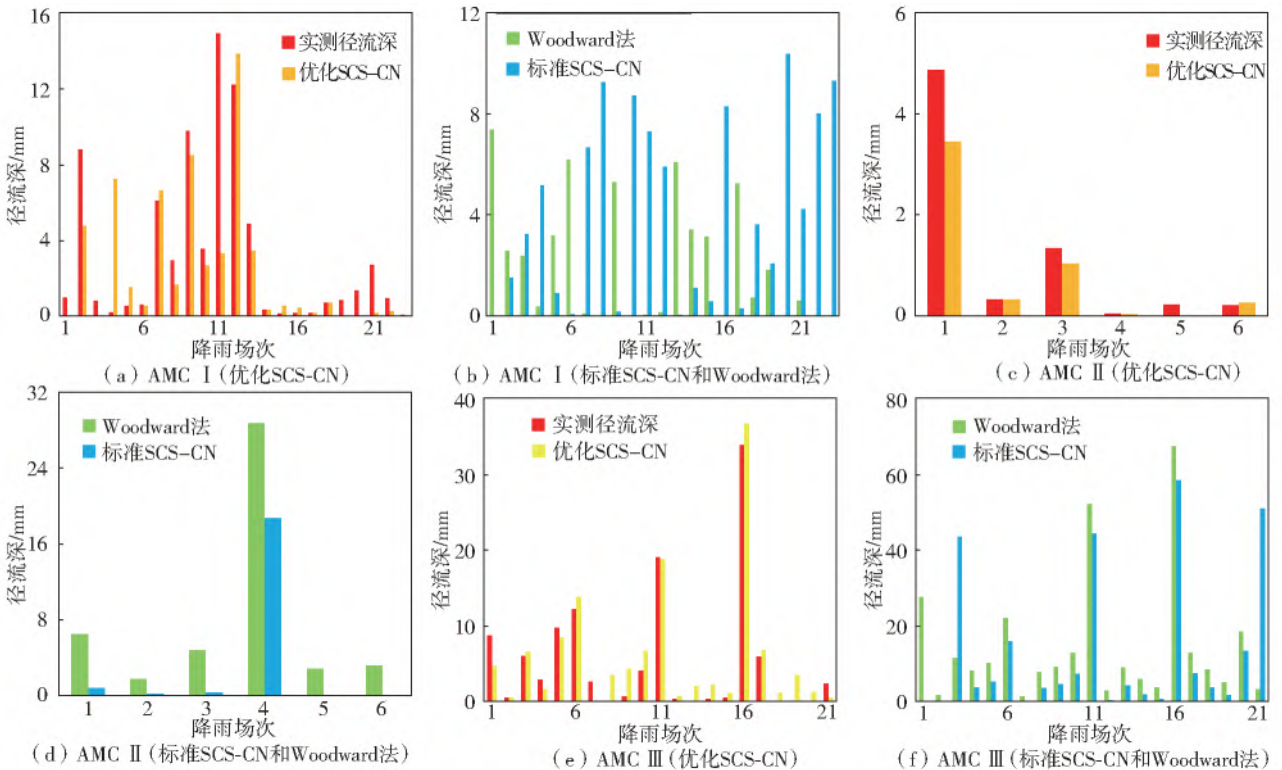


图 6 不同方法计算径流深与实测径流深对比分析

Fig. 6 Comparison and analysis of runoff depth calculated by different methods and measured runoff depth

在土壤前期湿度 AMC I 状态下, 分析每种模型的计算值与实测值的差值关系, 其中: 实测值与优化 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 -0.02 mm, 标准差为 1.17; 实测值与 Woodward 模型计算值的

误差均值为 0.44, 标准差为 3.09; 实测值与标准 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 2.54, 标准差为 5.63。实测值与优化 SCS-CN 模型的计算值误差最小且偏离程度小, 与标准 SCS-CN 模型计算值相

差最大,模型适用性排序为优化 SCS-CN 模型 > Woodward 模型 > 标准 SCS-CN 模型。

在土壤前期湿度 AMC II 状态下:实测值与优化 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 -0.32 mm,标准差为 0.56 ;实测值与 Woodward 模型计算值的误差均值为 6.81 ,标准差为 1.58 ;实测值与标准 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 2.19 ,标准差为 3.77 。实测值与优化 SCS-CN 模型的计算值误差最小且偏离程度小,与 Woodward 模型计算值相差最大,模型适用性排序为优化 SCS-CN 模型 > 标准 SCS-CN 模型 > Woodward 模型。

在土壤前期湿度 AMC III 状态下:实测值与优化 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 0.70 mm,标准差为 2.06 ;实测值与 Woodward 模型计算值的误差均值为 9.19 ,标准差为 9.50 ;实测值与标准 SCS-CN 模型计算值的误差均值为 7.73 ,标准差为 14.42 。实测值与优化 SCS-CN 模型的计算值误差最小且偏离程度小,实测值与标准 SCS-CN 模型计算值的误差均值小于 Woodward 模型,但是前者标准差小于后者,引入变异系数判断模型的适用性。实测值与 Woodward 模型计算值的误差变异系数为 1.03 ,与标准 SCS-CN 模型计算值的误差变异系数为 1.86 ,因此模型适用性排序为优化 SCS-CN 模型 > Woodward 模型 > 标准 SCS-CN 模型。

为进一步验证参数优化后 SCS-CN 模型的效率,拟合分析实测径流深与优化 SCS-CN 模型计算径流深,结果见图 7。计算径流深与实测径流深的回归直线斜率为 0.9058 ,截距为 0.544 , R^2 为 0.8127 , E_{NS} 为 0.7969 。在径流深范围处于 $0 \sim 0.5$ mm 时,模型计算值略大于实测值,有两次超过 5 mm;在径流深范围处于 $0.5 \sim 10$ mm 时,模型计算值与实测值接近,有 3 次的径流深计算接近于 0;在径流深大于 10 mm 时,有 3 次计算结果均与实测值接近。

2.2 研究区 2019 年径流量估算

对 2019 年降雨数据进行筛选,有 29 次降雨事件的降雨量超过侵蚀性降雨阈值(10 mm)按时间顺序编号为 $T_1 \sim T_{29}$,土壤前期湿润程度 23 次为 AMC I ($T_1 \sim T_7, T_9 \sim T_{18}, T_{24} \sim T_{29}$),1 次 AMC II (T_8),5 次 AMC III ($T_{19} \sim T_{23}$)。使用优化后的径流曲线模型基于 ArcGIS 平台分别对 29 场次降雨进行径流计算,使用 Zonal 工具统计分析各降雨场次径流深计算的平均值,综合分析各降雨场次的降雨量和植被覆盖程度,其结果见图 8。

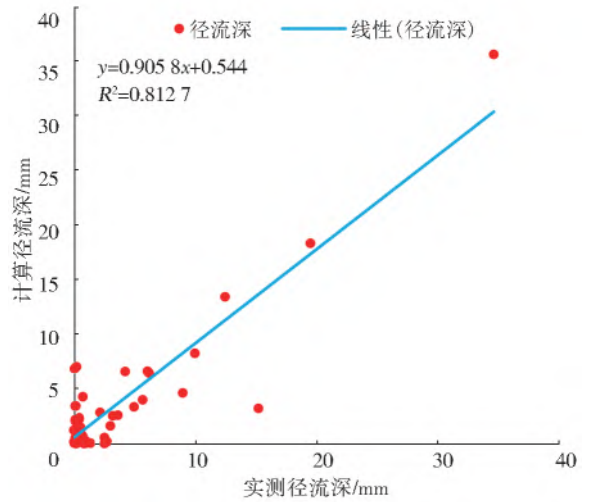


图 7 优化 SCS-CN 模型计算径流深与实测径流深对比分析

Fig. 7 Comparison and analysis of runoff depth calculated by optimized SCS-CN model and measured runoff depth

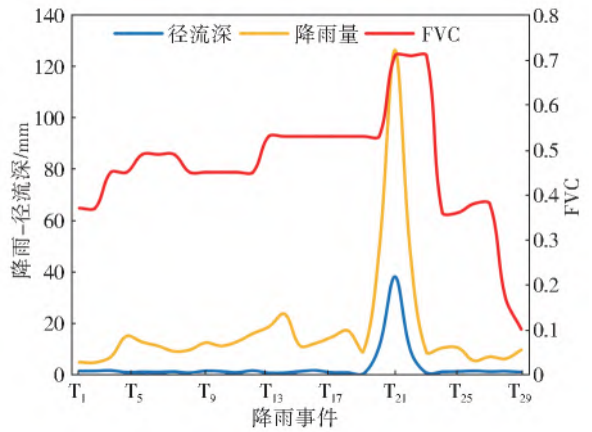


图 8 29 场降雨量、径流深及植被覆盖关系组合

Fig. 8 Combination diagram of the relationship between rainfall runoff and vegetation cover in 29 fields

由图 8 可以看出: $T_{19} \sim T_{23}$ 次降雨的径流量明显高于其他场次,表明在植被覆盖度相同的情况下,降雨量和土壤前期湿度对径流的产生影响较大; $T_1 \sim T_{18}$ 及 $T_{24} \sim T_{29}$ 场次降雨事件产生的径流量较小且变化不明显,径流深范围为 $0.08 \sim 1.39$ mm,这表明在土壤前期湿度均为 AMC I 的情况下,随着汛期的到来,降雨量的上升对径流深的变化影响不大,考虑是因为研究区植被覆盖程度在此期间呈现逐渐上升的趋势,且在汛期的中后期达到了全年植被覆盖度的最高值,植被截留降雨减小径流的作用随着植被覆盖度的上升而增加。

叠加 29 次径流深计算结果,得到 2019 年径流深分布栅格图见图 9。可以看出,研究区年径流深呈南高北低,西高东低的空间分布特征,径流深范围在 $34.15 \sim 371.52$ mm。结合 ArcGIS 中的分区统计工具计算得出研究区年径流量为 0.53 亿 m^3 ,年

均径流深为 134.52 mm, 各镇年均径流深分别为: 崮云湖街道 93.52 mm, 张夏镇 92.36 mm, 万德镇 72.1 mm。



图 9 崮山流域 2019 年年径流深分布

Fig. 9 Annual runoff distribution of Gushan in 2019

3 结 语

优化后的 SCS-CN 模型在研究区适用性较高, 模型优度拟合确定系数较 Woodward 模型提高了 17.68%, 较标准 SCS-CN 模型提高了 113.08%; E_{NS} 较 Woodward 模型提高了 48.81%, 较标准 SCS-CN 模型提高了 137.59%。

研究区 2019 年各侵蚀性降雨场次产生的径流受到降雨量大小和植被覆盖情况等多方面因素影响, 根据本文的研究成果可以判定降雨量与径流量呈正相关, 植被覆盖程度与径流量呈负相关。

2019 年崮山流域年径流量为 0.53 亿 m^3 , 空间分布上呈现北高南低、东高西低的分布规律, 流域内各行政镇区年均径流深排序为崮云湖街道 > 张夏镇 > 万德镇。

模型优化过程中参数 CN 值的优化是在查表值的基础上得到, 研究区的土壤类型及人工栽培的树种和自然树种等植被类型交错复杂, 接下来研究计划通过建立径流小区并持续观测, 以进一步优化 SCS-CN 模型的参数取值, 提高其在济南市南部山区的应用精确度。

参考文献(References):

[1] 渠勇建, 成向荣, 虞木奎, 等. 基于 SWAT 模型的衢江流域土地利用变化径流模拟研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 130-134. (QU Y J, CHENG X G, YU M K, et al. Study on runoff simulation of land use change

in Qujiang River basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 130-134. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.

- [2] 周铮, 吴剑锋, 杨蕴, 等. 基于 SWAT 模型的北山水库流域地表径流模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 66-73. (ZHOU Z, WU J F, YANG Y, et al. Simulation of surface runoff in Beishan Reservoir basin based on SWAT model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 66-73. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.
- [3] 张冠华, 胡甲均. 径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 144-154. (ZHANG G H, HU J J. Research progress on influencing factors and mechanism of runoff driven soil separation process [J]. Advances in Water Science and Technology, 2019, 30(2): 144-154. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.
- [4] 范彩霞. 改进径流曲线模型在北京地区小流域地表径流计算中的应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. (FAN C X. Application of improved runoff curve model in surface runoff calculation of small watershed in Beijing area[D]. Handan: Hebei University of Technology, 2020. (in Chinese)) DOI: 10.27104/d.cnki.gbjy.
- [5] 刘春春, 刘万青, 王宁, 等. SCS 模型在无资料地区径流模拟估算中的应用: 以清河流域为例[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(12): 56-63. (LIU C C, LIU W Q, WANG N, et al. Application of SCS model in runoff simulation estimation in non-data area: A case study of Qinghe River basin[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(12): 56-63. (in Chinese)) DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.
- [6] 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): 92-96, 103. (BU H, SHAO J, OUYANG S, et al. Application of improved SCS model in Nan Wu River basin, Laos [J]. Yangtze River, 2018, 49(22): 92-96, 103. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.
- [7] 彭云, 王明新, 刘迪, 等. 径流曲线数模型(SCS-CN)在荒漠草原典型小流域山洪计算中的应用分析[J]. 内蒙古水利, 2019, (5): 17-18. (PENG Y, WANG M X, LIU D, et al. Application analysis of runoff curve number model (SCS-CN) in mountain flood calculation of typical small watershed in desert steppe[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2019, (5): 17-18. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: NMSL. 0.
- [8] 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. (LI X C, HE Q N, ZHANG Y J. Improve-

- ment of SCS-CN model and its spatial scale effect[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 64-70, 130. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.
- [9] 崔晓庆,于泉洲,汤庆新,等. 1975—2016年济南市南部山区土地利用及其地形控制特征[J]. 中国水土保持, 2019(8): 51-55, 68. (CUI X Q, YU Q Z, TANG Q X, et al. Land use and topographic control characteristics in the southern mountainous area of Jinan City from 1975 to 2016[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(8): 51-55, 68. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.
- [10] 陈振江,单彪,汪峰. 济南市南部山区水土流失原因分析与建议[J]. 山东水利, 2019, (5): 55-56. (CHEN Z J, SHAN B, WANG F. Analysis and suggestions on causes of soil and water loss in southern mountainous area of Jinan City[J]. Shandong Water Resources, 2019, (5): 55-56. (in Chinese)) DOI:10.16114/j.cnki.sdsl.
- [11] 赵旭. 济南市长清南部山区水文地质环境调查分析[J]. 环境与生活, 2014(5): 97. (ZHAO X. Investigation and analysis of hydrogeological environment in south Changqing mountain area of Jinan City[J]. Environment and Life, 2014(5): 97. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HJYS. 0.
- [12] 杨员. 济南市南部山区典型小流域水土流失特征研究[D]. 济南: 济南大学, 2016. (YANG Y. Study on characteristics of soil and water loss in typical watershed in southern mountainous area of Jinan City[D]. Jinan: University of Jinan, 2016. (in Chinese)) DOI: CNKI;CDMD;2.1016.257871.
- [13] 徐晶. 卧虎山流域气候及土地利用变化对土壤侵蚀的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. (XU J. Study on the effect of climate and land use change on soil erosion in Wuhu Mountain basin[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018. (in Chinese)) DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.
- [14] PSOMIADIS E, SOULIS K X, EFTHIMIOU N. Using SCS-CN and earth observation for the comparative assessment of the hydrological effect of gradual and abrupt spatiotemporal land cover changes[J]. Water, 2020, 12(5): 1386. DOI:10.3390/w12051386.
- [15] AL-GHOBARI H, DEWIDAR A, ALATAWAY A. Estimation of surface water runoff for a semi-arid area using RS and GIS-based SCS-CN method[J]. Water, 2020, 12(7): 1924. DOI:10.3390/w12071924.
- [16] RAO K N. Analysis of surface runoff potential in ungauged basin using basin parameters and SCS-CN method[J]. Applied Water Science, 2020, 10(1): 1-16. DOI:10.1007/s13201-019-1129-z.
- [17] DINKA M O, KLIK A. Temporal and spatial dynamics of surface run-off from Lake Basaka catchment (Ethiopia) using SCS-CN model coupled with remote sensing and GIS[J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2020, 25(2): 167-182. DOI: 10.1111/lre.12313.
- [18] 郑亚运,赵清,黄巧华,等. 济南市南部山区土地利用变化与地形因子关系研究[J]. 水土保持研究, 2016(4): 149-153. (ZHENG Y Y, ZHAO Q, HUANG Q H, et al. Study on the relationship between land use change and topographic factors in southern mountainous area of Jinan City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016(4): 149-153. (in Chinese)). DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.
- [19] 黄兆欢,刘阳,张银雪,等. 淮河上游流域 SCS-CN 模型初损取值与 CN 值确定方法的研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(12): 95-98. (HUANG Z H, LIU Y, ZHANG Y X, et al. Research on SCS-CN model initial loss value and CN value determination method in the upper Huaihe River basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(12): 95-98. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.12.019.
- [20] 颜真梅,母国宏. 基于泰森多边形法的流域面平均雨量计算[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(1): 19-22. (YAN Z M, MU G H. Calculation of average rainfall in watershed area based on Tyson polygon method [J]. Water Science and Technology & Economy, 2017, 23(1): 19-22. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.
- [21] 赵伟,贾新颖,武丽生,等. 宁柏隆地下水漏斗水位变化影响因素分析[J]. 水利规划与设计, 2020, 205(11): 51-55. (ZHAO W, JIA X Y, WU L S, et al. Analysis of influencing factors of groundwater funnel level change in Ningbailong [J]. Water Resources Planning and Design, 2020, 205(11): 51-55. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.
- [22] 李亦然,张兴刚,程甜甜,等. SCS模型在鲁中南低山丘陵区径流估算中的优化及应用评价[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2): 116-124. (LI Y R, ZHANG X G, CHENG T T, et al. Optimization and application evaluation of SCS model in runoff estimation in the hilly region of central and southern Shandong Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, 17(2): 116-124. (in Chinese)) DOI: 10.16843/j.sswc.
- [23] 王红艳,张志强,查同刚,等. 径流曲线数(SCS-CN)模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 71-79. (WANG H Y, ZHANG Z Q, ZHA T G, et al. Improvement of runoff

- curve number (SCS-CN) model for estimating rainfall and runoff in small watershed in the Loess Plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38 (8): 71-79. (in Chinese) DOI:10.13332/j.1000-1522.
- [24] WOODWARD D E, HAWKINS R H, JIANG R, et al. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio [C] // *World Water and Environmental Resources Congress 2003*. 2003. DOI: 10.1061/40685(2003)308.
- [25] HUANG M B, GALLICHAND J, WANG Z L, 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. DOI:10.1002/hyp.5925.

Optimal application of SCS-CN model in runoff estimation in the southern mountainous area of Jinan

ZHAO Dengliang^{1,2}, CHEN Zhenjiang³, LIU Jianhua³, MENG Fanrong⁴, XU Zhenghe¹, SANG Guoqing¹, BIAN Zhen¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Qingdao Water Conservancy Survey and Design Institute Company Limited, Jinan 250013, China; 3. Hydrographic Bureau in Jinan, Jinan 250100, China; 4. Water Resources Department of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: Gushan watershed in the southern mountainous area of Jinan is located in the northern China. Soil erosion is a serious problem, dominated by hydraulic erosion and the ecological environment is fragile. Runoff carrying sediment are intuitive manifestations of soil erosion. The Gushan watershed is a key area for dynamic monitoring of water and soil erosion at the provincial level in Jinan. Complete rainfall and runoff datasets and the parameter optimization of the rainfall-runoff estimation model (runoff curve model (SCS-CN)) can improve the applicability of the model in the watershed and provide technical support and basis for the monitoring and forecasting of soil and water conservation in the region.

Based on multi-source remote sensing technology and ArcGIS 10.7 platform, and according to the principle of the SCS-CN model, comprehensive consideration is given to the soil types in the watershed, the degree of early soil moisture, land use types, and topographic features. Measured rainfall and runoff data of five rainfall stations and one hydrological station in the basin for the past 10 years is selected, and goodness-fitting statistical analysis method and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient verification method are used to determine the initial loss rate (λ) and the number of runoff curves of the model parameters (CN) to carry out optimization test. The rainfall-runoff estimation results of the standard SCS-CN model, Woodward model, and optimized SCS-CN model in the watershed are used to improve the estimation accuracy of rainfall-runoff of the SCS-CN model in the Gushan watershed.

(1) When the value of the model parameter λ is less than 0.06, the runoff simulation result fits well with the measured value. After parameter optimization, λ is selected as 0.05. (2) The runoff curve model is greatly affected by topographical changes in the limestone mountain area. After using CN value slope conversion model, the accuracy of the model is further improved. (3) The optimized model has high accuracy with $K=0.9058$, $R^2=0.8127$, $E_{NS}=0.7969$ which can be better applied to the rainfall-runoff estimation in the Gushan watershed. (4) The rainfall-runoff generation of 29 erosive rainfalls in 2019 is estimated in the Gushan watershed, and the cumulative calculations show that the annual runoff in the watershed is $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$, the annual runoff depth is between 34.15 mm and 371.52 mm, and the average annual runoff depth is 134.52 mm, respectively. The runoff generated by rainfall during the flood season accounts for 90.27% of the annual runoff.

The optimized SCS-CN model has higher applicability in the study area. The model goodness of fit determination coefficient is increased by 17.68% compared with the Woodward model, and is increased by 113.08% compared with the standard SCS-CN model. The Nash efficiency coefficient (E_{NS}) is compared with the Woodward model shows an increase of 48.81%, and 137.59% compared to the standard SCS-CN model. (2) The runoff generated by the various erosive rainfall events in the study area is affected by many factors such as the amount of rainfall and vegetation coverage. Based on research results, it can be determined that rainfall and runoff are positively correlated, and the degree of vegetation coverage and runoff has a negative correlation. (3) The annual runoff of the Gushan watershed was $0.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2019, and the spatial distribution showed a pattern of high in the north and low in the south, high in the east, and low in the west. The order of the average annual runoff depth of each administrative township in the basin is Guyunhu Sub-district > Zhangxia Sub-district > Wande Sub-district. (4) The optimization of the parameter CN value in the model optimization process is obtained based on the look-up table value. The soil type, the artificially cultivated tree species, natural tree species, and other vegetation types are staggered and complicated. The next research plan is to establish a runoff community and to further optimize the parameter values of the SCS-CN model and improve its application accuracy in the southern mountainous area of Jinan.

Key words: runoff curve model; model optimization test; runoff estimation; multi-source remote sensing; southern mountainous area of Jinan