

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

许秀泉¹, 范昊明¹, 李刚²

(1.沈阳农业大学水利学院, 沈阳 100866; 2.辽宁省阜蒙县水利事务服务中心, 辽宁 阜新 123100)

摘要: 探讨径流曲线法(SCS—CN法)在不同土地利用方式中的适用性, 为该方法评价水保措施提供一定参考。选择东北半干旱区径流小区监测资料, 采用同时率定径流曲线数(CN)与初损率(λ)的方法, 分析SCS—CN法在评价水保措施与耕作方式的可行性。结果表明: (1) 干旱情况下(AMC1), 最优 λ 值为0.05时, 不同土地利用方式模拟不理想, 利用改正潜在蓄水能力(S)方法得到的裸地、等高沟垄和顺坡垄作结果较为理想, 对应 CN_1 值分别为87.54, 68.49和60.46, 最优 λ 值为0.40。(2) 水平槽、地埂植物带和水平梯田结果不理想, 当实测径流量 >10 mm时, 计算值过大, 利用径流系数比改正后, 模拟精度有较大提高, 是适合水保措施的改正方法。(3) 正常(AMC2)与湿润(AMC3)情况下数据量有限, 保持最优 λ 值不变, 改正S值, 模拟效果较为理想, 是适合干旱地区的估算方法。

关键词: 水土保持措施; 初损率; CN值; 改正

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0052-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.008

Application and Correction of the SCS—CN Method in Runoff Estimation of Several Land Use Patterns in Northeast Semi-arid Region

XU Xiuquan¹, FAN Haoming¹, LI Gang²

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 100866;

2. Water Conservancy Service Center of Fumeng County, Liaoning Province, Fuzin, Liaoning 123100)

Abstract: The applicability of the Curve Number Method (SCS—CN) in different land use patterns was discussed to provide some references for the evaluation of water and soil conservation measures by this method. Based on the monitoring data of runoff plots in semi-arid areas of Northeast China, the feasibility of SCS—CN method in evaluating soil and water conservation measures and tillage methods was analyzed by the methods of simultaneously calibrating of runoff curve number (CN) and the initial loss ratio. The results showed that: (1) Under the drought (AMC1) condition, the optimal value of λ was 0.05, but the simulation results of different land use patterns was not ideal, while the results of bare land, contour ridge and ridge along slope simulated by the modified method of the potential maximum retention (S) were better, and the corresponding CN_1 values were 87.54, 68.49 and 60.46, respectively, and the optimal value of λ was 0.40. (2) The results of horizontal troughs, vegetation belts and terraces were not ideal, and the calculated values were too large when the measured runoff was more than 10 mm. The simulation accuracy was greatly improved through correcting by runoff coefficient ratio, which was recommended as a suitable correction method for water conservation measures. (3) Under normal (AMC2) and wet (AMC3) conditions, the amount of data was limited, keeping the optimum value of λ remained, correcting S value, the simulation result was ideal, and it was a suitable estimation method for arid areas.

Keywords: soil and water conservation measures; initial loss ratio; curve number values; correction

径流曲线法(SCS—CN法)是原美国农业部水土保持局(USDA—SCS, 现为自然资源保护局, NRCS)根据不同环境条件下小流域降雨—径流数据得到的经验模

型^[1]。与其他地表径流模拟方式相比, 该方法结构简单、物理概念明确、所需参数较少, 在世界不同类型的小流域^[2-3]、径流小区^[4]得到了较为广泛的应用, 也被

SWAT 等水文模型所采用。SCS—CN 法主要框架为基于 2 个假设下的水量平衡计算,其应用集中在 CN 值与初损率(λ)的确定。CN 值范围为 0~100,受水文土壤类型(按土壤入渗能力分为 4 类)、土地利用和前期土壤湿度(antecedent moisture condition,简称 AMC)等因素影响,其中 AMC 由前 5 日累计降雨量确定,包括干旱(AMC1)、正常(AMC2)和湿润(AMC3)共 3 种情况,对应 CN 值为 CN_1 、 CN_2 和 CN_3 。 λ 为研究地雨水初损量与潜在蓄水能力(S)之比,推荐标准值为 0.20。

确定 CN 值的主要方法包括反算法^[5]与事件分析法^[6]。符素华等^[7-8]利用 5 种算法进行比较,得出算数平均值法精度较高。多数文献中 λ 值的率定范围为 0.01~0.40,不少地区取 0.05 时精度较高^[9],可见 SCS—CN 法区域化模拟计算精度较优。为克服经验模型的固有弱点,许多学者依据研究区资料特点进行了适当改正,包括基于数学、物理方法的改正与基于一定假设条件的改正^[10],例如引入降雨强度修正^[2,11]、加入积雪消融水^[12]等。

水土流失是威胁生态环境安全的重要问题,目前我国实施了大量水土保持工程,而不同水土保持措施势必引起土地利用方式变化。由于目前监测体系不够完善,数据量较少,且存在大量无资料地区,均增

加了有效评估水土保持效益的困难。SCS—CN 法在少资料、无资料地区径流模拟的优势为客观分析水土保持措施效益提供了可行途径^[13]。本文选择东北半干旱低山丘陵区径流小区资料,采取同时率定 CN 与 λ 的方法,探讨 SCS—CN 法分析典型水土保持措施、耕作方式引起的土地利用方式变化的适用性。同时针对模拟效果不理想、不同土壤水文状况数据量较少等问题,考虑不同土地利用方式对降雨产流过程的影响,采用试算法给出可行改正途径。

1 材料与方法

1.1 径流小区概况

二道岭小流域坡面径流场位于辽宁省阜新蒙古族自治县国华乡西部,地理坐标为东经 121°49′51″,北纬 41°51′20″。该地属土石质低山棕壤丘陵区,为温和半干旱季风大陆性气候,多年平均降水量 480 mm,多年平均径流深 51 mm,汛期降雨(6—9 月)占全年总量 75%以上,且多以大雨、暴雨出现。土壤侵蚀主要以水力侵蚀为主,多年平均侵蚀模数为 1 216 t/(km²·a)。

径流小区始建于 2004 年,土壤类型为薄腐酸性岩棕壤性土。本文选择 2004—2005 年、2013—2018 年 2 个阶段比较完整的 5—10 月降水量、径流量数据,径流小区基本情况与样本数见表 1。

表 1 小区基本情况及样本数

编号	土地利用方式	小区规格(长×宽)/m	坡度/(°)	植被	样本数	5—10月平均降雨量/mm	5—10月平均径流深/mm
1	水平槽	20×5	13	杂草	24	395.8	5.1
2	裸地	30×5	13	稀疏杂草	73		88.7
3	等高沟垄	30×5	13	玉米	45		48.3
4	顺坡垄作	30×5	13	玉米	59		66.7
5	地埂植物带	30×5	13	玉米、柠条	30		11.2
6	水平梯田	30×5	13	玉米	30		12.5

水平槽整地小区布设 0.8 m×1.5 m 水平槽工程。裸地小区保持连续裸露休闲状态,并且常年中耕除草,保持植被盖度不大于 5%,以及无明显植物生长或结皮生成。等高沟垄小区的垄向与等高线平行或呈很小角度(与等高线呈 1%~2%的比降),垄距为 0.5 m。顺坡垄作(不属水土保持措施,属耕作方式)小区的垄向垂直于等高线,垄距为 0.6 m。地埂植物带小区在垂直于等高线方向修建土埂,用于积存雨水,共 5 条埂,埂斜距 6.0 m,并在土埂顶部栽种柠条。水平梯田小区在垂直于等高线方向修建土台,便于蓄水,同时在土台上种植作物,设水平田面 6 个,均宽 5.0 m,田坎高度为 0.9 m。各小区均种植本地主要作物—玉米,按当地传统方法进行耕作、管理。

1.2 数据处理

小区土壤水文组可以近似化为 B 组类型。AMC 划分见表 2。其中 AMC1 下产流次数占全部次数的

86%,可见前期土壤湿度以干旱为主。参考符素华等^[7-8]、何杨洋等^[9]研究结果, λ 值设置在 0.05~0.40 范围,并且利用算数平均值法反推的 CN 值。

表 2 SCS—CN 模型 AMC 划分

前期土壤湿度条件	前 5 日降雨量/mm	
	生长期	休闲期
AMC1	<35.6	<12.7
AMC2	35.6~53.3	12.7~27.9
AMC3	>53.3	>27.9

根据以上分析,主要处理步骤为:(1)设置 λ 值范围为 0.05~0.40,每间隔 0.05,利用算数平均值法推求 CN_1 值,通过对应 λ 值与 CN_1 值计算径流量,利用皮尔森相关系数(r)与纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,NSE)评价模拟效果,筛选出最优 λ 值与 CN_1 值。(2)对于模拟效果不理想的土地利用方式,采用改正 S 值以及与裸地小区径流系数类比的方式,改正模拟结果。(3)在前期土壤湿度为

AMC2、AMC3 时资料有限(约占 14%)情况下,依据干旱条件的 λ 值与 CN_1 值,通过试算得到改正 CN_2 值、 CN_3 值的方式评价模拟效果。

利用 r 分析实测值与模拟值的线性相关程度。利用 NSE 评价模拟精度,其计算公式为:

$$NSE=1-\frac{\sum(Q_o-Q_m)^2}{\sum(Q_o-\overline{Q_o})^2}$$

式中: Q_o 为观测值; Q_m 为模拟值; $\overline{Q_o}$ 为观测值的算数平均值(mm)。NSE 取值为负无穷至 1, NSE 值接近 1, 表示模式质量好,模型可信度高;NSE 值接近 0, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平,总体结果可信,但过程模拟误差大;NSE 值远远小于 0, 表示模型不可信。

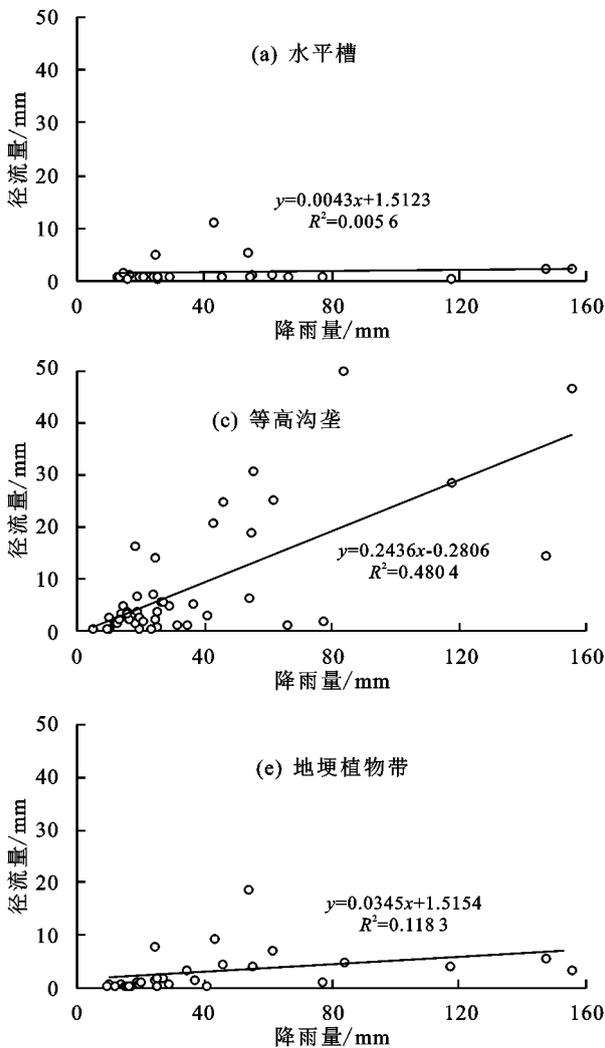


图 1 不同径流小区降雨量—径流量相关分析

2.2 不同土地利用方式下 λ 值与 CN_1 值

根据实测降雨—径流资料,在 λ 值为 0.05~0.40 范围内,以 0.05 为间隔,利用算数平均值法反算 CN_1 值。利用各 λ 值与对应 CN_1 值计算所得径流量与实测径流量的关系见表 3。裸地计算结果的 NSE 与 r 值随初损率增大逐渐最大,最优 λ 值为 0.40,对应的

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下降雨—径流关系

6 个不同土地利用方式小区的多年降雨—径流关系见图 1。裸地、等高沟垄和顺坡垄作小区产流次数较多,且径流量较大。具有水土保持措施的水平槽、地埂植物带和水平梯田小区产流次数相对较少,径流量也相对较低。对比产流时的最低降水量,裸地与顺坡垄作小区为 2 mm,等高沟垄小区为 5 mm,此时前期降雨比较充分;而其他措施小区均接近或超过 10 mm,体现了水土保持工程措施的蓄水作用。裸地、垄作小区降雨量与径流量的线性相关关系较好,而措施小区关系不密切,说明水土保持措施对降雨—产流关系影响较大。

CN_1 值为 87.54。其余土地利用方式下, NSE 与 r 值均随初损率的增大而逐渐减小,最优 λ 值均为 0.05,此时不同土地利用方式对应的 CN_1 值分别为 47.69 (水平槽), 68.49 (等高沟垄), 60.46 (顺坡垄作), 51.37 (地埂植物带), 50.45 (水平梯田)。与北京密云水库流域(暖温带季风气候)计算结果^[9]相比,最优 λ 值相

同,裸地 CN_1 值接近,但耕地的 CN_1 值较小,表明其 S 值较大,这与该地属半干旱气候区,且以 AMC1 为主是相符的。

在最优 λ 条件下,NSE 值由大到小顺序为:裸地 > 等高沟垄 > 顺坡垄作 > 水平梯田 > 地埂植物带 > 水平梯田。其中裸地、等高沟垄小区的 NSE 值分别为 0.33, 0.16,说明其模拟可信度最高;顺坡垄作与水平梯田小

区的 NSE 值接近于 0,表明模拟值接近于观测值的平均水平,但次产流过程模拟误差较大;其余小区的 NSE 值低于 0,说明模拟误差较大。同时裸地、耕作小区的模拟径流量与监测值的相关关系较好,与实测降雨—径流关系相似。根据分析结果,不同土地利用方式相比,裸地与耕作小区的模拟效果优于水土保持措施小区,但总体模拟效果均不理想。

表 3 不同土地利用方式与初损率对应的 CN_1 值与计算结果

参数	土地利用方式	λ							
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
CN_1	水平槽	47.69	57.22	63.15	67.37	70.59	73.16	75.27	77.04
	裸地	64.77	73.73	78.36	81.37	83.52	85.16	86.47	87.54
	等高沟垄	68.49	73.59	77.02	79.54	81.49	83.06	84.36	68.49
	顺坡垄作	60.46	69.87	75.03	78.44	80.92	82.83	84.34	85.59
	地埂植物带	51.37	61.23	67.10	71.15	74.18	76.56	78.49	80.09
	水平梯田	50.45	60.22	66.11	70.22	73.31	75.74	77.73	79.38
NSE	水平槽	-38.60	-56.17	-69.11	-79.46	-88.12	-95.60	-102.22	-108.22
	裸地	0.01	0.15	0.22	0.26	0.28	0.30	0.31	0.33
	等高沟垄	0.16	0.12	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02	-0.11
	顺坡垄作	-0.12	-0.08	-0.08	-0.10	-0.12	-0.14	-0.16	-0.18
	地埂植物带	-4.78	-7.45	-9.41	-10.96	-12.24	-13.34	-14.30	-15.17
	水平梯田	-0.66	-20.64	-26.17	-30.57	-34.22	-37.32	-40.02	-42.44
r	水平槽	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.05	-0.05
	裸地	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85
	等高沟垄	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68
	顺坡垄作	0.81	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
	地埂植物带	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19
	水平梯田	0.50	0.46	0.45	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44

2.3 S 的改正估算

SCS—CN 法多应用于小流域,而本文小区面积较小,且除水平槽与裸地外,均种植玉米,植被覆盖度最大接近于 85%,因此作物对小区尺度模拟结果的影响远大于小流域,这是导致模拟效果不理想的重要因素。作物与杂草不同生长周期内,降雨截留、蒸散发耗水存在差异性,因此不同时期的 S 值也存在差异,上文固定 CN 值无法反映这一差异。基于此,提出改正 S 值的方法,即以作物生长周期内平均植株高度(或覆盖度)对应上文 CN_1 值,其余月份的 CN 值正比于该月份与平均植株高度(或覆盖度)的比例,得到的最优模拟结果见表 4。

表 4 改正 S 值后的估算结果

土地利用方式	λ	NSE	r
水平槽	0.05	-34.68	0.01
裸地	0.40	0.79	0.82
等高沟垄	0.40	0.79	0.72
顺坡垄作	0.30	0.74	0.79
地埂植物带	0.05	-0.20	0.26
水平梯田	0.05	-7.81	0.53

对于模拟较为理想的裸地与耕作小区(图 2),最优

λ 值在 0.40(顺坡垄作取 0.40 时,NSE 值为 0.71,与 0.74 差别不大),且以 <10 mm 的径流事件为主。实测径流量 <10 mm 时,计算值较为接近,但稍微低于实测值;10~20 mm 区间内计算值普遍低于实测值; >20 mm 情况下,计算值多高于实测值。对于模拟效果不理想的措施小区(图 3),多数表现为计算值高于实测值,尤其是一些降雨产流事件中,计算值高于实测值 10 倍以上。

在固定 λ 值与 CN_1 值的情况下,径流量随降雨量增大而增加。除了降雨量,其他因素对径流量也有不同程度影响,如降雨强度、降雨历时、土壤属性等^[14-15]。水平槽整地、地埂植物带、水平梯田等土地利用方式,蓄水作用较强,产流机制较为复杂,在某些降雨条件下可能会产生蓄满产流,也会伴随壤中流和地下径流,使得计算值远高于实测值,这也是造成径流量与降雨量相关系数不高的原因。

2.4 措施小区的改正估算

模拟效果不理想的水土保持措施小区与裸地和耕作小区相比,同等降雨情况下产流次数与产流量较小,主要与不同类型措施的蓄水能力影响有关。计算

值与模拟值最显著差异是在较大雨量情况下,一些场次的模拟径流量远大于实测值(图 3),主要原因是此时可能发生蓄满产流,并且由于水土保持措施小区蓄水作用较强,壤中流、地下径流也会伴随发生。这种情况下 SCS—CN 法中的 S 值应该较大,即 S 值随降雨量的增大而增大,导致表 3 中措施小区的 NSE 值远低于 0。若排除这些极端值,其他计算值与模拟值的关系与裸地、耕作小区相似,说明上述解释不能适用于所有较大雨量的次降雨产流过程,因此单纯调整 S 值(即降低 CN 值)不能提升模拟效果。

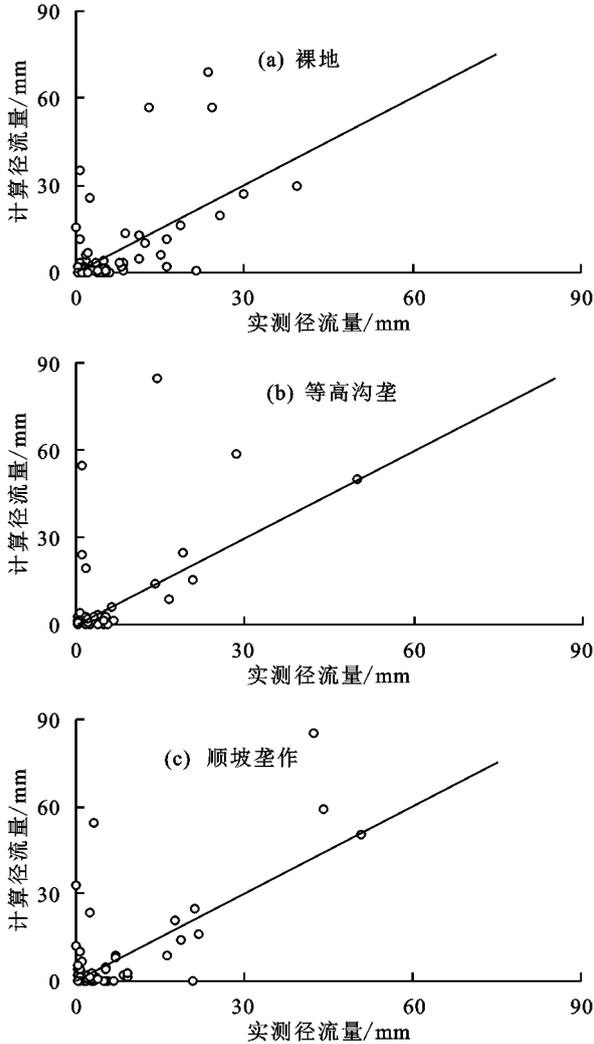


图 2 改正 S 值后裸地与耕作小区的估算结果

基于以上分析,提出径流系数比的改正方法,即将 >10 mm 的计算径流量除以该措施与裸地的径流系数比,得到改正计算径流量(图 3)。对比 2 种结果,水平槽小区的 NSE 值由 -38.60 增加至 -0.26 , r 值不变;地埂植物带小区的 NSE 值由 -12.91 增加为 -0.53 , r 值由 0.23 增大为 0.48 ;水平梯田小区的 NSE 值由 -2.74 变为 -0.21 , r 值由 0.50 变为 0.39 。结果表明改正计算值的相关性变化不大,但 NSE 值均有较大提高,且接近于 0,此时模拟值接近于实测值平均水平,但次降雨产流过程仍存在误差。

对于径流系数远小于裸地的措施,尤其是蓄水能力较强的措施,如果大雨量下的计算值远大于实测值,可以利用径流系数类比的方法,改正计算结果接近于监测值的平均水平,模拟效果有较大提升,但计算结果仅表明改正方法有效。

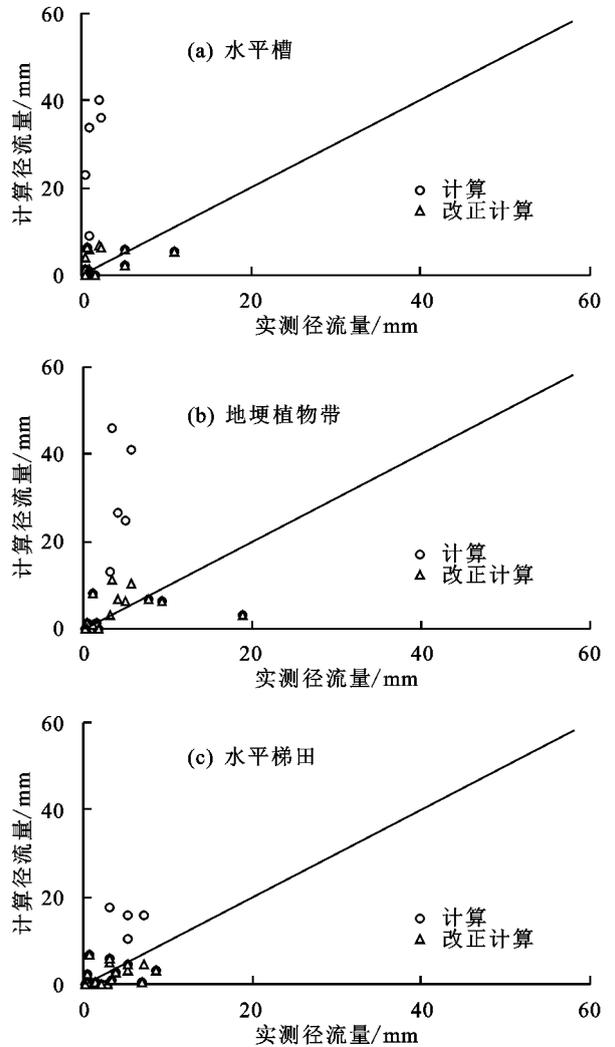


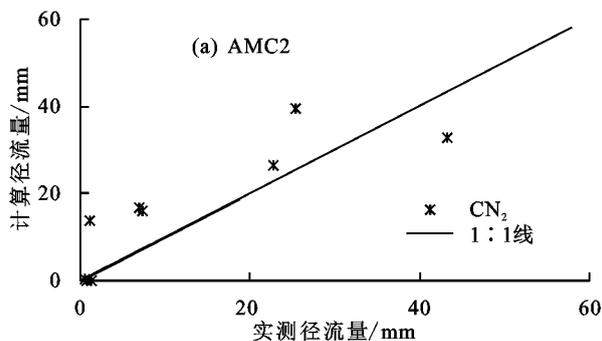
图 3 措施小区径流量估算及改正计算

2.5 正常与湿润情况的径流估算

径流小区地属半干旱性气候,前期土壤湿度条件以干旱为主,所用 8 年监测资料中前期降水属于正常与湿润情况下的数据较少,代表性不足,不宜直接利用类似 CN_1 值的计算方法。按照 SCS—CN 法假设条件,正常与湿润情况下, S 值存在减小的趋势,即径流生成前降雨量的初损值减小,对应 CN 值有增大趋势。因此考虑到正常与湿润情况主要集中在 7—8 月,采用保持最优 λ 不变,以 CN_1 值为基础,改正 S 值,得到 CN_2 值、 CN_3 值的途径进行试算。

图 4 为改正方法模拟结果,其中 AMC2 与 AMC3 的 S 值为 AMC1 的 1.4 倍。AMC2 的 NSE 值为 0.63 , r 值为 0.77 ; AMC3 的 NSE 值为 0.65 , r 值为 0.77 。改正计算值更贴近 1:1 线,模拟效果较为理想。干旱半干旱地区的多年监测资料,存在

AMC以 AMC1 为主,而正常与湿润情况下数据量较小,直接使用效果不理想的问题。由于正常与湿润条件的 S 值相比干旱条件是减小的,可以通过改正 S



值的途径,即采用数据量较大的 AMC1 为基础,按照植株高度(或覆盖度)的关系增加 S 值,后利用实测资料进行验证。

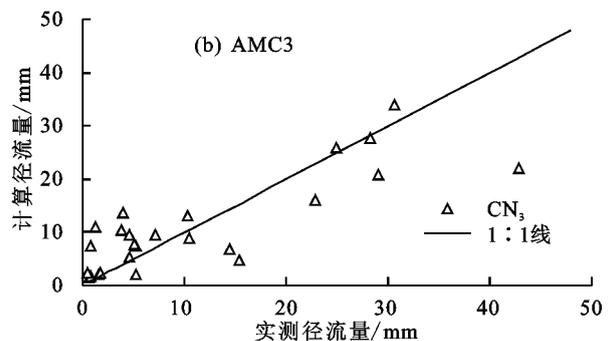


图4 正常与湿润情况的径流量估算

3 结论

(1)采用同时率定 λ 与 CN_1 值的方法,得到最优 λ 值为 0.05,但模拟结果均不理想。改正 S 值后,裸地、等高沟垄和顺坡垄作方式下径流量模拟效果较为理想, CN_1 值分别为 87.54,68.49,60.46,但最优 λ 值增加至 0.40。

(2)水平槽、地埂植物带、水平梯田小区模拟效果不理想,突出表现在一些场次降雨产流机制复杂,计算径流量过大。采用径流系数比的方式进行改正(本文以计算径流量 >10 mm 为界),提升了模拟效果,使得模拟值接近于实测平均值。

(3)研究区以 AMC1 情况为主,其余情况数据量过少,影响了模型应用范围。通过改正 S 值获取正常与湿润情况下的 CN_2 值、 CN_3 值进行试算,模拟效果较为理想。

(4)本文 3 个改正方法具有一定物理基础,方法简单,与经验模型较为匹配。因所用监测资料有限,其应用前景还需进一步检验。另外,经验模型主要优势是参数少,计算简洁、高效,改正方法过多失去了这一本意,因此几个改正方法能否耦合或优化,还需进一步商榷。

参考文献:

[1] Chung W H, Wang I T, Wang R Y. Theory-based SCS-CN method and its applications[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(12): 1045-1058.

[2] 王英,黄明斌.径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J].中国水土保持科学, 2008, 6(6): 87-91.

[3] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, 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.

[4] 焦剑,宋伯岩,王世雷,等.基于改正径流曲线数模型的北京密云坡地径流估算[J].农业工程学报, 2017, 33(21): 194-199.

[5] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土区 SCS-CN 模型径流曲线数计算方法研究[J].人民黄河, 2018, 40(4): 9-14.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Mishra S K, Singh V P, Singh P K. Revisiting the soil conservation service curve number method[A]. Hydrologic Modeling: Select Proceedings of ICWEES-2016 [C]. Springer, 2018: 667-693.

[11] 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正[J].北京林业大学学报, 2016, 38(8): 71-79.

[12] 王瑾杰,丁建丽,张喆,等.奎屯河流域春季融雪期 SCS-CN 模型参数取值方法[J].生态学报, 2017, 37(13): 4456-4465.

[13] Deshmukh D S, Chaube U C, Hailu A E, et al. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 89-101.

[14] 尹鑫卫,李晓玲,康燕霞,等.基于 SCS-CN 模型的沟垄微型集雨系统径流预测[J].生态学杂志, 2015, 34(12): 3502-3508.

[15] 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.