

黄土丘陵区第三副区人工牧草 SCS—CN 值率定研究

邹伟婷^{1,3}, 信忠保^{1,3}, 秦瑞杰², 张满良², 刘晓²

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.黄河水利委员会天水水土保持科学试验站,
甘肃 天水 741000;3.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083)

摘要: 径流曲线数法(SCS—CN 模型)是估算地表径流的常用方法,可以快速评估不同地表覆盖对降水径流关系的影响。为探讨径流曲线数法在黄土高原地区人工牧草措施下的适用性,提高植被恢复对黄土高原水资源影响的理解,为黄土高原人工牧草地表径流估算提供理论参考,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 7 个径流小区中 73 场降雨径流事件资料,采用步长法对黄土高原人工牧草标准 SCS—CN 模型的径流曲线数(CN)和初损率(λ)进行优化率定。结果表明:(1)人工牧草最优 λ 值为 0.15,而对照农田为 0.18;(2)不同种类牧草 CN 值差异不显著,约为 79,对照农田 CN 值为 81,表明美国土壤保持局推荐的 CN 值对黄土高原人工牧草径流计算具有适用性,但 λ 值需根据实际情况进行优化率定;(3)根据前期土壤湿度情况修正 S 值,模拟效果较为理想,修正后的 SCS—CN 模型适用于黄土高原半干旱人工牧草地区。

关键词: 黄土高原; SCS—CN; 人工牧草; 径流

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0233-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.029

Study on the Rate of SCS—CN Value of Artificial Forage Grass in the Third Sub-district of the Loess Hilly Area

ZOU Weiting^{1,3}, XIN Zhongbao^{1,3}, QIN Ruijie², ZHANG Manliang², LIU Xiao²

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Yellow River Water Conservancy Commission Tianshui Soil and Water Conservation Science

Experimental Station, Tianshui, Gansu 741000; 3.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: The SCS—CN model is one of the most widely method for estimating surface runoff, which can quickly assess the effects of different ground covers on precipitation-runoff relationships. To explore the applicability of the Soil Conservation Service Curve Number Model under artificial grazing measures in the Loess Plateau region, to improve the understanding of the impact of vegetation restoration on water resources in the Loess Plateau, and to provide a theoretical reference for the estimation of surface runoff from artificial grazing in the Loess Plateau, this paper selects data from 73 rainfall runoff events in seven runoff plots at the Luoyugou test site of the Tianshui Soil and Water Conservation Experiment Station of the Yellow River Water Conservancy Commission, and uses the step-size method to estimate the runoff from artificial grazing in the Loess Plateau. The runoff curve number (CN) and the initial abstraction ratios (λ) of the standard SCS—CN model were optimized by the step method. The results showed that: (1) The optimal initial abstraction ratios value for artificial grazing was 0.15, while that for control farmland was 0.18; (2) The difference of curve number values for different species of pasture was not significant, about 79, and that for control farmland was 81, indicating that the curve number values recommended by the U.S. Soil Conservation Service were applicable to the calculation of artificial pasture runoff on the Loess Plateau, but the the initial abstraction ratios values needed to be optimized and rate determined according to the actual situation; (3) The S

收稿日期:2022-04-12

资助项目:国家自然科学基金项目(4217071224)

第一作者:邹伟婷(1995—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:zwt1019268593@163.com

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

values were modified according to the previous soil moisture S value was corrected according to the previous soil moisture condition, and the simulation effect was more satisfactory, and the modified SCS-CN model was applied to the semi-arid artificial grazing area of Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; SCS-CN; artificial grazing; runoff

黄土高原位于中国北方黄河流域的中游,属于干旱半干旱地区,面积超过 60 万 km^2 [1]。近 20 年,为缓解水土流失,改善环境质量,黄土高原实施了退耕还林还草等一系列水土保持措施促进植被恢复,大量坡耕地被转变为林地或草地,极大地改变了土地利用格局[2]。草地是黄土高原生态恢复的重要措施,占黄土高原土地覆盖类型中总面积的 39.21%[3]。植被恢复使植被覆盖度增加,土壤养分水平改善,土壤性质恢复,进而导致水文功能和土壤侵蚀的显著响应。因此,准确认识草地对地表径流的影响,是开展黄土高原生态恢复对地表水文水资源影响研究的重要领域,对于土地利用规划和水资源管理具有重要意义[4]。

径流曲线数法(SCS-CN 模型)作为估算地表径流的常用方法,与 Green-Ampt, Philip 和 Horton 入渗曲线等模型相比,具有结构简单、计算方便的特点[5]。自 20 世纪 90 年代,SCS-CN 模型已被广泛应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。已有研究[6-11]表明,SCS-CN 模型是黄土高原小流域径流预测的一种有价值的工具,但对于模型的适用性及参数的取值需要进行局部验证和率定。SCS-CN 模型主要包括 CN 值和初损率(λ) 2 个参数。Lian 等[12]对中国 55 个研究站点的 CN 值进行了率定,结果表明,修正后的 CN 值与美国土壤保持局推荐的 CN 查表存在较大差异。Shi 等[10]将 CN 值与引入的 3 个因子(土壤湿度、降雨深度和强度)相结合,建立了改进 SCS-CN 方法的方程。Huang 等[13]建立 CN 与土壤水分之间的方程,以更好地预测黄土高原气候和土壤条件下的径流量。初损率(λ)为初损雨量与流域最大入渗量的比值,是 SCS-CN 模型中关键的区域与气候参数,通常取标准值 0.2。然而,已有研究[14-15]表明, λ 取标准值时模型的预测精度不能满足实际需求,已有研究[15]对 SCS-CN 模型进行了系统的机理论证,提出应将 λ 作为区域化参数,并对其进行合理取值。邓景成等[16]用穷举法率定得到陕西省吴起县杨青川流域草地和裸地最适 λ 分别为 0.13 和 0.03。周淑梅等[17]利用反算法和事件分析法率定黄土丘陵沟壑区桥子西沟流域 λ 为 0.1。

尽管针对黄土区 SCS 模型的修正已有许多研究,但缺乏专门针对于人工牧草的 CN 值的率定研究。草地作为黄土高原生态恢复的重要措施,对黄土

高原生态恢复、土地利用规划和水资源管理具有重要意义。针对这一科学问题,本研究的主要目的:(1)根据黄委会天水水土保持科学试验站提供的不同牧草小区水文观测数据,评估 SCS-CN 模型在黄土高原人工草地的适用性;(2)对人工牧草的 CN 值和 λ 进行优化率定,提高模拟精度。研究结果为黄土高原人工牧草地地表径流估算提供理论参考,为提高植被恢复对黄土高原水资源影响理解提供科学依据。

1 模型原理

SCS-CN 模型基于水量平衡方程和 2 个基本假定[18]:

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。

$$\text{水量平衡: } P = I_a + f + Q \quad (1)$$

$$\text{假定 1: } \frac{f}{S} = \frac{Q}{(P - I_a)} \quad (2)$$

$$\text{假定 2: } I_a = \lambda \cdot S \quad (3)$$

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(1)~(3)可得:

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

$$Q = 0 \quad P \leq I_a \quad (4)$$

潜在滞留量(S)值的变化幅度可以很大,不利于取值,为了计算 S ,引入径流曲线数 CN。CN 值是一个无量纲参数,理论取值范围是 0~100,实际应用中取值范围是 40~98。 S 与 CN 值的经验转换关系为:

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

模型以次降雨前 5 天降雨量为依据,将前期土壤湿度划分为 3 级[5]:干旱(AMC-I)、正常(AMC-II)和湿润(AMC-III)。划分依据见表 1。

《美国国家工程手册》[19]根据大量实测资料的分析结果制定了 CN 值选取表,用以表征标准 SCS-CN 模型 AMC-II 状态下的 CN 值表。对于 AMC-I 和 AMC-III 条件下的 CN 值,计算公式为[20]:

$$CN_1 = 4.2 CN_2 / (10 - 0.058 CN_2) \quad (6)$$

$$CN_3 = 23 CN_2 / (10 + 0.13 CN_2) \quad (7)$$

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

表 1 前期土壤湿度划分

| 前期土壤湿度条件 | 前 5 天降雨总量/mm | |
|----------|--------------|-----------|
| | 生长期 | 休闲期 |
| AMC-I | <35.6 | <12.7 |
| AMC-II | 35.5~53.3 | 12.7~27.9 |
| AMC-III | >53.3 | >27.9 |

本文通过标准 SCS-CN 修正法^[21],优化率定得出了适应黄土高原地区的不同植被措施下的初损率(λ)值和径流曲线数(CN)值。

2 数据与方法

2.1 研究区概况及数据来源

研究选取黄委会天水水土保持科学试验站甘肃天水罗玉沟流域 1987—1989 年罗玉沟试验场 7 个径流小区 105 场水文观测数据,开展人工牧草径流场 SCS-CN 模型径流曲线数的研究工作。罗玉沟试验场创建于 1956 年,位于天水市秦州区罗玉沟流域桥子东沟上游,距天水市区约 5 km,平均海拔高度约 1 445 m,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。7 个小区随机排列,布设于罗玉沟试验场的坡耕地上,坡向均为西南方向,坡度均为 15°,pH=8.4。小区水平投影面积 66.72 m²(4.00 m×16.68 m),小区长边与坡地流水线平行,上、下边与等高线平行。土壤发育均为红黏土母质上的灰褐土,土壤结构在黄土高原丘陵沟壑第

3 区中有较强的代表性,径流小区的试验成果,能够代表该区至黄土高原坡面水土流失的基本情况。

有研究^[22]指出,根据我国的具体情况,规定标准小区的水平投影坡长为 20 m,水平垂直宽度为 5 m,即 20 m×5 m,坡度不作硬性规定,5°~25°均可,将连续保持清耕状态的小区作为标准小区,与之相对应的小区就是一般措施小区,投影面积、坡度坡长、坡位坡向和操作流程均应与标准小区一致,处理措施不同。本研究采用小区布设于 2007 年颁布的《水土保持试验规程》(SL 419—2007)^[23]以前,除投影面积外,均与标准小区和措施小区的要求一致,因此,可以作为当地的对照参数,用于水土流失规律研究和水土保持效益计算。

径流小区基本概况见表 2,共设人工牧草和对照农田 2 种样地,1~6 号小区为人工牧草径流小区,其中 1 号小区为小冠花,2 号小区为红豆草,3 号小区为沙打旺,4 号小区为紫花苜蓿,5 号小区为红三叶,6 号小区为鹰咀紫云英,7 号小区为农作物对照。除沙打旺每年收割 1 次外,其他牧草均在相应的最佳收割期每年收割 2 次。

罗玉沟试验场土壤水文组可统一看作 B 组^[17]。1987—1989 年,试验场 7 个径流小区共有 105 场水文观测数据,选取有地表径流产生的 73 场降雨径流事件为有效降雨。前期土壤湿度条件为 AMC-I 的产流次数为 59 场,占全部产流次数比例为 80.8%,AMC-III 条件下产流次数占比为 19.2%,可见该区域前期土壤湿度以干旱为主,因此选取 AMC-I 下 CN₁作为径流参数预报。

表 2 径流小区基本情况

| 指标 | 土地利用 | 植被覆盖 | 坡长/m | 坡宽/m | 坡度/(°) | 坡向 | 降雨量/mm | 径流量/mm | 观测时间 |
|-----|------|-------|-------|------|--------|----|-------------|-----------|-----------|
| 1 号 | 人工牧草 | 小冠花 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 28.18±23.56 | 5.12±6.67 | 1987—1989 |
| 2 号 | 人工牧草 | 红豆草 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 29.57±24.19 | 2.78±5.99 | 1987—1989 |
| 3 号 | 人工牧草 | 沙打旺 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 24.5±14.37 | 1.58±2.62 | 1987—1989 |
| 4 号 | 人工牧草 | 紫花苜蓿 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 29.57±24.19 | 2.72±3.33 | 1987—1989 |
| 5 号 | 人工牧草 | 红三叶 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 28.18±23.56 | 4.09±6.02 | 1987—1989 |
| 6 号 | 人工牧草 | 鹰咀紫云英 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 24.5±14.37 | 2.03±2.99 | 1987—1989 |
| 7 号 | 对照农田 | 农作物 | 16.68 | 4.00 | 15.00 | WS | 28.73±24.63 | 3.70±7.09 | 1987—1989 |

注:表中数据为平均值±标准差。

2.2 标准 SCS-CN 修正法

有研究^[15]指出,初损率(λ)和径流曲线数(CN)都是 SCS-CN 模型的敏感性参数,因此,黄土区人工牧草径流曲线数法的适用性分析,需要对 CN 值和 λ 值进行优化率定。

(1)标准 SCS-CN 法:根据试验小区的水文土壤条件和植被措施类型,查《美国国家工程手册》^[19]

CN 值选取表,分别得到 7 个径流小区对应的 CN₂ 值。根据前期土壤条件,选取 AMC-I 下 CN₁作为径流参数预报,CN₁通过公式(6)确定,结合降雨量数据,计算地表径流量 Q₁。

(2)初损率(λ)优化率定:据统计^[16],50%以上的初损率 λ 的变化在 0~0.4。标准 CN 值保持不变,λ 值以 0~0.4 为区间,0.01 为步长,采用公式(8)最小平方差

(LSE)得出模拟效果最优的 λ 值。将标准 CN_1 与最优 λ 值同时带入SCS-CN模型,计算地表径流量 Q_2 。

$$LSE = \min \sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2 \quad (8)$$

式中: Q_i 为第*i*场降雨的观测径流量(mm); Q'_i 为第*i*场降雨的预测径流量(mm)。

(3)CN值优化率定:CN值是无量纲参数,理论取值范围是0~100,实际应用中取值范围通常为40~98^[21]。最优 λ 值不变,以40~98为区间,1为步长,最小平方差(LSE)最为最优判定的目标函数,得出模拟效果最优的CN值。将最优 CN_1 与最优 λ 值同时带入SCS-CN模型,计算地表径流量 Q_3 。

(4)在前期土壤湿度为AMC-II和AMC-III(约占19.2%)数据有限的情况下,依据AMC-I下 CN_1 的径流预报参数,通过公式(5)和(7)得到修正的 CN_3 ,带入SCS-CN模型,计算地表径流量 Q_4 。

2.3 模型评价标准

模型的拟合优度有多个评价标准,本文选用3个常用的评价指标:

(1)纳什效率系数。用来评价预测径流量与观测径流量的接近程度,计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (9)$$

式中: Q_i 为第*i*场降雨的观测径流量(mm); Q'_i 为第*i*场降雨的预测径流量(mm); \bar{Q}_i 为观测径流量的平均值(mm);NSE值越接近于1,代表预测径流量值与观测径流量越接近,模型可信度和有效性就越好。

(2)均方根误差(mm)。用来评价预测径流量偏离观测径流量的程度,可以反映模型预测的精准度,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2} \quad (10)$$

RESM值为0时,模型拟合程度最好,RMSE值越高,模型模拟精度越差。

(3)相关系数(R)。用来评价计算值与实测值之间的相关程度,计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)(Q'_i - \bar{Q}'_i)}{[\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \sum_{i=1}^n (Q'_i - \bar{Q}'_i)^2]^{0.5}} \quad (11)$$

式中: \bar{Q}'_i 为预测径流量的平均值(mm)。相关系数(R)的取值为(-1,1),|R|值越大,误差越小,预测径流量与观测径流量的线性相关程度越高;|R|值越接近0,误差越大,预测径流量与观测径流量的线性相关程度越低。

2.4 数据处理

数据处理利用Excel 2019软件中完成,描述性统计和差异性分析采用SPSS 23.0软件计算,对黄土

高原人工牧草标准SCS-CN模型的径流曲线数(CN)和初损率(λ)进行优化率定。

3 结果与分析

3.1 标准SCS-CN法

根据试验小区的水文土壤条件和土地利用类型,查《美国国家工程手册》^[19]CN值选取表,分别得到7个径流小区对应的 CN_2 值。小冠花、红豆草、沙打旺、紫花苜蓿、红三叶、鹰咀紫云英属于人工牧草类,查表得 CN_2 值为79,7号小区属于农作物类对照小区,查表得 CN_2 值为81。带入公式(6)、(7)得到人工牧草与对照农田的 CN_1 、 CN_3 值。根据SCS-CN标准模型,取 $\lambda=0.2$,模拟计算人工草地和对照农田的预测径流量 Q_1 、预测径流量 Q_1 与观测径流量 Q 对比见图1。

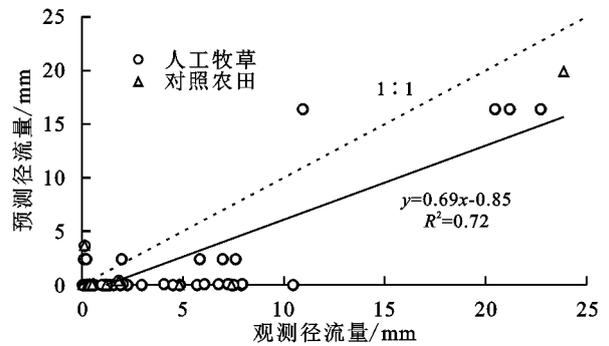


图1 标准SCS-CN法预测径流量 Q_1 与观测径流量 Q 比较

从图1可以看出,标准SCS-CN法预测径流量 Q_1 与观测径流量 Q 的线性回归线斜率为0.69,偏离1:1趋势线较大,且位于直线下方,说明标准SCS-CN法的预测径流量 Q_1 整体上小于实测径流量 Q 。同时,可以看出标准SCS-CN法不能准确预测小降雨径流事件,降雨事件中,预测径流量 Q_1 为0的情况占比为74%,这是由于预测径流量 Q_1 为0的判定条件为 $P \leq I_a$ ($I_a = \lambda S$),说明在黄土高原地区人工牧草CN值率定中,标准SCS-CN模型初损值 λ 取值0.2过高,进而导致标准SCS模型模拟的径流量偏小甚至出现模拟值大量为0的情况。

从表3可以看出,标准SCS-CN法相关系数(R)为0.91,决定系数(R^2)分别为0.72,说明标准SCS模型法模拟的预测径流量 Q_1 与观测径流量 Q ,就相关性和变化趋势来说,效果较好,变化趋势基本一致,在一定程度上标准SCS-CN法可以适用于黄土高原人工牧草径流量的预测。均方根误差RMSE为3.39 mm,纳什效率系数NSE为0.59,说明预测径流量 Q_1 相较于观测径流量 Q 虽有相似的变化趋势,但是误差比较大,尤其是对于小降雨径流事件的坡面产流预测并不准确,需要针对模型的相关参数进行适当的修正,尤其是 λ 值的优化^[21]。

表 3 径流预测模型评价指标分析

| 方法 | 土地利用 | λ | CN ₁ | CN ₂ | CN ₃ | NSE | RMSE | R | 线性回归 | |
|--------------|-------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|------|------|------|------|----------------|
| | | | | | | | | | 斜率 | R ² |
| 标准 SCS-CN | 人工牧草 | 0.20 | 61.24 | 79 | 89.64 | 0.59 | 3.39 | 0.91 | 0.69 | 0.72 |
| | 对照农田 | 0.20 | 64.16 | 81 | 90.75 | | | | | |
| 优化 λ | 人工牧草 | 0.15 | 61.24 | 79 | 89.64 | 0.63 | 3.24 | 0.90 | 0.83 | 0.72 |
| | 对照农田 | 0.18 | 64.16 | 81 | 90.75 | | | | | |
| | 小冠花 | 0.15 | 64.16 | 81 | 90.75 | | | | | |
| | 红豆草 | 0.15 | 61.24 | 79 | 89.64 | | | | | |
| | 沙打旺 | 0.15 | 44.91 | 66 | 81.70 | | | | | |
| | 紫花苜蓿 | 0.15 | 53.17 | 73 | 86.15 | | | | | |
| 优化 CN | 人工牧草 | 0.15 | 61.24 | 79 | 89.64 | 0.68 | 2.99 | 0.91 | 0.85 | 0.77 |
| | 红三叶 | 0.15 | 61.24 | 79 | 89.64 | | | | | |
| | 鹰咀紫云英 | 0.15 | 68.80 | 84 | 92.35 | | | | | |
| | 对照农田 | 0.18 | 64.16 | 81 | 90.75 | | | | | |
| | 人工牧草 | 0.15 | 61.24 | 79 | 89.64 | | | | | |
| 优化 AMC | 对照农田 | 0.18 | 64.16 | 81 | 90.75 | 0.74 | 2.70 | 0.93 | 0.87 | 0.77 |

3.2 初损率(λ)优化率定

(1)取 CN 值为标准 SCS-CN 法的值不变,优化 λ , 范围为 0~0.4, 步长 0.01, 共 40 个, 依次将 λ 和标准 CN 值代入公式(4)计算预测径流量 Q_2 ; (2)应用 LSE 作为最优判别标准, 分别得到人工牧草 λ 最优值为 0.15, 裸地 λ 最优值为 0.18, 预测径流量 Q_2 与观测径流量 Q 对比见图 2。

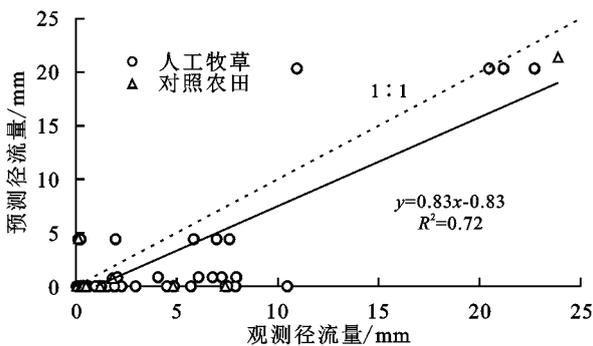


图 2 优化初损率(λ)径流量 Q_2 与观测径流量 Q 比较

初损率(λ)优化率定后, 相比于 λ 取标准值 0.2, 回归线性方程斜率由 0.69 提升为 0.83, 表明标定后的模拟值更靠近 1:1 线, 离散程度显著降低。均方根误差 RMSE 由 3.39 mm 减小为 3.24 mm, 纳什效率系数 NSE 由 0.59 提升为 0.63, 模拟结果 Q_2 与观测径流量 Q 的拟合程度略有提高, 表明 λ 修正后的模型更适合研究区域的降雨资料。说明在黄土高原应用标准 SCS 模型对径流进行估算时, 由于土壤类型、流域下垫面特点(土壤、植被、坡度、土地利用等)和气候条件等的差异, 必须对初损率(λ)进行区域适用性评价, 以得到适宜于研究区域的 λ 值^[21]。

3.3 λ 、CN 值同时优化率定

(1)在人工牧草 λ 最优值为 0.15, 对照农田 λ 最

优值为 0.18 基础上, 对 CN₂ 值进行优化; (2) 选取 CN₂ 的取值范围为 45~95, 步长为 1 进行演算, 由公式(6)、(7)得到对应的 CN₁ 和 CN₃ 值; (3) 依次将 CN₁ 值和最优 λ 代入公式(4)计算预测径流量 Q_3 ; (4) 应用 LSE 作为最优判别标准, 得到不同牧草种类最优 CN₁、CN₂ 和 CN₃ 值见表 3, 人工牧草最优 CN₂ 值为 79, 其中小冠花为 81、红豆草为 79、沙打旺为 66、紫花苜蓿为 73、红三叶为 79、鹰咀紫云英为 84, 而对照农田最优 CN₂ 值为 81。通过各类牧草最优 CN 值与 λ 值得到预测径流量 Q_3 , 与观测径流量 Q 对比见图 3。

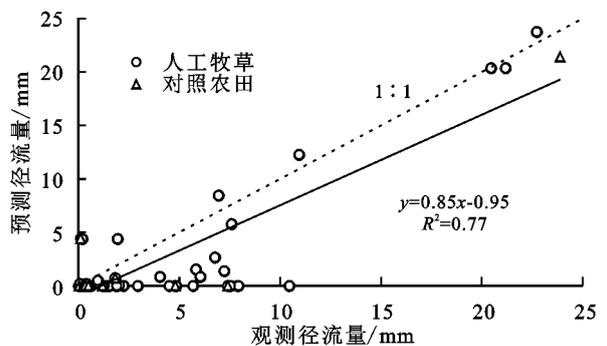


图 3 λ 与 CN 值同时优化后预测径流量 Q_3 与观测径流量 Q 比较

结果显示, 纳什效率系数 NSE 由 0.63 提升至 0.68, 回归线性方程斜率由 0.83 提升为 0.85, 模型拟合程度在一定程度上有所提高, 对于小降雨径流事件预测值为 0 的情况有所改善。对预测径流量 Q_2 和 Q_3 进行配对样本 t 检验, 显示不同种类牧草的最优 CN₂ 值差异不显著 ($p=0.27 > 0.05$), 说明牧草 CN₂ 取值均为 79 时, 预测径流量 Q_2 和 Q_3 无显著性差异。因此, 人工牧草最优 CN₂ 值为 79, 对照农田为 81。通过修

正模型计算得出,黄土高原人工牧草的 CN_2 值仍为标准 CN_2 值,即美国土壤保持局提供的 CN 值仍在黄土高原人工牧草区仍具有适用性,此时 λ 取值:人工牧草为 0.15,对照农田为 0.18。

3.4 正常与湿润情况下的径流估算

径流小区属于半干旱气候,73 场有效降雨事件中,前期土壤湿度条件为 AMC-I 的产流次数为 59 场,占全部产流次数比例为 80.8%,可见该区域前期土壤湿度以干旱为主,因此前文选取 AMC-I 下 CN_1 作为径流参数预报,将 73 场有效降雨事件统一看作 AMC-I 条件下,对人工牧草和对照农田的最优 CN 值和 λ 值进行率定。

按照 SCS-CN 法假设条件,正常与湿润条件下, S 值有减小的趋势,73 场有效降雨事件中,19.2% 的产流事件前期土壤湿度条件为 AMC-III。根据公式(5)、(7),以人工牧草最优 CN_2 值为 79,对照农田最优 CN_2 值 81 为基础,对 AMC-III 条件下产流事件的 S 值进行修正,图 4 为 S 值修正后模拟的结果。

根据前期土壤湿度修正 S 后,均方根误差 RMSE 从 3.39 mm 提升至 2.70 mm,模型效率系数 NSE 从 0.59 提升至 0.74,误差显著降低,尤其是对于小降雨事件,模型拟合程度显著提高,模拟效果较为理想^[6]。

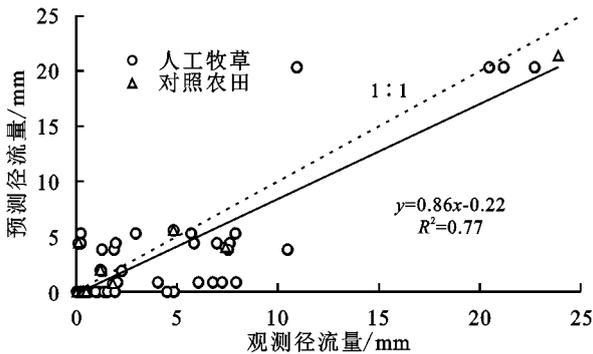


图 4 优化 AMC 后预测径流量 Q_p 与观测径流量 Q_o 比较

4 讨论

标准 SCS-CN 法直接应用于黄土高原人工牧草地区时,对于大部分小降雨事件的径流预测值偏低,这与王英等^[21]的研究结果一致。经本研究优化后,模型模拟精度有提高,纳什效率系数由 0.59 提升至 0.74,尤其是提升了小降雨产流事件的预测精度。优化后的 CN 值、 λ 值更适用于黄土高原人工牧草地区的降雨产流预测。

SCS-CN 模型是基于水量平衡的合理化模型,一般主要应用于以农业土地利用为主的小流域次降雨径流的计算,而影响降雨径流的因素有土壤类型、土地利用覆被情况以及前期土壤湿度等,则隐含在径

流曲线数(CN)和初损率(λ)中^[14]。

不同土地利用方式下的 CN 值有显著的差异,土地利用直接影响到地表植被疏密、地表扰动等,因此会影响植被截留和土壤入渗,对径流产生影响,从而对 CN 值产生影响^[5]。本研究中,人工牧草地 CN 值为 79,而对照农田 CN 值为 81,与美国土壤保持局提供的 CN 值相同^[19]。

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(λ)进行区域适用性评价,以得到适宜于研究区域的 λ 值^[16]。本研究中人工牧草最优 λ 值为 0.15,对照农田为 0.18,相较于取标准值 0.2,纳什效率系数 NSE 略有提升,但提高程度有限,且 λ 值在 0.2 附近波动范围小,这与已有研究^[14]的结果类似,张钰娴等^[20]在黄土丘陵区山西径流场,选取 6 个坡度下的实测降雨资料,对参数 λ 进行敏感性分析,结果表明,初损率 $\lambda = 0.2$ 适合于黄土丘陵缓坡地, λ 随着坡度的增大而减小。

前期土壤湿度条件对 SCS-CN 法模型也有较大的影响,本研究中,对 AMC-III 条件下产流事件的 S 值进行修正,纳什效率系数 NSE 提升至 0.74,修正计算值更加贴近 1:1 线,模拟效果较为理想,这与许秀泉等^[6]的研究结果一致,干旱半干旱地区的监测资料存在前期土壤湿度条件以 AMC-I 为主,可通过修正 S 值获取正常与湿润情况下的 CN_2 、 CN_3 值,模拟效果较为理想。

SCS-CN 模型前期土壤湿度条件通过降雨事件前 5 天的降雨量进行等级划分:干旱(AMC-I),正常(AMC-II)和湿润(AMC-III),使用 3 个离散的 AMC 级别意味着 CN 值从一个级别突然跳到另一个级别,使得 CN 值在特定土壤湿度值上出现的阶跃变化^[13],由公式(5)中 S 和 CN 值的换算关系, S 值也呈现阶跃变化特征,没有考虑到降水强度对径流的影响,在一定程度上限制了模型的预测精度。因此,探讨适合黄土高原地区的前期土壤湿度等级划分标准,将降水强度引入 SCS-CN 模型是提高模型预测精度有效方法^[15]。

另外,SCS-CN 模型多用于小流域,而本文小区面积小,植被覆盖度差异明显,植被覆盖对小区尺度模拟结果的影响远大于小流域,且本研究数据主要来源于实测降雨资料,野外收集降雨径流资料具有一定的困难和误差性,这也是导致整体预测径流量小于观测径流量的重要因素^[6]。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工作。

5 结论

根据黄委会天水水土保持科学试验站罗玉沟试

验场 7 个径流小区中 73 场降雨径流事件资料研究发现,土地利用类型和前期土壤湿度对径流曲线数有显著影响。本研究通过修正 SCS-CN 模型对黄土高原 CN 值和 λ 值优化率定后,得到黄土高原人工牧草 CN₂ 值为 79,对照农田为 81,人工牧草最优 λ 值为 0.15,对照农田为 0.18。可见,美国土壤保持局提供的 CN 值对黄土高原人工牧草具适用性,而初损率 (λ) 值需要优化率定。研究得出的黄土高原人工牧草径流曲线数可为该区域的地表水资源量评价以及土地利用管理提供服务。

参考文献:

- [1] Lu Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [2] 胡健,胡金娇,吕一河.基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6417-6429.
- [3] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
- [4] 井光花.黄土高原半干旱区草地群落结构和功能对管理措施的响应特征[D].北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Shi W H, Wang N. An improved SCS-CN method incorporating slope, soil moisture, and storm duration factors for runoff prediction [J]. *Water*, 2020, 12(5): e1335.
- [8] 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.
- [9] Gao G Y, Fu B J, Lv 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, 16(7): 2347-2364.
- [10] Shi W H, Wang N, Wang M M, et al. Revised runoff curve number for runoff prediction in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(10): e14390.
- [11] 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.
- [12] Lian H S, Yen H, Huang J C, et al. CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China [J]. *Water Research*, 2020, 177: e115767.
- [13] Huang M B, Gallichand J, Dong C Y, et al. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(11): 1471-1481.
- [14] 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.
- [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, 146.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张钰娴,穆兴民,王飞.径流曲线数模型(SCS-CN)参数 λ 在黄土丘陵区率定的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(5): 124-128.
- [21] 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.
- [22] 左长清,郭乾坤.关于径流小区若干技术问题的研究[J]. *中国水土保持*, 2016(6): 43-47, 77.
- [23] 中华人民共和国水利部. SL 419—2007 水土保持试验规程[S].北京:中国水利水电出版社, 2008: 17-20.