

# SCS模型在干热河谷区坡面产流模拟中的应用

郭晓军<sup>1,2,3</sup>, 王道杰<sup>1,2</sup>, 庄建琦<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室; 610041, 成都;  
3. 中国科学院研究生院, 100049, 北京)

**摘要** 为探索干热河谷泥石流多发地区的降雨产流机制, 选择地处云南省东北部干热河谷区的蒋家沟流域, 利用径流小区野外双环下渗试验的结果, 确定径流小区中各土壤水文类型, 根据蒋家沟实际情况, 用前期影响雨量代替前 5 d 降雨总量来确定各径流场中土壤的前期湿润程度, 然后利用实际观测的 5 次降雨—径流资料, 运用 SCS 模型对 5 个不同土地利用类型的径流小区进行降雨产流模拟, 通过校正初损  $I$  和  $C_n$  参数, 得到模拟结果。结果表明, 与实测资料相对比, 各次降雨中模拟的径流量与实测值的误差平均值分别为 4.32%, 5.30%, 9.59%, 7.99%, 5.26%, 可信度较高, 说明 SCS 模型可以应用于干热河谷区坡面降雨产流的估算, 研究成果可为该地区降雨—径流模型提供参考。

**关键词** SCS 模型; 降雨—径流; 蒋家沟

## Application of SCS model on simulation of the slope runoff process in dry-hot valley

Guo Xiaojun<sup>2,3</sup>, Wang Daojie<sup>2</sup>, Zhuang Jianqi<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 610041, Chengdu; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Process, CAS, 610041, Chengdu; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China)

**Abstract** To study the rainfall runoff mechanism in debris flow valley in dry-hot area, the experiments were carried out on red-yellow soil which is the main type in dry-hot valley in northern Yunnan province. This paper identified the soil hydrological types of each runoff plot by outdoor infiltration experiment, classified the AMC (Antecedent Moisture Class) by antecedent impaction precipitation in the last five days instead of total precipitation, calculated the volume of surface runoff during 5 rainfalls in 2006 on 5 different kinds of land use types by SCS (Soil Conservation Service) model. The result is acceptable through calibrating  $I$  and  $C_n$ . The average error during each rainfall is respectively 4.32%, 4.32%, 9.73%, 7.28%, 6.24%. The result shows that the feasibility of the application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field in dry-hot valley, and also provides a reference to study the rainfall runoff model in this district.

**Key words** SCS model; rainfall runoff; Jiangjia gully

SCS (Soil Conservation Service) 模型是美国农业部水土保持局于 1954 年开发研制的小流域水文模型, 由于它结构简单, 使用方便, 对观测资料要求不高, 因此被广泛应用于美国及其他国家<sup>[1]</sup>。SCS 模

型应用的关键参数就是  $C_n$  (curve number) 值的确定, 由于中国和美国的地区之间存在气候、土壤、植被类型等各方面的差异, 因此, 直接应用模型中的  $C_n$  值会有一些的差异。针对这一问题, 国内一些学

收稿日期: 2010-01-29 修回日期: 2010-08-19

项目名称: 国家自然科学基金项目“分布式单沟泥石流预报模型”(06K1100100)

第一作者简介: 郭晓军 (1985—), 男, 硕士。主要研究方向: 山地水文学。E-mail: sbjbn@003@yahoo.com.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

者进行了一定的改进。史培军等<sup>[2]</sup>、袁艺等<sup>[3]</sup>采用 SCS模型对深圳市降雨径流过程进行模拟,分析了不同土地利用方式对城市径流的影响;高扬等<sup>[4]</sup>将 SCS模型应用在紫色土坡地,在统一土地利用条件下研究了前期降雨对径流量的影响,取得了较好的结果。笔者根据 2006 年 7—8 月云南省蒋家沟流域径流小区观测的 5 次降雨—径流数据,用 SCS模型定量研究不同土地利用和前期降雨量对径流场产流的影响,尝试探讨适合该地区的产流参数,对该流域分布式水文模型的建立和泥石流的发生及预报具有重要意义。

## 1 模型概述

### 1.1 SCS模型的基本原理

美国农业部水土保持局通过对全美小流域降雨与径流关系 20 多年的研究,确定出以下关系式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I}$$

式中: P 是一次性降雨总量, mm; Q 为径流量, mm; I 为降雨初损值,即产生地表径流之前的降雨损失, mm; F 为降雨后损值,即实际入渗量,即产生地表径流之后的降雨损失, mm; S 为流域当时的可能最大滞留量,是后损的上限, mm。

美国农业部水土保持局在分析大量长期实验结果的基础上,提出了  $I = 0.2S$  因此, SCS 模型产流计算公式一般表示为

$$\begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \\ 0 & P \leq 0.2S \end{cases}$$

流域最大可能滞留量 S 在空间上与土地利用方式、土壤类型和坡度等下垫面因素密切相关,通过在模型中引入变量  $C_N$  可较好地确定 S 公式如下:

$$S = \frac{25400}{C_N} - 254$$

### 1.2 $C_N$ 的影响因素及确定方法

$C_N$  是一个量纲为 1 的参数,是前期土壤湿度 AMC (Antecedent Moisture Class)、坡度、土地利用方式和土壤类型状况等因素的函数,  $C_N$  值的大小可直接反映流域各子单元的产流能力。  $C_N$  取值介于 0~100 之间,一般情况下,当降雨一定时,产流量较大的土地利用类型、土壤类型、前期湿润土壤,其  $C_N$  值也较大,反之亦然。由于  $C_N$  值受降雨前流域内土壤湿润程度的影响,所以, SCS 模型根据前 5 d 的降雨总量将土壤湿润程度划分为 3 类,分别代表干

(AMC I)、平均 (AMC II)、湿 (AMC III) 3 种状态 (表 1),模型根据最小下渗率将土壤分为 4 种类型 (表 2)<sup>[5]</sup>。

表 1 土壤前期湿润程度等级划分

Tab 1 AMC classification

土壤水分状况	前 5 d 降水总量 /mm	
	作物生长阶段	作物休眠阶段
AMC I	< 30	< 15
AMC II	30 ~ 50	15 ~ 30
AMC III	> 50	> 30

表 2 SCS 模型土壤分类

Tab 2 Soil classification by the stable infiltration of SCS model

土壤类型	最小下渗率 / (mm h <sup>-1</sup> )
A	7.28 ~ 11.43
B	3.81 ~ 7.28
C	1.27 ~ 3.81
D	0 ~ 1.27

不同土壤湿润程度的  $C_N$  值转换关系<sup>[6]</sup>如下:

$$C_{N1} = \frac{C_{N2}}{2.334 - 0.01334 C_{N2}}$$

$$C_{N3} = \frac{C_{N2}}{0.4036 + 0.0059 C_{N2}}$$

## 2 研究区概况

蒋家沟流域位于云南省东北部,是金沙江一级支流小江右岸的一条支沟。流域内最高海拔 3 269 m,最低海拔 1 041 m。流域内气候干湿季分明,年降雨量为 400 ~ 1 000 mm,每年 11 月到次年 5 月为旱季,6—10 月为雨季,流域内主要土地利用类型有坡耕地、林地、草地、灌木丛、裸地等<sup>[7]</sup>。蒋家沟是著名的泥石流多发沟,泥石流爆发时,往往充满整个河道,给水文观测造成了很大的不便。为了研究蒋家沟流域的产汇流实际情况,2002 年,中科院成都山地所在云南东川泥石流国家观测研究站 (E103°08', N26°14') 按照土地利用类型建立了 6 个标准径流小区,小区周围用水泥板围埂,每个径流小区面积为 20 m × 5 m,设置上、中、下 3 个土壤含水量观测点,观测土壤中的体积含水量,底部设径流桶,控制观测一次降雨之后径流量和泥沙含量。由于该年度有一个小区的基础设施被破坏,因此,本次研究选取 6 个径流小区中的另外 5 个,编号分别为 1~5,小区

的土地利用类型分别为植被稀疏的坡耕地、林草地、纯合欢 (*Leucaena glauca*)林、剑麻合欢 (*Asiatica*)林、合欢截干林。

### 3 SCS模型的应用

#### 3.1 前期土壤湿度划分

SCS模型利用前5d的降雨总量将前期土壤湿度划分成3类,但由于各地区下垫面以及气候方面存在着很大的差异,所以,在实际应用过程中会出现不同程度的误差。研究地区地处干热河谷,蒸发量远比一般流域大<sup>[7]</sup>,因此,用前期累积降雨量来反映前期土壤湿度是不科学的。根据这一情况,笔者利用前期影响雨量取代前期总降雨量来作为前期土壤湿度的划分标准。

前期影响雨量<sup>[8]</sup>  $P_b$ 采用下式来计算:

$$P_b = \sum_{i=1}^n P_i k$$

式中:  $P_i$ 为第  $i$ 日前  $1 \sim n$ 天的各日降雨量, mm;  $k$ 为第  $i$ 天的雨量折减系数。在蒋家沟地区,  $n=10$ ,  $k=0.78$ 。5次降雨前的前期影响雨量分别为15.43、29.8、26.1、23.67和19.38 mm。根据表1,5次降雨前土壤的前期湿润程度均为AMC II。

#### 3.2 土壤水文类型划分

为了确定各径流小区的土壤水文类型,在各小区进行了双环入渗试验,结果表明,1号径流场土壤的最终下渗率为7.8 mm/h,2~5号径流场土壤的最终稳定下渗率介于6.0~7.2 mm/h之间。这与陈宁生等<sup>[9]</sup>在同一流域中大凹子沟进行的产流试验结果(泥石流源区最终稳渗率为0.11~0.14 mm/min)较为相似。根据表2确定1号径流场的土壤类型为A型,2~5号径流场的土壤类型为B型。

查SCS模型  $C_n$ 标准值,得出1~5号径流场的  $C_n$ 值分别为77、74、75、74、75。

#### 3.3 初损参数的修正

降雨过程中的填凹、下渗、壤中流以及地下径流等是主要的水分损失量。由于模型的  $I_a=0.20 S$ 是根据美国小流域的降雨—径流过程假定的,相对于美国年内比较均匀的江水来说,蒋家沟地区的降水主要集中在6—9月,且多暴雨;因此,在应用模型的过程中,对模型的初损值范围适当扩大为0.18 S~0.22 S。其中:1号径流场土地利用类型为坡耕地,且投入使用时间不长,土壤较为松散,下渗率偏大,初损值为0.22 S;2号径流场土地利用为林草地,由于植物的截留作用,初损值介于0.20 S~0.22 S之间;其他各径流场初损值均为0.18 S~0.22 S。另外,6月22日的前期影响雨量较小,土壤含水量偏低,因此,初损值偏大。

#### 3.4 模拟结果

采用校正过的  $C_n$ 值与初损参数,用SCS模型进行径流计算,误差在15%之内,计算结果比较满意(表3和图1)。对5次降雨中各个径流场的模拟值与实测值进行相关分析,得到相关系数分别为0.992、0.999、0.950、0.917、0.943,均达到显著水平。对模拟值进行误差分析,5次降雨的平均相对误差分别为4.317%、5.297%、9.585%、7.985%、5.256%,均在可接受范围之内,其中最大误差发生在7月7日4号径流场,即林草地径流场中,达-14.29%。另外,从模拟结果来看,7月7日降雨模拟结果最差,1~5号径流场模拟误差分别为3.765%、12.414%、10.765%、14.29%、6.692%,这是由于复杂的前期降雨情况造成的,该次降雨从7月5日开始至7月7日结束,降雨强度较小,从降雨资料看,7月7日前5d降雨总量并不大,但连续降雨使得各个径流场土壤水分含量很高,这种复杂性造成了模拟结果的偏差。

表3 各径流小区5次降雨径流量的实测值与模拟值

Tab 3 Measured and simulated runoff results of runoff plots under 5 rainfall events

径流场	06-23			06-27			07-07			07-24			08-21		
	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%
1	0.324	0.329	1.598	0.602	0.668	10.979	0.599	0.622	3.765	0.117	0.120	2.406			
2	0.225	0.241	6.942	0.223	0.230	3.073	0.123	0.138	12.414	0.034	0.030	-11.239	0.187	0.188	0.393
3	0.179	0.193	7.998	0.176	0.186	5.912	0.087	0.078	-10.765	0.126	0.141	11.798	0.152	0.148	-2.217
4	0.197	0.193	-1.870	0.227	0.230	1.257	0.096	0.078	-14.290	0.134	0.141	5.207	0.163	0.148	-8.836
5	0.288	0.297	3.179	0.331	0.348	5.263	0.133	0.142	6.692	0.206	0.226	9.277	0.217	0.196	-9.577
平均值	4.317			5.297			9.585			7.985			5.256		

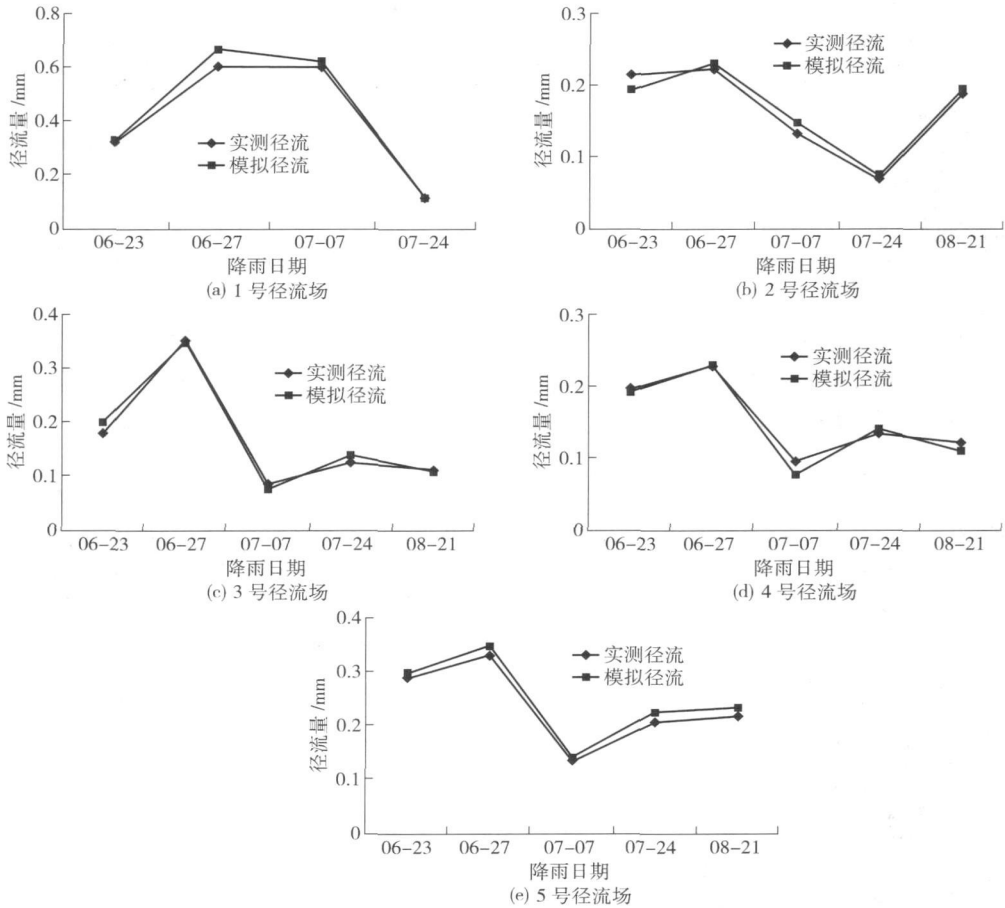


图 1 次降雨中各径流小区径流模拟结果

Figure 1 Simulated runoff results under rainfall events

3.5 分析

1) 从各个径流场最终确定的  $C_N$  值来看, 荒坡耕地 > 林地 > 草地, 但差别并没有在  $C_N$  值标准表上查得的差别大, 这是因为蒋家沟流域的土壤级配较宽, 下渗率较大。荒坡耕地的土壤水文类型为 A 类, 其他各径流场为 B 型。

2) 从各个径流场降雨的初损量来看, 1 号径流场的初损量要比 2~5 号径流场略大。这是因为径流场投入使用时间不长, 植物处于生长期, 截留作用不大, 而同时坡耕地的初始下渗率比林地、灌木林地大。这个结果与邹翔<sup>[10]</sup>在泥石流观测站附近做的双环下渗试验结果以及陈晓清等<sup>[11]</sup>在蒋家沟泥石流源区做的下渗试验结果一致。

3) 从最终的模拟结果来看, 各个径流场和各场降雨的模拟效果参差不齐, 但基本上都在允许范围之内, 大部分的模拟结果误差都在 10% 以下, 是可以接受的。

4) SCS 模型的优点在于结构简单, 对资料的要

求不高, 因此, 可以广泛应用; 但 SCS 模型没有考虑降雨历时和降雨强度对初损和  $C_N$  值的影响, 因此, 从长期推广和应用来看, 不可避免会影响模拟的精度。另外, SCS 模型提出的土壤前期湿润程度和初损值确定方法过于笼统, 使模型在应用中主观性太强, 依赖使用者的经验技术和知识水平。

4 结论与不足

1) 野外下渗试验表明, 蒋家沟流域坡耕地径流场的土壤下渗率为 7.8 mm/h 土壤水文类型为 A 型, 林草地、纯合欢林、剑麻合欢林、合欢截干林等径流场的土壤下渗率为 6.0~7.2 mm/h 土壤水文类型为 B 型。

2) 利用前期影响雨量取代前期降雨总量来确定模型的  $C_N$  值, 利用改进后的 SCS 模型对蒋家沟流域径流小区中的降雨—径流过程进行模拟, 可信度较高, 大部分模拟结果的误差都在 10% 以下, 说明利用前期影响雨量取代前期降雨总量之后的, SCS

模型具有用来模拟干热河谷地区坡面产流的可行性。

前期降雨对土壤湿润状况的影响是一个很复杂的过程,笔者只是根据模型最后的模拟结果来对其进行简单的率定,这一方面的研究还有待于进一步深化;同时,SCS模型中 $C_n$ 值在中国小流域如何确定也有待于进一步研究。

## 5 参考文献

- [1] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number has[reached maturity]. *J Hydrologic Engg ASCE*, 1996, 1(1): 11-19
- [2] Shi P J, Yuan Y, Jing Z, et al. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1041-1050
- [3] 袁艺,史培军.土地利用对流域降雨-径流关系的影响. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2001, 37(1): 131-136
- [4] 高扬,朱波,缪驰远,等. SCS模型在紫色土坡地降雨径流量估算中的运用. *中国农学通报*, 2006, 22(11): 396-400
- [5] 郝芳华,程红光,杨胜天.非点源污染模型:理论与应用.中国环境科学出版社,2006:31
- [6] Boughton W J. A review of USDA SCS curve number method. *Soil and Water Management and Conservation*, 1989, 27: 511-523
- [7] 林永明.金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用:以云南蒋家沟为例[D].成都:中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2008
- [8] 崔鹏,杨坤,陈杰.前期降雨对泥石流形成的贡献:以蒋家沟泥石流形成为例. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11-15
- [9] 陈宁生,张军.泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律. *山地学报*, 2001, 19(2): 169-171
- [10] 邹翔.小江流域的土壤侵蚀特征与机理[D].成都:中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2003
- [11] 陈晓清,崔鹏,陈杰,等.云南东川蒋家沟宽级配砾石土原位渗透试验初步研究. *山地学报*, 2006, 10(24): 190-197

(责任编辑:宋如华)

## 《中国水土保持科学》第二届编委会第二次会议召开

《中国水土保持科学》第二届编委会第二次会议于2010年8月14日在北京林业大学召开。会议由中国水土保持学会副理事长李锐副主编主持,出席会议的有王礼先、王兆印、王百田等编委,中国水土保持学会常务副秘书长张焱、副秘书长岳金山和编辑部成员出席了会议。

会议首先宣布聘任程云同志为《中国水土保持科学》编辑部主任,然后听取并讨论了第二届编委会第二次会议工作报告,审议了编辑部经费使用情况,讨论通过了《〈中国水土保持科学〉优秀论文奖评选暂行办法》。

主编王礼先教授代表编辑部作了第二届编委会工作报告,总结了编委会成立3年来取得的成绩、存在的问题及今后的设想。与会编委对第二届编委会成立以来取得的成绩给予了充分肯定和积极评价,认为,期刊能办到现在的水平是全体编委、作者、读者、审稿人和编辑部共同努力的结果。通过本次会议进一步明确了期刊的定位与特色,对期刊的发展起到了积极的促进作用。

(程云)