

基于可变源区理论的 SCS 模型改进及其应用

熊昱¹, 方怒放², 史志华^{1,2}

(1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:准确预测小流域的径流量是进行侵蚀预报和水土流失治理的关键。SCS-CN 是预测无径流观测资料地区降雨产流的常见模型之一。针对传统 SCS-CN 模型不能准确识别饱和产流源区问题, 基于可变源区理论对 SCS-CN 模型进行了改进, 并以三峡地区王家桥小流域 50 场降雨径流数据为例, 对基于可变源区的 SCS 方法(CN-VSA)、初损率 $\lambda=0.2$ 和改进的 $\lambda=0.05$ 的 SCS-CN 方法进行了对比。结果表明: SCS-CN_{0.2} 方法不适合该流域, CN-VSA 和 SCS-CN_{0.05} 方法均能较好模拟结果, CN-VSA 方法决定系数为 0.802, 效率系数是 0.651, SCS-CN_{0.05} 方法分别是 0.763, 0.766, 但是 SCS-CN_{0.05} 方法不能准确定位饱和产流源区。在流域综合治理的水文效应评估中, 饱和产流源区准确定位十分重要, 改进的 CN-VSA 方法能定位产流源区, 在实践中有着重要意义。

关键词:降雨; 径流; 小流域; 可变源区; SCS 模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0289-04

Application of Improved SCS Model Based on Variable Source Area

XIONG Yu¹, FANG Nufang², SHI Zhihua^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Estimation of direction runoff is essential for soil erosion prediction and soil and water conservation plan. The Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method developed by the USDA-Soil Conservation Service is widely used for the estimation of direct runoff for a given rainfall event from small watersheds due to its low input data requirements and its simplicity. However, it is limited in predicting the location of source areas. We present an improved SCS method based on variable source area (VSA). It was applied to Wangjiaqiao watershed to analyze 50 measured rainfall-runoff events. The CN-VSA method was compared with the traditional SCS-CN_{0.2} method and the SCS-CN_{0.05} method. The results indicated that both the CN-VSA method and the SCS-CN_{0.05} method could well predict runoff volume. The R^2 of the CN-VSA method was 0.802 and efficiency coefficient (E) was 0.651 compared with 0.763 and 0.766 for the SCS-CN_{0.05} method. Locations of runoff source area varied during individual storm events when using the CN-VSA method. The CN-VSA method can be used for comprehensive management and hydrologic effects assessment of small watershed.

Keywords: rainfall; runoff; small watershed; variable source area; SCS model

水土流失不仅使土地质量下降, 而且还引起水质恶化、洪涝灾害等诸多问题。小流域综合治理被公认

为是行之有效的措施, 它包括水土保持措施布设、土地利用结构调整等。相应的, 需要认识这些措施的水文

机制,建立合理的水文模型,评估其水文效应。近年来,分布式水文模型虽然发展迅速,但大量的输入参数不仅参数确定和模型校正造成工作量剧增,尤其是我国还存在无数资料匮乏的流域^[1-2]。美国农业部水土保持局提出的 SCS-CN 模型,就是考虑了人类活动的水文效应,并用于直接模拟各种人类活动措施下的径流过程^[3]。模型综合考虑了降雨、土壤、土地利用、前期土壤湿润状况与径流间的关系,建立了产流计算公式:

$$Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + \lambda S} \quad (1)$$

$$\lambda = I_a / S \quad (2)$$

式中: Q 表示径流量(mm); P 表示降雨量(mm); λ 表示初损率; I_a 表示初损值(mm); S 表示最大滞留量(mm),由下式计算:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

式中: CN 是反映降雨前流域特征的一个综合参数,它与前期土壤湿润状况、土壤类型和土地利用方式有关。该模型结构简单、参数要求少,广泛应用于资料匮乏的地区。其产流机制是基于超渗理论,高的 CN 值意味着高径流量和低渗透量,低的 CN 值意味着低的径流量和高的渗透量。但是在气候湿润地区,蓄满产流也是一种重要的机制。土壤水分饱和后,继续降雨就会产流,蓄流区域就成为产流源区,这些源区的面积和位置在不同季节和不同降雨事件中都会发生改变,被称作可变源区(variable source areas, VSA)^[4]。但传统的 SCS-CN 方法对源区分布的定位还存在不足^[5]。鉴于此,本文基于可变源理论改进了 SCS 模型(CN-VSA),以三峡库区王家桥流域的降雨表示径流数据为基础,结合我们对该流域的初损率修正结果^[6],对 CN-VSA 和两种初损率下的 SCS-CN 模型进行对比,以期对小流域综合治理的水文效应评估提供依据。

1 SCS 模型改进

1.1 基于可变源区理论的饱和产流区确定

Tammo 等认为饱和产流区可以表示如下^[7]:

$$A_f = \Delta Q / \Delta P \quad (4)$$

式中 A_f 是产流区; ΔQ 为单位时间的产流量; ΔP 是单位时间降雨量; 引入有效降雨 P_e :

$$P_e = P - I_a \quad (5)$$

I_a 为初损值(mm),结合(1)可得:

$$A_f = 1 - \frac{S^2}{(P_e + S)^2} \quad (6)$$

Lyon 和 Walter 在 Steenhuis 等人的基础上使用分布式变源曲线法(CN-VSA)^[8],引用类似于 TOP-MODEL 中的地形参数 γ :

$$\gamma = \ln \frac{\alpha}{\tan(\beta)DK} \quad (7)$$

式中: α 是指单位等高线的汇流面积; $\tan(\beta)$ 是坡度; D 是土层厚度; K 是饱和导水率。通过 DEM 来获取参数 α 和 $\tan(\beta)$,通过方程(6) 可以获取关键地形指数,大于关键地形指数的区域产流。

1.2 初损率(λ)修订

传统初损率(λ)取值为 0.2,但不少学者认为初损率应该根据区域特征对其修正^[9],Shi 等在对王家桥小流域降雨—径流事件的分析基础上,提出 λ 取 0.05 更适宜,其详细修订过程见文献[6]。使用 $\lambda = 0.05$ 之后,SCS-CN 模型和相应的 CN 修改如下:

$$Q = \frac{(P - 0.05S)^2}{P + 0.95S} \quad (8)$$

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879 \left[\frac{100}{CN_{0.20}} - 1 \right]^{1.15} + 1} \quad (9)$$

2 模型应用

2.1 流域概况

湖北省秭归县王家桥小流域地处 $31^\circ 12' N$, $110^\circ 42' E$,是长江二级支流,面积 16.7 km^2 ,海拔在 $184 \sim 1180 \text{ m}$ 。气候属中亚热带大陆性季风气候,年均温 $18.0^\circ C$,降水量 1013 mm 。母岩以紫色砂页岩为主,夹少量泥岩。植被以针阔叶混交林为主,主要树种有马尾松、杉、栎等;灌木以马桑、荆条等常见。农作物以水稻、小麦、玉米、油菜为主;柑橘是主要经济作物。流域土壤类型主要有紫色土和水稻土;土地利用类型包括:林地 743.2 hm^2 、旱地 459.2 hm^2 、灌木林 53.4 hm^2 、居民用地 71.8 hm^2 、水田 330.7 hm^2 、水体 11.7 hm^2 。

2.2 降雨—径流数据选取

王家桥流域建有三个雨量站和一个卡口站,本文收集了 1989—1996 年降雨—径流观测数据,从中选取水文和降雨资料相匹配的 50 场降雨。选取标准为:(1) 侵蚀性降雨,针对水土流失选取降雨量大于 11 mm 的侵蚀性降雨^[10]。(2) 为减少工作量和计算的复杂程度,选择在流域内分布均匀的降雨,即 3 个雨量站降雨量基本一致。

2.3 计算过程

由于 SCS-CN 方法介绍文献较多^[3,6],因此 SCS-

CN_{0.2} ($\lambda=0.2$) 和 SCS-CN_{0.05} ($\lambda=0.05$) 方法在此不详细说明。CN-VSA 计算过程具体如下:根据降雨数据和径流水位图分离出初损率 I_a ,用 Steenhuis 等人的方法^[5],利用方程(1),选择最适合曲线,估算 S 值为 350 mm。以 1996 年 6 月 28 日降雨为例,运用 CN-VSA 方法,观测降雨 32.4 mm,观测的初损 I_a 为 14.6 mm,有效降雨 P_e 为 17.8 mm,使用方程(6)得到产流区 A_f 为 0.09,即有 9%的区域产流,找到关键地形指数 γ ,有 9%区域地形指数大于关键地形指数,计算相应的饱和产流区面积为 1.5 km²。三种方法分别计算 50 场降雨径流见表 1。

2.4 结果验证

为检验 CN-VSA,SCS-CN_{0.05} 和 SCS-CN_{0.2} 模拟结果,对不同方法的计算值和观测值做回归分析,分析决定系数 R^2 ,斜率、截距。并用效率系数 E 来评估模型效率^[11], E 表达式如下:

$$E=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_{pi}-Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n(Q_i-Q_{ave})^2}$$

(10)

式中: Q_{pi} 是模型第 i 场降雨模型估算径流值; Q_i 是观测径流值; Q_{ave} 是观测平均值。理想情况下,当模拟值与观测值完全相符时 E 值为 1。效率系数 E 被广泛用于水文模型效率检验中,一般认为 E 比决定系数 R^2 具有更好的检验能力^[12]。

3 结果与分析

3.1 三种方法对径流的计算

使用三种方法计算 50 场降雨的径流,并与观测值进行比较。由图 1 可以看出 SCS-CN_{0.2} 方法不适合王家桥流域。CN-VSA 和 SCS-CN_{0.05} 方法都能很好的估算次降雨径流,但是对于大雨强的径流估算,CN-VSA 方法模拟结果偏大,这可能是受最大保水率 S 的精度影响,因为 Steenhuis 等人方法中对 S 的估算是采用曲线拟合,受次降雨数量影响较大,降雨次数越多,拟合越准确,并且大雨强事件多, S 值偏大,小雨强事件多, S 值偏小。

由表 2 可见,SCS-CN_{0.2} 线性关系不好,模型效率系数也很低。CN-VSA 模型的决定系数为 0.802,截距 0.572,斜率 0.708,SCS-CN_{0.05} 模型分别是 0.763,0.318,0.954。效率系数 CN-VSA 模型为 0.651,SCS-CN_{0.05} 模型为 0.766。说明 CN-VSA 和 SCS-CN_{0.05} 方法都能很好模拟次降雨径流量。

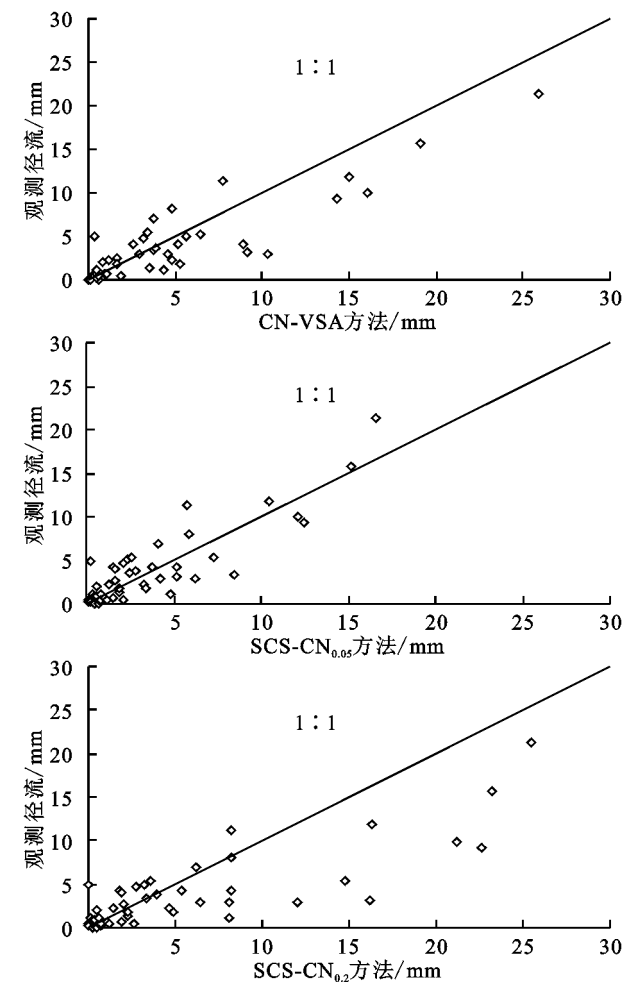


图 1 三种方法对 50 场降雨径流计算比较

表 1 三种方法分别计算 50 场降雨径流

事件	日期	雨量/ mm	观测 径流/mm	CN-VSA 方法/mm	SCS-CN _{0.05} 方法/mm	SCS-CN _{0.2} 方法/mm
	(日/月/年)					
1	03/05/1994	11.2	0.36	0.24	0.11	0.00
2	29/7/1989	11.2	0.13	0.12	0.11	0.00
3	14/06/1995	11.9	0.16	0.16	0.14	0.01
4	01/09/1989	12.6	0.15	0.28	0.37	0.15
5	07/01/1993	14.1	0.20	0.26	0.22	0.02
6	12/05/1989	14.9	4.99	0.38	0.25	0.04
7	28/05/1990	15.9	1.20	0.53	0.30	0.07
8	07/03/1993	18.9	0.79	0.49	0.47	0.23
9	12/05/1995	19.0	0.01	0.03	0.48	0.24
10	16/04/1995	19.8	0.47	0.54	2.08	2.60
11	19/07/1993	21.0	0.97	0.63	0.61	0.40
12	02/04/1989	21.4	2.08	0.78	0.64	0.43
13	30/04/1993	21.6	0.16	0.20	0.66	0.45
14	10/09/1995	22.0	0.03	0.09	0.69	0.49
15	14/07/1990	22.0	0.10	0.54	0.69	0.49
16	10/04/1993	23.0	1.18	0.49	0.77	0.60
17	01/06/1995	23.6	0.29	0.43	0.82	0.66
18	17/10/1995	24.1	0.48	0.60	0.86	0.72
19	09/05/1994	26.5	0.65	0.97	1.07	1.04
20	17/11/1990	27.6	0.41	1.85	1.18	1.20

续表 1

事件	日期	雨量/ mm	观测 径流/mm	CN-VSA 方法/mm	SCS-CN _{0.05} 方法/mm	SCS-CN _{0.2} 方法/mm
	(日/月/年)					
21	19/06/1996	28.3	2.18	1.19	1.32	1.42
22	26/05/1993	30.0	4.17	2.53	1.53	1.76
23	29/09/1989	30.4	0.57	1.10	1.59	1.85
24	20/06/1995	30.8	4.02	2.64	1.64	1.94
25	07/06/1989	32.2	2.59	1.63	1.68	2.00
26	23/06/1996	32.3	1.27	3.52	1.85	2.29
27	28/06/1996	32.4	1.75	1.60	1.86	2.31
28	10/04/1989	33.9	4.75	3.15	2.09	2.69
29	26/06/1989	35.9	5.03	5.66	2.41	3.24
30	14/05/1996	36.1	3.45	3.78	2.44	3.29
31	24/03/1993	37.2	5.35	3.42	2.63	3.62
32	18/04/1994	38.1	3.72	3.91	2.79	3.89
33	26/08/1989	40.6	2.17	4.78	3.25	4.70
34	19/10/1995	41.2	1.75	5.32	3.36	4.89
35	29/06/1990	43.3	4.20	5.11	3.78	5.34
36	03/06/1993	44.8	6.94	3.73	4.10	6.19
37	02/06/1989	45.5	2.91	4.58	4.25	6.46
38	26/08/1994	48.1	1.08	4.30	4.83	8.05
39	07/07/1989	49.7	3.02	2.89	5.20	8.14
40	04/11/1996	49.8	4.15	8.93	5.23	8.18
41	07/07/1995	51.9	11.25	7.71	5.74	8.20
42	25/08/1993	52.3	8.07	4.81	5.84	8.26
43	02/07/1996	54.0	2.86	10.31	6.27	12.01
44	02/05/1996	57.7	5.34	6.44	7.25	14.73
45	03/06/1996	62.1	3.23	9.12	8.49	16.20
46	07/06/1994	68.6	11.87	14.99	10.48	16.32
47	09/04/1994	73.7	9.94	16.08	12.15	21.17
48	22/7/1993	74.5	9.26	14.24	12.42	22.63
49	18/09/1996	82.3	15.70	19.07	15.19	23.26
50	03/07/1996	85.9	21.31	25.90	16.53	25.48

表 2 三种方法计算径流结果与分析

方法	线性回归分析			模型效率
	截距	斜率	R ²	系数(E)
CN-VSA	0.572	0.708	0.802	0.651
SCS-CN _{0.05}	0.318	0.954	0.763	0.766
SCS-CN _{0.2}	0.826	0.527	0.684	-0.008

3.2 产流分布

在三峡地区,蓄满产流是一种重要机制,相应的可变源理论可得到较好应用。CN-VSA 方法通过地形指数 γ 考虑了地形、坡度、土层厚度等因素,用 CN-VSA 方法对 1996 年 6 月 28 日(图 2A)和 1996 年 7 月 3 日(图 2B)两次降雨事件产流源区定位,产流源区随着降雨大小而改变,分别占全流域 9%和 33%。而基于超渗理论的 SCS-CN 方法考虑的是土壤类型、土地利用方式及管理水平、前期土壤湿润状况等因素,只能计算某一类型土壤总径流量,不能准确的定位饱和产流源区。

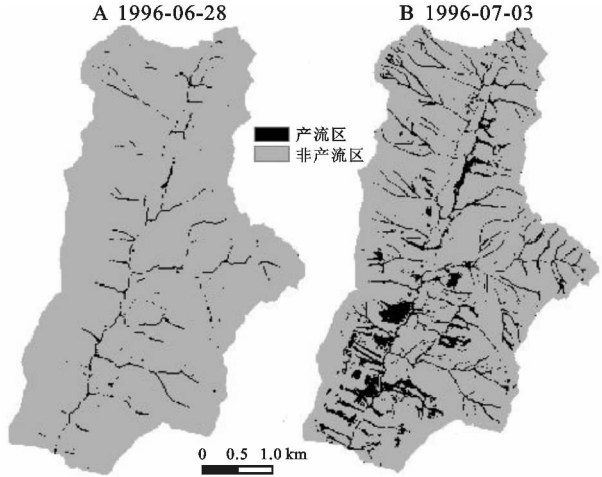


图 2 CN-VSA 方法表示 1996 年 6 月 28 日和 1996 年 7 月 3 日降雨产流分布

4 结论

为提高 SCS 模型在气候湿润地区的适应性,针对传统 SCS-CN 模型不能准确识别饱和产流源区问题,本文基于可变源区理论对 SCS-CN 模型进行了改进,并与两种初损率下的 SCS-CN 模型作比较。修正初损率($\lambda=0.05$)后的 SCS-CN_{0.05} 模型和 CN-VSA 模型都能很好模拟径流结果,但是 SCS-CN 模型不能准确识别饱和产流源区,CN-VSA 能对饱和产流源区定位。在水文效应评估和流域综合治理研究中,找到源区分布十分必要。CN-VSA 模型计算方法简单,对数据要求少,对我国许多无径流观测资料地区的小流域水文预测及其水土保持效果评价有较好应用前景。

参考文献:

[1] Perrin C, Michel C, Andreassian V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments[J]. Journal of Hydrology, 2001, 242(3): 275-301.

[2] 张金存,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 286-292.

[3] 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.

[4] Tammo S S, Michael W, Jane R, et al. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 6(5): 234-238.

[5] Srinivasan M S, Gerard-Marchant P, Veith T L, et al. Watershed scale modeling of critical source areas of runoff generation and phosphorus transport [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41: 361-375.

- [2] 王媛媛,张勃. 基于标准化降水指数的近40a陇东地区旱涝时空特征[J]. 自然资源学报,2012,27(12):2135-2144.
- [3] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [4] Shafer B A, Dezman L E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas[C]// Proceedings of the western snow conference. Fort Collins, CO: Colorado State University, 1982,50:164-175.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22):179-183.
- [6] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales[C]// Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology. Dallas, Boston, MA: American Meteorological Society, 1995:233-236.
- [7] 任建成, 巩在武, 郑宝枝, 等. 基于SPI的近30年黄河三角洲地区旱涝时空特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1):46-51.
- [8] 杜华明, 贺胜英. 岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1):153-157.
- [9] 张调风, 张勃, 王有恒, 等. 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近50年气象干旱特征分析[J]. 生态学报, 2013, 33(3):0975-0984.
- [10] 谢五三, 田红, 王胜, 等. 基于CI指数的淮河流域干旱时空特征研究[J]. 气象, 2013, 39(9):1171-1175.
- [11] Livada I, Assimakopoulos V D. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 89(34):143-153.
- [12] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J L. A multi-scale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1711.
- [13] 热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘永强, 等. 新疆近54年气温和降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):123-127.
- [14] 韩雪云, 杨青, 姚俊强. 新疆天山山区近51a来降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):139-144.
- [15] 魏义长, 王纪军, 张芳, 等. 经验正交函数与地统计相结合分析降水时空变异[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4):105-109.
- [16] 姜逢清, 胡汝骥. 近50年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1):35-40.
- [17] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 29(3):499-508.
- [18] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前进初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3):199-225.
- [19] 刘天虎, 刘天龙. 集合经验模态分解下中国新疆降水变化趋势的区域特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(4):17-24.

~~~~~

(上接第292页)

- [6] 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.
- [7] Lyon S W, Walter M T, Gérard-Marchant P, et al. Using a topographic index to distribute source area runoff predicted with the SCS curve-number equation [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(15):2757-2771.
- [8] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1):43-69.
- [9] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J] Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(1):11-19.
- [10] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4):6-11.
- [11] 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.
- [12] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation [J]. Water Resources Research, 1999, 35(1):233-241.