

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150508

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

王红艳 张志强 查同刚 朱聿申 张建军 朱金兆
(北京林业大学水土保持学院,山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站)

摘要:径流曲线数(SCS-CN)是预测场降雨地表径流常用的水文模型之一,由于其基本假设合理、参数易于获得而被广泛应用。然而,由于流域径流的形成受广泛存在空间或时间异质性的地形、地貌、土壤、气象、植被以及土地利用等多种因素的影响,按照标准径流曲线数模型估算的场降雨径流与实测径流相差可能很大。因此,针对特定区域、特定流域对该模型进行相应的修正是提高其径流预测精度的有效途径。本文于晋西黄土区吉县蔡家川分别以农田草地、人工林和次生林为主的3个典型小流域为对象,将2004—2011年实测的场降雨径流数据分为模型参数率定期(2004—2009年)和验证期(2010—2011年),对比标准SCS-CN模型和修正的SCS-CN模型(包括降雨量修正,降雨量与降雨强度修正,降雨量、降雨强度和初损率优化修正)预测场降雨径流的可靠性。结果表明:1)标准SCS-CN预测小流域场降水径流时,精度极差,模型拟合效率系数(E)均小于0;2)采用降雨量修正CN值预测流域地表径流精度优于标准模型,但对于小径流事件而言,预测结果会偏大,对于大径流事件,预测结果会偏小;3)基于优化降雨强度修正因子 β 和初损率 λ 模型可以提高以农田草地和人工林为主2个小流域的径流预测精度。对于以次生林为主的流域而言,仅通过降雨量修正CN值即可提高模型的预测精度, E 可达0.79。反映流域储水特征的初损率 λ ,人工林为主的流域最小,为0.069,农田草地为主的流域次之,为0.189,次生林为主的流域,为0.200,表明次生林流域具有较好的储水效果。

关键词:SCS-CN; 降雨; 地表径流; 黄土高原

中图分类号:S715.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)08-0071-09

WANG Hong-yan; ZHANG Zhi-qiang; ZHA Tong-gang; ZHU Yu-shen; ZHANG Jian-jun; ZHU Jin-zhao. **Modification of SCS-CN model for estimating event rainfall runoff for small watersheds in the Loess Plateau, China.** *Journal of Beijing Forestry University*(2016)**38**(8) 71-79 [Ch,32 ref.]

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;
2 Jixian Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Jixian, Shanxi, 042200, P. R. China.

The SCS-CN method is one of the most widely used hydrological models to predict surface runoff from watershed for a given rainfall event. However, runoff generation is governed by spatially and temporally heterogeneous factors including topography, landform, soil, climate, vegetation and land use, and using standard SCS-CN method to predict surface runoff, could thus result in large errors. Therefore, it is an effective way to modify the original model for particular region, specific watershed for improving the accuracy. The measured event rainfall-runoff datasets from three watersheds located in Caijiachuan watershed on the Loess Plateau of China during 2004 and 2011 were used for calibrating (2004 to 2009) and validating (2010—2011) the original and five modified SCS-CN models. The selected three watersheds are dominated by farmland and grassland, plantation forests, and secondary forests, respectively. We found that the standard SCS-CN method poorly estimated the event runoff for all three watersheds (model efficiency coefficients E less than 0). The performance of revised SCS-CN based on

收稿日期: 2015-12-28 修回日期: 2016-03-07

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划项目(2015BAD07B030303)。

第一作者: 王红艳。主要研究方向: 森林水文与流域管理。Email: 501243477@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 张志强, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林水文、侵蚀控制与流域管理。Email: zhqzhang@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

rainfall amount was better than the standard one even though overestimation for small runoff events and underestimation for large ones were observed across the watersheds. The optimized SCS-CN model by rainfall intensity revised and initial abstraction coefficient improved the prediction accuracy most among the five modified models for watersheds dominated by farmland and grassland and plantation forest. Interestingly, revised SCS-CN by rainfall amount only improved significantly the predicting accuracy for secondary forest dominated watershed ($E = 0.79$). In addition, the initial abstraction coefficient (λ) was 0.069, 0.189, and 0.200 for watersheds dominated by plantation forest, farmland and grassland, and secondary forest, respectively, indicating that the water storage capacity was affected by the vegetation type.

Key words SCS-CN; rainfall; runoff; the Loess Plateau

地处干旱半干旱地区的黄土高原,由于植被退化、地形破碎、土壤质地疏松,且降水多以短历时暴雨形式出现,使其成为世界上土壤侵蚀与水土流失最为严重的地区,该区年土壤侵蚀量可高达 20 000 ~ 30 000 t/km²^[1-3]。因此,准确估算该区小流域场降水地表径流,对于开展流域综合治理规划与水土流失综合治理都具有重要的理论和实践意义。许多估算以超渗产流方式形成的地表径流模型,如 Green-Ampt 入渗曲线、Philip 入渗曲线以及 Horton 入渗曲线等^[4]虽得到广泛的应用,但由于这些方法所需参数较多,且不易获取,限制了他们的广泛使用。

美国自然资源保育局径流曲线数(SCS-CN, soil conservation service curve number)是预测单场降雨地表径流最常用的水文模型之一,该模型考虑了流域下垫面土壤、坡度、植被、土地利用等特点,只需通过查表即可得到径流曲线数(CN),进而计算地表径流量。由于其可用于无资料流域且所需参数少,在世界各国得到了非常广泛的应用^[5-6]。许多基于物理过程分布式流域水文模型,如 SWAT(soil & water assessment tool)、EPIC(erosion productivity impact calculator)和 HEC-HMS(hydrologic modeling system)等都采用该方法计算地表径流量^[7]。然而,SCS-CN 模型也存在一定的不足。首先,根据土壤水文组合前 5 天降雨量划分的 3 个前期土壤湿润程度(AMC)等级确定的不连续 CN 值,可导致模型预测精度很差的结果^[8];其次,该模型并没有考虑降雨强度、雨型、降雨历时、地形以及土壤入渗等的时空变化特点。因此,目前仍有许多研究,试图通过对该模型进行修正,来提高其计算地表径流精度。径流曲线数 CN 和初损率 λ 是该模型 2 个主要参数。Boughton^[9]发现径流深对 CN 的敏感性高于降雨量,CN 取值 $\pm 10\%$ 的变化可导致径流量 +55% 和 -45% 的变化。 λ 作为一个非常重要的区域和气候参数^[10],其值在 0.01 ~ 0.50 之间更合理^[11-13]。因此,将 SCS-CN 模型应用在某个特定地区时,需要对

其进行率定和验证。本文选取位于黄土高原丘陵沟壑区以不同土地利用类型为主的 3 个典型小流域实测降水径流资料,分析标准 SCS-CN 模型预测场降水径流的可靠性,并探究提高其模拟精度的改进途径。

1 研究区概况和数据收集

1.1 研究区概况

蔡家川流域(110°39'45" ~ 110°47'45"E, 36°14'27" ~ 36°18'23"N)是黄河的 3 级支流,位于山西省吉县境内,流域面积约 39 km²,海拔 904 ~ 1 592 m。多年平均降雨量为 580 mm,其中 6—9 月降水量约占全年降水量的 70%,最大 5 min 降雨强度可高达 50 mm/h,年均蒸发量为 1 729 mm^[14]。流域土壤为褐土,呈微碱性,黄土母质,土层厚度异质性较大。农地土壤贫瘠,有机质含量不到 1%,有林地有机质含量在 4% 以上,土壤肥力较高^[15]。全流域森林覆盖率为 72%,其中上游覆盖了大面积的次生林,主要有白桦(*Betula platyphylla*),山杨(*Populus davidiana*),辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等。中游主要为人工林,主要树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*),侧柏(*Platycla dusorientalis*)以及油松(*Pinus tabulaeformis*)等树种,下游主要为荒草和农地。

1.2 数据收集

本研究选取分别以农田草地(1 号)、人工林(3 号)和次生林(6 号)为主的 3 个典型小流域为对象,试验点位于北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测蔡家川流域(图 1,表 1^[14])。降水量分别由布设在 3 个小流域内的翻斗式雨量计测定;小流域径流量采用出口断面布设的矩形-三角形复合断面测流堰水位测定,通过水位流量关系计算得到;场降雨径流量采用直线切割法获得。超声波水位计测定测流堰水位的时间间隔为 5 min,并采用浮子式长期自记水位计(日产水研 62 型)记录的

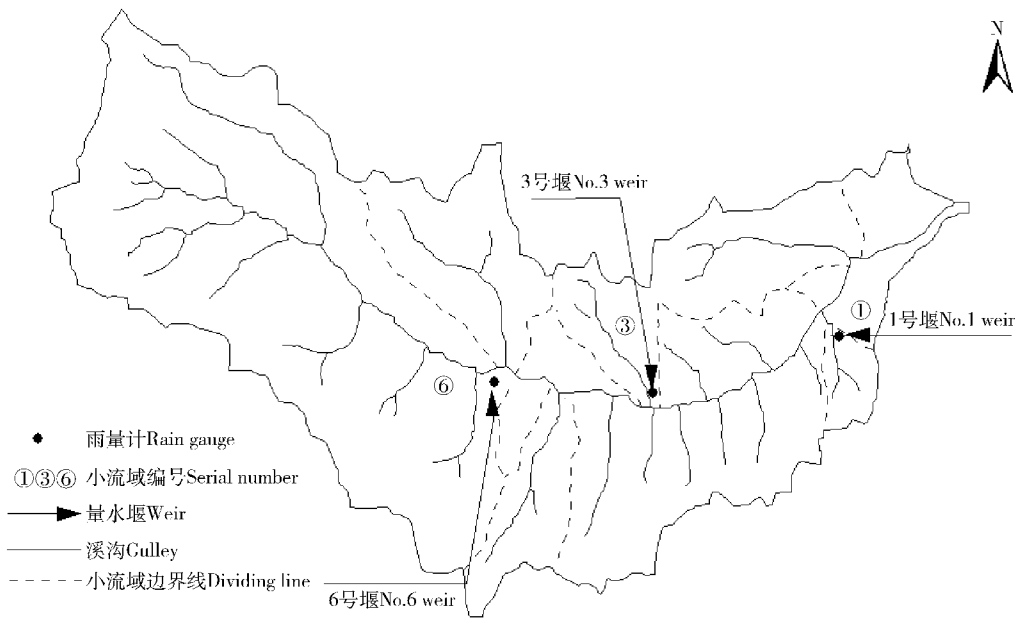


图 1 蔡家川流域概况
Fig.1 General situation of Caijiachuan watershed

表 1 3 个典型小流域 2003 年土地利用现状

Tab.1 Land uses for three typical watersheds within the study area in 2003

流域编号 Watershed number	面积 Area/ km ²	农地 Cropland/ %	草地 Grassland/ %	灌木 Shrub land/ %	次生林 Secondary forest/%	人工林 Plantation/ %	果园 Orchard/%	居民点 Buildings/ %	裸地 Bare land/ %
1	0.7	35.9	52.4	0.0	0.0	9.9	0.9	0.9	0
3	1.5	7.1	0.3	36.9	8.2	40.6	6.9	0	0
6	18.6	1.3	6.3	7.8	55.1	29.2	0.1	0.1	0.1

水位进行校正^[16]。

2 研究方法

2.1 标准 SCS-CN 模型

SCS-CN 模型假设实际入参与潜在最大入渗之比等于地表径流与潜在最大径流之比,初损量与潜在最大入渗成正比,即:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}, \quad P > I_a \tag{1}$$

$$I_a = \lambda S \tag{2}$$

式中:Q 为径流深,mm;P 为降雨量,mm;I_a 为初损量,mm;S 为潜在最大入渗量,mm;λ 为初损率,标准 SCS 模型定义 λ = 0.2。

潜在最大入渗量可由下式确定:

$$S = \frac{25\,400}{CN} - 254 \tag{3}$$

式中:CN 为径流曲线数(curve number)。

CN 的标准值与流域前期土壤湿润程度(AMC, antecedent moisture condition)、坡度、植被、土壤类型和土地利用状况有关。当 CN = 100 时,S = 0,

说明此流域是一个不透水流域;当 CN = 0,S = ∞,说明此流域是一个无限吸水的流域。当降雨和径流都可获得时,取λ = 0.2,由方程(1)、(2)可反推得到^[17]:

$$S = 5[P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ}] \tag{4}$$

2.2 模型改进、参数率定与验证

将 2004—2009 年实测场降水径流系列资料作为改进模型参数率定期,2010—2011 年为验证期。

2.2.1 基于降雨量修正 CN 值

利用 2004—2009 年的实测场降水径流数据,由方程(4)计算得到一系列与降雨量对应的 S 值。采用 SPSS 软件分别分析 3 个小流域的 S 值与降雨量的相关性,若二者相关性显著,再进行回归分析,即可得到不同流域 S 随降雨量变化的关系式,进而根据式(3)计算小流域 CN 值。3 个小流域的 S 值与降雨量显著相关(P < 0.001),S 随降雨量变化的回归方程分别为(5)、(6)、(7)。

农田草地: $S = 10.281 + 3.369P + 0.014P^2$ (5)
 $R^2 = 0.987, n = 45$

人工林: $S = 14.163 + 2.875P + 0.003P^2$ (6)
 $R^2 = 0.937, n = 36$

次生林: $S=5.844+4.255P+0.001P^2$ (7)
 $R^2=0.998,n=40$

利用 2010—2011 年的实测场降水径流数据对上式(5)~(7)进行验证。结果表明,采用式(5)~(7)计算得到的 S 与式(4)计算得到的 S 有着很好的相关性, R^2 均大于 0.99。

2.2.2 引入降雨强度修正 SCS-CN 模型

黄土高原的产流方式主要为超渗产流,标准 SCS-CN 未明确考虑超渗雨对模型的影响^[12]。因此,有必要在 SCS-CN 模型中引入降雨强度,提高模型的预测精度。王英等^[18]在陕西黄土高原地区提出降雨强度与有效降雨量的函数关系(公式 8),引入降雨强度后,模型(公式 9)拟合效率系数 E 较标准 SCS-CN 提高了 131%,高达 0.812。

$$P_a=P\left(\frac{I_{30}}{I}\right)^{\beta}$$
 (8)

$$Q=\frac{\left(P\left(\frac{I_{30}}{I}\right)^{\beta}-I_a\right)^2}{\left(P\left(\frac{I_{30}}{I}\right)^{\beta}-I_a+S\right)},P_a>I_a$$
 (9)

式中: P_a 为有效降雨量,即降雨强度大于土壤入渗

率的降水,mm; I_{30} 为一场降雨中连续 30 min 累计降雨量最大时段所对应的平均雨强,mm/min; \bar{I} 为平均降雨强度,mm/min; β 为降雨强度修正因子。

有研究表明,在黄土高原地区,产流量与 10 和 30 min 最大降雨强度有着较好的相关性^[19-21]。因此,本文同时也采用 10 min 最大降雨强度(I_{10})代替方程(8)中的 I_{30} 评价和比较其预测地表径流的可靠性。

2.3 参数估计

由于 SCS-CN 模型及其降雨强度修正模型均为非线性模型,参数 λ 和 β 优化采用 MATLAB 粒子群优化算法寻优得到最优解, $0<\lambda<1$,用最小平方差作为目标函数:

$$LSE=\min \sum_{i=1}^N\left(Q_{obs}-Q_{com}\right)_i^2$$
 (10)

式中: Q_{obs} 为实际径流深,mm; Q_{com} 为预测径流深,mm; N 为总降雨径流事件。

根据 SCS 土壤分类定义,共分为 4 类土壤(A、B、C、D),见表 2。通过实验结合野外调查,蔡家川流域土壤类型为 C,通过查表得到标准的 SCS-CN 模型中 CN 值分别为 78(农田草地)、73(人工林)、70(次生林)。

表 2 SCS 土壤分类定义
Tab.2 The classification definition of soil

分类 Classification	土壤 Soil
A	厚层沙,厚层黄土,团粒化粉砂土 Thick sand, thick loess, pelletized silty soil
B	薄层黄土,沙壤土 Thin loess, sandy loam
C	黏壤土,薄层沙壤土,有机质含量低的土壤,黏质含量高的土壤 Clayey loam, thin sandy loam, low organic matter, high viscosity
D	吸水后显著膨胀的土壤,塑性大的黏土,某些盐渍土 Significant swell after absorbing water, high-ductility clay, some salinized soil

2.4 模型评价标准

本文采用模型拟合效率系数 E 用来评价实测径流值与预测径流值的一致性,采用标准均方根误差(NRMSE)用来衡量预测径流值同实际径流值之间的偏差^[22]。

$$E=\left[1-\frac{\sum_{i=1}^N\left(Q_{obs}-Q_{com}\right)_i^2}{\sum_{i=1}^N\left(Q_{obs}-\bar{Q}_{obs}\right)_i^2}\right] \times 100 \%$$
 (11)
$$NRMSE=\sqrt{\left(1 / N\right) \sum_{i=1}^N\left(Q_{obs}-Q_{com}\right)_i^2} / \bar{Q}_{obs}$$
 (12)

式中: NRMSE 为标准均方根误差; E 为 Nash-Sutcliffe 模型效率系数,%; \bar{Q}_{obs} 为平均实际观测值,mm。NRMSE 值越高,模型精度越低。 $-\infty \leq E \leq 1$,

$E=1$ 表明模型完全拟合,随着 E 值的降低,模型拟合效率降低, $E \leq 0$ 表明观测值的平均值比模型本身来预测更好。

标准 SCS-CN 模型、模型改进方法及其参数率定与优化结果见表 3。

3 结果与分析

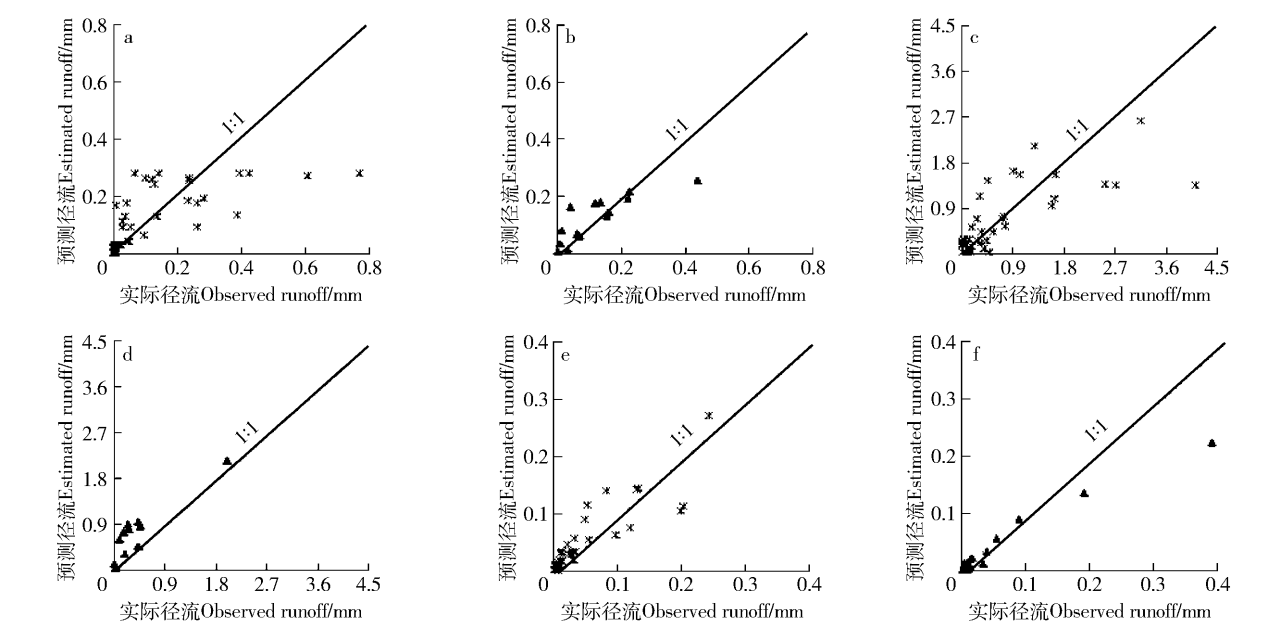
从率定期和验证期径流量的对比可以看出,以农田草地为主的小流域,模型 2 会低估大于 0.2 mm 的径流深,高估小于 0.2 mm 的径流深(图 2a、2b);以人工林为主的小流域,模型 2 会高估小于 1.8 mm 的径流深(图 2c、2d);对于以次生林为主的流域,模型 2 计算的径流量与实际径流量拟合程度较好(图 2e、2f)。3 个小流域基于模型 2 计算地表径流与实际径流的拟合程度值见表 4。

表 3 模型修正及参数率定

Tab.3 Approaches for model improvement and parameter calibration

模型编号 Model number	类型 Type	方程 Formula	参数设定/率定 Parameter setting/calibration		
			CN	β	λ
1	标准 SCS-CN Standard SCS-CN	$Q = (P - \lambda S)^2 / (P - \lambda S + S)$	查表 Table-look-up		0.200
2	降雨量修正 SCS-CN revised SCS-CN	$Q = (P - \lambda S)^2 / (P - \lambda S + S)$	方程(5) ~ (7) Equation (5) - (7)		0.200
3	降雨量与 30 min 降雨强度修正 SCS-CN Rainfall amount and 30 min rainfall intensity revised SCS-CN	$Q = \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S \right)^2 / \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S + S \right)$	方程 (5) 和 (3) Equation (5) and (3)	-0.013	0.200
4	降雨量、30 min 降雨强度和初损率 λ 优化修正 SCS-CN 模型 Rainfall amount, 30 min rainfall intensity and initial abstraction coefficient revised SCS-CN	$Q = \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S \right)^2 / \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S + S \right)$	方程(5)和(3) Equation (5) and (3)	-0.057	0.189
5	降雨量与 10 min 降雨强度修正 SCS-CN Rainfall amount and 10 min rainfall intensity revised SCS-CN	$Q = \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S \right)^2 / \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S + S \right)$	方程 (6) 和 (3) Equation (6) and (3)	0.000	0.200
6	降雨量、10 min 降雨强度和初损率 λ 优化修正 SCS-CN 模型 Rainfall amount, 10 min rainfall intensity and initial abstraction coefficient revised SCS-CN	$Q = \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S \right)^2 / \left(P \left(\frac{I_{30}}{I} \right)^3 - \lambda S + S \right)$	方程 (6) 和 (3) Equation (6) and (3)	-1.550	0.069

注: β 为降雨强度修正因子, λ 为初损率。Notes: β means rainfall intensity coefficient, λ means initial abstraction coefficient.



以农田和草地为主小流域(a,b),以人工林为主小流域(c,d),以次生林为主小流域(e,f),率定期(a、c、e),验证期(b、d、f)。
Farmland and grassland dominated watershed (a,b), forest plantation dominated watershed (c,d), secondary forest dominated watershed (e,f), calibration periods (a,c,e), validation period (b,d,f) .

图 2 模型 2 在率定期和验证期预测流域径流深与实测径流深的比较

Fig.2 Observed and computed event runoff by using model 2 during the calibration and validation periods

表 4 率定期和验证期模型预测地表径流深效率

Tab.4 Model performance of predicting surface runoff during the calibration and validation periods

模型 编号 Model number	项目 Item	农田草地为主小流域 Farmland and grassland dominated watershed			人工林为主小流域 Plantation dominated watershed			次生林为主小流域 Secondary forest dominated watershed		
		R^2	E	NRMSE	R^2	E	NRMSE	R^2	E	NRMSE
1		0.11	-13	7.56	0.10	-1.74	2.24	0.21	-170	21.3
2	率定 Calibration	0.48	0.47	1.04	0.54	0.53	0.14	0.77	0.77	0.66
	验证 Validation	0.64	0.62	0.72	0.82	0.46	0.30	0.96	0.79	0.87
3	率定 Calibration	0.51	0.50	1.00	0.55	0.53	0.86	0.78	0.77	0.65
	验证 Validation	0.68	0.63	0.71	0.81	0.48	1.03	0.96	0.76	0.94
4	率定 Calibration	0.55	0.55	0.96	0.77	0.66	0.73	0.78	0.77	0.66
	验证 Validation	0.69	0.65	0.69	0.43	-0.69	1.87	0.96	0.76	0.94
5	率定 Calibration	0.48	0.47	1.01	0.54	0.54	0.14	0.77	0.77	0.65
	验证 Validation	0.64	0.56	0.73	0.82	0.48	0.30	0.95	0.75	0.95
6	率定 Calibration	0.51	0.53	0.97	0.76	0.76	0.10	0.78	0.77	0.65
	验证 Validation	0.62	0.56	0.77	0.86	0.60	0.26	0.95	0.75	0.92

3.1 农地和草地为主小流域

从表 4 中可以看出,采用模型 1 预测地表径流时,拟合效率系数 E 为 -13,精度极差;在验证期,与模型 1 相比,模型 2 预测径流深与实际观测值有着更高的 E (0.62),预测精度显著提高;模型 3 与模型 2 相比, R^2 和 E 都略有所提高,模型拟合效率系数 E 从 0.62 提高到 0.63,NRMSE 从 0.72 减小到 0.71;对模型 4 中的 λ 和 β 进行优化,得到 $\lambda = 0.189, \beta = -0.057$ (表 3),且模型 4 较前 3 个模型的 R^2 和 E 都有所提高,表明在以农地和草地为主的小流域同时优化 30 min 降雨强度修正因子 β 和初损率 λ 可以提高模型的预测精度。从图 3a、3b 中可以看出,引入降雨强度优化 SCS-CN 模型后,仍然会高估大部分小径流事件($<0.2\text{ mm}$),低估大径流事件($>0.2\text{ mm}$)。

3.2 人工林为主小流域

以人工林为主的小流域,模型 1 模型拟合效率系数 E 为 -1.74。从表 4 中可以看出,在率定期,模型 4 较模型 3 拟合效率 E 有显著提高,从 0.53 提高到 0.66,而在验证期,模型拟合效率 E 却从 0.48 减小到 -0.69。与模型 4 相比较,模型 6 在率定期模型拟合效率系数 E 从 0.66 提高到 0.76,在验证期,模型拟合效率 E 从 -0.69 提高到 0.60,且标准均方根误差 NRMSE 减小。由于以人工林为主小流域主要以油松和刺槐为主,地表枯枝落叶少,草本植被覆盖度较低,降雨时容易形成地表径流^[15],因此,在此流域引入 10 min 降雨强度优化 SCS-CN 模型且同时优化 λ ,可以提高模型的预测精度。图 3c 与图 2c 比较,在预测地表径流趋势上相同,仍然会低估大径

流事件($>1.8\text{ mm}$)。在小于 1.8 mm 的径流事件上,预测趋势与率定期相似。

3.3 次生林为主小流域

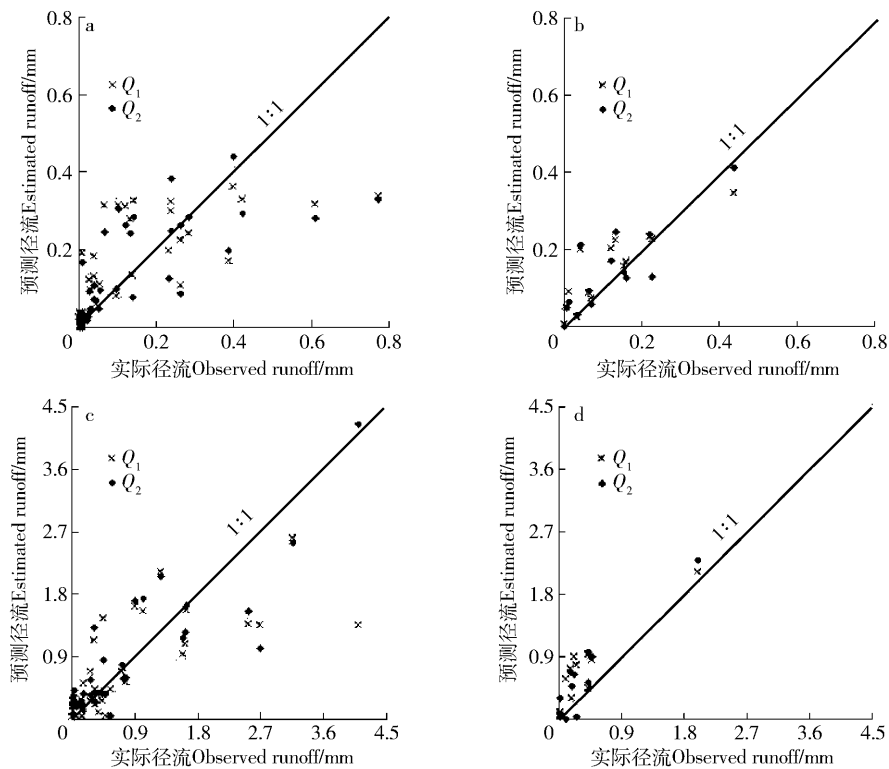
从表 4 中可以看出,在率定期,模型 2 与模型 1 相比,模型拟合效率系数 E 从 -170 提高到 0.77,NRMSE 从 21.3 减小到 0.66,极大的提高了模型的预测精度。与模型 2 相比,在率定期,模型 3、4、5 和 6 模型精度都没有提高, E 值未出现变化,仍为 0.77;在验证期, E 值有所减小,NRMSE 增大。由于以次生林为主的小流域森林覆盖率高,地表枯枝落叶层厚,对降雨强度敏感性较弱,径流预测拟合程度较模型 2 并没有变化,因此,在以次生林为主的小流域中引入降雨强度修正 SCS-CN 模型并不能提高预测精度。在验证期,实际径流深与预测径流深线性关系很好,如图 2f 所示。

4 讨 论

与基于物理过程分布式参数的水文过程模型不同,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的次降雨径流的计算。而影响次降水径流的其他因素如地形、地貌、土地利用等,则隐含在径流曲线数 CN 和初损率 λ 中。考虑到影响 3 个小流域地表径流的形成的地形地貌因素并无差异,因此,本文重点讨论土地利用方式和降雨对 SCS-CN 模型中参数的影响。

4.1 降雨量对 CN 值的影响以及降雨强度对产流的影响

本文在预测地表径流时只考虑了降雨量对 CN 值的影响以及降雨强度对产流的影响,并没有考虑



以农田和草地为主小流域(a,b),以人工林为主小流域(c,d),率定期(a,c),验证期(b,d). Q_1 为利用降雨量和降雨强度修正因子 β 修正 SCS-CN 模型后的预测径流量, Q_2 为利用降雨量、降雨强度修正因子 β 和初损率入优化 SCS-CN 模型后的预测流量。Farmland and grassland dominated watershed(a,b), forest plantation dominant watershed(c,d), calibration periods(a,c), validation period(b,d). Q_1 indicates revised SCS-CN by rainfall amount and rainfall intensity to predict surface runoff, Q_2 indicates revised SCS-CN by rainfall amount, rainfall intensity and initial abstraction to predict surface runoff.

图 3 模型 4 在率定期和验证期预测流域径流深与实测径流深的比较
Fig. 3 Observed and computed event runoff by using model 4 during the calibration and validation periods

降雨历时、雨型、坡度、前期土壤湿润程度、入渗的时间和空间变化等因素对流域产流的影响,这些因素限制了模型拟合效率系数最高值只达到了 0.79 (表 4)。

张秀英等^[23]选取 4 年的降雨径流资料反推 CN 值,得到 CN 值与降雨量的相关系数高达 95%,与本文研究结果一致。Hawkins^[17]应用渐近线法分析了 CN 值对降雨量的敏感性,发现随着降雨量的增大, CN 值将达到一个定值。一些研究者为了在特定流域进一步提高模型预测精度,将降雨量等级划分、坡度、前期土壤湿度程度等因素考虑到该模型中。Sahu 等^[22]在美国的农地流域通过划分降雨量等级来预测地表径流,结果表明降雨量在 10 ~ 20 mm 时,模拟效果最好,而对于小于 10 mm 的降雨量模拟效果最差。也有学者认为随降雨历时增加,CN 值会逐渐减小^[24]。Yuan^[13]在亚利桑那州发现随着河道面积的增大, S 也会随着增大。

Deshmulch 等^[1]在印度的 3 个相邻流域,分别利用观测到的降雨径流数据、土地利用方式以及坡度变化 3 种不同的方法估测 CN 值,结果表明,基于

降雨径流数据得到的 CN 值与基于土地利用方式得到的 CN 值拟合效果很好,对于坡度大于 5% 的小流域,应将坡度也考虑到 CN 值中。Huang 等^[25]在黄土高原地区利用坡度优化 CN 值,拟合效率系数 E 从 69.8% 提高到 82.6%。在本文中,3 个小流域坡度均大于 5%,在率定 CN 时,未将坡度因素考虑在内,也可能是造成模型拟合效率系数只能达到 0.79 的原因(表 4)。

Huang 等^[26]在黄土高原地区利用实测土壤含水量优化 CN 值,模型拟合效率从 0.24 提高到 0.66,且得到 CN 与 15 cm 表层土壤含水量呈非线性关系。Jacobs 等^[27]利用遥感获得的土壤数据估测 S ,径流预测精度较原来有显著提高。然而由于本文研究的 3 个小流域并没有实测的土壤含水量数据,因此,不能通过实测的土壤数据率定 S 。

在黄土高原流域,降雨强度对径流的产生有一定的影响。在以人工林为主的小流域,模型 6 预测地表径流优于模型 4,这可能是由于方程(8)是在黄土高原地区的农地和草地上统计得出,并不适合人工林小流域。在以次生林为主的小流域,由于森林

覆盖率、地表枯落物积累量和草本覆盖度高,因此,在引入降雨强度优化之后,模型效率并没有显著改进。而在以农地草地为主的小流域,引入 30 min 最大降雨强度可提高模型的预测精度。

4.2 土地利用方式的影响

以人工林为主的小流域的初损率 $\lambda = 0.069$,以农地和草地为主的小流域 $\lambda = 0.189$,以次生林为主的小流域最佳 $\lambda = 0.200$ (表 3)。这是由于以农田草地为主的小流域主要为水平梯田和草地,降雨主要集中在 7—9 月,这时农地和草地已经有一定的盖度,且农地土壤疏松,入渗能力较强;以次生林为主的小流域森林覆盖率、地表枯落物积累量和草本覆盖度高,形成了良好的林地土壤水分环境,水土保持效果表现最好;以人工林为主的小流域,由于流域内树种对水分的竞争使得流域内灌草生长退化,保水效果差。所以,反应流域储水特征的初损率 λ 以人工林为主小流域最小,以次生林流域为主最大,以农地和草地为主小流域介于二者之间。

在农地和草地为主的流域,对于初损率 λ 的修正,模型精度提高程度有限,且 λ 值在 0.2 附近波动范围小,这与一些研究者得出的结果类似^[2,28]。张钰娴等^[29]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 会随着坡度的增大而减小。除此之外,也有一些与以人工林为主流域相类似的研究结果,即通过优化初损率 λ 可以显著提高模型的预测精度。贺宝根等^[30]认为初损率 $\lambda = 0.05$ 适合于上海水田流域。Shi 等^[31]在 3 个峡谷流域得出初损率 $\lambda = 0.053$,模型拟合效率系数 E 从 48.2% 提高到 76.8%。Baltas 等^[11]在希腊的一个实验流域利用观测的降雨径流资料得到初损率 λ 的平均值,即 $\lambda = 0.014$ 。Elhakeem 等^[32]认为初损量 I_a 与潜在最大入渗量 S 呈非线性关系,Mishra^[8]等也得出同样的研究结果,而本文计算初损量采用的是线性方程式(2)。

5 结 论

综上,CN 值对降雨量敏感程度较高,基于降雨量修正的 CN 值,即模型 2 优于标准 SCS-CN 模型预测地表径流,但其对于小径流事件,预测结果会偏大,对于大径流事件,预测结果会偏小;在以不同的土地利用方式为主的小流域上,基于降雨量修正的 CN 值(模型 2)预测次生林为主的小流域地表径流精度优于以农田草地和人工林为主的小流域,验证期模型拟合效率系数达到 $E = 0.79$ 。在以农田草地和人工林为主的 2 个小流域分别引入 30 min 最大

降雨强度(模型 3)和 10 min 最大降雨强度(模型 5),与模型 2 相比,模型拟合效率系数 E 有一定提高,农田草地 E 从 0.62 提高到 0.63,人工林 E 从 0.46 提高到 0.48,在模型 3 和 5 的基础上,优化初损率 λ ,农田草地 E 从 0.63 提高到 0.65,人工林 E 从 0.48 提高到 0.60,但次生林为主小流域,预测精度并未提高。说明在农田草地和人工林为主的小流域引入降雨强度修正函数并优化初损率 λ 可以提高 SCS-CN 预测精度。反应流域储水特征的初损率 λ 人工林为主的小流域最小,为 0.069,以农田草地为主的小流域次之,为 0.189,以次生林为主的小流域对于减缓径流效果最佳, $\lambda = 0.200$ 。

参 考 文 献

[1] DESHMUKH D S, CHAUBE U C, EKUBE H A, et al. Estimation and comparision 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.

[2] 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.

[3] ZHANG L, PODLASLY C, REN Y, et al. Separating the effects of changes in land management and climatic conditions on long-term streamflow trends analyzed for a small catchment in the Loess Plateau region, NW China[J]. Hydrological Processes, 2014,28(3):1284-1293.

[4] 符素华,刘宝元,吴敬东. 北京地区坡而径流计算模型的比较研究[J]. 地理科学,2002,22(5):604-609.

FU S H, LIU B Y, WU J D. Study on runoff calculation method in Beijing mountainous area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(5):604-609.

[5] JUNG J W, YOON K S, CHOI D H, et al. Water management practices and SCS curve numbers of paddy fields equipped with surface drainage pipes[J]. Agricultural Water Management,2012, 110:78-83.

[6] REISTETTER J A, RUSSELL M. High-resolution land cover datasets, composite curve numbers, and storm water retention in the Tampa Bay, FL region[J]. Applied Geography,2011,31(2): 740-747.

[7] KOUSARI M R, MALEKINEZHAD H, AHANI H, et al. Sensitivity analysis and impact quantification of the main factors affecting peak discharge in the SCS curve number method: an analysis of Iranian watersheds [J]. Quaternary International, 2010,226(1-2):66-74.

[8] MISHRA S K, SAHU R K, ELDHO T I, et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology [J]. Water Resources Management, 2006,20(5): 643-660.

[9] BOUGHTON W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Soil and Water Management and Conservation,1989, 27(5):11-23.

[10] MISHRA S K, SINGH V P, SANSALONE J, et al. A modified SCS-CN method: characterization and testing [J]. Water

Resources Management,2003,17(1): 37-68.

[11] BALTAS E A, DERVOS N A, MIMIKOU M A. Technical note: determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007,11(6):1825-1829.

[12] MISHRA S K, SINGH V P. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates[J]. Hydrological Processes,2004,18(17): 3323-3345.

[13] YUAN Y P, NIE W M, STEVEN C, et al. Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in southeastern Arizona [J]. Hydrological Processes,2014,28(3):774-783.

[14] WANG S P, ZHANG Z Q, MCVICAR T R, et al. An event-based approach to understanding the hydrological impacts of different land uses in semi-arid catchments [J]. Journal of Hydrology, 2012,416-417:50-59.

[15] 张建军,纳磊,董煌标,等. 黄土高原不同植被覆盖对流域水文的影响[J]. 生态学报,2008,28(8):3597-3604.

ZHANG J J, NA L, DONG H B, et al. Hydrological response to changes in vegetation covers of small watersheds on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(8):3597-3604.

[16] 郑芳,张建军. 蔡家川流域降雨-径流关系及水量平衡分析[J]. 水土保持通报,2012,32(1):71-76.

ZHENG F, ZHANG J J. Analyses of rainfall-runoff relationship and water balance in Caijiachuan watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(1):71-76.

[17] HAWKINS R H. Asymptotic determination runoff curve numbers from data [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993,119(2):334-345.

[18] 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.

WANG Y, HUANG M B. Application of the SCS-CN method on runoff estimation in small watershed on Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation,2008,6(6):87-91.

[19] 贺维,张建军,纳磊,等. 晋西黄土区不同土地利用类型降雨-径流关系的研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,5(27):80-87.

HE W, ZHANG J J, NA L, et al. Research on relationship between rainfall and runoff in different land use patterns on loess slope in west of Shanxi province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2007,5(27):80-87.

[20] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力 R 指标的研究[J]. 中国水土保持,1987(12):34-38.

WANG W Z. Study on index of erosivity (R) of rainfall in loess area[J]. Soil and Water Conservation in China,1987(12):34-38.

[21] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2006,24(1):19-26.

YU X X, ZHANG X M, WU S H, et al. The effect of vegetation and precipitation upon runoff and sediment production in sloping lands of loess area [J]. Journal of Mountain Science,2006,24(1):19-26.

[22] SAHU R K, MISHRA S K, ELDOHO T I. Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(5):749-756.

[23] 张秀英,孟飞,丁宁. SCS 模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J]. 水土保持研究,2003,4(10):172-174.

ZHANG X Y, MENG F, DING N. Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region[J]. Research of Soil and Water Conservation,2003,4(10):172-174.

[24] MISHRA S K, PANDEY R P, JAIN M K, et al. A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CNProcedure for long duration rainfall-runoff events[J]. Water Resources Management,2008,22(7):861-876.

[25] HUANG M B, 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.

[26] HUANG M B, GALLICHAND J, DONG C Y, et al. Use of soil moisture and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 1471-1481.

[27] JACOBS J, MYERS D, WHITFIELD B. Improved rainfall/runoff estimates using remotely sensed soil moisture[J]. Journal of the American Water Resources Association,2003,39:313-324.

[28] 王白陆. SCS 产流模型的改进[J]. 人民黄河,2005,5(27):24-26.

WANG B L. Study on the improved SCS model [J]. Yellow River,2005,5(27):24-26.

[29] 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.

[30] 贺宝根,周乃晟,高效江,等. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系-SCS 法的修正[J]. 环境科学研究,2001,3(14):49-51.

HE B G, ZHOU N S, GAO X J, et al. Precipitation-runoff relationship in farmland nonpoint source pollution research: amending coefficient of SCS hydrologic method [J]. Research of Environmental Sciences,2001,3(14):49-51.

[31] 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.

[32] ELHAKEEM M, PAPANICOLAOU A N. Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements in the state of iowa, USA[J]. Water Resources Management,2009,23(12):2455-2473.

(责任编辑 李 契 范 娟
责任编辑委 杨晓晖)