

不同坡度黄土微地形条件下 SCS-CN 模型参数研究

张鑫, 张青峰, 周阳阳, 刘金龙

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:基于自然降雨数据研究径流曲线数(SCS-CN)模型参数难以排除坡度的干扰,从而影响模型计算径流量的精度。为了准确探究黄土微地形条件下不同坡度(5° , 15° , 25°)对模型的初损率(λ)和径流曲线系数(CN)的影响及其变化规律,从而为后续 SCS-CN 模型参数研究提供科学依据和优化径流预测模型。通过开展人工降雨试验(90 mm/h 雨强、人工掏挖耕作),探究黄土微地形不同坡度下 SCS-CN 模型的 λ 值和 CN 值。结果表明 5° 坡度下, $\lambda=0.2$, CN=75.58 时模拟效果最佳; 15° 坡度下, $\lambda=0.15$, CN=77.28 时模拟效果最佳; 25° 坡度下, $\lambda=0.1$, CN=72.91 时模型的模拟效果最佳。 $\lambda=0.2$ 这一标准参数值不能满足不同坡度条件下的径流模拟,且随着坡度增加呈现显著的递减趋势。

关键词:黄土微地形; SCS-CN 模型; λ 值; CN 值

中图分类号: P481; TV121⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0074-04

SCS-CN Parameter Determination Using Rainfall-Runoff Data on Microtopographic Surfaces of Different Gradient Loess Slopes

ZHANG Xin, ZHANG Qingfeng, ZHOU Yangyang, LIU Jinlong

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The most popular hydrological models are based on the Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) model for its simplicity. If using data obtained in natural rainfall events, the effect of slope gradient will be significant as the model is parameterized that way, which may interfere with calculating runoff in the events. This work tries to explore the influence of slope gradients (5° , 15° and 25°) on initial abstraction rate λ and curve number (CN) and their evolution in the events on the loess slope surface under microtopographic conditions, which can prepare ground for future SCS-CN parameterization research and for runoff prediction modeling in the related fields. A laboratory rainfall experiment (rainfall intensity at 90 mm/h and slope surfaces tilled by manual hoeing and digging) was carried out to determine appropriate values of λ and CN for a SCS-CN model. The results showed that the model provided the most appropriate values of λ and CN and prediction for runoff volume which fit measured rainfall-runoff data when the model determined that $\lambda=0.2$, CN=75.58 at 5° ; $\lambda=0.15$, CN=77.28 at 15° and $\lambda=0.1$, CN=72.91 at 25° . It was also found that the standard parameter $\lambda=0.2$ alone could not verify runoff prediction modeling at different slope gradients and a more appropriate value tended to decrease when the slope gradient increased.

Keywords: microtopographic surface on a loess slope; SCS-CN model; λ value; CN value

水资源是人类社会发展的基础要素。受水资源自然禀赋和经济发展阶段性影响,我国黄土高原正面临着突出的水资源问题^[1]。作为描述水资源分布和配置的一个重要指标^[2],地表径流是引起坡面水土流失的主要动力。寻求有效途径对降雨径流进行科学

预测,是黄土高原水土保持工作的一项基础内容。目前,常见的径流计算方法,如 Philip 入渗曲线、Green-Ampt 入渗曲线以及 Horton 入渗曲线等均需要大量的参数且不易获取^[3],而美国农业部水土保持局开发研制的小流域水文模型(SCS-CN, Soil Conservation

Service Cure Number) 结构简单, 所需参数相对较少, 可操作性高, 适用性广泛且其模拟结果准确度高, 是一种较好的计算降雨径流量的方法^[4-5]。因此, 该模型引起了国内外专家和学者的重视, 并在我国得到了广泛的应用研究。

SCS-CN 模型最初是针对洪水和暴雨设计的^[6], 对于降雨间隔不超过 1 h 的非连续性降雨其模型模拟结果不受到影响, 而超过 1 h, 土壤渗透能力恢复, 前期土壤湿度条件改变, 则需要重新率定 CN 值^[7]。 λ 值与 CN 相关, 在实际应用和计算过程中, 国内外大多学者直接应用美国水土保持局分析提出的 $\lambda = 0.2$ 来研究^[8], 然而由于地域差异, 模型应用于不同地区时仍需要在这两个参数进行修正和率定, 且雨强、坡度、植被类型和盖度、土地利用方式、土壤前期含水量等因素对径流量有一定影响^[9], 进而影响模型参数。Elhassanin 等^[10]研究表明坡度增加, 产流增加。张兴奇等^[11]利用 SCS-CN 模型进行坡面产流模拟, 研究表明喀斯特地区的模型参数 λ 取值多为 0.01, 0.05 远小于 0.2, 且 CN 值随着坡度的增加呈减少的趋势。陈正维等^[12]利用不同坡度降雨产流的实测数据, 确定 $6.5^\circ \sim 25^\circ$ 坡度下 CN 值为依次为 78.23, 78.45, 78.77, 79.11, 79.47。为进一步明确不同坡度微地形条件下 SCS-CN 模型参数的取值, 使微地形条件下 SCS-CN 模型试验结果更加精确, 本研究基于室内人工降雨模拟试验, 探究一定雨强、土壤类型和土地利用方式条件下不同坡度的最优 λ 值与 CN 值, 便于更为精准地进行径流模拟, 从而为黄土高原径流量的准确预测提供科学支撑, 并为水资源的有效利用提供依据。

1 材料与数据来源

1.1 研究区概况

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验土壤选择陕西省杨凌区坡耕地表层瘠土 (0—20 cm)。杨凌区 ($107.56^\circ \sim 108.08^\circ \text{E}$, $34.14^\circ \sim 34.20^\circ \text{N}$) 位于陕西黄土高原南部、关中平原西部, 全区总面积 135 km^2 , 地势总体呈现北高南低, 西高东低, 属于温带半湿润大陆性季风气候, 降雨分布不均, 多集中在夏秋季, 强度大且多暴雨、阵雨, 年均温为 13°C , 平均降水量 637 mm 。

1.2 试验设计

2015 年 6 月进行 90 mm/h 雨强下 3 个典型坡度 ($5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$) 的降雨模拟试验。试验槽规格为 2.0 m

$\times 1.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 可在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 之间调节。侵蚀槽底部排水口设计为 V 形, 便于收集径流量。下喷式降雨喷头距地面 16 m , 降雨均匀度大于 80% , 使得模拟降雨可以满足实际所有雨滴到达地面的速度并能替代自然降雨的雨滴直径和分布。

土样采集后风干过 $\phi 5 \text{ mm}$ 筛后分层填装在侵蚀槽中, 土壤容重保持在 1.30 g/cm^3 左右, 土壤含水率为 10% , 并确保土壤结构的均匀性和连续性。土地利用方式为裸地。为确保试验更接近自然状况, 分层填装后由长期从事农业劳作的人员布设黄土区常见的人工掏挖 (AD, artificial digging; 从坡底逐渐向坡顶锄挖, 形成在空间上不称的凹凸相间的洼地) 耕作措施。

分别设置 3 个重复对照试验。每个试验降雨历时 50 min 。

1.3 数据收集

在径流产生后每隔 30 s 收集径流, 称重、静置、分离上部清液后, 将泥沙样品放置于 105°C 的烘箱内烘干, 再次称重, 用于计算径流量; 取 3 次试验的平均值作为实测径流量。前 25 min 实测径流数据用于参数 λ 和 CN 值的率定, 后 25 min 内系统随机选取径流数据用于验证模型的模拟效果。

2 模型概况与参数率定

2.1 SCS-CN 模型原理

SCS-CN 模型是用于估算无资料地区径流量的经验模型。该模型的核心方程是基于实际径流量与最大可能径流量之比等于实际蓄水量与最大可能蓄水量 (或蓄水容量) 之比的假定基础上建立的, 即:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_e} \quad (1)$$

式中: F 为实际蓄水量 (mm); S 为最大可能蓄水量 (mm); Q 为实际径流量 (mm); P_e 为最大可能径流量 (mm); 根据水量平衡原理, 最大可能径流量等于降雨量 (P ; mm) 与初损 (I_a , 径流产生前植物截留、入渗、填注等造成的损失水量; mm) 的差值, 实际蓄水量 F 等于最大可能径流量 P_e 与实际径流量 Q 的差值, 即:

$$P_e = P - I_a \quad (2)$$

$$F = P - I_a - Q \quad (3)$$

将公式 (2) 和 (3) 代入 (1), 可得:

$$\begin{aligned} \text{当 } P \geq \lambda S \text{ 时, } Q &= \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \\ \text{当 } P < \lambda S \text{ 时, } Q &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 参数 λ 和 CN 值的确定

美国水土保持局通过大量试验分析得出 I_a 与 S

之间有一定的比例关系,即:

$$I_a = \lambda S \quad (5)$$

式中: λ 是一个区域系数,表示初损量与最大可能蓄水量之间的比值,受到地质和天气的影响。

根据公式(1)~(5)可以推导出公式(6),即 S 与 λ 以及降雨径流的关系:

$$S = \frac{1}{\lambda} \left\{ \left[P + (1-\lambda) \frac{Q}{2\lambda} \right] - \left[\frac{(1-\lambda)^2 Q}{4\lambda^2} + \frac{PQ}{\lambda} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

尽管很多学者直接应用 $\lambda=0.2$ 这一标准值来研究 SCS-CN 模型,但我国大多数地区的气候、土壤、地形等与美国不同,使用 $\lambda=0.2$ 标准值来计算我国的径流会必然会造成一定的误差。研究表明,不同土壤水文条件下 λ 变化范围通常在 $0.00 \sim 0.30$ ^[13]。为此,本研究在 $0.00 \sim 0.30$ 等间距选取 6 个不同的 λ 值,探求不同坡度下的最佳 λ 值。

由于 S 值的变化范围很大且不利于取值,因此引入无因次参数径流曲线数 CN 进行推算。 CN 是与土壤类型和土地利用方式密切相关的一种无量纲径流系数, $CN \in [0, 100]$,推算公式为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

将等距选取的 6 个 λ 值,分别代入公式(6)求得不同 λ 值所对应的 S ,然后根据公式(7)并利用算术平均值法^[14]推出该 λ 值对应的 CN 值,再将各 λ 值及其对应的 CN 值代入模型计算径流,将计算径流量与实测径流量比较,以确定 90 mm/h 下黄土高原南部地区人工开挖裸地条件下不同坡度的最佳 λ 值和 CN 值。

2.3 有效性检验

选择纳什效率系数作为模型最佳参数的选择依据。纳什效率系数(E_f)是由 Nash 等在 1970 年提出的用于评价计算值与实测值的接近程度^[15]。 E_f 的取值为 $(-\infty, 1)$, E_f 越接近 1 说明模型的有效性越好,其表达式为:

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_c)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (8)$$

3 结果与分析

由前 25 min 的降雨—径流资料,根据公式(6)、(7)并结合算术平均值法得到 λ 从 $0.05 \sim 0.3$ 各个值对应的 CN 值;将各 λ 值所对应的 CN 值用于后 25 min 内径流的计算,根据公式(8)得到模型模拟径流量的纳什效率系数(表 1)。

表 1 SCS-CN 模型参数及纳什效率系数

λ	5°		15°		25°	
	CN	E_f	CN	E_f	CN	E_f
0.05	60.10	-6.07	66.78	0.59	67.32	0.73
0.10	67.49	-1.67	73.22	0.91	72.91	0.96
0.15	72.21	0.41	77.28	0.96	76.62	0.95
0.20	75.58	0.99	80.14	0.90	79.31	0.85
0.25	78.13	0.68	82.30	0.78	81.38	0.70
0.30	80.15	-0.12	83.99	0.62	83.03	0.52

由表 1 可知,在 90 mm/h 雨强、人工开挖裸地条件下,5°坡面的 $\lambda=0.2$ 时所对应的 CN 值为 75.58, E_f 接近 1,计算径流量与实测径流量越接近。因此,5°坡时 SCS-CN 模型的最佳 λ 值和 CN 值分别为 0.2, 75.58。同理,15°坡时最佳 λ 值和 CN 值分别为 0.15, 77.28, 25°坡时最佳 λ 值和 CN 值分别 0.1, 72.91。模型率定参数结果与国内外模型相关学科研究者提供的参数取值范围一致^[13]。张钰娴等^[16]研究表明参数 λ 对坡度的变化有较高的敏感性,且 $\lambda=0.2$ 适合于 5°~10°的坡地。如表 1 所示,结果随着坡度的增加, λ 最佳取值分别为 0.2, 0.15, 0.1, 说明在 SCS-CN 模型中 λ 的取值随着坡度的增加有减少的趋势,这与张钰娴等^[16]的研究结果相类似,说明本文关于最佳参数取值的研究结果是合理的。

为进一步检验模型参数率定结果的合理性,在 5°, 15°和 25°坡面下分别在后 25 min 模拟降雨中随机选取 20 组降雨—径流实测值,将实测径流量与不同坡度对应的最佳参数模拟出的径流量进行比较,采用标准均方根误差、相对误差和相关系数进行参数合理性评价。标准均方根误差对极端值比较敏感,相对误差能反映计算径流量的可信程度,相对误差小于等于实测径流量的 20% 为许可误差。相关系数可以反映计算径流量与实测径流量之间的相关程度,相关系数绝对值越接近 1,表示实测径流量与计算径流量越接近,相关系数的绝对值越接近 0,表示误差越大,结果见图 1。

由图 1 可知,5°, 15°, 25°坡面分别在选取了最佳 λ 和 CN 取值的情况下,由 SCS-CN 模型计算的径流量与实测径流量非常接近。其中,在 5°坡下计算径流量与实测径流量的标准均方根误差为 0.04,相关系数为 0.998, 15°坡下标准均方根误差为 0.05,相关系数为 0.998, 25°坡下标准均方根误差为 0.05,相关系数为 0.995。不同坡度径流计算相对误差均在允许误差 20% 以内,由此可知,在不同坡度下模型最佳参数的模拟精度较高。

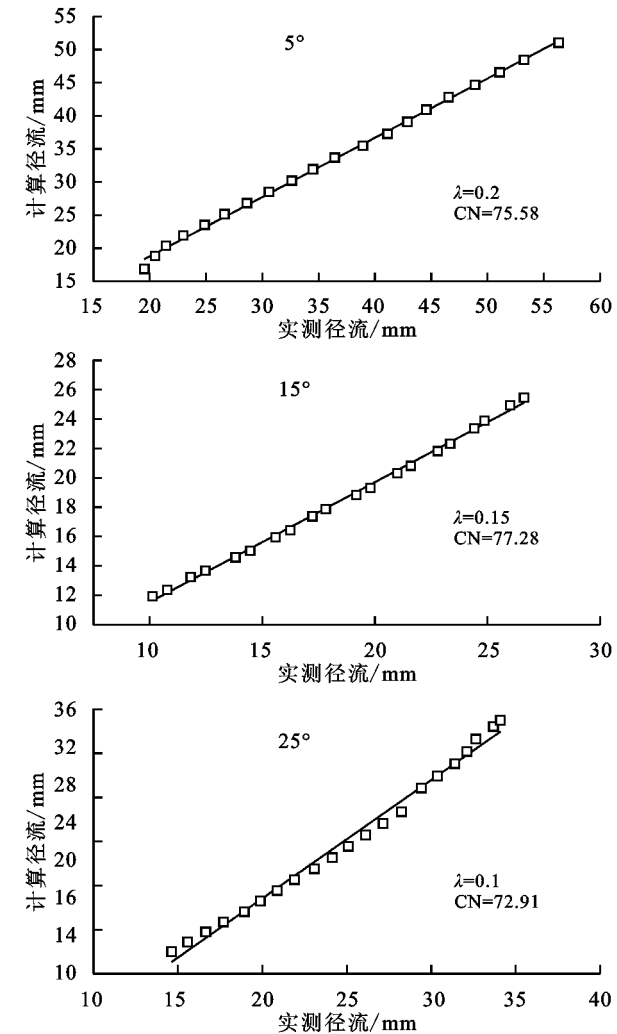


图 1 不同坡度计算径流与实测径流关系

4 结论

目前大多研究者对 SCS-CN 模型参数影响因素进行研究时并未限制唯一变量,因此其结论需要进一步考证,而本试验采取人工降雨的方法排除其他因子的干扰,提高了黄土微地形条件下坡度对模型参数影响结论的可靠性,为后续模型参数研究提供科学依据。

根据试验结果大致可知,当坡地较缓时, λ 值更接近于标准值 0.2,这与美国水土保持局的结果相一致,而当坡度改变时, $\lambda=0.2$ 这一标准值则不再适用于模型模拟径流, λ 值需要重新率定。本文采用降雨模拟试验研究模型参数,为 SCS-CN 模型参数率定提供了新的研究思路,为后续模型研究提供参考。该结论可用于黄土高原地区不同坡度降雨—径流量估算,而对于不同雨强、土壤类型和土地利用方式条件下模型参数的取值,仍需要进一步研究率定。

参考文献:

[1] 王浩,王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):352-358,331.

[2] 常丹东,王礼先. 水土保持对黄河年径流量影响研究[J]. 水利规划与设计,2005(S4):37-42.

[3] 符素华,王红叶,王向亮,等. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J]. 地理研究,2013,32(5):797-807.

[4] Zhang A, Fu G, Wang B, et al. Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China[J]. Water Resources Management, 2012,26(8):2199-2217.

[5] 周翠宁,任树梅,闫美俊. 曲线数值法(SCS 模型)在北京温榆河流域降雨—径流关系中的应用研究[J]. 农业工程学报,2008,24(3):87-90.

[6] 刘兰岚. 降雨产流计算中径流曲线法(SCS 模型)局限性的探讨[J]. 环境科学与管理,2013,38(5):64-68.

[7] Mishra S K, Singh V P. SCS-CN Method[M]// Soil Conservation Service Curve Number(SCS-CN) Methodology. Springer Netherlands, 2003.

[8] 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.

[9] 黄明斌,郑世清,李玉山. 流域尺度不同水保措施减水效益分割[J]. 水土保持通报,2001,21(2):4-7.

[10] Elhassanin A S, Labib T M, Gaber E I. Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of Burundi[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1993,43(3/4):301-308.

[11] 张兴奇,徐鹏程,顾璟冉. SCS 模型在贵州省毕节市石桥小流域坡面产流模拟中的应用[J]. 水土保持通报,2017,37(3):321-328,333.

[12] 陈正维,刘兴年,朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土地径流预测[J]. 农业工程学报,2014,30(7):72-81.

[13] Bosznay M. Generalization of SCS curve number method[J]. Irrig. and Drain. Engineer, Asce, 1989,115(1):139-144.

[14] 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.

[15] 何杨洋,王晓燕,段淑怀. 密云水库上游流域径流曲线模型的参数修订[J]. 水土保持学报,2016,30(6):134-138.

[16] 张钰娴,穆兴民,王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区率定[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):124-128.