

密云水库上游流域径流曲线模型的参数修订

何杨洋¹, 王晓燕¹, 段淑怀²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市水土保持总站, 北京 100037)

摘要: 为探讨同时率定 CN 值和初损率 2 个参数得到的模拟结果是否比单独率定一个参数更为理想, 且在不同土地利用类型下 SCS-CN 模型是否均适用, 选取了密云水库上游石匣小流域为研究区域, 根据石匣小流域坡面试验小区 2006—2010 年实测降雨—径流数据和 SCS-CN 模型的计算公式, 在 0.05~0.40 范围内, 等间隔选取 8 个不同的初损率值, 并利用算术平均值法反推各初损率值条件下对应的 CN 值, 以纳什效率系数为 SCS-CN 模型的适用性评价参数, 确定裸地、耕地、草地和林地 4 种不同土地利用类型下模拟效果最佳的 CN 值与初损率, 最后对 4 种不同土地利用类型下的 SCS-CN 模型进行了适用性评价。结果表明: (1) 4 种不同土地利用类型条件下, 当初损率为 0.05 时纳什效率系数值最高, 分别为裸地(0.75)、耕地(0.48)、草地(-1.11)、林地(-0.24); (2) 在石匣小流域内利用 SCS-CN 模型对该研究区域的径流值进行预测时, 裸地条件下的 CN_1 值为 86, 耕地条件下的 CN_1 值为 74, 草地条件下的 CN_1 值为 58, 林地条件下的 CN_1 值为 63, 4 种不同土地利用类型的初损率取值均为 0.05; (3) 通过同时率定 2 个参数可以使得 SCS-CN 模型的模拟效果得到一定的提高; (4) 在石匣小流域内, SCS-CN 模型在裸地和耕地条件下可以较好地模拟地表径流, 但草地和林地条件下其模拟结果不理想。

关键词: 密云水库上游流域; SCS-CN 模型; 径流曲线数; 初损率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0134-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.024

Revision of CN Value and Initial Abstraction Ratio in the SCS-CN Model in Upper Reaches of Miyun Reservoir

HE Yangyang, WANG Xiaoyan, DUAN Shuhuai

(1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 2. Water and Soil Conservation Station of Beijing, Beijing 100037)

Abstract: The studies on revision of parameters of SCS-CN model have been done by lots of scholars in China, but most of them focused on using different methods to revise 1 of the 2 parameters. In order to investigate whether the simulated result obtained from revising the 2 parameters at the same time is better than only revising 1 parameter, and also to identify the applicability of SCS-CN model under 4 different kinds of land use, this paper chose Shixia small watershed, which is the upper area of Miyun Reservoir watershed, as the study area, and the monitoring data during 2006 to 2010 of Shixia small watershed was collected. 8 equal interval of initial abstraction ratio value from 0.05 to 0.40 was selected, and by using the arithmetic mean method, the curve number values of 8 different initial abstraction ratios were calculated respectively. This paper also evaluated the applicability of SCS-CN model in study area under 4 different kinds of land use by taking Nash efficiency coefficient as criterion. The results showed that: (1) In the study area, when the initial abstraction ratio values were 0.05 under 4 different types of land use conditions, the Nash efficiency coefficient were the highest, which were 0.75, 0.48, -1.11 and -0.24 under bare land, cropland, grassland and woodland, respectively. (2) When we adopted SCS-CN model to predict runoff in upper area of Miyun reservoir, the recommend values of curve number under bare land, cropland, grass land and woodland were 86, 74, 58, and 63, respectively. And the recommend values of initial abstraction ratio under 4 land use patterns were all 0.05. (3) The simulation results of the SCS-CN model could be improved to a certain extent by revising the 2 parameters at the same time. (4) SCS-CN model could be adopted in bare land and cropland in Shixia small watershed, but was not recommended to be adopted in grassland and woodland.

收稿日期: 2016-06-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271495); 高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目(20121108110006)

第一作者: 何杨洋(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持及水污染控制与管理研究。E-mail: 771344674@qq.com

通信作者: 王晓燕(1967—), 女, 教授, 博士, 主要从事流域水环境污染研究。E-mail: wangxy@cnu.edu.cn

Keywords: upper reaches of Miyun Reservoir; SCS—CN model; runoff curve number value; initial abstraction ratio

美国农业部研发的 SCS—CN 模型由于参数少,计算过程简单,所需资料易于获取等优点,在水环境、水文水资源等领域被广泛应用^[1-2]。在我国也有很多 SCS—CN 模型用于次降雨过程中预测径流量的案例^[3-5]。SCS—CN 模型主要包括 2 个参数:CN 值和初损率 λ 。其中 CN 值能反映不同土壤条件、不同土地利用方式及前期土壤含水量对降雨径流的影响;初损率 λ 受土地利用类型、耕作方式、灌溉条件、枝叶截留、下渗、填注等各种因素的综合影响^[6-7]。在诸多应用案例中,研究者大多直接选用美国农业部土壤保持局提供的 CN 查算表中的 CN 值来估算径流量,初损率 λ 则选取美国农业部土壤保持局在分析大量长期试验结果的基础上确定的 0.2 作为默认值。但是由美国农业部土壤保持局提供的 CN 值查算表反映的是美国地域特征,而中国大多数地区与美国的气候、植被、土壤、地形等多方面存在着显著差异。近几年来,在不同地区的一系列研究表明,初损率取默认值 0.2 时,模拟精度并不能满足实际应用,Ponce 等^[7]对 SCS—CN 方法进行了一次全面的理论论证,建议初损率应作为区域化参数,对其合理取值需进一步研究。针对 CN 值和初损率 λ 的参数区域化,国内外的许多学者对此展开了研究。Deshmukh 等^[8]利用长期观测的降雨—径流实测数据以及回归统计模型在流域尺度上估算不同土地利用方式下的 CN 值;Fan 等^[9]利用遥感影像获取研究区域的植被覆盖、土壤类型和不透水面比例等信息来计算该研究区域的 CN 值;符素华等^[10]根据北京密云、延庆、门头沟 64 个坡面径流小区的降雨径流资料,利用算术平均法计算出各小区的 CN 值;陈正维等^[11]选取 2013 年的 5 场降雨产流的实测数据,考虑坡度对径流的影响,确定紫色土坡耕地区域的 CN 值和初损率 λ 的最佳取值;Shi 等^[2]采用事件分析法率定中国南方三峡库区王家沟小流域初损率,并推荐该研究区域的最佳初损率为 0.05;周淑梅等^[12]利用反算法和事件分析法确定黄土丘陵沟壑区典型小流域初损率取值,为 SCS—CN 法在该地区的适用性评价提供参考。

虽然国内外对 CN 值和初损率的确定已展开了一系列的研究,但大多数研究都是在默认初损率为 0.2 的基础上单独率定 CN 值,或是直接根据美国 CN 值查算表确定 CN 值后再率定初损率,很少有学者将 CN 值和初损率同时进行率定。根据相关学者^[13]在密云水库流域单独进行 CN 值或者初损率的率定结果来看,其模型模拟结果依然不够理想。这可

能是由于学者未同时率定 2 个参数所造成的结果,也可能是因为 SCS—CN 模型在该研究区域并不适用。为探讨该问题,给该研究区域内 SCS—CN 模型的参数区域化提供参考,本研究以北京市密云县石匣小流域为例,利用 2006—2010 年连续 5 年的长期坡面径流观测资料,对密云水库流域裸地、耕地、草地和林地 4 种不同土地利用类型下的 SCS—CN 模型中的 CN 值和初损率进行率定,以寻求该区域 CN 值和初损率的建议取值,并对该研究区域内 4 种不同土地利用类型下应用 SCS—CN 模型的适用性进行评价。研究结果可以为 SCS—CN 模型在密云水库上游流域地表径流量的预测及区域水土流失监测评估中的应用提供参考。

1 研究区概况

密云县高岭镇石匣试验小区位于密云水库东北部,地理位置处于东经 117°01′—117°07′,北纬 47°32′—47°38′,总面积 33 km²,属于潮河流域下游。该流域地处土石浅山丘陵区,地势北高南低,海拔 160~353 m,相对高差 193.2 m。

石匣流域内岩石类型主要为片麻岩,间有花岗岩和石灰岩。褐土为主要土壤类型。土地利用类型包括林地、耕地、草地、水域、建设用地以及裸地,其中林地占地面积最大,为 68%,耕地占地面积为 7%,草地占地面积不到 1%,裸地占地面积不到 1%。气候上属暖温带季风气候,降雨集中于夏季且多暴雨,6—8 月降雨量占全年降雨量的 76.5%,多年平均降雨量 660 mm。

2 数据获取及方法

选取石匣小流域 4 种不同土地利用类型的 4 个坡面试验小区 2006—2010 年的降雨—径流历史监测数据,具体包括 5 年间连续观测的逐日降雨量及每场降雨对应的产流量。5 年间总共监测到 213 场降雨,其中有 53 场降雨事件有地表径流产生,该 4 个坡面小区的基本情况 & 产流样本数见表 1。

表 1 石匣坡面试验小区基本情况及产流样本数						
坡面 编号	坡长/ m	坡度/ (°)	土地利用 方式	耕作 方式	植被覆 盖度/%	产流样 本数
1	10	14.4	裸地	标准小区	—	53
2	10	16.5	耕地	开荒种植	—	45
3	10	19.0	草地	人工草地	70~80	16
4	10	14.4	林地	灌草坡封育	45~60	29

根据土壤的最小下渗率及土壤质地的不同,SCS—CN 模型划分了 A、B、C、D 4 种不同的水文土壤类型,其中 A 类水文土壤类型的渗透性最强,D 类水文土壤类型的渗透性最弱^[14](表 2)。SCS—CN 模型中根据降雨前 5

天的降雨总量(mm)把前期土壤湿度条件划分为 3 个等级: AMC1(干旱), AMC2(正常)和 AMC3(湿润)^[15]。具体划分依据见表 3。3 个不同前期土壤湿度条件下的 CN 值分别为 CN₁、CN₂ 和 CN₃。

表 2 水文土壤类型划分

水文土壤类型	土壤质地	最小下渗率/(mm·h ⁻¹)
A	砂土,壤质砂土,砂质壤土	>7.26
B	壤土,粉砂壤土	3.81~7.26
C	沙黏壤土	1.27~3.81
D	黏壤土,粉砂黏壤土,砂黏土,粉砂黏土	<1.27

表 3 SCS-CN 模型前期土壤湿度条件划分

前期土壤湿度条件	前 5 天降雨总量/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

根据密云水库地区的土壤资料,石匣小流域的土壤水文组可以近似划归为 B 组类型^[6,10]。密云水库流域前期土壤湿度条件为 AMC1 的产流次数占总产流次数的 66%,该区域降雨产流的前期湿度条件以干旱居多,因此本文选取 AMC1 下的 CN₁ 作为径流预报参数。针对初损率做出相关研究的学者认为,初损率根据底部土壤水文条件的不同,一般取值范围为 0≤λ≤0.4。本文利用算数平均值法^[13],根据实测降雨—径流数据和 SCS-CN 模型计算公式反推当初损率在 0.05~0.4 范围内每间隔 0.05 的 8 个不同取值下所对应的 CN 值,并将各初损率及其对应的 CN 值代入 SCS-CN 模型中进行计算,将预测径流量与实测径流量进行比较,选取各土地利用类型下模拟结果最佳的 CN 值与初损率值作为该区域 4 种不同土

地利用类型条件下的参考值。

为了评价不同 CN 值和初损率下的 SCS-CN 模型径流模拟精度,选用纳什效率系数 E_f 作为评价指标,其计算公式为:

$$E_f=1-\frac{\sum(R_{o,i}-R_{c,i})^2}{\sum(R_{o,i}-\bar{R}_o)^2}\tag{1}$$

式中: $R_{o,i}$ 和 $R_{c,i}$ 分别为第*i*场降雨的实测径流量和计算径流量(mm), $\bar{R}_o$ 为实测径流量的平均值。纳什效率系数越接近 1,则表示模型计算值与实测值越接近,也就是模型的有效性越好。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型下降雨—径流特征分析

2006—2010 年间,石匣小流域共有 213 场降雨,其中有 53 场降雨事件有地表径流产生(本文称为有效降雨)。有效降雨量最小值为 10.1 mm,最大值为 73.3 mm,平均值为 29.4 mm。由图 1 可以看出,在裸地和耕地条件下,当降雨量>10 mm 后,开始有径流产生;裸地条件下径流量不超过 60 mm,耕地条件下径流量不超过 40 mm。在草地和林地条件下,当降雨量>15 mm 后,开始有径流产生,径流量均不超过 20 mm。对 4 种不同土地利用类型下降雨量与径流量进行皮尔森(Pearson)相关分析可知,裸地条件下降雨量与径流量间的相关系数为 0.85($p<0.01$);耕地条件下降雨量与径流量间的相关系数为 0.70($p<0.01$);草地条件下降雨量与径流量间的相关系数为 0.06,相关性不显著;林地条件下降雨量与径流量间的相关系数为 0.51($p<0.01$)。这说明在裸地、耕地和林地条件下,降雨量与径流间的关系比较密切,其中与裸地条件下降雨量与径流量的关系最为密切。

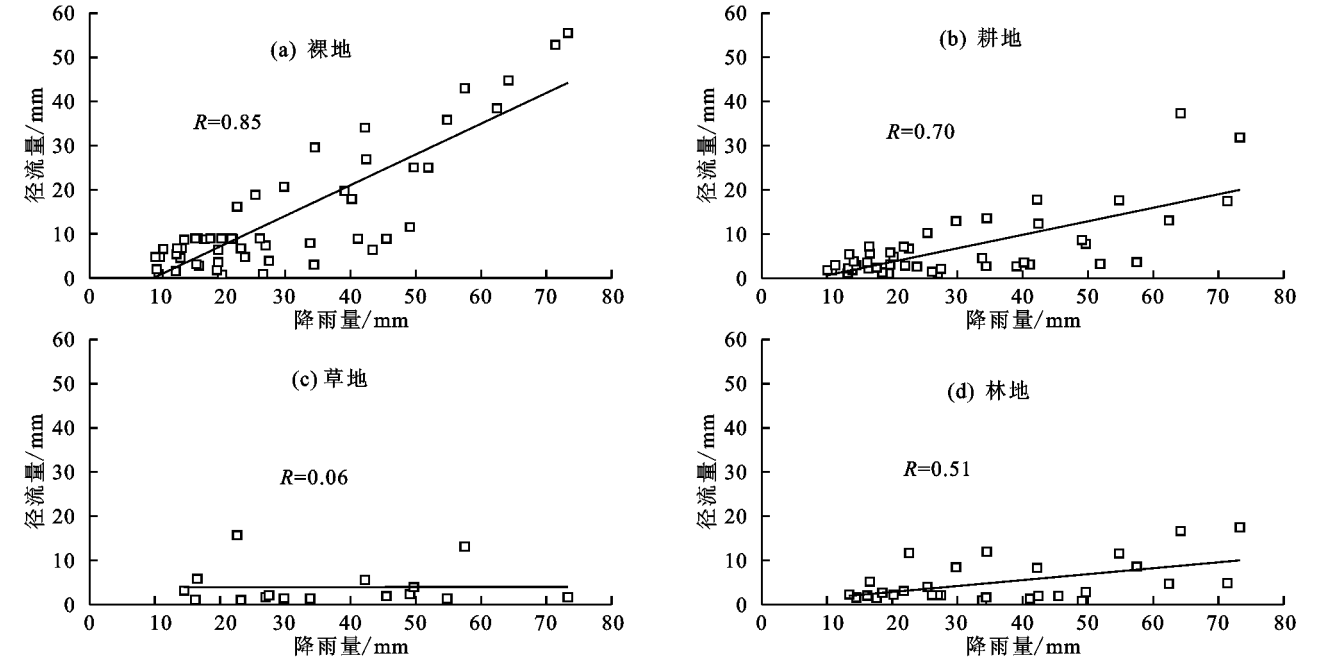


图 1 降雨量—径流量相关分析(R 为皮尔森相关系数)

3.2 4 种不同土地利用类型下初损率和 CN 值的确定

根据实测降雨—径流数据和 SCS—CN 模型计算公式反推当初损率在 0.05~0.4 范围内每间隔 0.05 所取的 8 个值下所对应的 CN_1 值。将反推 CN_1 值的结果及其对应的初损率代入 SCS—CN 模型中进行模拟计算,

表 4 不同土地利用类型和初损率条件下对应的 CN_1 值和纳什效率系数

项目	土地利用 类型	初损率							
		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
CN_1 值	裸地	86	88	90	91	92	92	93	93
	耕地	74	79	82	84	86	87	88	89
	草地	58	66	71	75	78	80	81	83
	林地	63	70	74	77	80	81	83	84
纳什效率 系数	裸地	0.75	0.30	0.04	-0.52	-0.66	-0.79	-0.76	-0.6
	耕地	0.48	0.43	0.24	0.18	0.06	0.05	0	-0.07
	草地	-1.11	-1.52	-1.83	-2.23	-2.63	-2.82	-2.62	-3.14
	林地	-0.24	-0.57	-0.76	-0.94	-1.34	-1.18	-1.53	-1.51

从表 4 可以看出,4 种土地利用类型条件下,随着初损率的增大,纳什效率系数先降低后略微有所增高,在初损率为 0.05 时纳什效率系数最大。可以说明,在该研究区域,4 种不同土地利用类型下建议的最佳初损率为 0.05,裸地条件下对应的 CN_1 值为 86,耕地条件下对应的 CN_1 值为 74,草地条件下对应的 CN_1 值为 58,林地条件下对应的 CN_1 值为 63。

Woodward 等^[16]利用近 3 万场次降雨事件观测数据发现,不同流域以及同一流域不同降雨事件初损率取值均不同,其值通常<0.2;Shi 等^[2]采用事件分析法率定中国南方三峡库区王家沟小流域初损率,结果认为该流域的建议初损率取值为 0.05;Lim 等^[17]和 Baltas 等^[18]研究也表明,初损率取 0.05 时的拟合效果优于标准值。

在初损率相同时,纳什效率系数由大到小分别为裸地>耕地>林地>草地。在选取率定值范围内,裸地条件下纳什效率系数最大值为 0.75,耕地条件下纳什效率系数最大值为 0.48,草地条件下纳什效率系数最大值为-1.11,林地条件下纳什效率系数最大值为-0.24。说明 SCS—CN 模型在裸地和耕地条件下其模型结果较为理想;而草地和林地条件下,虽然本研究在同时率定 CN 值与初损率的情况下纳什效率系数与符素华等^[13]在该研究区域进行 CN 值确定方法时计算出的纳什效率系数相比有所提高,但其值仍为负,说明 SCS—CN 模型在本研究区域的草地和林地条件下的模拟效果并不理想。

3.3 不同土地利用条件下 SCS—CN 模型的适用性分析

图 2 为在建议 CN_1 值与初损率取值下,利用 SCS—CN 模型计算出的预测径流量与实测径流量的比较。从图 2 可以看出,裸地和耕地条件下,径流集中分布在<10 mm 的区间范围内,裸地条件下径流最高为 60

将模拟值与实测值进行比较,选取纳什效率系数最高值时所对应的初损率及 CN_1 值作为该土地利用类型条件下的最佳初损率和 CN_1 值,为该区域 4 种不同土地利用类型条件下的 SCS—CN 模型应用提供参考。反推 CN_1 值和纳什效率系数计算结果见表 4。

mm 左右,耕地条件下径流量最高不超过 40 mm;草地条件下径流量大多<6 mm,最高值为 16 mm;在林地条件下,径流量<6 mm 的居多,最高值也不超过 18 mm。由此说明,在该研究区域,次降雨产生的地表径流普遍偏低,<10 mm 的径流事件居多。

裸地条件下,当实测径流量<10 mm 时,预测径流量与实测径流量较为接近,而当径流量>10 mm 时,预测径流量普遍低于实测径流量;耕地条件下,当实测径流量<5 mm 时,预测径流量与实测径流量较为接近,当实测径流量>5 mm 时,预测径流量与实测径流量间的差别开始变大;草地条件下,当实测径流量<2 mm 时,预测径流量与实测径流量较为接近,当实测径流量>2 mm 时,预测径流量普遍高于实测径流量;林地条件下,预测径流量与实测径流量间的差别较大。

由 SCS—CN 模型的计算公式可知,在初损率和 CN 值确定的情况下,降雨量越高,计算出的径流量就越高。但根据径流量影响因素^[19-20]的相关研究可知,降雨量并非影响径流量产生的唯一降雨因素,降雨强度等其他降雨因素也对径流量的产生有一定的影响,且在不同的研究区域和土地利用类型下,径流量与降雨量、降雨强度的相关程度不同,而 SCS—CN 模型中并未考虑降雨强度对径流产生的影响。由于本研究区域草地条件下径流量与降雨量间的相关性并不显著,因此模型计算出的结果并不理想。由于林地条件下的产流机制较为复杂,在特定的降雨条件下可能会产生蓄满产流,这种情况下可能会有壤中流和地下径流产生,因此 SCS—CN 模型可能会低估实际径流量,且地表径流量与降雨量相关系数并不高,仅为 0.51,因此预测径流量与实测径流量间的差别相对较大。

总体而言,由于在草地和林地条件下径流量与降雨量的相关系数较小,只考虑降雨量一个降雨因素的

SCS-CN 模型则不适用于该研究区域的草地和林地条件下的径流量预测。裸地和耕地条件下,在实测径流值偏低时,即小降雨-径流事件中,SCS-CN 模型的模拟结果与实测结果较为接近。由此说明 SCS-

CN 模型更加适用于小降雨-径流事件中进行径流的预测。由于该研究区域内大多为小降雨-径流事件,因此利用 SCS-CN 模型在该研究区域内裸地和耕地两种土地利用类型条件下进行径流预测是可行的。

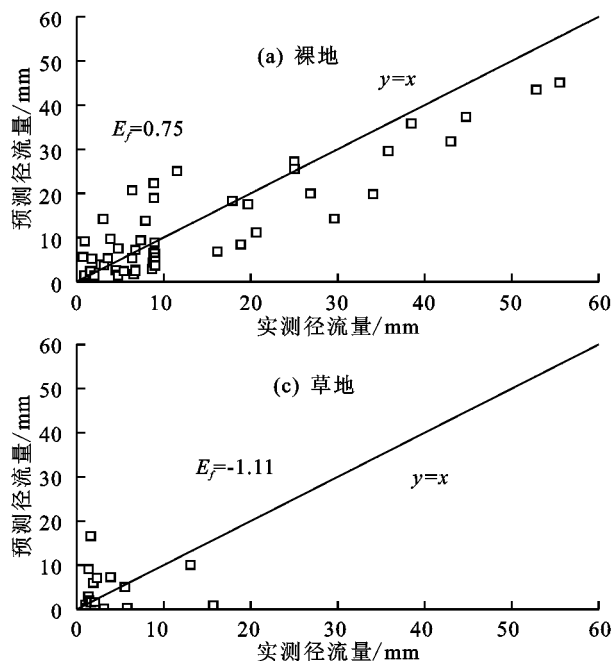


图 2 实测径流量-预测径流量关系

4 结论

本文利用石匣小流域不同土地利用类型的试验坡面小区 2006—2010 年实测降雨-径流数据,对密云水库上游流域 SCS-CN 模型的参数进行区域化,并以纳什效率系数为指标进行最佳参数确定及适用性的评价,主要结论为:

(1)在该研究区域内利用 SCS-CN 模型对该研究区域的径流值进行预测时,裸地条件下的建议 CN_1 值为 86,耕地条件下的建议 CN_1 值为 74,草地条件下的建议 CN_1 值为 58,林地条件下的建议 CN_1 值为 63,4 种不同土地利用类型的建议初损率均为 0.05。

(2)通过同时率定 SCS-CN 模型中的 CN 值和初损率,与相关学者在石匣小流域的研究结果相比,纳什效率系数得到了提高,这说明,同时率定 2 个参数可以利用 SCS-CN 模型更好地模拟研究区域内的地表径流。

(3)通过同时率定 2 个参数,在裸地和耕地条件下,纳什效率系数数值较高,模型模拟结果较为理想,但在草地和林地条件下,虽然与相关研究结果相比纳什效率系数有所提高,其值仍然为负值,说明在石匣小流域的草地和林地条件下,利用 SCS-CN 模型进行地表径流预测结果并不理想。

参考文献:

[1] Mishra S K, Tyagi J V, Singh V P, et al. SCS-CN-Based modeling of sediment yield[J]. Journal of Hydrol-

ogy, 2006, 324(1/4): 301-322.

- [2] 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.
- [3] 洪林, 罗琳, 江海涛. SCS 模型在流域尺度水文模拟中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 582-586.
- [4] 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.
- [5] 郑长统, 梁虹, 舒栋才, 等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域 SCS 产流模型应用[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 185-194.
- [6] 房孝铎, 王晓燕, 欧洋. 径流曲线数法(SCS 法)在降雨径流量计算中的应用: 以密云石匣径流试验小区为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 89-92.
- [7] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(1): 11-19.
- [8] Deshmukh D S D, 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(6): 89-101.
- [9] Fan F L, Deng Y B, Hu X F, et al. Estimating composite curve number using an improved SCS-CN method with remotely sensed variables in Guangzhou, China[J]. Remote Sensing, 2013, 5: 1425-1438.