

# 门头沟西侧小流域地表雨水资源量预测

刘兰妹, 王秀茹, 王红雷, 郭晓楠, 赵羿涵

(北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**应用传统的径流系数法与 SCS—CN 模型法预测了北京市门头沟西侧小流域雨水资源利用潜力, 并对比了不同方法预测的雨水资源量及其时空分布规律。结果表明, 径流系数法预测的丰水年 ( $P=25\%$ )、平水年 ( $P=50\%$ )、枯水年 ( $P=75\%$ ) 和多年平均年份地表雨水资源量分别为:  $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.22 \times 10^7 \text{ m}^3$  和  $2.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。模型法预测的丰水年、平水年、枯水年和多年平均地表雨水资源量分别为:  $3.21 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $2.16 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$  和  $2.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 经验法预测值小于模型法。夏季的 7 月, 地表的雨水资源利用潜力达到相应特征年份的最大值。

**关键词:** 经验公式; SCS—CN 水文模型; 地表雨水资源; 分布规律

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)06-0227-05

中图分类号: TV213.9

## Prediction of Surface Rainwater Resources in West Side Small Watershed of Mentougo Region

LIU Lan-mei, WANG Xiu-ru, WANG Hong-lei, GUO Xiao-nan, ZHAO Yi-han

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The potential of rainwater resources utilization were calculated and compared using the empirical formula method and SCS—CN model method. The amount of surface rainwater resources through different methods were analyzed and contrasted monthly and seasonally to find time and spatial distribution of water resources. Result showed that the predicted amount of surface rainwater resources by the empirical formula method in wet years ( $P=25\%$ ), flat water years ( $P=50\%$ ), dry years ( $P=75\%$ ) and mean years were as follows:  $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.22 \times 10^7 \text{ m}^3$  and  $2.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ , respectively. The predicted amounts by the model method in wet years, flat water years, dry years and average annual precipitation years were as follows:  $3.21 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $2.16 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$  and  $2.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ , respectively. The calculated value of experience method's was less than that of the model method. The summer of July, surface rainwater utilization potential reached a maximum value of corresponding feature year.

**Keywords:** empirical formula; SCS—CN hydrological model; surface rainwater resource; distribution regularities

随着区域经济、社会的快速发展,人畜用水,农业灌溉,工业用水逐年增加。门头沟区水资源时空分布不均,年内夏多冬少,大部分地区的水量集中在 6—9 月,占全年的 60%~70%;年际上丰、枯水年水资源量相差甚多。胜利村流域属于山区,坡陡沟深,地表雨水多以径流的形式流失,造成当地地下水资源过度开采,过多的径流冲刷河道和沟渠,水土流失现象严重。因此,预测地表雨水资源量的空间分布特征和时间变化规律,将有助于确定雨水集蓄工程,调节雨水时空分布,进而指导水资源合理高效利用。

不同的计算方法反映不同的雨水资源分配规律,经验公式法<sup>[1]</sup>预测较为简单,未考虑下垫面影响因素;随着 3S 技术的发展,水文模型趋向于和地理信息系统(GIS)、遥感(RS)相集成,SCS—CN 水文模型可预测地表雨水资源量<sup>[2]</sup>。有学者<sup>[3]</sup>基于地理信息和 SCS 模型模拟的黄土高原小流域径流过程具有较高的精度及适用性。一些研究应用 GIS 和 RS 技术并结合水文模型确定适宜实施雨水收集的地点和规模<sup>[4-6]</sup>。对于径流分布,前人<sup>[7]</sup>基于地形数据和 GIS 平台的径流空间分布研究,将流域出口响应函数进行

收稿日期:2013-04-21

修回日期:2013-05-06

资助项目:北京市门头沟区流域治理专项资金项目(YSLY2011016)

作者简介:刘兰妹(1992—),女(汉族),河北省唐山市人,本科生,研究方向为雨洪利用、流域综合治理。E-mail:583173118@qq.com。

通信作者:王秀茹(1957—),女(汉族),河北省保定市人,博士,教授,博士生导师,研究方向为流域管理、水资源及农田水利等。E-mail:wang-xr@163.com。

以单元网格线性系统为基础的空间分解和求和;一些学者<sup>[8]</sup>用径流相关系数来研究径流时空特性和规律,之前的参数和模型的校正为雨水资源量的定量分析提供了基础,但结合水文模型分析可利用的雨水资源量的时空分布却少有触及。本研究采用经验公式法计算研究区的地表雨水资源量;其次应用 RS 和 GIS 技术,结合 SCS—CN 模型提取不同下垫面的空间特征与属性,通过多年降雨资料,以各子集水区为单元计算径流量和地表雨水资源量,并分析了不同时段空间雨水资源的分布特征与规律。

## 1 研究区概况

研究区位于北京市门头沟区清水镇西部胜利村流域上游,总面积 78.45 km<sup>2</sup>;海拔 200~1 350 m 地貌类型为山区,气候类型为中纬度大陆性季风气候,年平均气温 11.7 ℃,多年平均降雨量 581 mm;平水年降雨量( $P=50\%$ )561 mm,丰水年( $P=25\%$ )696

mm,枯水年( $P=75\%$ )445 mm;80%以上集中于 6—8 月份,降水时空分布不均,降雨的变率较大;土地利用方式以耕地、园地、林地、草地、工矿住宅用地为主,土壤类型以山地草甸、山地棕壤、淋溶褐土为主,土壤质地主要为砂土、壤土及黏壤土。地下水埋藏深,且分布不均匀,地表板结严重,遇暴雨易形成大量径流,水土流失严重。

## 2 材料与方法

### 2.1 基础材料

LANDSAT-7SLC-off 卫星影像 TM 影像(条带号:125,行编号:27;2008-04-18);土壤类型及土壤质地图,来源于北京市土肥工作站;逐月的降雨资料源于 CRU 气候数据 1992—2011;平水年、丰水年和枯水年和平均年份的水文资料源于门头沟区水文手册和水文站长序列资料。多年平均降雨资料详见表 1。

表 1 门头沟区多年平均降雨资料

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	总计
多年平均降雨量/mm	2.7	4.9	8.3	21.2	34.2	78.1	189.8	164.4	45.5	21.8	7.4	2.8	581

### 2.2 研究方法

2.2.1 经验公式法 研究区雨水资源量主要是指研究区由降雨形成的地表径流量与地下径流量之和。但本研究保留研究流域地上部分的蓄水能力,经验公式法计算雨水资源量时,直接估算地表径流量,即径流系数、降雨量和面积的乘积<sup>[1]</sup>。

$$W = a \cdot P \cdot F \quad (1)$$

式中: $a$ ——径流系数,对研究区取综合径流系数; $P$ ——降雨量(mm); $F$ ——研究区域内汇水总面积(m<sup>2</sup>); $W$ ——流域的雨水资源量。

2.2.2 基于 GIS 平台下 SCS—CN 模型预测法 利用遥感(RS)技术,对影像处理后得到土地利用现状图;利用 Arc Map 软件对土壤类型图进行配准、矢量化后,得到土壤类型矢量图;将两图求交,再根据降雨资料,确定前期土壤湿润程度和 CN 值;最后结合不同特征年份和不同月份的降雨量,运用 SCS—CN 模型并结合 GIS 图像处理技术预测流域地表雨水资源量及分布。

SCS 径流模型是基于集水区的实际入渗量  $F$  与实际径流量  $Q$  之比,与集水区该场降雨前的最大可能入渗量(或潜在入渗量  $S$ )与最大可能径流量(或潜在径流量  $Q_m$ )之比相等的假设的基础上建立的<sup>[9-10]</sup>,即:

$$\frac{F}{Q} = \frac{S}{Q_m} \quad (2)$$

$$Q_m = P - I_a \quad (3)$$

$$F = P - I_a - Q \quad (4)$$

$$I_a = \lambda S \quad (5)$$

式中: $Q$ ——径流量(mm); $P$ ——降雨总量(mm); $I_a$ ——降雨初损值(mm); $F$ ——实际下渗量(mm); $S$ ——可能最大滞留量(mm)。其中  $\lambda$  是区域参数( $0.1 \leq \lambda \leq 0.3$ ),主要受地质和天气因素影响, $\lambda$  值取 0.2<sup>[11]</sup>。径流量的计算公式为:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (7)$$

式中:CN 值是一个无量纲参数,由前期土壤湿度(AMC)、土地利用及土壤类型决定<sup>[12]</sup>。根据研究区各月降雨量及地表蒸发量,不同湿润状况的 CN 值有相互的转换关系为<sup>[13]</sup>

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.334 - 0.01334CN_2} \quad (8)$$

$$CN_2 = \frac{CN_1}{0.4036 + 0.059CN_1} \quad (9)$$

## 3 数据分析

### 3.1 不同频率年份雨水资源量

3.1.1 经验公式法 根据门头沟区水文手册得到研

研究区的径流量,用来计算不同特征年份的径流系数。根据研究区的降雨资料预测不同频率年份的径流量和雨水资源量(表2)。通过计算预测不同特征年丰水年( $P=25\%$ )、平水年( $P=50\%$ )、枯水年( $P=75\%$ )地表雨水资源量分别为: $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.22 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。由表2可看出,经验公式法计算的多年平均地表雨水资源利用潜力为  $2.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

表2 经验公式法预测地表雨水资源量

特征年型	丰水年	平水年	枯水年	多年平均
降水量/mm	696	561	445	581
径流系数	0.52	0.45	0.35	0.47
径流量/mm	361.92	252.58	155.92	273.12
雨水资源量/ $10^4 \text{ m}^3$	2 839	1 982	1 223	2 142

### 3.1.2 水文模型法

(1) 研究区土壤类型图。采用 ArcGIS 软件对研究区栅格土壤数据进行配准及矢量化后,得到研究区土壤类型矢量数据,根据研究区土壤质地和渗透性质<sup>[14]</sup>确定土壤的水文土壤组(HSG)如图1所示。

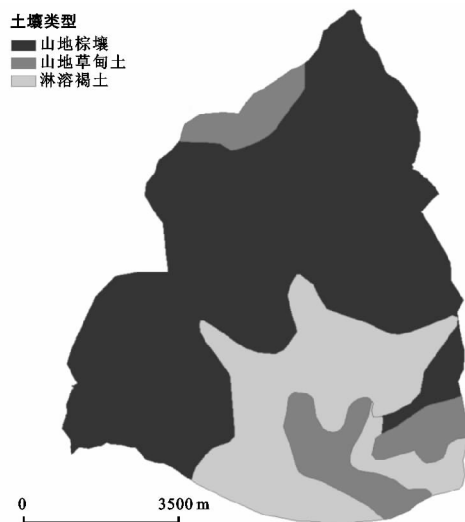


图1 研究区土壤类型图

研究区的水文土壤组分为3类:淋溶褐土(HSG-A)、山地草甸土(HSG-A)和山地棕壤(HSG-C),A类土壤的潜在径流量低,是高入渗速率的砂土;而山地棕壤即HSG-C类为中等透水性壤土<sup>[15]</sup>。其中淋溶褐土面积  $18.61 \text{ km}^2$ ,山地棕壤面积  $50.96 \text{ km}^2$ ,山地草甸土面积  $8.89 \text{ km}^2$ 。

(2) 研究区土地利用图。对 LANDSAT 卫星影像进行处理,采用 ERDAS 软件对影像数据进行波段合成、几何精校正及图像增强处理<sup>[16]</sup>得到土地利用现状图。分析得到,研究区耕地面积为  $0.72 \text{ km}^2$ ,园地  $2.35 \text{ km}^2$ ,有林地  $46.6 \text{ km}^2$ ,灌木林地  $22.23 \text{ km}^2$ ,

其它林地  $0.20 \text{ km}^2$ ,草地  $0.54 \text{ km}^2$ ,天然牧草地  $3.26 \text{ km}^2$ ,工矿用地  $0.79 \text{ km}^2$ ,住宅用地  $0.56 \text{ km}^2$ ,裸地  $1.12 \text{ km}^2$ ;有林地及灌木林的面积最大。

(3) 预测 CN 值。由于 CN 值受降雨前流域内土壤湿润程度的影响,SCS 模型将土壤湿润程度(AMC)根据前5d的降雨总量划分为3类,分别代表干(AMC I)、平均(AMC II)及湿(AMC III)3种状态<sup>[17]</sup>(表3)。

将土壤类型图和土地利用图在 Arc Map 下使用分析工具进行求交(intersect)并提取主要信息,根据相关文献查找不同的 CN 值<sup>[15,17-18]</sup>并利用加权平均法进行计算,不同土壤湿度条件下的 CN 值转换利用公式(8)~(9)。得到 CN 值详见表4。从表4中可以看出,同一土壤类型下,耕地、园地、有林地、草地 CN 值在30左右波动,植被覆盖度越高,下垫面的蓄水能力越强。研究区水文土壤组(HSG)分为A和C两类,灌木林地在HSG-A土壤类型条件下CN值最小,最低为23,产流能力较弱;山地棕壤条件下,裸地CN值大于住宅用地高达70,形成的地表径流量较大。

表3 前期土壤湿度(AMC)等级划分

土壤水分状况	前5d降雨量/mm		各月份土壤湿润程度划分
	休眠季节	生长季节	
干 AMC I	<13	<36	1—5月,9—12月
平均 AMC II	13~28	36~53	6—8月
湿 AMC III	>28	>53	

(4) 雨水资源量的确定。得到 CN 值后,根据平水年、枯水年、丰水年和多年平均降水资料及公式(6)~(7)分别对研究区的最大蓄水量(S)和径流量(Q)进行计算,通过统计的子流域的面积特征,计算流域的地表产流量详见表4。由表4可以看出,模型法预测得出不同特征年丰水年( $P=25\%$ )、平水年( $P=50\%$ )、枯水年( $P=75\%$ )、多年平均年份地表雨水资源量分别为: $3.21 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $2.16 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $2.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。从不同频率年份地表雨水量看出,枯水年最少,丰水年最多。公式(7)中可以看出 CN 值与最大蓄水量(S)呈反比,CN 值越大,表明流域径流量越大。由研究区地表径流量空间分布特征分析可知,山地棕壤、低植被覆盖度的下垫面蓄水能力小,易形成有效坡面径流,反之,淋溶褐土的林地、草地地表径流较少,涵养水源的能力较强。

### 3.2 不同时段地表雨水资源量

根据不同时段的降雨资料和土壤的水分状况,确定水文土壤类型(表3)。经验公式法是逐月的多年平均降雨量与径流系数的乘积;模型法是结合不同月份的多年平均降雨量预测的不同子集水区的径流量,

再分别与不同子集水区的面积相乘得到地表雨水资源量,获得逐月分布图(图 2)。

从图 2 可以看出,两种方法的地表雨水资源量的分布存在相似性,与降雨量的分布趋势一致;模型法预测的径流量最大月份出现在 7 月,高达  $9.06 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;最小月份是 12 月份的  $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;1—5 月份和 9—11 月份,经验公式法预测的雨水资源量要大于模型法预测数值;经验公式法地表雨水资源量与降雨量呈线性正比关系,极值均处于模型法极值之间。

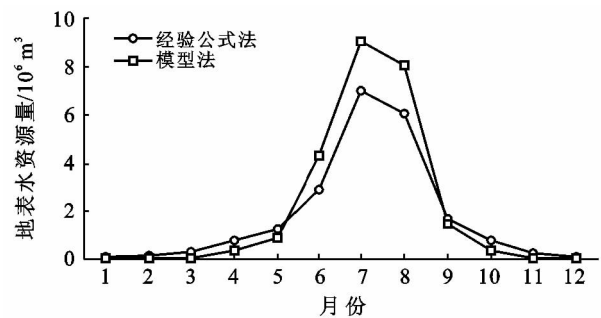


图 2 研究区两种方法不同月份地表雨水资源量

表 4 研究区地表雨水资源量

土地利用	土壤类型	面积/m <sup>2</sup>	CN	最大蓄水量 S/mm	地表雨水量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>			
					平水年	丰水年	枯水年	平均年份
耕地	淋溶褐土	322 328	30	598	5.36	8.98	2.66	6.48
	山地草甸土	277 241	30	598	4.61	7.72	2.29	5.57
	山地棕壤	124 107	40	376	3.08	4.73	1.75	3.6
园地	淋溶褐土	1 199 817	35	469	25.1	40.03	13.51	29.79
	山地草甸土	951 927	35	469	19.91	31.76	10.72	23.63
	山地棕壤	200 509	44	320	5.52	8.31	3.25	6.4
有林地	淋溶褐土	4 909 522	27	703	67.78	118.34	31.34	83.32
	山地草甸土	1 787 286	27	703	24.68	43.08	11.41	30.33
	山地棕壤	39 967 400	54	214	1347.69	1943.31	846.81	1538.88
灌木林地	淋溶褐土	10 945 693	23	838	118.93	219.43	49.65	149.43
	山地草甸土	4 122 386	23	838	44.79	82.64	18.7	56.28
	山地棕壤	7 169 545	61	164	267.12	377.02	173.33	302.54
其它林地	淋溶褐土	83 583	31	572	1.45	2.41	0.73	1.75
	山地草甸土	6 345	31	572	0.11	0.18	0.06	0.13
	山地棕壤	112 528	67	124	4.55	6.31	3.04	5.12
草地	淋溶褐土	391 719	34	493	7.85	12.63	4.16	9.35
	山地草甸土	88 794	34	493	1.78	2.86	0.94	2.12
	山地棕壤	57 413	67	124	2.32	3.22	1.55	2.61
天然牧草地	山地棕壤	2 500 315	68	118	102.31	141.48	68.46	114.97
	山地草甸土	762 475	37	429	17.17	26.96	9.47	20.25
工矿用地	淋溶褐土	602 747	54	215	20.29	29.27	12.74	23.17
	山地草甸土	61 586	54	215	2.07	2.99	1.3	2.37
	山地棕壤	131 234	54	214	4.43	6.38	2.78	5.05
住宅用地	淋溶褐土	132 216	67	124	5.35	7.42	3.57	6.02
	山地草甸土	287 971	67	124	11.65	16.15	7.77	13.11
	山地棕壤	141 156	67	124	5.71	7.92	3.81	6.42
裸地	淋溶褐土	18 096	54	214	0.61	0.88	0.38	0.7
	山地草甸土	540 464	54	214	18.22	26.28	11.45	20.81
	山地棕壤	560 062	70	109	23.37	32.18	15.74	26.22
总计		78 456 465			2 164	3 211	1 313	2 496

### 3.3 分季节地表雨水资源量

根据土壤的理化性质和不同月份的水分情况,按季节将月份划分为春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—

11月)、冬(12—2月)。4个季节研究区的地表雨量变化规律如图 3 所示。

由图 3 中可以看出,春秋冬三个季节,利用模型

法预测的地表雨水资源量低于经验公式法的预测数值,而模型法夏季较高;SCS—CN模型法分布季节性变化较大,经验公式结果变化较为平缓。预测得到的多年平均地表雨水资源量经验公式法低于模型法。

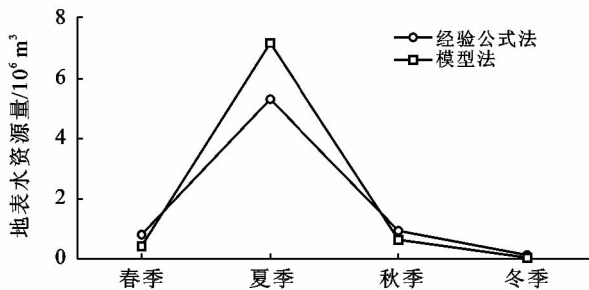


图3 研究区不同季节两种方法雨水资源量

## 4 结论

(1) 利用经验公式预测了流域地表雨水资源量;预测的丰水年( $P=25\%$ )、平水年( $P=50\%$ )、枯水年( $P=75\%$ )和多年平均年份地表雨水资源量分别为: $2.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.22 \times 10^7 \text{ m}^3$  和  $2.14 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

(2) 采用SCS—CN模型预测了丰水年、平水年、枯水年和多年平均年地表雨水资源量分别为: $3.21 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $2.16 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,  $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$  和  $2.50 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,定量分析评价了研究区可收集雨水资源量。由于经验公式预测结果采用的径流深为计算时间段内多年平均的总径流量平均分布于测站以上整个流域面积上所得到的平均水层厚度,不能准确反映不同区域的径流系数。而采用SCS—CN模型方法可应用于无水文资料流域的可收集雨水资源量估算,精度能够满足要求。

(3) 得出地表雨水资源分布规律:夏季的7月,地表可利用的雨水利用潜力达到平均年份的最大值。分析看出,经验公式结果变化较为平缓,模型的结果月份和季节变化量较大,其原因是经验公式预测时未考虑径流形成水文物理过程变化,降雨量是主导因素;SCS—CN模型则考虑了不同下垫面土壤、土地利用和地形等水文因素,对调节雨水的时空分布具有指导意义。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 罗乾,方国华,黄显峰,等. 流域下游缺水地区雨水资源利用潜力研究[J]. 水电能源科学,2011,29(12):5-7.  
 [2] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS模型及其研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(2):120-124.  
 [3] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,等. 基于地理信息的SCS模型

及其在黄土高原小流域降雨—径流关系中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(5):93-97.

- [4] Prinz D, Oweis T, Oberle A. Rainwater Harvesting for Dry Land Agriculture: Developing a Methodology Based on Remote Sensing and GIS[C]. Rabat, Morocco: Proceeding s of XIII International Congress Agricultural Engineering, ANAFID, 1998.  
 [5] Durga Rao K H V, Venkateswara Rao V, Roy P S. Water Resources Development: Role of Remote Sensing and Geographical Information System[C]. New Delhi, India: Proceeding of the 12th International Rainwater Catchment Systems Conference, 2005.  
 [6] 王红雷,王秀茹,王希,等. 采用SCS—CN水文模型和GIS确定雨水集蓄工程的位置[J]. 农业工程学报,2012,28(22):108-114.  
 [7] Maidment D R, Olivera F, Calver A, et al. Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field [J]. Hydrological Processes, 1996, 10(6): 831-844.  
 [8] Gottschalk L. Correlation and covariance of runoff[J]. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1993, 7(2): 85-101.  
 [9] William J R, Lasear W V. Water yield model using SCS curve numbers [J]. Journal of Hydraulics Division, 1976, 102(9):1221-1253.  
 [10] Bosznay M. Generalization of SCS curve number method[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1989,155(1): 139-144.  
 [11] 赵松岭. 集水农业引论[M]. 陕西 西安:陕西科学出版社,1996.  
 [12] 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.  
 [13] 郭晓军,王道杰,庄建琦. SCS模型在干热河谷区坡面产流模拟中的应用[J]. 中国水土保持科学,2010,8(5): 14-18.  
 [14] Sameer S, Mohammad A. Application of GIS: Based SCS—CN method in West Bank catchments, Palestine [J]. Water Science and Engineering, 2010,3(1):1-13.  
 [15] 徐秋宁,马孝义. SCS模型在小型集水区降雨径流计算中的应用[J]. 西南大学学报:自然科学版,2002, 24(2): 97-100, 107.  
 [16] 毕华兴. 3S技术在水土保持中的应用[M]. 北京:中国林业出版社,2008:219-237.  
 [17] 徐刘凯,王全金,向速林. 应用SCS模型模拟清丰水流域产汇流量[J]. 华东交通大学学报,2011,28(4), 84-88.  
 [18] 王爱娟,张平仓,丁文峰. 应用SCS模型计算秦巴山区小流域降雨径流[J]. 人民长江,2008,39(15):49-50.