

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.005

徐赞, 吴磊, 吴永祥, 等. SCS-CN 模型改进及其径流预测[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 32-39. (XU Zan, WU Lei, WU Yongxiang, et al. Improvement and runoff prediction of SCS-CN model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 32-39. (in Chinese))

SCS-CN 模型改进及其径流预测

徐 赞¹, 吴 磊², 吴永祥¹, 徐荣嵘¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 黄土高原的土壤侵蚀与水土流失程度都很严重, 对其进行水土流失的预报有着重要的生态意义和经济意义。利用 SCS-CN(soil conservation service curve number)模型进行地表产流预测。针对黄土高原特定的气候及下垫面条件, 以陕西省榆林市绥德韭园沟典型小流域为研究区域, 借助韭园沟流域次降雨径流资料, 优化影响降水产流关系的相应参数(初损率和降雨强度)。结果表明: ①使用反算法来优化初损率, 确定初损率为 0.075, 模型效率系数为 0.208; ②使用 MATLAB 结合粒子群算法来进一步优化初损率, 确定初损率为 0.13, 模型效率系数为 0.504, 相比于反算法提高了 142%, 模型预报精度得到了很大提高; ③在黄土丘陵沟壑区引入雨强因子修正降雨量函数, 改进后模型效率系数为 0.652, 确定性系数为 0.753, 利用雨强修正函数后的 SCS 模型相比于标准 SCS 模型, 确定性系数和模型效率系数分别提高了 101% 和 534%。通过预测流域径流深与实测流域径流深的比较, 模型模拟精度较为理想, 可用于黄土高原不同小流域场次降雨的产流预报。

关 键 词: SCS-CN 模型; 雨强因子; 初损率; 模型改进

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)03-0032-08

黄土高原坐落于中国西北部, 黄土沉积区面积为世界之最, 跨晋陕甘青宁豫六省区, 面积约 40 万 km²。由于植被覆盖减少, 土质疏松, 地形支离破碎, 且降水多以短历时暴雨形式出现, 使其成为世界上土壤侵蚀与水土流失程度最为严重的地域。因此, 以典型小流域为研究对象, 准确估算各类下垫面条件下的地表径流量, 对进行黄土高原水土流失的预报和开展水土保持工程措施有着重要的生态意义和经济意义^[1]。

SCS-CN(soil conservation service curve number)模型于 19 世纪 30 年代由美国农业部水土保持局根据当地环境开发, 目前主要集中于地表径流预测、模型参数改进及与其他模型结合的研究。

(1) 地表径流预测。Karl Auerswald 利用回归法计算 CN 值进行径流预测^[2]。Bhuyan 根据前 5 日降雨量预测前期土壤湿度, 提高 CN 值精度, 并在各种流域中进行径流预报^[3]。张钰娴等根据 50 场实测降雨资料, 研究初损率在合理范围内变化时不同坡度下的径流曲线数值^[4]。李常斌等考虑了土地利用情况下的径流场资料, 对标准 SCS-CN 模型进行推导反推得到 CN 值^[5]。罗利芳等根据陕西安塞 25 个小区实测降雨径流资料, 计算黄土高原不同下垫面条件下的 CN 值, 并分析 CN 值与各影响因子的关系^[6]。这些模型获得的结果较为精确, 但有一定的局限性, 针对不同的流域, 由于水文状况和土壤条件的区别, 这些方法所建立的 CN 值不能适应其他流域。

(2) 模型参数改进。Singh 和 Mishra 考虑蒸散发, 并改进初损估计值方法, 对大尺度的降雨进行估算^[7-8]。Sahu 等考虑雨强与前 5 日降雨量的关系, 改进初损值^[9]。樊登星在北京山区坡面研究土壤侵蚀时

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601703, 2016YFC0401005, 2016YFC0402808); 江苏省水利科技项目(2016046)

作者简介: 徐 赞(1994—), 男, 浙江长兴人, 硕士研究生, 主要从事水文预报研究。E-mail: 1185830101@qq.com

通信作者: 吴 磊(E-mail: lwu@nwsuaf.edu.cn)

利用反算法算得不同土地利用下初损率 λ ,并将前期土壤含水量 M 作为新参数引入模型中,发现改进后的新径流曲线模型(SCS-CN-MS)具有一定适用性^[10]。王白陆根据数理统计原理,利用标准差来优化模型^[11]。范营营等通过径流对有效降雨的积分改进模型^[12]。参数的修正并未解决大尺度流域的地表径流问题。

本次研究区选定为陕西省榆林市绥德城的韭园沟流域,该流域面积为 70.7 km²,测站控制面积达到了 70 km²,两者几近吻合,因此可直接将该测站数据用于整个流域,同时该流域的资料齐全,易获得。韭园沟流域属于陕北地区,是黄土高原中心地带的典型代表,地势特点明显(北高南低,西高东低),水土流失严重。在该流域采用 SCS-CN 模型开展径流模拟与预报研究,对黄土高原区上进行水土流失预报、水土保持措施实施和非点源污染负荷估算有着重要意义。

1 资料与方法介绍

1.1 流域概况及数据

韭园沟地处绥德城东北方向,是位于无定河左岸的一条支沟,全流域面积 70.7 km²,韭园沟测站以上控制面积为 70.1 km²。流域内丘陵起伏,沟壑纵横,主沟纵贯整个流域,全长达 18 km,平均宽度为 3.89 km。5 km 以上的支沟有 10 条,1 km 以上的支沟有 68 条,200 m 以上的支沟有 257 条。沟壑密度 5.34 km/km²。丘陵最上层为黄土层,其次是红土层,而再往下的就是三叠纪的沙岩层。沟底至峁顶相对高差 100~200 m。韭园沟流域土地贫瘠,地形支离破碎,是典型的黄土高原丘陵沟壑区第一副区。

韭园沟流域年均降水量为 450 mm,大部分的降水量集中在 7—9 月,年平均温度 9.3 ℃,绝对最高温度 39 ℃,最低温度 -27 ℃,无霜期 150~180 d,一年中西北风偏多,最大风力 12.5 m/s。本研究共收集了韭园沟流域 1954 年至 1968 年之间的 81 场降雨及其径流数据(其中 1955 年缺测)。

1.2 模型介绍

王英引入雨强因子来修正降雨量函数,结合黄土高原的地表径流大都为超渗产流形式,经过一系列的试验研究后发现修正后的降雨量正相关于最大 30 min 雨强,并给出了一个较为适合黄土地区的降雨量修正函数,通过试验证明该模型的预报精度很高^[13]。降雨量的修正式如下:

$$P_a = (P_y I_{30}/I)^\beta \quad (1)$$

式中: P_a 为修正后降雨量(mm); I_{30} 为次降雨中最大 30 min 的雨强(mm/h); I 为次降雨平均雨强(mm/h); β 为降雨强度修正参数。

将式(1)与标准 SCS-CN 公式相结合,推出基于雨强的下列计算式:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P(I_{30}/\bar{I})^\beta - \lambda S)^2}{P(I_{30}/\bar{I})^\beta + (1 - \lambda)S}, & P(I_{30}/\bar{I})^\beta > I_a \\ 0, & P(I_{30}/\bar{I})^\beta \leq I_a \end{cases} \quad (2)$$

1.3 方法介绍

1.3.1 反算法 所谓反算法(Back Calculation,简称 BC)即将标准 SCS-CN 方程反推,推出以 I_a/S 为结果的形式,而 I_a/S 就是初损率 λ ,反解出的计算式如下:

$$\lambda = (2P - Q - \sqrt{Q^2 + 4QS})/(2S) \quad (3)$$

周淑梅等在黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS 方法研究中对初损率的取值采用反算法和事件分析法优化初损,算得的结果均小于标准初损率 0.2,但事件分析法的计算值略大于反算法,经过误差分析和图形拟合验证后采用反算法得到的结果为 0.1^[14]。樊登星利用改进径流曲线模型(SCS-CN-MS),通过反算法计算大量典型降雨径流事件中不同土地利用条件下的初始损失系数 λ ,引入前期土壤含水量到模型中,并结合前期降雨指数模型(API)来算得前 5 日降雨量,以确定前期的土壤水分;结果表明,改进后的径流曲线模型在北京山区有着较好的适用性^[10]。

1.3.2 验证方法

(1) Nash-Sutcliffe 公式 纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, 简称NSE)可用于水文模型的验证,用 E 来表示计算值(预测径流量)与实际值(实测径流量)的接近程度,公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

式中: Q_i 为实测第 i 场降雨在流域面积上产生的径流深(mm); Q_i^* 为计算获得的第 i 场降雨在流域面积上产生的径流深(mm); $\bar{Q}$ 为所有实测径流深的平均值(mm); n 为总径流次数。

(2) 线性回归方程分析 在 Excel 中模拟预测径流深(Y 轴)与实测径流深(X 轴)的趋势线并与直线 $Y=X$ 作比较。

(3) 最小平方差 任意拟定参数,代入公式获得计算值,将实际值与计算值相减后再平方求和,最小值对应的参数就是所寻求的最优参数。目标函数如下:

$$\text{LSE} = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^*)^2 \quad (5)$$

2 参数的率定与优化

2.1 CN 值的确定

CN 值又称为径流曲线数,可反映地表产流的能力。SCS 模型对 CN 值的精确度要求很高,该参数综合考虑了前期雨量、前期土壤湿度、土地类型、土壤水分下渗率等各个因素,故而在不同的流域所对应的 CN 值有着很大的区别,由此可见,标准 SCS 模型中如何精确地寻找出 CN 值极为重要。本文鉴于黄土高坡较为特殊的地形与气候,参考了符素华等^[15]对 CN 值确定方法的研究方法(平均值法、中值法、算术平均法、S 对数频率曲线法和渐近线法)。

通过符素华等的大量试验数据对 5 种方法的对比分析发现^[15]:从纳什效率系数看,渐近线法有一定的优势;从合格率和相关系数 R 看,算术平均法更有一定依据性。综合比较这两种方法的适用范围、计算量大小等,得出采用算术平均法计算 CN 值相比于其他 4 种方法更为科学合理。

对 51 场长系列降雨径流实测数据进行计算分析获得标准 CN 值为 76.61。韭园沟流域地处陕西省北部,接受日照时间充足,是中国日照高值区之一,年平均日照时长 2 593.5~2 914.4 h。该流域地形错乱,表层覆盖土壤为易受侵蚀的黄绵土,前期土壤湿度较小,AMC 等级被划分为 I 级,对应的径流曲线数为 58.8,即标准 CN 值。相应的潜在最大保持量为 178.1 mm。

2.2 标准 SCS 模型验证

将确定的标准 CN 值回代入标准 SCS 模型进行回归分析:选用 1963 年至 1968 年 29 场实测降雨数据,对参数率定后的标准模型进行验证(λ 取为标准值 0.2, S 取 178.1)(图 1)。模型验证发现,纳什效率系数为负,而这表明了实测值的平均值相对于模型的预报值在进行径流量估算时有着更好的效果。试验数据得到的趋势线斜率为 0.244,截距为 -0.078,明显可见预测值远小于实际值,结果对比见图 1。上述两种验证方法校验的结果不理想,归根结底,症结在于 λ 取 0.2 过大,使得大部分系列资料中的降水的初期损失量 I_a 大于降雨量 P ,导致预测径流量默认为 0。在 29 组数据中,有 24 组的预测径流深为 0,目前的 SCS 模型并不能准确预报径流,因此适当修正初损率 λ 变得尤为关键。

国外学者 Ponce, Hawkins 等研究发现 λ 的取值一般在 0~0.3,而 Woodward 也同样是认为 λ 取值小于

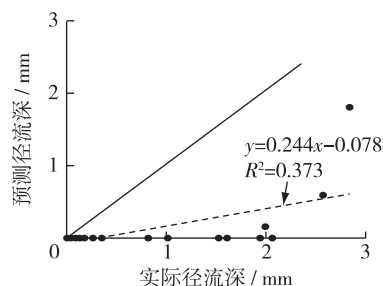


图 1 标准 SCS 模型实测值与径流值对比

Fig. 1 Comparison of measured and predicted runoff values of standard SCS model

0.2 的概率高达 90%。通过国内外学者们的大量研究也证实了 50% 左右的降雨事件初损率 λ 的取值范围为 0.095~0.380^[15]。

3 初损率 λ 的率定与优化

3.1 反算法优化模型参数及验证

本次研究采用反算法,拟选定了韭园沟流域 1954—1964 年间的 51 场降雨事件。已知潜在最大保持量 S 为 178.1 mm,结合 51 组 P - Q 数据并代入计算式(3),即可算得 51 组结果。将这一系列数据进行排序后取中值为 0.075,即优化后的 λ 值取 0.075。

选定 1963 年至 1968 年 29 场实测降雨径流数据,代入初损率优化后的 SCS 模型进行模型检验, λ 取为标准值 0.075,CN 值取 58.8, S 取 178.1。利用纳什公式进行效率验证,发现算得纳什效率系数 E 为 0.208,尽管改进后的模型效率已变为正,但是这样的模型预报精度仍需进一步优化。将实测径流深与预测径流深拟定回归方程,分析结果:斜率为 1.585,截距为 -0.046,明显看出预测值已超出于实际值;相关系数的平方 R^2 达到了 0.899,远高于之前的 0.374,说明实测值与预测值的相关程度有了很大的提高。对比结果见图 2。综上所述两种验证方法校验的结果,反算法优化参数使得模型精度有所提高,但模型效率 E 还待提高。

3.2 MATLAB 粒子群优化算法

3.2.1 MATLAB 粒子群算法优化 λ LSE(最小平方差)是把 n 场降雨径流资料里的实测值与预测值的差值平方后再累积而得。LSE 愈小,则预测值愈接近实测值,模型的模拟度则愈高。利用 MATLAB 编程过程分为两个部分:①计算出每个初损率 λ 下每场降雨的径流预测值 $Q(i)$ 以及对应这一系列数据的一个最小平方差 LSE;②找出所有 LSE 中最小的值,并给出对应的 λ 。

本研究以 LSE 作为目标函数,以找到当 LSE 最小时对应的参数 λ ,该 λ 即为符合韭园沟流域的最优初损率 λ 。将流域 1954—1964 年间的 51 场实测降雨径流资料导入 MATLAB,并转成 mat 文件。通过 MATLAB 软件粒子群优化算法,输出 λ 为 0.13,LSE 为 30.04。

3.2.2 利用 MATLAB 优化后 SCS 模型的验证 选定 1963 年至 1968 年 29 场实测降雨径流数据,代入初损率优化后的 SCS 模型中, λ 取为标准值 0.13。利用纳什公式进行效率验证,发现算得纳什效率系数 E 为 0.504,通过采用 MATLAB 优化初损率后,模型的纳什有效系数与上次优化后相比,又有了明显的提高,此时的模型已具有一定的预报径流能力。将实测径流深与预测径流深拟定回归方程,分析结果得斜率为 0.958,截距为 -0.212,这表明预测径流深已非常接近于实际径流深;而相关系数的平方 R^2 虽然有所减小,但这对模型整体精度并没有多大的影响。对比结果见图 3。综上所述两种验证方法校验的结果,采用 MATLAB 粒子群算法优化参数使得模型精度提高很多。在黄土高原小流域或小区域中,针对不同地区的降雨、土地类型、土壤质地、植被覆盖等因子各有不同,利用 SCS 模型估算径流时,需要根据当地适应性评价,重新拟定初损率 λ 。

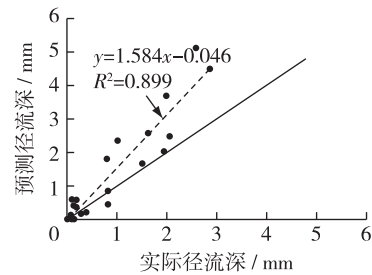


图2 反算法改进 SCS 模型实测值与径流值对比

Fig. 2 Comparison of measured and predicted runoff values of improved SCS model by black calculation

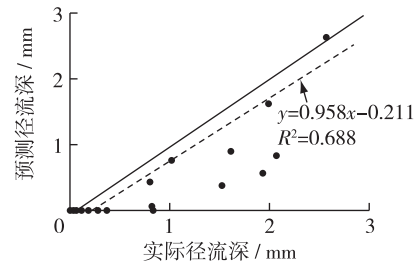


图3 利用 MATLAB 粒子群优化算法改进 SCS 模型实测值与预报值对比

Fig. 3 Comparison of measured and predicted runoff values of improved SCS model by using MATLAB particle swarm optimization algorithm

3.3 方法对比

标准 SCS-CN 模型在预报径流时,因 λ 的率定不够精确,模型效率为负,其次未考虑前期土壤湿度在黄土高坡上对模型的影响。因此在资料充足的前提下,需探讨黄土高原丘陵沟壑区的符合该模型的前期土壤湿度等级划分标准;而通过反算法改进的 SCS 方法,模型效率提高到 0.208,但其预报的径流深却已经高于实际的径流深;最后通过 MATLAB 来改进 SCS-CN 模型对小降水产流事件的预报能力显著提高,回归方程的斜率也已无限接近 1,但模型效率 E 为 0.504,相比之前的方法已经提高很多,但这还不是最理想的。3 种径流模型的对比分析见表 1。

表 1 韭园沟流域 3 种径流预报模型的分析比较
Tab. 1 Comparison of three runoff forecast models for Jiuyuangou watershed

方法	初损率 λ	线性回归			效率 E
		斜率	截距	R_2	
标准 SCS 方法	0.200	0.244	-0.079	0.374	-0.150
反算法改进的 SCS 方法	0.075	1.585	-0.046	0.899	0.208
MATLAB 改进的 SCS 方法	0.130	0.958	-0.212	0.688	0.504

4 引入雨强因子修正径流曲线法

陕西黄土高原地区属于干旱、半干旱气候带,地下水埋深较深,植被稀疏,水土流失严重,气候较干旱,降水集中且少,地面产流主要以超渗产流的形式存在。为了提高 SCS 模型精度,需引入雨强因子来修正降雨量函数。从 20 世纪 50 年代开始,对于黄土高坡上的降雨特征的研究就已经开始。吴发启等^[16]研究发现各类组合指标 $P_{30}I_{30}$ 与对黄土高原缓坡耕地上的降雨、产流、产沙的表征更为恰当。

选用 1954 年至 1963 年的韭园沟重点雨量站汛期降水量摘录表上的 44 场符合要求的降雨。将重点雨量站汛期降水量摘录表的小时段及其相应的降水量采用雨强过程线的积分,可由逐时段的雨量沿时程累加求得;各时段的雨量可由累积雨量过程线差分得到,除以相应的时段长,得各时段雨强,从而绘出降雨强度过程线。在累积雨量过程线上取时段长度为 30 min,找到在这些时段中降雨量增加量最大的一段,即为 I_{30} 。采用累积雨量过程线法转化出 I_{30} 。

4.1 利用 MATLAB 粒子群优化算法改进函数

4.1.1 MATLAB 粒子群优化算法率定 λ, β 选择 1954 年至 1963 年的 44 组数据,其中包括雨量、径流深、最大 30 min 雨强和平均雨强。以最小平方差作为目标函数,将雨量、径流深和 $I_a/\bar{I}$ 这 3 组数据导入 MATLAB 转化成 mat 文件。通过粒子群优化算法,算出最优初损率 λ 为 0.10,雨强修正参数 β 为 -0.084, LSE 为 25.546。

4.1.2 改进后函数的验证 基于雨强因子修正降雨量后改进的 SCS 模型,在各个方面都要优于之前仅仅改进了初损率 λ 的那些模型。选定 1963 年至 1968 年 33 场符合要求实测降雨径流数据,代入基于雨强因子修正降雨量后改进的 SCS 模型中, λ 取为标准值 0.10,雨强修正系数 β 为 0.084。利用纳什公式进行效率验证,发现算得纳什效率系数 E 提高到 0.652,通过采用 MATLAB 粒子群优化算法优化初损率和雨强修正系数后,模型的纳什有效系数与上次优化后相比,又有了明显的提高,此时的模型预报径流的能力已经成熟。将实测径流深与预测径流深拟定回归方程,分析结果得:斜率为 0.953,截距为 -0.153,回归方程的斜率基本已接近 1,而相关系数的平方 R^2 相比于仅优化 λ 时也有了一定提升,此时可以认为预报径流量等于实际径流量。对比结果见图 4。无论是纳什公式,还是回归方程分析,这两种验证方法对改进后的新函数的验证效果都很好,改进后的 SCS 模型函数在黄土高原地区的径流深预报精度很高。

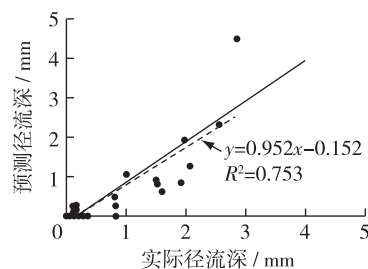


图 4 基于雨强改进后模型径流实测值与预报值的对比
Fig. 4 Comparison of measured and predicted values of runoff based on improved rainfall intensity

4.2 敏感性分析

4.2.1 降雨产流对雨强修正系数 β 的敏感性 假定 $S=60, \lambda=0.1, I_{30}/\bar{I}=3$, 改变 β 的取值, 在每个 β 值下, 降雨的取值范围在 $0 \sim 160$ mm, 径流深随着降雨量的变化而变化, 最终形成一簇光滑曲线。在 β 分别为 $-0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5, -0.8$ 和 -1.0 时, 得到的径流曲线见图 5(a): 在相同降雨量的情况下, 随着 β 值的增大, 地表产流径流深也随之变大。

4.2.2 降雨产流对潜在最大保持量 S 的敏感性 假定 $\lambda=0.1, \beta=-0.1, I_{30}/\bar{I}=3$, 改变 S 的取值, 分别为 $0, 10, 40, 80, 100, 150$ 和 300 mm, 绘出在每个 S 值下的降水径流曲线(见图 5(b))。由图 5(b)可得: 在相同降雨量的情况下, 随着 S 值的增大, 地表产流径流深也随之变大; 当 $S=0$ mm 时, 初损量 I_a 为 0 , 此时径流深与降雨量呈一次线性关系, 并且该直线经过坐标原点 $(0, 0)$; 随着 S 的增大, 径流深变化率也越来越小。

4.2.3 降雨产流对 $I_{30}/\bar{I}$ 的敏感性 假定 $S=60, \beta=-0.1, \lambda=0.1$ 的前提下, 改变 $I_{30}/\bar{I}$ 的取值为 $1, 2, 4, 6, 8, 10$ 和 12 , 绘出径流深关于降雨量的一簇曲线(见图 5(c))。由图 5(c)可得: 在相同降雨量的情况下, 随着最大 30 min 雨强与平均雨强两者的比值的增大, 地表产流量愈来愈少; 两者比值越小, 径流量随降雨量的变化率却越大, 反之则越小。

4.2.4 降雨产流对初损率 λ 的敏感性 假定 $S=60, \beta=-0.1, I_{30}/\bar{I}=3$ 的前提下, 改变初损率 λ 的取值分别为 $0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40$ 和 0.70 , 绘制径流深关于降雨量的一簇光滑曲线(见图 5(d))。由图 5(d)可得: 在相同降雨量的情况下, 随着初损率 λ 的增大, 地表径流逐渐减小; 在小降雨事件中, 随着初损率的增大, 地表径流为 0 的可能性也就越大。

5 结 语

径流曲线法所含参数少, 便于计算, 适用于缺乏资料的地区, 本次研究将该方法用于黄土高原地区韭园沟流域, 通过对 SCS-CN 模型的改进, 得到如下结论:

(1) 由于前期土壤湿润程度、土壤下渗率等数据获得困难, 本研究采用算术平均法来确定最终标准 CN 值为 58.8 , 但由于默认标准初损率 0.2 过大, 使得大部分的小降雨事件中地表产流预报值小于实际值。尝试使用反算法来优化初损率, 确定 λ 为 0.075 , 但此时模型效率只有 0.208 。采用 MATLAB 软件结合粒子群算法来进一步优化初损率, 结果 λ 为 0.13 , 模型效率为 0.504 , 相比于反算法提高了 142% 。

(2) 考虑到黄土高原上的降雨形式一般以短历时、高强度形式, 而标准 SCS-CN 模型并未考虑到这一点, 函数中并不存在雨强参数, 故参考王英等在黄土丘陵沟壑区引入雨强因子修正降雨量函数之后, 得到韭园沟流域的最终 SCS 模型, 其中 β 为 $-0.084, \lambda$ 为 0.1 。

模型效率为 0.652 , 决定系数为 0.753 , 利用雨强修正函数后的 SCS 模型相比于标准 SCS 模型, 决定系数

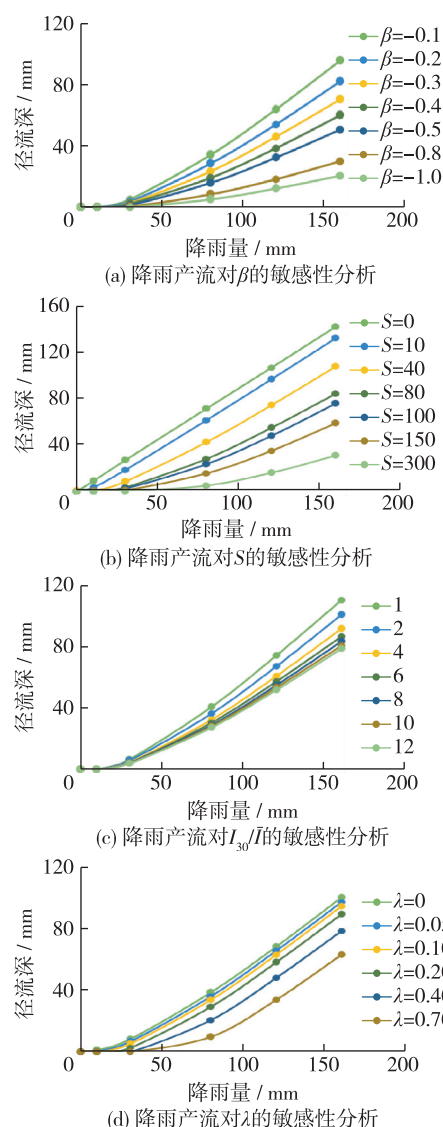


图 5 降雨产流的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of rainfall runoff

R^2 和模型效率 E 分别提高了 101%和 534%。

对改进后的降雨径流函数进行敏感性分析发现:①在相同降雨量的情况下,随着 β 值的增大,地表产流径流深也随之变大;在参数 β 变幅为 $\pm 10\%$ 的前提下,敏感性系数可达到 1.68,影响显著。②在相同降雨量的情况下,随着 S 值的增大,地表产流径流深也随之变大;当 $S=0$ 时,初损量 I_a 为 0,此时径流深与降雨量呈一次线性关系,并且该直线经过坐标原点(0,0);当 $S=300$ 时,径流深随降雨的变化很小;随着 S 的增大,径流深的变化率变小;一般 CN 取值为 30~100,所以潜在最大保持量 S 取值范围很大,敏感系数在其变化范围内并不稳定。③在相同降雨量的情况下,随着最大 30 min 雨强与平均雨强两者比值的增大,地表产流量愈来愈少;两者比值越小,径流量随降雨量的变化率却越大,反之则越小;该参数对降雨产流影响较小。④在相同降雨量的情况下,随着初损率 λ 的增大,地表径流逐渐减小;在小降雨事件中,随着初损率的增大,地表径流为 0 的可能性也就越大。

参 考 文 献:

- [1] 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 Hongyan, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al. Improvement of rainfall runoff in small watershed of Loess Plateau by using SCS-CN model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 71-79. (in Chinese))
- [2] AUERSWALD K, HAIDER J. Runoff curve numbers for small grain under german cropping conditions [J]. Journal of Environmental Management, 1996, 47(3): 223-228.
- [3] MANKIN K R, KOELIKER J K, BHUYAN S J. Watershed-scale AMC selection for hydrologic model[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 303-310.
- [4] 张钰娴, 穆兴民, 王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区中的率定[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(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, 26(5): 124-128. (in Chinese))
- [5] 李常斌, 秦将为, 李金标. 计算 CN 值及其在黄土高原典型流域降雨-径流模拟中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 67-70. (LI Changbin, QIN Jiangwei, LI Jinbiao. Application of computational curve number to precipitation-runoff simulation in a typical watershed in Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(8): 67-70. (in Chinese))
- [6] 罗利芳, 张科利, 符素华. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 58-61. (LUO Lifang, ZHANG Keli, FU Suhua. Application of runoff curve number method on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(3): 58-61. (in Chinese))
- [7] MISHRA S K, JAIN M K, BHUNYA P K, et al. Field applicability of the SCS-CN based Mishra-Singh general model and its variants[J]. Water Resources Management, 2005, 19(1): 37-62.
- [8] MISHRA S K, PANDEY R P, JAIN M K, et al. A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN procedure for long duration rainfall-runoff events[J]. Water Resources Management, 2008, 22(7): 861-876.
- [9] SAHU R K, MISHRA S K, ELODHO T I, et al. A modification to the initial abstraction in the existing SCS-CN methodology incorporating storm duration and antecedent rainfall[J]. Recent Advances in Water Resources Development and Management, 2005: 697-704.
- [10] 樊登星. 北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. (FAN Dengxing. Study on soil erosion response characteristics and model simulation of slope in Beijing mountain area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese))
- [11] 王白陆. SCS 产流模型的改进[J]. 人民黄河, 2005, 27(5): 24-26. (WANG Bailu. Improvement of SCS runoff model[J]. Yellow River, 2005, 27(5): 24-26. (in Chinese))
- [12] 范营营, 胡铁松. SCS-CN 模型的改进及在澎家滩流域的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009(12): 11-14. (FAN Yingying, HU Tiesong. The improvement of SCS-CN model and its application in Pengjiatan watershed[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(12): 11-14. (in Chinese))
- [13] 王英. 径流曲线法(SCS-CN)的改进及其在黄土高原的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环

- 境研究中心), 2008. (WANG Ying. Improvement of runoff curve method and its application in Loess Plateau[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Ministry of Education), 2008. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421. (FU Suhua, WANG Xiangliang, WANG Hongye, et al. Method of determining CN value in the SCS-CN method[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 415-421. (in Chinese))
- [16] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正, 等. 黄土高原南部缓坡耕地降雨与侵蚀的关系[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 53-60. (WU Faqi, ZHAO Xiaoguang, LIU Bingzheng, et al. Relation between rainfall and soil erosion in the gentle slope land in the south part of loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 53-60. (in Chinese))

Improvement and runoff prediction of SCS-CN model

XU Zan¹, WU Lei², WU Yongxiang¹, XU Rongrong¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The Loess Plateau is one of the regions with the most severe water loss and soil erosion, which has the important ecological and economic significance for the prediction of the soil and water loss in the region. Integrating such factors as the climate, early soil moisture, soil type, and underlying surface, and featuring advantages of easy calculation, few parameters and easy access to the data needed, the SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) has been extensively applied in the prediction of the surface runoff yield in the small watershed. Considering the specific climate and underlying surface of the Loess Plateau, the typical small watershed of Jiuyuangou, Suide County, Yulin, Shanxi Province was taken as the study region, then by virtue of rainfall runoff data in the Jiuyuangou area, the corresponding parameters (initial abstraction rate and rainfall intensity) affecting the runoff generation relation of the rainfall were optimized. The result showed that: ①The optimization of initial abstraction rate was conducted by use of the back-calculation method to confirm that λ was 0.075 and the coefficient of efficiency for the model was 0.208; ②The further optimization of initial abstraction rate was conducted by using MATLAB combined with the particle swarm optimization, and it was confirmed that λ was 0.13 and the coefficient of efficiency for the model was 0.504, increasing by 142% compared with the back-calculation method; and the prediction accuracy of this model was greatly improved; ③The factors of rainfall intensity were introduced in the loess hilly and gully region for the amendment of rainfall function, and after the improvement, the coefficient of efficiency for the model was 0.652 and the deterministic coefficient was 0.753. Compared with the standard SCS model, after the use of the modification function of rainfall intensity the deterministic coefficient R^2 and the coefficient of efficiency of the model were increased by 101% and 534%, respectively. The comparison between the predicted and the measured runoff depths in the watershed shows that the simulated accuracy for the model is relatively ideal, and the model can be used for the prediction of the runoff generation of the rainfall in different small watersheds of the Loess Plateau.

Key words: SCS-CN model; factors of rainfall intensity; initial abstraction rate; model improvement