

黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型SCS-CN模型研究

刘鑫雨¹, 肖玉玲², 邹伟婷¹, 信忠保¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林丰源生态环境规划设计院有限公司,北京 100089)

摘要: [目的] 揭示黄土高原丘陵沟壑区第三副区不同土地利用类型和降雨条件下的产流潜力及其影响因素。[方法] 基于甘肃省天水市罗玉沟试验场17个标准径流小区2011—2020年的实地观测数据,通过优化适用于当地的不同土地利用和降雨事件的 λ 值和CN值来率定标准SCS-CN模型,从而更准确地模拟黄土丘陵沟壑区的产流。[结果] 1)林地、草地、农地和裸地的最优初损率(λ 值)分别为0.17、0.16、0.25和0.36,最优径流曲线数(CN值)分别为56、55、67和74,2个参数均随土壤渗透率的增大而减小。2)最优初损率(λ 值)随降雨量的增大而增大,4个地类的径流曲线数(CN值)随降雨量的增大逐渐趋近于60。3)从林草到农地和裸地的转变中, λ 值随降雨历时和降雨量的增加而增大;CN值与降雨历时、降雨量、场次平均雨强和径流深均呈负相关。[结论] 考虑到不同坡度、不同降雨量的复杂性,参数优化后的SCS-CN模型精度显著提升,但对于其他土壤类型和坡长的地块来说,模型参数需要进一步检验和优化,以适用于更广泛的区域。

关键词: SCS-CN; 径流曲线数(CN); 初损率(λ); 土地利用类型; 降雨量

中图分类号: S157.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0166-09

Study on SCS-CN Model for Different Land Use Types in Loess Hilly-Gully Region

LIU Xinyu¹, XIAO Yuling², ZOU Weiting¹, XIN Zhongbao¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Beijing Greensource Environment Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: [Objective] To reveal the runoff potential and its influencing factors under different land use types and rainfall conditions in the third subregion of the hilly-gully region of the Loess Plateau. [Methods] Based on field observation data from 17 standard runoff plots at the Luoyugou experimental site in Tianshui City, Gansu Province from 2011 to 2020, the standard SCS-CN model was calibrated by optimizing the λ and CN values for different local land use types and rainfall events, thereby enabling more accurate simulation of runoff in the loess hilly-gully region. [Results] 1) The optimal initial abstraction ratio (λ) values for forest land, grassland, agricultural land, and bare land were 0.17, 0.16, 0.25, and 0.36, respectively, and the optimal curve number (CN) values were 56, 55, 67, and 74, respectively. Both parameters decreased with increasing soil infiltration rate. 2) The optimal λ value increased with increasing rainfall, and the CN values for the four land use types gradually approached 60 as rainfall amounts increased. 3) During the conversion from forest land and grassland to agricultural land and bare land, the λ value increased with rainfall duration and rainfall amount. The CN value was negatively correlated with rainfall duration, rainfall amount, mean rainfall intensity per event, and runoff depth. [Conclusion] The study considers the complexity of different slopes and rainfall amounts. The SCS-CN model shows significantly improved accuracy after parameter optimization. However, for plots with other soil types and slope lengths, further verification and optimization of the model parameters may be required to ensure its applicability across broader regions.

收稿日期: 2025-04-05

修回日期: 2025-05-27

录用日期: 2025-06-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243231, 42177319)

第一作者: 刘鑫雨(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: liuxinyulv@163.com

通信作者: 信忠保(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Keywords: SCS-CN; curve number (CN); initial abstraction ratio (λ); land use type; rainfall

Received: 2025-04-05

Revised: 2025-05-27

Accepted: 2025-06-13

Online(www.cnki.net): 2025-10-09

黄土高原丘陵区第三副区地处陇中东南部,是渭河及其较大支流等的发源地,以侵蚀地貌为主,是黄土高原侵蚀比较严重的地区之一^[1]。该地的土地利用变化、植被重建和生态工程建设显著改变流域下垫面特征,导致流域水文过程机制发生变化^[2]。径流曲线数法(SCS-CN模型)由美国农业部水土保持局提出,作为一种常用的地表径流估算方法,具有简单、方便的特点,并且对该模型进行了多次修订^[3-4]。SCS-CN模型在20世纪80年代开始在中国应用,已被广泛用于我国的径流计算与水资源评价中,尤其是在黄土高原地区。然而,在SCS-CN模型的应用过程中,实证研究^[5-6]揭示,估算的径流量与实测的径流量存在较大偏差,主要源于:1)采用标准SCS-CN方法查表获得的 CN_2 值并不适用于该区域的土壤、水文和土地利用条件;2)传统SCS-CN模型中, CN_2 值的设定是基于5%坡度这一假设条件,实际应用中坡面坡度变化较多,存在差异;3)标准SCS-CN法的初损系数(λ)采用0.2,而 λ 是变化的^[7-8]。针对土壤性质高度异质性的黄土高原,已有相关的研究^[8-11]对SCS-CN模型进行校正。王红艳等^[9]研究发现,基于降雨量和降雨强度修正的模型在不同流域的预测效果存在差异,该研究对不同土地利用类型下初损系数的优化仍需进一步深化;冯憬等^[8]基于前人不同坡度下 λ 的率定结果,对不同下垫面条件的CN值进行校正,证实土壤前期水分体积分、不同植被种类、植被盖度、土地利用、坡度及水土保持工程措施等均对径流曲线数有明显影响;赵武成等^[10]对黄土高原丘陵区坡地微型集雨垄的CN值和初损系数进行校准发现,坡度对初损系数有显著影响,但对CN值的影响在自然降雨条件下不明显,且该研究仅针对特定坡度下的微型集雨垄,对于更广泛的坡度范围和土地利用类型下的模型参数优化仍需进一步探讨。

综上所述,模型的适用性验证多局限于特定区域或特定条件下的研究,缺乏对黄土高原丘陵沟壑区的不同土地利用方式和降雨条件影响下模型适用性的系统评估。在模型参数优化方面,对于多种因素共同作用下参数的综合优化及不同因素间相互作用机制的探讨相对较少。修正后的模型在不同流域或不同降雨事件中的预测效果仍存在差异,且对模型在特殊地形条件下的适用性研究相对不足。因此,本研究选取黄河水利委员会天水水土保持科学试验站罗玉沟试验场4种土地利用的17个径流小区

中2011—2020年61场次降雨径流资料,分别对不同土地利用和降雨量的标准SCS-CN模型径流曲线数(CN值)和初损率(λ)进行优化率定,并探究坡面径流和优化后的模型参数值(λ 和CN值)与土壤基本性质、降雨历时、降雨量和降雨强度等多个影响因素的相关性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原罗玉沟试验场(34°36′19″~34°36′57″N, 105°42′22″~105°43′01″E)位于甘肃省天水市秦州区罗玉沟流域东北部,属黄土丘陵区第三副区,是水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室野外试验基地^[12]。桥子沟流域总面积约为2.45 km²,处于温带大陆性气候,干旱少雨,年平均降水量526.1 mm,且降水变幅大,年内分配不均,大多集中于雨季(7—8月)。桥子沟流域土壤多为黄土质黑褐土和红色黄土质黑褐土型粗骨土,主要植物种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、樱桃(*Prunus pseudocerasus*)、山杏(*Prunus sibirica*)、小麦(*Triticum aestivum*)和小冠花(*Securigera varia*)等^[13]。罗玉沟试验场布设林、草、农地径流小区15个,裸地小区2个。径流小区基本情况见表1。

1.2 数据来源与处理

径流小区降雨与径流输沙数据采用黄委会天水水土保持科学试验站2011—2020年实测日数据汇总得到的历年数据。降雨数据来自翻斗式雨量计,与径流小区直线距离30 m。经过降雨资料分析可以进一步计算出次降雨量(mm)、降雨历时(min)、最大30 min雨强(I_{30} , mm/h)和降雨侵蚀力 $[EI_{30}, (MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)]$ 等指标。

$$E = \sum_{r=1}^l (e_r p_r) \quad (1)$$

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)] \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (EI_{30})_k \right] \quad (3)$$

式中: E 为次降雨总动能, MJ/hm²; l 为本次降雨过程次数; e_r 为某时段单位降雨动能, MJ/(hm²·mm); p_r 为对应时段单位降雨量, mm; i_r 为断点雨强, mm/h; R 为降雨侵蚀力, (MJ·mm)/(hm²·h)。

径流小区用于观测单次降水所产生的径流和泥沙总量。产流结束后直接测量水深,将池中的泥沙与水充分混合后取样(每份2 L)。再利用泥沙置换

法(亦称比重法)对样品的含沙量进行分析,计算出每次降雨的产流量、侵蚀量及侵蚀模数等关键指标。2011—2020年,对罗玉沟试验场的17个径流小区进行长期监测,共记录61场降雨事件。降雨量为8.9~101.7 mm,平均次降雨量为37.9 mm;次降雨侵蚀力为10.1~519.1 mm;径流量为0.02~8.92 mm,平均径流量为1.41 mm;侵蚀强度为0.75~731.11 t/km²,平均侵蚀强度为138.43 g/L。

表 1 径流小区基本情况
Table 1 Basic information on runoff plots

编号	土地利用类型	坡向	坡度/(°)	坡长/m		宽度/m	植被类型	水土保持措施
				倾斜	水平			
1	林地	SE	6.0	20.1	20	5	杏树	鱼鳞坑
2	草地	SE	7.4	20.2	20	5	小冠花	等高耕作
3	农地	SE	7.8	20.2	20	5	冬小麦	等高耕作
4	林地	SE	8.2	20.2	20	5	杏树	鱼鳞坑
5	草地	SE	8.3	20.2	20	5	小冠花	等高耕作
6	农地	SE	8.6	20.2	20	5	冬小麦	等高耕作
7	林地	SE	14.8	20.7	20	5	杏树	鱼鳞坑
8	草地	SE	15.6	20.8	20	5	小冠花	等高耕作
9	农地	SE	15.7	20.8	20	5	冬小麦	等高耕作
10	裸地	SE	14.9	20.7	20	5	休闲农地	对照
11	裸地	SE	15.1	20.7	20	5	休闲农地	对照
12	林地	SE	12.4	20.5	20	5	杏树	鱼鳞坑
13	草地	SE	10.1	20.3	20	5	小冠花	等高耕作
14	农地	SE	9.6	20.3	20	5	冬小麦	等高耕作
15	林地	SE	21.8	21.5	20	5	杏树	鱼鳞坑
16	草地	SE	20.6	21.4	20	5	小冠花	等高耕作
17	农地	SE	20.5	21.4	20	5	冬小麦	等高耕作

于2024年7—8月采集土壤样品,每个地类小区分上、中、下3个间隔2.5 m的点位。在0~40 cm土层深度分别使用环刀取原状土,共51个环刀和51份散装土。取回原状土后,去顶盖浸入水中12~24 h,保持水面稍低于环刀上口。饱和后上套空环刀,封好接口,放到漏斗上,下面承接有烧杯。初始加水5 cm,后开始计时,每隔3 min更换漏斗下面的烧杯,分别量出渗水量 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 $\cdots$ 、 Q_n 。每计时1次将上面环刀水面加至5 cm,同时记录水温(t_0 , °C),直到渗水量稳定时停止试验。计算出 K 值后,换算成10 °C时的渗透系数(K_{10}),然后拆去上面空环刀,将带盖原装土环刀放在干燥石上面静置去除重力水,2 h后称重(M_3),24 h后称重(M_4)。之后放入105 °C烘箱中烘烤12 h,先拿出1~2个环刀称重,连续2 h重量没有明显变化表示已经烘干水分,然后全部拿出称重(M_5)。最后,洗净擦干环刀,并称取空环刀重量(M_0),计算土壤水力性质,包括土壤体积质量、孔隙度、田间持水量和渗透系数(表2)。散装土通过TOC分析仪测定土壤有机质质量分数。

$$BD = \frac{M_5 - M_0}{V}$$

(4)

$$CP = \frac{BD \times \frac{M_3 - M_5}{M_5 - M_0} \times 100\%}{\rho_{\text{water}}}$$

(5)

$$FC = \frac{M_4 - M_5}{M_5 - M_0} \times 100\%$$

(6)

$$K = \frac{Q_n \times l \times 10}{S \times t \times h} = \frac{Q_n \times 10}{S \times t}$$

(7)

$$K_t = K \times \frac{l}{h + l} = \frac{K}{2}$$

(8)

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t_0} = \frac{K}{2 \times (0.7 + 0.03t_0)}$$

(9)

式中:BD为土壤体积质量,g/m³;CP为毛管孔隙度,%;FC为田间持水量,%;K为渗透系数,mm/min;K_t、K₁₀分别为温度为 t_0 和10 °C的渗透系数,mm/min;l为土层厚度,mm;h为水层厚度,mm;S为环刀横断面积,cm²;t₀为水温,°C。

分别用标准SCS-CN法和步长法优化参数来模拟径流。描述性统计、差异性分析和相关性分析分别采用Excel 2019和Origin 2024软件计算和绘图,对不同土地利用的SCS-CN模型的径流曲线数和初损率进行优化率定,并选择纳什效率系数和标准均方根误差为该模型拟合度的评判依据。

表 2 不同土地利用类型的土壤基本性质
Table 2 The fundamental properties of soils across different land uses

土地利用类型	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	田间持水量/%	渗透系数/(mm·min ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)
林地	1.28±0.05	50.08±2.89	35.60±3.55	0.93±0.22	7.45±1.57
草地	1.34±0.09	47.95±3.15	32.28±4.74	1.09±0.15	11.14±6.88
农地	1.23±0.07	51.01±2.55	37.87±3.87	0.85±0.15	4.71±0.24
裸地	1.39±0.05	44.60±1.74	27.24±2.10	0.66±0.16	4.01±0.83

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 研究方法

1.3.1 SCS-CN 模型 SCS-CN 模型基于水量平衡方程和 2 个基本假定^[14-15]。假定Ⅰ:实际地表径流量(Q)与流域可能最大径流量(P-I_a)的比值等于实际入渗量(f)与潜在滞留量(S)之比;假定Ⅱ:初损量(I_a)和潜在滞留量(S)之间存在一定量关系。

水量平衡: $P = I_a + f + Q$ (10)

假定Ⅰ: $\frac{f}{s} = \frac{Q}{(p - I_a)}$ (11)

假定Ⅱ: $I_a = \lambda s$ (12)

式中:P 为降雨量,mm;Q 为地表径流量,mm;P-I_a 为最大可能径流量,mm;f 为实际入渗量,mm;S 为潜在滞留量,mm;I_a 为初损量,mm;λ 为初损率。由公式(10)~公式(12)可得:

$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + s)} \quad P > I_a$ (13)

$Q = 0 \quad P \leq I_a$

S 值的变化幅度大,不便取值,为计算 S,引入径流曲线数 CN,无量纲,取值为 50~90。S 与 CN 值的经验转换关系为:

$S = \frac{25400}{CN} - 254$ (14)

模型以次降雨前 5 d 降雨量为依据,将前期土壤湿度划分为 3 级^[3]:干旱(AMC-I)、正常(AMC-II)和湿润(AMC-III)。经过前期降雨量计算得知,61 场降雨均为干旱(AMC-I)等级。《美国国家工程手册》^[16]根据大量实测资料的分析结果制定 CN 值选取表,用以表征标准 SCS-CN 模型在 AMC-II 状态下的 CN 值。对于 AMC-I 和 AMC-III 条件下的 CN 值,计算公式^[17-18]为:

$CN_1 = \frac{4.2 \times CN_2}{10 - 0.058 \times CN_2}$ (15)

$CN_3 = \frac{23 \times CN_2}{10 + 0.13 \times CN_2}$ (16)

式中:CN₁、CN₂、CN₃ 分别为 AMC-I、AMC-II 和 AMC-III 条件下的 CN 值。

传统方法中,CN₂是在坡度为 5% 的条件下得到。Huang 坡度修正公式则是基于黄土高原地区的实测数据提出的,用于优化 CN 值以考虑坡度对地表

径流的影响^[19],计算公式为:

$CN_{2\alpha} = CN_2 \frac{322.79 + 15.63 \times \alpha}{\alpha + 323.52}$ (17)

式中:CN_{2α} 为经过坡度订正后的 CN₂ 值;α 为平均坡度,‰。

1.3.2 模型评价

1) 标准均方根误差

标准均方根误差(NRMSE)是用来衡量计算地表径流值与实测值之间的偏差。NRMSE≥0,该值越小,代表模型的预测精度和适用性越好,反之越差^[20]。

$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_2)^2}}{Q_3}$ (18)

2) 纳什效率系数

纳什效率系数(E_f)是由 NASH 等^[21]提出的用于评价预测值与实际值的接近程度。E_f取值为(-∞, 1),该值越接近 1,有效性越好,计算公式为:

$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_2)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_1 - Q_3)^2}$ (19)

式中:Q₁ 和 Q₂ 分别为第 i 场降雨实测径流量和预测径流量,mm;Q₃ 为实测平均径流量,mm。

2 结果与分析

2.1 标准 SCS-CN 方法

根据试验小区的水文土壤条件和土地利用类型,查表得到林地、草地、农地和裸地的 CN₀ 值。将 CN₀ 代入公式(17)得到不同坡度下的 CN_{2α},初损率取 λ=0.2,计算不同覆被下的预测径流量。标准 SCS-CN 法预测径流量与实际径流量的回归线与 1:1 趋势线相差较大,标准 SCS-CN 法的预测径流量整体大于实测径流量,模拟效果较差(图 1)。标准 SCS-CN 法容易较高地估计径流量,且不能准确预测小降雨径流事件,降雨事件中,林地的预测径流量为 0 的情况占比高达 57.37%,是由于预测径流量为 0 的判定条件为 P≤I_a。因此,标准 SCS-CN 模型不能准确预测研究区地表径流,为提高模型的预测准确性,有必要对模型参数进行调整,尤其是对 λ 参数和 CN 值进行优化,以改善模型的预测效果。

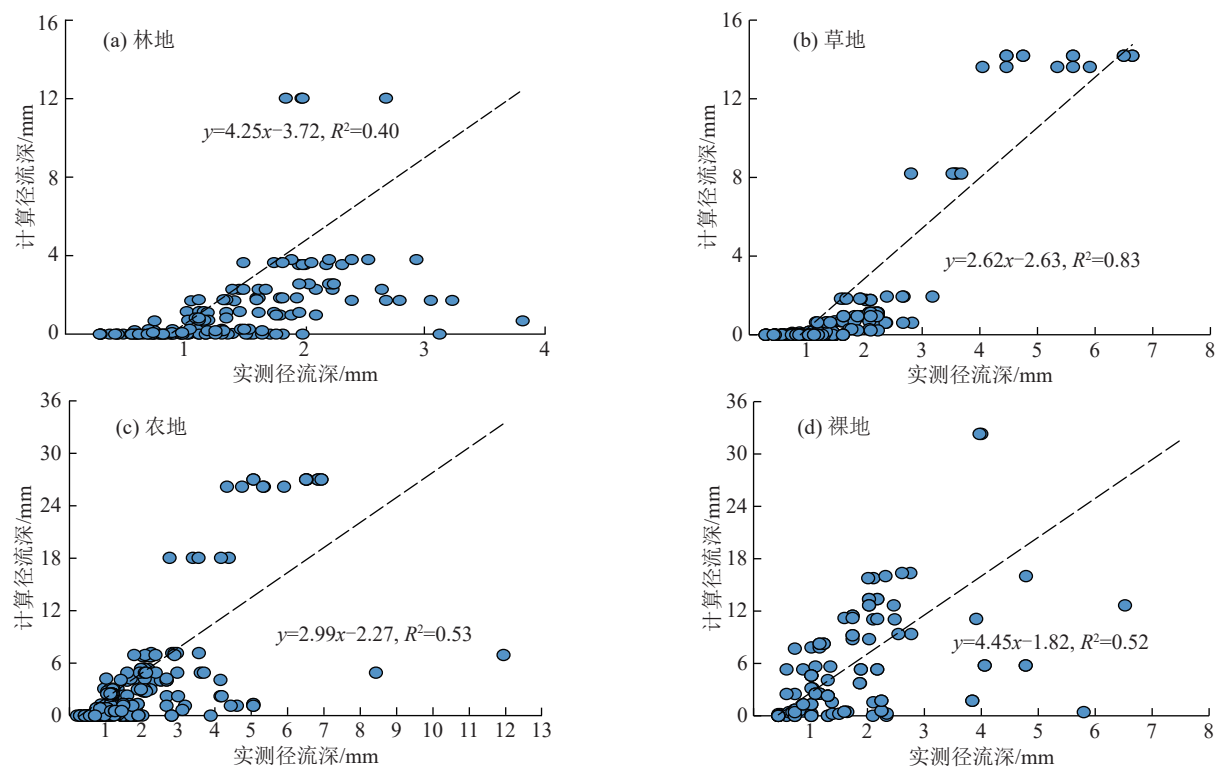


图 1 标准 SCS-CN 法的径流模拟
Fig. 1 Runoff simulation with standard SCS-CN

2.2 依次优化参数值 λ 和 CN

由表 3 可知,只区分地类而不区分降雨量下的径流模拟程度并不理想,不同雨量下的径流变化并不是单纯的线性变化关系,因此需要划分降雨量后再优化。即每段雨量和每个地类均取最优的参数值,再进行模拟。首先,取 CN 值为标准 SCS-CN 法的值不变,优化 λ 为 0~0.4,步长 0.01,共 40 个,依次将 λ 和标准 CN 值代入公式(13),计算预测径流量。其次,应用预测径流深和实测径流深的参考线模拟程度及 NRMSE 和 E_f 参数值作为最优判别标准,得到各条件下的最优 λ 值。林地、草地、农地和裸地的平均最优 λ 值分别为 (0.17 ± 0.12) 、 (0.16 ± 0.10) 、 (0.25 ± 0.13) 和 (0.36 ± 0.08) 。

表 3 径流模拟
Table 3 Runoff simulation

土地利用类型	CN	λ	径流模拟程度			NRMSE	E_f
			模拟方程	R^2	n		
林地	57	0.35	$y=0.95x-0.90$	0.26	250	1.10	-6.92
草地	60	0.31	$y=1.91x-2.06$	0.77	256	1.22	-6.58
农地	67	0.35	$y=1.33x-1.78$	0.47	278	1.29	-3.20
裸地	68	0.40	$y=1.48x-1.96$	0.48	121	1.38	-3.82

模拟和实际径流深的 NRMSE 值均减小, E_f 值均增加(表 4),农地和裸地的模拟数据偏大,各组离散程度仍然较高,且计算径流深在预测较大雨量下的径流时,仍比实测径流深偏大,预测较小雨量的径流

时 0 值较多。为使模拟的径流深更接近实测径流深,需要进一步优化 CN 值。

对 CN 值进行优化,取值为 45~95,步长为 1 进行演算,再根据不同土地利用类型和不同降雨量取平均 CN 值。由表 4 可知,林地、草地、农地和裸地的平均 CN 值分别为 68、69、74 和 73,农地和裸地的 CN 值较林地和草地大,且 NRMSE 值均减小, E_f 值均增加,模拟程度较好。林地、草地、农地和裸地的标准 SCS-CN 法预测径流量与观测径流量的线性回归线斜率更接近 1 值,截距更接近 0(图 2)。模拟决定系数(R^2)增长至 0.76、0.88、0.76 和 0.72,表明标定后的模拟值更靠近 1:1 线,离散程度显著降低,小降雨条件下模拟为 0 的情况减少, NRMSE 值均减小, E_f 值均增加,模拟程度较好(图 2、表 4)。

2.3 多因素对参数值的影响

从表 4 可以看出,模型优化后,林地、草地、农地和裸地的最优 λ 值分别为 (0.17 ± 0.12) 、 (0.16 ± 0.10) 、 (0.25 ± 0.13) 和 (0.36 ± 0.08) 。λ 值随降雨量增大,裸地从 30~40 mm 降雨量时优先达到 0.4,其次为农地坡面。

由图 3 可知,林地、草地、农地和裸地的最优 CN 值分别为 (56 ± 1) 、 (55 ± 2) 、 (67 ± 3) 和 (74 ± 8) ,且随降雨量的变化较大。农地的 CN 值随着降雨量降低, CN 值减小速度相对和缓,最后逐渐接近 60。林地与草地优化后的 CN 值相对较为稳定,最后也逐渐接近 60。

表 4 区分降雨量的径流模拟
Table 4 Runoff simulation after dividing rainfall

土地利用类型	降雨量/ mm	查表 CN ₀	坡度优化						参数值优化				
			CN ₂	CN _{2a}	S	λ ₀	NRMSE	E _f	λ	CN'	S'	NRMSE	E _f
林地	10~20	73	75	55	207.82	0.20	0.92	0.75	0.03	58	187.26	0.23	0.98
	20~30	73	75	55	207.82	0.20	1.64	-7.33	0.05	57	188.15	0.41	0.50
	30~40	73	75	55	207.82	0.20	4.02	-23.27	0.10	55	205.09	0.31	0.86
	40~50	73	75	55	207.82	0.20	4.98	-178.42	0.14	56	198.19	0.36	0.08
	50~60	73	75	55	207.82	0.20	4.91	-68.84	0.17	56	195.90	0.17	0.91
	60~70	73	75	55	207.82	0.20	5.69	-75.95	0.20	56	198.42	0.13	0.96
	80~90	73	75	55	207.82	0.20	10.68	-263.09	0.32	56	199.57	0.14	0.96
	100~110	73	75	55	207.82	0.20	11.26	-239.02	0.38	56	198.42	0.13	0.97
草地	10~20	74	73	56	199.57	0.20	0.85	0.87	0.01	50	254.00	0.45	-1.22
	20~30	74	73	56	199.57	0.20	2.08	-12.88	0.05	54	216.37	0.51	-1.64
	30~40	74	73	56	199.57	0.20	8.04	-16.34	0.09	53	225.25	0.44	-3.00
	40~50	74	73	56	199.57	0.20	5.38	-352.06	0.14	56	199.57	0.32	-0.24
	50~60	74	73	56	199.57	0.20	9.52	-67.81	0.17	56	199.57	0.22	-0.21
	60~70	74	73	56	199.57	0.20	4.95	-33.41	0.20	57	191.61	0.20	0.02
	80~90	74	73	56	199.57	0.20	6.55	-62.28	0.29	56	199.57	0.10	-0.10
	100~110	74	73	56	199.57	0.20	5.34	-34.83	0.33	56	199.03	0.11	0.56
农地	10~20	82	68	68	119.53	0.20	1.26	0.58	0.04	69	115.42	0.73	-0.01
	20~30	82	68	68	119.53	0.20	2.69	-16.11	0.11	69	113.48	0.56	-0.33
	30~40	82	68	68	119.53	0.20	4.55	-6.72	0.18	68	117.68	0.42	0.63
	40~50	82	68	68	119.53	0.20	6.13	-116.21	0.25	68	120.65	0.37	0.56
	50~60	82	68	68	119.53	0.20	5.76	-45.50	0.30	68	119.36	0.40	-0.23
	60~70	82	68	68	119.53	0.20	5.70	-27.37	0.35	67	125.10	0.31	-0.67
	80~90	82	68	68	119.53	0.20	8.77	-149.44	0.40	63	149.17	0.16	-0.05
	100~110	82	68	68	119.53	0.20	6.78	-64.19	0.40	60	169.33	0.15	-0.06
裸地	10~20	91	93	84	48.38	0.20	3.19	-1.57	0.17	84	48.38	0.81	-0.46
	20~30	91	93	84	48.38	0.20	4.16	-31.33	0.32	84	47.45	0.55	0.38
	30~40	91	93	84	48.38	0.20	10.75	-50.90	0.40	79	67.52	0.59	-1.86
	40~50	91	93	84	48.38	0.20	9.28	-212.88	0.40	77	77.00	0.42	0.45
	50~60	91	93	84	48.38	0.20	10.67	-158.08	0.40	73	92.46	0.32	0.57
	60~70	91	93	84	48.38	0.20	11.26	-205.18	0.40	71	103.75	0.34	-0.02
	80~90	91	93	84	48.38	0.20	12.72	-251.80	0.40	63	149.17	0.05	-154.46
	100~110	91	93	84	48.38	0.20	9.02	-103.04	0.40	61	162.39	0.11	-1.56

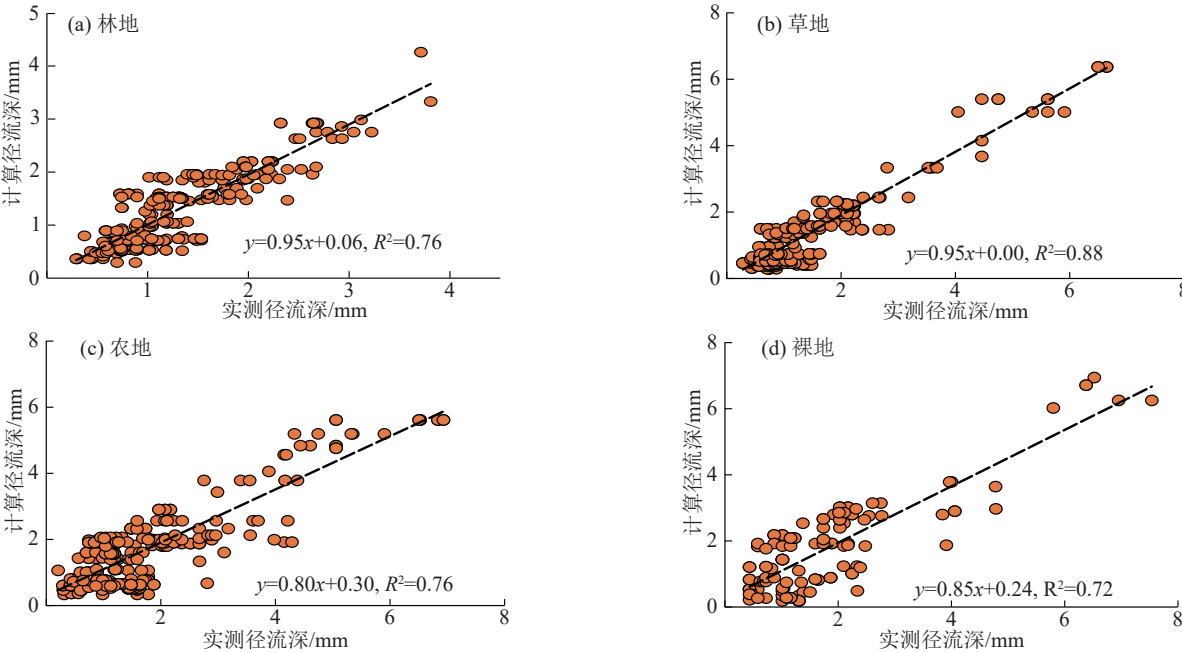


图 2 优化参数值后的径流模拟
Fig. 2 Runoff simulation after optimization

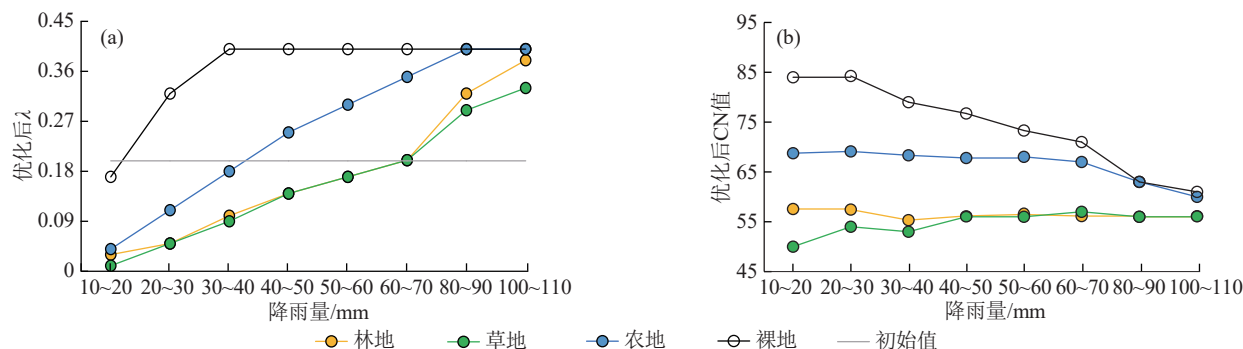


图 3 不同土地利用类型和降雨量下的参数值

Fig. 3 Parameter optimized values for different land use and rainfall

为了更直观地了解模型参数和径流深对土地利用、坡度、降雨强度、降雨历时、降雨量等的响应程度,本研究将优化后的 λ 值和CN值与多个影响因素进行相关性分析。由图4可知,径流深的大小与土地利用、土壤有机质、降雨历时、降雨量、场次平均降雨强度有关($p \leq 0.001$)。径流深与降雨量的相关性最好,相关系数为0.75,即降雨量越高,径流深越大。 λ 值随着林草到农地和裸地的转变及降雨历时和降雨量的增大依次增大,随着土壤有机质的增加依次减小。CN值与土地利用、有机质、降雨历时、降雨量、场次平均雨强和径流深密切相关($p \leq 0.001$)。CN值随降雨历时、降雨量、场次平均雨强、径流深呈负相关。



注:**表示 $p \leq 0.01$;***表示 $p \leq 0.001$ 。

图 4 优化参数后多因素相关性分析

Fig. 4 Multi-factor correlation analysis after optimization of parameter

3 讨论

SCS-CN模型作为一种广泛使用的估算地表径流的水文模型,主要用于计算小流域次降雨的径流量,该模型考虑诸多影响降雨径流的因素,包括土壤类型、土地利用覆被情况及前期土壤湿度等,这些因素隐含在模型中的径流曲线数(CN值)和初损率(λ 值)中^[9]。然而,该模型参数在初步查表得到的值较为粗糙,对特定区域的使用误差较大^[22]。标准SCS-

CN模型在黄土高原丘陵沟壑区坡面的应用面临降雨量较大、降雨历时较长时预测径流深偏大、降雨量和降雨历时偏小时预测径流深偏小的问题,因而限制该模型在黄土高原丘陵沟壑区坡面的应用^[23]。可能与黄土高原丘陵沟壑区独特的破碎地形和土壤类型多样的特征相关,需对 λ 和CN值进行区域适用性率定,以得到适宜于研究区域的径流模型^[24-25]。

本研究对 λ 值和CN值进行优化,模型模拟精度明显提高,纳什效率系数增加,显著提升小降雨产流事件的预测精度,更适用于桥子沟流域坡面径流小区的降雨产流预测。通过对比不同土地利用类型和降雨量下的参数值发现,有植被覆盖的小区的 λ 值在较小的雨量中 < 0.2 ,与余聂彤等^[11]的研究结果类似。土壤渗透性质与 λ 值和CN值在不同土地利用类型的趋势一致:较低的 λ 值和CN值表示较好的土壤透水性和渗透能力,而较高的 λ 值和CN值则表示较差的渗透能力。裸地缺乏植被覆盖,农地有人为干扰,渗透系数较小, λ 值和CN值相对较高^[26]。林地通常具有较好的植被覆盖,树木的根系可以有效固定土壤,减少土壤侵蚀和流失,同时植被能够减缓水流速度,增加土壤的渗透性,降低地表径流的形成,因此 λ 值和CN值较低。降雨量增大时, λ 值随之增加,是由于径流增多,土壤达到饱和后土壤下渗和植被截留的能力减弱,因此需要更大的 λ 值来反映这种变化,再加上草地和林地的渗透系数较大,分别为 (1.09 ± 0.15) 、 (0.93 ± 0.22) mm/min,裸地的渗透系数最小,为 (0.66 ± 0.16) mm/min(表2)。裸地在降雨后首先达到饱和, λ 值增大较快,其次为农地,草地和林地的 λ 值增大较为缓慢^[3]。裸地的 λ 值普遍偏大,在降雨量超过30 mm后便增大到 λ 值所假设的最大值,是由于黄土高原土壤的异质性和地形的多样性,即裸地缺乏植被保护,与其他地类的土壤差异较大,裸地坡度较大(15°),再加上裸地小区数量较少,数据可能不具有较强的代表性,模拟径流时精度下降。在与裸地的对比下,可以得知黄土高原在植被恢复和坡度改造后土壤的渗透能力和稳定性得到改善。

有研究^[9,27]发现,降雨量对最优CN值和径流产生影响。CN值是反映土壤产流能力的重要参数,随着降雨量的增大,土壤的入渗能力达到极限,产流能力趋于稳定,因此CN值趋于相同。本研究发现,随着降雨量增大,不同土地利用类型的最佳CN值最后趋于一致,为60。HAWKINS^[27]用渐近线法分析CN值对降雨量的敏感性发现,随着降雨量的增大CN值将达到71。由于区域和土壤类型等环境条件的不一致,区域一致的CN值不同。

综上所述,本文在考虑到不同土地利用类型和降雨量分层的基础上优化SCS-CN模型参数,提升黄土高原地区径流模拟精度,同时也发现最优参数值与下垫面和降雨条件的相关性。然而,野外收集降雨径流资料具有一定的困难和误差性,也是导致整体预测径流量小于观测径流量的重要因素^[28]。因此,在黄土高原地区应用SCS-CN模型预测降水产流尚需做大量的野外定位观测工作。在黄土高原桥子沟流域应用SCS-CN模型时,模型的普适性是一个重要的考量因素。本研究考虑到不同坡度、不同降雨量的复杂性,但对于其他的土壤类型和其他坡长的地块来说,该模型参数需要进一步检验和优化。今后的研究中SCS-CN模型可能对黄土高原更多的土壤类型和地形条件进行应用和调整,使得该模型适用于更广泛的区域^[11]。

4 结论

1)林地、草地、农地和裸地的最优初损率 λ 值分别为0.17、0.16、0.25和0.36,最优径流曲线数CN值分别为56、55、67和74。最优初损率 λ 值和最优径流曲线数CN值均随土壤渗透率的增大而减小。

2)最优初损率(λ 值)随降雨量的增大而增大,其中裸地的 λ 值优先达到0.4,其次为农地。随着场次降雨量增大,4个地类的径流曲线数CN值趋近于60。

3) λ 值随土地利用从林草到农地和裸地的转变、降雨历时和降雨量的增加而增大,而CN值与降雨历时、降雨量、场次平均雨强和径流深呈负相关。

本研究考虑到不同坡度、不同降雨量的复杂性,但对于其他的土壤类型和坡长的地块来说,该模型参数需要进一步检验和优化。今后的研究中SCS-CN模型可能对黄土高原更多的土壤类型和地形条件进行应用和调整,使得该模型适用于更广泛的区域。

参考文献:

[1] 徐剑春,王博,罗进选.基于GIS的小流域尺度水土流失敏感性评价:以通渭县牛谷河项目区为例[J].中国水土保持,2021(1):37-41.
XU J C, WANG B, LUO J X. Sensitivity evaluation of soil and water loss in small watersheds based on GIS[J].

Soil and Water Conservation in China, 2021(1):37-41.
[2] 李发文,陶仁杰.变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析[J].水资源保护,2023,39(5):9-17.
LI F W, TAO R J. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):9-17.
[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.
FU S H, WANG H Y, WANG X L, et al. The runoff curve number of SCS-CN method in Beijing [J]. Geographical Research, 2013, 32(5):797-807.
[4] JIAO P J, XU D, WANG S L, et al. Improved SCS-CN method based on storage and depletion of antecedent daily precipitation [J]. Water Resources Management, 2015, 29(13):4753-4765.
[5] 张鑫,张青峰,周阳阳,等.不同坡度黄土微地形条件下SCS-CN模型参数研究[J].水土保持研究,2019,26(2):74-77.
ZHANG X, ZHANG Q F, ZHOU Y Y, et al. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data on microtopographic surfaces of different gradient loess slopes [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2):74-77.
[6] YAN X, NUNES J P, SUN J N, et al. Restored vegetation dominates the decrease in surface and subsurface runoff on the Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2024, 640:e131730.
[7] GAO G Y, FU B J, LÜ Y H, et al. Coupling the modified SCS-CN and RUSLE models to simulate hydrological effects of restoring vegetation in the Loess Plateau of China[J].Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 9(3):4193-4233.
[8] 冯憬,卫伟,冯青郁.黄土丘陵区SCS-CN模型径流曲线数的计算与校正[J].生态学报,2021,41(10):4170-4181.
FENG J, WEI W, FENG Q Y. The runoff curve number of SCS-CN method in loess hilly region[J].Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):4170-4181.
[9] 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. Modification of SCS-CN model for estimating event rainfall runoff for small watersheds in the Loess Plateau, China[J].Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8):71-79.
[10] 赵武成,买小虎,王琦,等.基于SCS-CN模型的黄土高原丘陵区坡地微型集雨垄面径流量预测[J].生态学报,2022,41(1):199-208.
ZHAO W C, MAI X H, WANG Q, et al. Ridge surface runoff estimation for micro-rainwater-harvesting-ridges on slopping land in the hilly areas of the Loess Plateau

- based on SCS-CN model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(1): 199-208.
- [11] 余聂彤, 赵雪花, 姚柳杉. 黄土高原小流域考虑坡度影响的径流曲线数优化[J]. 中国农村水利水电, 2024(5): 200-205.
YU N T, ZHAO X H, YAO L S. Optimization of runoff curve number considering the effect of slope on small watershed in Loess Plateau[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(5): 200-205.
- [12] 刘春月, 信忠保, 秦瑞杰, 等. 1986—2018年黄土丘陵区典型小流域不同水文年水沙变化[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 126-135.
LIU C Y, XIN Z B, QIN R J, et al. Variation of runoff and sediment of the typical watershed in loess hilly region in the different hydrological years during the period from 1986 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 126-135.
- [13] 马建业, 李占斌, 马波, 等. 黄土高原丘陵区不同植被恢复方式下土壤水分特征: 以桥子沟流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 8-15.
MA J Y, LI Z B, MA B, et al. Soil water characteristics under different vegetation recovery modes in hilly and gully region of the Loess Plateau: A case study of the Qiaozigou Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 8-15.
- [14] VERMA S, VERMA R K, MISHRA S K, et al. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(12): 1891-1930.
- [15] 邹伟婷, 信忠保, 秦瑞杰, 等. 黄土丘陵区第三副区人工牧草 SCS-CN 值率定研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 233-239.
ZOU W T, XIN Z B, QIN R J, et al. Study on the rate of SCS-CN value of artificial forage grass in the third sub-district of the loess hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 233-239.
- [16] USDA-NRCS. National engineering handbook: Part 630-Hydrology. Chapter 9: Hydrologic soil-cover complexes [M]. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, 2004.
- [17] 张钰娟, 穆兴民, 王飞. 径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区的率定[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 124-128.
ZHANG Y X, MU X M, WANG F. 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.
- [18] 李润奎, 朱阿兴, 陈腊娇, 等. SCS-CN模型中土壤参数的作用机制研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1778-1787.
LI R K, ZHU A X, CHEN L J, et al. Effects of soil parameters in SCS-CN runoff model[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 1778-1787.
- [19] 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.
- [20] 张晓涵, 桑国庆. SCS-CN模型在小流域产流计算中的应用[J]. 人民黄河, 2022, 44(5): 35-39.
ZHANG X H, SANG G Q. Application of SCS-CN model in runoff calculation of small watershed[J]. Yellow River, 2022, 44(5): 35-39.
- [21] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [22] 杨娜娜, 刘舒, 刘正风, 等. 径流曲线数模型在湖南省山区小流域的优化与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(4): 411-424.
YANG N N, LIU S, LIU Z F, et al. Optimization and application of SCS-CN model in small mountain basins of Hunan Province[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(4): 411-424.
- [23] 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.
WANG Y, HUANG M B. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 54-58.
- [24] XIAO B, WANG Q H, FAN J, et al. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 738-749.
- [25] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 模拟降雨条件下黄土区SCS模型的参数率定[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 205-210.
DENG J C, GAO P, MU X M, et al. Study on calibrating parameters of SCS model in loess area under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 205-210.
- [26] MU W B, YU F L, LI C Z, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize[J]. Water, 2015, 7(6): 2990-3008.
- [27] HAWKINS R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(2): 334-345.
- [28] 许秀泉, 范昊明, 李刚. 径流曲线法在东北半干旱区几种土地利用方式径流估算中的应用与改正[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 52-57.
XU X Q, FAN H M, LI G. Application and correction of the SCS-CN method in runoff estimation of several land use patterns in northeast semi-arid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 52-57.