

# 模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定

邓景成<sup>1</sup>, 高 鹏<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 赵广举<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>, 田 鹏<sup>1,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 资环学院, 陕西 杨凌 712100))

**摘 要:**开展径流模拟的相关研究,是进行土壤侵蚀预报和水土流失防治的重要基础。SCS 模型是较为常用的一种径流计算模型。模型中的两个参数初损率  $\lambda$  和径流曲线数 CN 对于模型准确计算地表径流有重要意义。通过对杨青川流域 22 场不同土地利用类型人工模拟降雨资料,应用穷举法对该地区运用 SCS 模型时初损率和径流曲线数进行了率定。结果表明:(1)在黄土区,运用标准 SCS 模型模拟人工降雨条件下的径流深有较大误差,且模拟值均偏小 1.1~3 mm。(2)初损率  $\lambda$  和径流曲线数 CN 都是模型的敏感性参数,且  $\lambda$  值敏感性更高。(3)运用穷举法的方式进行了各参数的率定后,得到在草地类型,SCS 模型最适宜的初损率为 0.13,径流曲线数为 65;裸地类型最适宜的初损率为 0.03,径流曲线数为 83。优化后的模型能更好地模拟径流深,均方根误差、相对误差均显著减小,纳什系数有显著增大,能为该地区关于地表径流的模拟计算提供理论参考,具有重要意义。

**关键词:**SCS 模型; 初损率; 径流曲线数; 参数率定; 黄土高原

中图分类号:S715.55

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0205-06

## Study on Calibrating Parameters of SCS Model in Loess Area Under Simulated Rainfall

DENG Jingcheng<sup>1</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2</sup>, SUN Wenyi<sup>1,2</sup>, Tian Peng<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University,

Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3. Resources and Environmental Science College, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;)

**Abstract:** The study on runoff simulation is an important basis for the prediction and control of soil and water losses and soil erosion. The SCS model is a commonly used model of runoff calculation. The two parameters in the model, initial loss rates  $\lambda$  and runoff curve number CN, are important for the model to calculate the surface runoff accurately. By artificial simulated rainfall data of 22 different land use types in Yangqingchuan river basin, the initial loss rate and runoff curve number of the SCS model in this area were verified by using the method of exhaustion. The results show that: (1) the simulated runoff depth by SCS model under artificial rainfall is very large, and the simulation value is 1.1~3 mm larger than the measured value in the loess area; (2) the initial loss rate and the runoff curve number are the sensitivity parameters of the model and the sensitivity of  $\lambda$  is higher. (3) the optimal initial loss rate was 0.13, and the runoff curve number was 65 in the grassland; the optimum initial loss rate is 0.03, and the runoff curve is 83 in the bare land. The optimized model can better simulate the depth of runoff, RMSE and Re decrease significantly, and the Nash coefficient increases significantly.

**Keywords:** SCS model; initial loss rates; runoff curve number; parameter calibration

收稿日期:2017-10-25

修回日期:2017-11-18

资助项目:十三五国家重点研发计划“黄土高原水土流失综合治理技术及示范”(2016YFC0501707);中国科学院西部之光一般面上项目“延河流域水土保持措施抵御极端灾害性暴雨能力的研究”;国家自然科学基金面上项目“渭河流域水土流失对土地利用/覆被变化的尺度响应与模拟研究”(41371277)

第一作者:邓景成(1993—),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向为流域生态水文和水土保持。E-mail:djc18821714915@163.com

通信作者:高鹏(1976—),男,陕西宝鸡人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事水土保持和流域生态水文。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

水资源短缺、水土流失等问题因其关系人类生存发展备受社会关注,而暴雨形成的超渗产流是黄土区水土流失的主要动力来源,因此,开展径流模拟的相关研究,是进行土壤侵蚀预报和水土流失防治的重要基础。SCS 模型<sup>[1]</sup>是美国农业部水土保持局研制的用于计算给定降雨条件下一定区域地表径流的经验模型,因其结构简单,仅需一个反映地理和气候因子—初损率  $\lambda$  和一个反映土壤型、土地利用/覆被状况以及前期土壤湿度的参数—径流曲线数  $CN$ <sup>[2-3]</sup>,被广泛应用于许多国家的流域水文模型<sup>[4-5]</sup>。SCS 模型中初损雨量与流域最大入渗量的比值定义为初损率,取值范围为 0.095~0.38,通常取标准值 0.2<sup>[2,6]</sup>。近年来许多研究表明不同地区初损率取标准值时模型模拟精度不能满足实际应用。Shi 等<sup>[7]</sup>运用事件分析法对中国三峡库区王家沟小流域初损率进行了率定修正,发现流域初损率变化在 0.01~0.015 4,选用 0.05 为初损率模拟效果最佳。Woodward 等<sup>[8]</sup>通过分析美国 23 个州 307 个小流域 28 301 次降雨事件观测数据发现,不同流域以及同一流域不同降雨事件初损率取值均不同,且小于标准值。不同区域,初损率  $\lambda$  取值会有所差异,甚至是同一地区不同坡度等级也有差异<sup>[9]</sup>。因此,许多学者在应用 SCS 模型时都对初损率  $\lambda$  进行了修正<sup>[4,9-13]</sup>。

径流曲线数  $CN$  值由美国土壤保持局提供的  $CN$  查值表得到,由于黄土区土壤水文条件、土地利用方式等与美国地区的差异,在运用查值表时有效性受到影响<sup>[14]</sup>。 $CN$  值是 SCS 模型中一个重要的参数,对径流计算结果影响很大。Boughton<sup>[15]</sup>的流域试验研究表明  $CN$  值变化  $\pm 10\%$  就会引起径流量计算变化  $+55\%$  和  $-45\%$ ,因此  $CN$  取值对于准确计算区域地表径流量有重要意义。关于黄土区 SCS 模型参数的率定进行了许多研究,张钰娟等<sup>[9]</sup>通过分析黄土区 62 场实测降雨资料对初损率  $\lambda$  进行了定量分析,结果表明,标准值 0.2 仅适用于黄土丘陵缓坡地,随坡度增大  $\lambda$  相应减小。周淑梅等<sup>[10]</sup>的研究也表明黄土区桥子西沟小流域初损率为 0.1 时模拟效果更好。尽管针对黄土区 SCS 模型的修正已有许多研究,但关于不同土地利用类型在运用 SCS 模型时的研究较少。本文通过杨青川流域进行的 22 场人工模拟降雨资料,分别对草地和裸地在运用 SCS 模型模拟径流深进行了初损率  $\lambda$  和径流曲线数  $CN$  的率定。

## 1 基本原理

SCS-CN 模型是基于水分平衡方程

$$p = I_a + F + Q \quad (1)$$

两个基本假设:一是假设流域内实际径流量( $Q$ )与可能最大径流量的比值等于实际入渗量( $F$ )和流域最大入渗量( $S$ ):

$$\text{即 } \frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

二是假设初损量( $I_a$ )与流域最大入渗量( $S$ )成比例:

$$\text{即 } I_a = \lambda S \quad (3)$$

(1),(2),(3) 解得:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

式中: $P$  表示流域内总降水量(mm); $I_a$  表示初损雨量(mm); $Q$  表示流域内实际径流量  $F$  表示流域实际入渗量(mm); $S$  表示流域最大入渗量(mm); $\lambda$  为初损系数,是一个区域参数,其数值主要取决于地理和气候因子,取值范围为  $0.095 \leq \lambda \leq 0.38$ ;  $\lambda$  值的大小是影响模型产流模拟的重要因子,标准值取 0.2。流域最大入渗量  $S$  通过以下公式计算:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

$CN$  值是一个反映土地利用、土壤类型、水文条件和前期土壤湿度的综合性指标,范围在 0~100。SCS 模型根据土壤最小下渗率和土壤质地,将流域水文土壤类型划分为 A,B,C,D 共 4 类,入渗能力依次降低。在一定的水文类型,覆盖类型和管理方式下,水文条件好,土壤一般产流能力低,通常根据样方的植被密度和地表残余物覆盖度来估计。前期土壤湿度由降雨前 5 d 累计降雨量确定即前期降水指数 API(Antecedent Precipitation Index),分为 AMC I(干旱)、AMC II(正常)和 AMC III(湿润)3 种状态,分别对应  $CN_1, CN_2, CN_3$ 。用户可根据研究区的土壤类型、土地利用和土壤湿度状况由查值表获取  $CN$  值。基于美国的植被状况、土壤类型、产流机制与我国的差异,在应用 SCS-CN 模型时要根据研究地的实际情况对  $CN$  值进行修正。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

研究区位于距陕西省延安市吴起县城南 20 km 左右的杨青川流域,坐标为东经  $107^{\circ}52'47''$ ,北纬  $37^{\circ}2'49''$ ,杨青川流域属半干旱温带大陆性季风气候,地貌属黄土高原丘陵沟壑区。流域内成土母质为黄土,土壤以黄绵土为主,土壤颗粒以细砂粒和粉粒为主(80%左右),土壤容重为  $1.23 \text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度 55%~60%,最小入渗率 5.0 mm/h,属于 B 类土壤。试验共设草

地、裸地两种样地,草覆盖度大约为 55%。试验小区详细立地条件见表 1。试验采用两侧对喷式降雨装置模拟人工降雨。喷头高度大约为 6 m。通过更换喷头出水孔的孔径来调整降雨强度。降雨装置受风的影响较大,因此选择在清晨 5:00—6:00 进行试验,以减小风对试验结果的影响。试验时间安排在 2015 年 8 月 19 日至 9 月 26 日,属于植被生长期。降雨前用烘干法测定的土壤前期含水量结果为:0—50 cm

平均含水量为  $20.45\pm0.13\%$ ;0—100 cm 平均含水量为  $17.18\pm0.14\%$ ,综合小区的前期降雨影响,确定土壤前期湿度等级为 AMCⅢ级。试验在草地和裸地 4 个小区间轮流进行,尽量避免试验过程中对草地的人为扰动,裸地小区采取翻晒、整平处理。小区沿对角线布设 3 个翻斗式自计雨量筒,记录每次试验的降雨量。降雨时,记录产流开始时间,定时用塑料桶采集径流泥沙样,时间间隔为 1 min。

表 1 模拟降雨径流小区布设情况

| 小区类型 | 规格/m | 坡度/(°) | 小区描述          | 盖度/% | 水文土壤类型 | 植被类型        |
|------|------|--------|---------------|------|--------|-------------|
| 草地   | 5×1  | 12/25  | 封禁草地          | 55   | B      | 长芒草、铁杆蒿、狗尾草 |
| 裸地   | 5×1  | 12/25  | 翻耕深度 30 cm 左右 | 0    | B      | 无           |

2.2 标准 SCS 模型径流模拟

取标准初损率  $\lambda=0.2$ ,则初损雨量  $I_a=0.2S$ 。前期对试验地含水量测定确定属于 AMCⅢ等级,Huang 等<sup>[13]</sup>的研究表明在黄土高原地区应用 SCS 模型时应对 CN 值进行坡度修正,根据公式(6)和(7),结合土地利用方式和土壤类型等级选用  $CN_2$  进行坡度修正。依据表 2 查算得试验小区草地和裸地的  $CN_2$  值分别为 65,82。运用公式(6)对  $CN_2$  进行坡度修正得到  $CN_2'$ ,再利用公式(7)计算出前期湿度

AMCⅢ条件下的径流曲线数  $CN_3'$ 。最后用公式(4)和(5)计算出初损率为标准值 0.2 时得到的模拟径流深。

$$CN_2'=CN_2\frac{322.79+15.63a}{a+323.52}$$

(6)

$$CN_3'=\frac{23CN_2'}{10+0.138CN_2'}$$

(7)

式中: $CN_2$ 、 $CN_3$ 为 AMCⅡ;AMCⅢ条件下的径流曲线数; $CN_2'$ 、 $CN_3'$ 为坡度修正后的径流曲线数; $a$ 为坡度百分比(%)。

表 2 不同湿度等级下不同土壤类型和土地利用类型 CN 值<sup>[16]</sup>

| 土地利用<br>类型 | A  |    |    | B  |    |    | C  |    |    | D  |    |    |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|            | I  | Ⅱ  | Ⅲ  | I  | Ⅱ  | Ⅲ  | I  | Ⅱ  | Ⅲ  | I  | Ⅱ  | Ⅲ  |
| 林地         | 22 | 30 | 48 | 32 | 56 | 66 | 48 | 73 | 80 | 53 | 81 | 86 |
| 草地         | 30 | 39 | 55 | 42 | 65 | 79 | 57 | 78 | 86 | 64 | 89 | 93 |
| 耕地         | 47 | 67 | 85 | 56 | 76 | 90 | 70 | 83 | 93 | 77 | 86 | 96 |
| 水域         | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| 建设用地       | 69 | 75 | 88 | 70 | 84 | 94 | 77 | 90 | 96 | 81 | 91 | 98 |
| 裸地         | 53 | 72 | 88 | 67 | 82 | 94 | 76 | 86 | 96 | 79 | 90 | 97 |

2.3 参数敏感性分析

参数率定的目的是进行敏感性参数的率定。所以,参数率定前必须对模型参数进行敏感性分析。初损率  $\lambda$  和径流曲线数 CN 是 SCS 模型中的两个重要参数。本文选 2 个坡度下的草地各一场实测降雨资料,通过固定模型其中一个参数,改变另一个参数的方法,对参数  $\lambda$  和 CN 进行敏感性分析,并通过弹性系数比较两个参数敏感性强弱,定义为径流变化率与某一参数变化率的比值。弹性系数绝对值越大表明参数敏感性越强。

$$\epsilon_i=\frac{\Delta Q}{\Delta i}$$

(8)

式中: $\epsilon_i$ 表示参数的弹性系数; $i$ 表示参数初损率和径流曲线数; $\Delta Q$ 表示模拟径流变化率; $\Delta i$ 表示参数变化率。

3 结果与分析

3.1  $\lambda$  取标准值时模拟径流深与实测径流深比较

根据 SCS 标准模型,取  $\lambda=0.2$ ,模拟计算草地的 12 场降雨和裸地的 10 场的径流深,结果见图 1。从图中可以看出,草地和裸地模拟计算得到的径流深均小于实测径流深,两者的决定系数  $R^2$  分别达到了 0.98,0.97,表明根据 SCS 模型模拟的径流深就相关性和变化趋势而言,效果较好。计算均方根误差 RMSE 和相对误差 RE,草地分别为 2.21,23.9%,裸地为 5.41,17.51%,表明模拟值相较于实测值有相似的变化趋势,但误差量较大。图 2 反映了模拟径流深与实测径流深的比值图,由图可看出比值偏离 1:1 线较大,离散程度较高,且均位于直线下方,表明模拟径流深相比实测径流深偏小。模拟值均偏小说明,根据模

型计算过程中,初损雨量取值较大,即 $I_a=\lambda S$ 中的 $\lambda$ 取值偏大,导致模拟的径流深偏小。因此标准的 SCS 模型不能准确预测黄土区的坡面产流过程。针对模型的相关参数进行适当修正优化尤为重要。

3.2 参数敏感性分析

对参数 $\lambda$ 进行敏感性分析时, $\lambda$ 取值范围为 0.095~0.38,取 $\lambda=0.10,0.13,0.16,0.19,0.22,0.25,0.28,0.31,0.34,0.37$  计算模拟径流深;对参数 CN 进行敏感性分析时,固定参数 $\lambda$ (标准值 0.2),CN 值以 1 为步长,取 CN=

60,61,62,...,70 计算模拟径流深。图 3 显示了在不同坡度条件下,模拟径流深随参数 $\lambda$ 和 CN 的变化关系,初损率 $\lambda$ 增大 0.03,模拟径流深相应减少 11%~41%;CN 值增大 1,模拟径流深增大 5%~11%,计算不同坡度下弹性系数得 $\epsilon_\lambda=-5.2,-4.8,\epsilon_{CN}=2.73,3.41$ ,比较弹性系数绝对值发现径流深对初损率 $\lambda$ 的反应比较敏感,对 CN 值敏感性次之,但也表现出较强的敏感性。因此,模型中的两个参数都是敏感性参数,需要进行适当的修正率定。

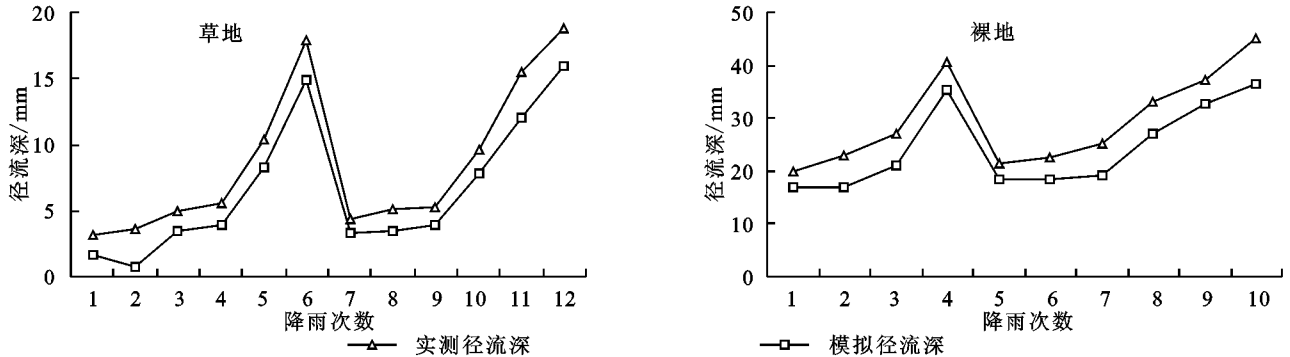


图 1 草地和裸地模拟径流深与实测径流深比较

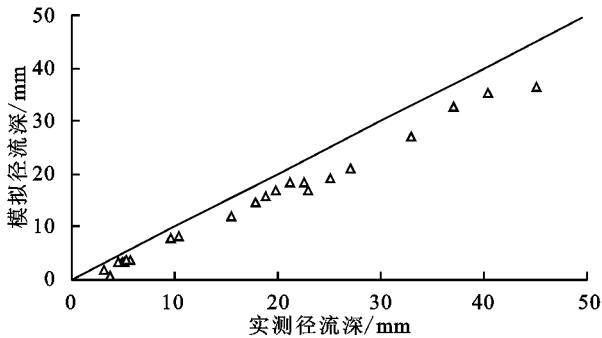


图 2 初损率取标准值时模拟径流深与实测径流深比较

3.3 初损率 $\lambda$ 的优化率定

对初损率 $\lambda$ 率定时,参数 CN 值按标准 SCS 模型取值,即草地和裸地分别为 65,82,然后对 $\lambda$ 进行优化。 $\lambda$ 取值范围为 0.095~0.38,以 0.01 为步长,依次代入公式(4)计算径流量模拟值,以均方根误差 RMSE、相对误差 RE 和纳什系数 NSE 作为评价指标。表 3 列了 $\lambda$ 取部分值时计算的各评价指标,从表

中可以看出对草地而言,当 $\lambda$ 取 0.15 时, RMSE, RE 最小,相比于取标准值 0.2, RMSE 由 2.21 减小为 0.87, RE 由 23.9%减小为 7.16%,纳什系数 NSE 也由 83.5%提高为 97.42%;裸地则是在 0.05 时, RMSE, RE 最小,为 1.98, 5.49%, NSE 最大为 94.51%,经过优化修正得到草地初损率取 0.13,裸地取 0.03 时效果最好。将经过修正后的 $\lambda$ 代入公式(4)计算地表径流,与实测径流深作比较(图 4),草地其均方根误差 RMSE 减小为 0.68,相对误差 RE 减小为 5.69%,纳什系数增大为 98.45%;裸地其均方根误差 RMSE 减小为 1.69,相对误差 RE 减小为 4.68%,纳什系数 NSE 增大为 95.99%。优化 $\lambda$ 后模拟的模拟精度显著提高,这表明了在黄土丘陵沟壑区应用标准 SCS 模型进行径流估算时,由于土壤性质、土地利用类型和气候条件等的差异,必须对初损率 $\lambda$ 进行区域适用性评价,以得到适宜于研究区域的 $\lambda$ 值。

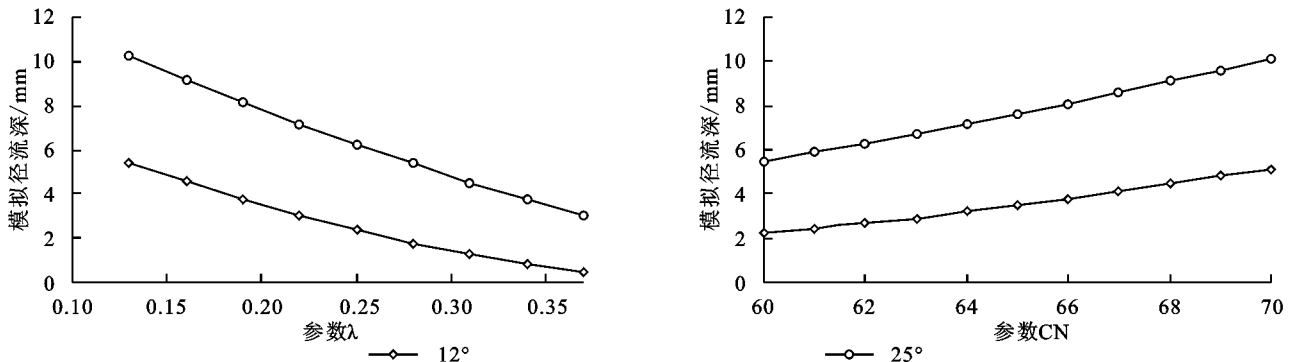


图 3 参数敏感性分析

3.4 径流曲线数 CN 的优化率定

CN 值也是影响模型模拟径流深的敏感性参数。为了进一步提高模型的精度,在草地和裸地 $\lambda$ 分别取 0.13,0.03 的基础上,以 1 为步长对径流曲线数 CN 值进行优化,同样以 RMSE,RE 和 NSE 作为评价指标,得到草地和裸地 CN 取值为 65,83。草地经过 RMSE,RE 和 NSE 判定发现原值 65 在计算模拟径流深时效果最好,裸地则取 83 模拟效果更好,均方根误差 RMSE 由 1.69 减小为 1.50,相对误差 RE 减小为 4.31,纳什系数 NSE 更高为 96.83%。裸地优化 CN 值后模拟径流深与实测径流深比较见图 5。从图 6 可以看出,与参数率定前比较,标定后的模拟值更

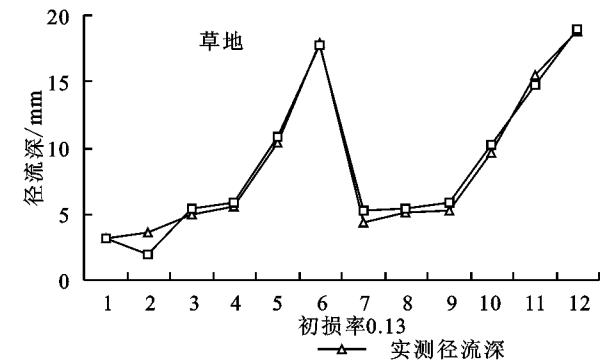


图 4 优化  $\lambda$  后的草地和裸地模拟径流深与实测径流深比较

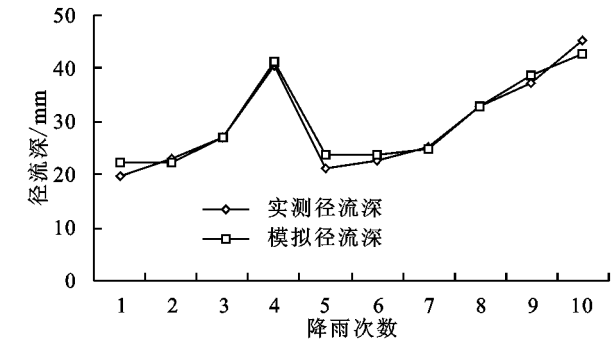


图 5 CN 值修正后裸地实测径流深与模拟径流深比较

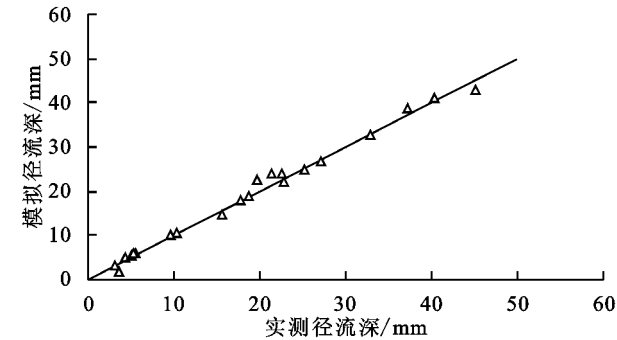


图 6  $\lambda$  与 CN 修正之后模拟径流深与实测径流深

4 结论与讨论

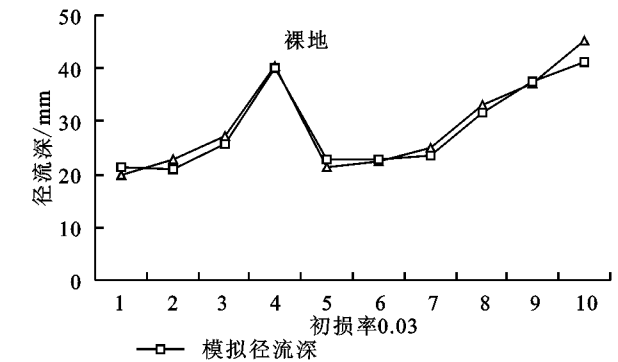
4.1 讨论

关于 SCS 模型在不同地区适用性问题已有许多学者进行了大量研究<sup>[4,9,10,12]</sup>。但一般都通过分析实

靠近 1 : 1 线,其离散程度显著降低。表明标定后的模型更适合预测本地区的降雨资料。

表 3 参数  $\lambda$  取不同值时草地和裸地各评价指标

| $\lambda$ 取值 | 草地   |       |       | 裸地   |       |       |
|--------------|------|-------|-------|------|-------|-------|
|              | RMSE | RE/%  | NSE   | RMSE | RE/%  | NSE   |
| 0.05         | 2.96 | 32.20 | 0.70  | 1.98 | 5.49  | 0.95  |
| 0.1          | 1.30 | 14.31 | 0.94  | 3.00 | 8.66  | 0.87  |
| 0.15         | 0.87 | 7.16  | 0.97  | 4.18 | 13.11 | 0.75  |
| 0.2          | 2.21 | 23.90 | 0.83  | 5.41 | 17.51 | 0.59  |
| 0.25         | 3.59 | 39.41 | 0.57  | 6.65 | 21.86 | 0.38  |
| 0.3          | 4.85 | 53.00 | 0.21  | 7.89 | 26.16 | 0.13  |
| 0.35         | 5.96 | 64.40 | -0.20 | 9.12 | 30.41 | -0.17 |



测降雨资料进行研究<sup>[9,14]</sup>,考虑到野外收集降雨径流资料的困难与误差性,本文则通过人工模拟降雨试验,严格控制试验参数,相对增加了所测数据的准确性以及试验结果的可靠性。同时本次研究对 SCS 模型的两个控制参数初损率和径流曲线数都进行了敏感性分析以及参数率定,使得模型模拟结果与实测值拟合程度更高,进一步增加了模型在试验样地的适用性。由于试验经费以及试验操作的复杂性,使得样地只能局限于研究流域的部分可操作区域,对于流域其他土地利用类型的应用无法确定,因此大尺度模型的改进与应用尚须进一步研究。

4.2 结论

- (1) 在黄土区,运用标准 SCS 模型模拟人工降雨条件下的径流深有较大误差,且模拟值均偏小 1.1~3 mm。
- (2) 选用两个坡度下的两场草地降雨资料,进行 SCS 模型参数的敏感性分析可知,初损率 $\lambda$ 和径流曲线数 CN 都是模型的敏感性参数,且 $\lambda$ 值敏感性更高。
- (3) 运用穷举法的方式进行各参数的率定后,得到在草地中,SCS 模型最适宜的初损率为 0.13,径流曲线数为 65;裸地中最适宜的初损率为 0.03,径流曲线数为 83。优化后的模型能更好地模拟径流深,均方根误差、相对误差均显著减小,纳什系数有显著增大。

## 参考文献:

- [1] Mockus V. Estimation of direct runoff from storm rainfall; National engineering handbook. soil conservation service[M]. US Dept. , 1972.
- [2] Kliment Z, Kadlec J, Langhammer J. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models[J]. Catena, 2008,73(3):286-299.
- [3] Tyagi J V, Mishra S K, Singh R, et al. SCS-CN based time-distributed sediment yield model[J]. Journal of Hydrology, 2008,352(3/4):388-403.
- [4] 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.
- [5] Tyagi J V, Mishra S K, Singh R, et al. SCS-CN based time-distributed sediment yield model[J]. Journal of Hydrology, 2008,352(3):388-403.
- [6] Bhuyan S J, Mankin K R, Koelliker J K. Watershed-scale AMC selection for hydrologic modeling[J]. Transactions of the Asae, 2003,46(2):303-310.
- [7] Shi Zhihua, Chen Liding, Fang Nufang, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2009,77(1):1-7.
- [8] Woodward D E, Hawkins R H, Jiang R, et al. Runoff curve number method;examination of the initial abstraction ratio [C] // World Water & Environmental Resources Congress 2003,2003;1-10.
- [9] 张钰炯,穆兴民,王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 $\lambda$ 在黄土丘陵区的率定[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):124-128.
- [10] 周淑梅,雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-C 方法初损率取值研究[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4240-4247.
- [11] 孙立堂,曹升乐,陈继光,等. 改进的 SCS 模型产流参数在小清河流域的率定[J]. 人民黄河,2008,30(5):33-34.
- [12] 王英,黄明斌. 径流曲线法模型参数在黄土地区的优化研究[J]. 水土保持通报,2008,28(1):54-58.
- [13] Huang M, Gallichand J, Wang Z, 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.
- [14] 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.
- [15] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Soil Research, 1989,27(3):511-523.
- [16] 蒋观滔. 基于 SWAT 模型的北洛河上游土地利用/覆被变化水沙响应研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.

~~~~~

(上接第 204 页)

- [11] 陈丽华,张艺,余新晓,等. 北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟[J]. 北京林业大学学报,2013,21(3):423-431.
- [12] 李振新,欧阳志云,郑华,等. 岷江上游两种生态系统降雨分配的比较[J]. 植物生态学报,2006,30(5):723-731.
- [13] 刘艳丽,王全九,杨婷,等. 植物叶片截留特征分析[J]. 水土保持研究,2015,22(4):143-147,154.
- [14] 徐天乐,朱教君,于立忠,等. 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质[J]. 生态学报,2013,33(11):3415-3424.
- [15] 石小亮,张颖,单永娟,等. 云南省高原典型森林植被涵养水源功能研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(8):1366-1372.
- [16] 张东,邵社刚,赵辉. 晋西黄土丘陵沟壑区主要人工林枯落物水文特性研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(5):97-101,110.
- [17] 鲍乾,梁建发,王棋,等. 花江喀斯特石漠化区不同经济型植物的土壤蓄水特征[J]. 水土保持研究,2017,24(1):18-24.
- [18] 潘春翔,李裕元,彭亿,等. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J]. 生态学报,2012,32(2):0538-0547.
- [19] 李建军,张会儒,熊志祥,等. 水源涵养林健康评价指标系统的结构解析[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(7):19-26.
- [20] 王威,郑小贤,宁杨翠. 北京山区水源涵养林典型森林类型结构特征研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(1):60-63.