

SCS 模型在泥石流多发区降雨—径流模拟中的应用

——以云南省蒋家沟流域为例

郭晓军^{1,2,3}, 崔鹏^{1,2}, 庄建琦^{1,2,3}, 刘应辉⁴, 张建强^{1,2,3}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 四川省电力设计院, 四川 成都 610072)

摘要: 基于云南省蒋家沟流域的 DEM, 根据流域地貌, 利用地理信息系统软件划分流域子单元, 在此基础上利用蒋家沟土地利用类型、土壤类型等地理信息数据和流域水文、气象资料, 根据 SCS 模型 CN 值标准表, 提出适合各子流域产流计算的 CN 值, 绘制出了蒋家沟流域次降雨的 CN 值分布图, 进而应用 SCS 产流模型和等流时线法对云南省蒋家沟流域的降雨—径流过程进行了模拟。模拟结果表明, 与有限的实测资料相比较, 模型的模拟精度在 90% 以上, 模拟结果较为满意, 说明基于 CN 值的 SCS 模型可以应用于蒋家沟流域, 同时模拟的径流过程可以弥补实测资料的不足, 为蒋家沟流域分布式水文模型的建立提供理论依据和研究方法。

关键词: SCS 模型; 等流时线; 地理信息系统; 径流模拟; 蒋家沟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0225-04

中图分类号: S157.4

SCS Model and Its Application to Rainfall—Runoff in Debris Activity Region

—A Case from Jiangjiagou Watershed of Yunnan Province

GUO Xiao-jun^{1,2,3}, CUI Peng^{1,2}, ZHUANG Jian-qi^{1,2,3}, LIU Ying-hui⁴, ZHANG Jian-qiang^{1,2,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Processes, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Sichuan Electric Power Design Institute, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Based on the DEM (digital elevation model) of Jiangjiagou watershed, Yunnan Province, the watershed is compartmentalized into some sub-units according to landform by using Geographical Information System software. With the information data of land use, soil classification, hydrology, and meteorology, the fitting CN values for sub-watersheds are presented and the CN distribution map is drawn by the GIS software. The hydrograph of calculated runoff process by the SCS model and isochrones method is fitted well with observed runoff data. It shows that SCS model can be successfully used in Jiangjiagou watershed and simulated result can supplement observed data. This paper provides a method to study the distributed hydrological model in Jiangjiagou watershed.

Keywords: SCS model; isochrones; geographical information system; runoff simulation; Jiangjiagou watershed

SCS 模型是美国农业部水土保持局 (soil conservation Service, 简称 SCS) 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它国家^[1]。我国从 20 世纪 80 年代起也开始应用 SCS 模型, 在小流域水土保持、工程规划及防洪、城市水文、土地房屋的洪水保险及无资料流域等多种水文问题中得到广

泛应用, 并根据各个流域的实际情况, 对该模型进行了改进^[2,6]。与传统的水文模型相比, SCS 模型的特点在于考虑了流域下垫面对降雨径流的影响。近年来随着社会经济的发展, 各种下垫面因素尤其是土地利用方式和利用强度对流域产汇流的影响成为当前水文科学领域研究的热点, 而传统的水文模型很少直接或间接地将土地利用状况、土壤湿度特征等作为影响因素在

收稿日期: 2009-08-27

修回日期: 2010-01-06

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

作者简介: 郭晓军(1985—), 男(汉族), 山西省运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与水文模型。E-mail: shlong2003@yahoo.com.cn.

通信作者: 崔鹏(1957—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为山地灾害与水土保持。E-mail: pengcui@im.de

模型应用中加以考虑。其中一个很重要的原因是土地利用数据、地形数据是遥感和地理信息数据处理得到的结果,这种面状的遥感信息与传统的水文模型的参数和结构不相适应。在这方面,刘贤赵^[7]等人提出了基于地理信息系统的 SCS 模型,并对黄土高原某小流域进行了模拟,取得了良好的效果;许彦、潘文斌^[8]介绍了一种在 Arcview 环境中应用 SCS 模型的方法,但没有对研究流域进行径流模拟。本研究以云南省蒋家沟这一典型泥石流沟为研究对象,结合地理信息方法,用 SCS 模型和等流时线相结合对应流域降雨—径流过程进行模拟,探讨泥石流沟的降雨—径流关系。

1 SCS 模型的基本原理

SCS 模型是次降雨径流模型,因此不考虑降雨期间的蒸发量,但该模型考虑了流域下垫面的特点(如土壤、植被、坡度、土地利用等),既可间接地考虑人类活动对流域径流的影响,也可在水文模型参数与遥感信息之间建立直接的联系,并可应用于无资料流域径流的估算。其降雨—径流关系的最终表达式为^[9]

$$\begin{cases} \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} & P \geq 0.2S \\ 0 & P \leq 0.2S \end{cases} \quad (1)$$

式中: R ——径流量 (mm); P ——次降雨总量 (mm); S ——流域当时的可能最大滞蓄量 (mm)。其计算公式为

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

CN 是一个无量纲参数,是前期土壤湿度 (AMC)、坡度、土地利用方式和土壤类型状况等因素的函数,CN 值的大小间接地反映了流域各子单元的产流能力。

SCS 模型采用一条统一的单位时线来计算径流输出过程。

2 研究区概况

蒋家沟是长江上游金沙江一级支流小江右岸的一条支沟,自东向西汇入小江,主要支沟有门前沟、多照沟、大凹子沟、查菁沟和老蒋家沟等。主沟长 13.9 km,流域面积 48.52 km²。位置介于东经 103°06′,北纬 23°13′—23°17′处,流域海拔在 3 269~1 041 m 之间。

蒋家沟流域位于滇东北干热河谷区,是著名的泥石流多发区,地形的显著特点是沟深坡陡,流域平均坡度为 43°,坡度在 30°~68°之间的土地面积占总面积的 60%以上;土壤类型主要有砾石土、燥红土、黄红壤 3 种,土地利用类型主要有林地、草地、坡耕地、

裸地等。2006 年时林地约占流域总面积的 11.5%,灌丛约占总面积的 5.22%,草地约占总面积的 31.2%,农田约占总面积的 28.2%,裸露荒地约占总面积的 16.1%。流域内气候干湿季分明,垂直气候带明显,每年 11 月至次年 5 月为旱季,6—10 月为雨季,暴雨中心多出现在海拔为 2 500~3 000 m 的地带。从河谷到分水岭可分为 3 个区:海拔 < 1 600 m 为亚热带干热河谷区,年降雨量为 600~700 mm,植被稀疏,是蒋家沟泥石流堆积区;海拔 1 600~2 200 m 之间为亚热带、暖温带半湿润区,年降雨量为 700~850 mm,是蒋家沟泥石流固体物质主要源区;海拔 > 2 200 m 为温带湿润山岭区,年降雨量为 1 200 mm,植被覆盖率较高,是蒋家沟泥流水源汇流区。随着海拔的上升,湿度增大,蒸发与气温下降,植被呈现出明显的垂直地带性,从低到高共有 3 带,分别为稀疏灌草丛带、针阔叶混交林带和高山草甸带^[10-11]。

3 研究方法

基于蒋家沟 DEM 和遥感资料,用 SCS 模型和等流时线来计算径流量,并用实测资料来检验。

(1) 划分流域的地貌子单元。地貌子单元的划分是进行流域单元分布计算产流前提,利用由蒋家沟流域等高线生成的 DEM,应用 ARCGIS 的水文分析工具,获取流域水系,对整个流域的干流和各级支流进行识别,根据山脊山谷线将流域划分成 27 个子流域。

(2) 获取各子流域的 CN 值。根据遥感数据解译出蒋家沟的土地利用图和土壤类型图,用 Arcgis 计算子流域内不同土地利用类型和土壤类型所占的面积,结合次降雨前期土壤湿度情况,参照 SCS 模型提供的 CN 值表,用面积加权法确定各子流域 CN 平均值(附图)。

(3) 利用上述结果,采用统一的无因次单位线和等流时叠加原理计算流域各点的径流产生和径流输出过程。

(4) 利用 2008 年 7 月至 9 月 5 次降雨的降雨—径流过程数据对 SCS 模型在蒋家沟流域降雨—径流关系中的适用性和有效性进行检验。

4 模型应用

4.1 子流域 CN 值的确定

CN 是前期土壤湿润程度 (AMC)、坡度、土壤类型和土地利用类型等因子的函数。SCS 模型根据前 5 d 的降雨总量,将前期土壤湿润程度划分为 3 类^[9],分别代表干 (AMC I)、平均 (AMC II)、湿 (AMC III)

这 3 种状态(表 1), 不同湿润程度的 CN 值可相互转化。同时根据土壤最小入渗率将土壤划分为 A, B, C, D 共 4 种类型⁹(表 2)。其中 A 类主要是一些具有良好透水性能的砂土或砾石土, 渗透性很强, 潜在径流量很低, 土壤在水分完全饱和的情况下仍然具有很高入渗速率和导水率。B 类主要是一些砂壤土, 或者在土壤剖面的一定深度具有一层不透水层, 渗透性较强, 当土壤在水分完全饱和的情况下仍然具有很高的入渗速率。C 类主要为壤土, 或者虽为砂性土但在土壤剖面的一定部位存在一层不透水层, 中等透水性土壤, 在水分完全饱和的情况下保持中等入渗速率。D 类主要为黏土等, 弱透水性土壤。蒋家沟流域土壤类型主要有燥红土、黄红壤和砾石土, 前两种土壤类型均属于 A 型^[12-13]; 砾石土主要分布在河道附近, 以泥石流堆积体为主, 因此 CN 较大, 参考 SCS 的 CN 值标准表, 查得砾石土在 AMC I, AMC II, AMC III 这 3 种土壤湿度程度下的 CN 分别为 77, 90, 97; 同时查得这 3 种前期土壤湿润程度条件下燥红土和红黄壤不同土地利用类型的 CN 值(表 3)。

表 1 土壤前期湿润程度等级划分

土壤湿度	前 5 d 降水量/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 最小下渗率的 SCS 模型土壤分类

土壤类型	最小下渗率/(mm · h ⁻¹)
A	7.28 ~ 11.43
B	3.81 ~ 7.28
C	1.27 ~ 3.81
D	0 ~ 1.27

表 3 蒋家沟黄红壤和燥红土不同土地利用情况下的 CN 值

土壤湿度	阔叶林	针叶林	灌木丛	草地	居民用地	坡耕地	裸地
AMC I	56	55	58	52	78	64	71
AMC II	74	73	76	71	90	81	86
AMC III	89	88	92	88	98	94	97

在此基础上, 在流域的子单元中进行土地利用、土壤类型叠加, 提取出不同土地利用类型和土壤类型在各子流域中的所占的面积比例, 查得相应的 CN 值, 然后用面积加权平均的方法确定了各子流域的 CN 值(表 4)。

表 4 蒋家沟流域各子单元 CN 值

子流域编号	AMC I	AMC II	AMC III	子流域编号	AMC I	AMC II	AMC III
1	76	80	86	15	74	77	84
2	76	80	85	16	76	80	86
3	75	79	85	17	75	80	86
4	74	78	84	18	77	82	88
5	74	78	85	19	75	80	86
6	74	77	84	20	76	80	86
7	76	80	86	21	73	79	86
8	74	77	84	22	69	74	82
9	76	81	87	23	76	82	89
10	77	82	85	24	70	74	80
11	76	81	87	25	72	77	83
12	77	82	86	26	77	83	90
13	76	82	87	27	73	77	84
14	75	80	85				

4.2 模型在蒋家沟流域的应用

选取 2008 年 9 月 3 日至 9 月 4 日次降雨的降雨径流资料, 首先在划分好子流域的基础上, 根据研究步骤二在 Arcgis 中绘制出 9 月 3 日至 9 月 4 日次降雨蒋家沟流域的 CN 值分布图(附图 7); 插值出流域的降雨分布图(附图 8); 根据 SCS 模型的产流条件和产流公式(2)计算出流域内的产流分布图(附图 9), 再从流域 DEM 中提取流域中各点沿着最大坡度到流域出口距离, 即流长分布图(附图 10), 根据 SCS 汇流公式⁹ 求出各点到流域出口的汇流时间, 以小时(h)为单位将流域划分成 9 个不同的汇流时间区(附图 11)。在同一个汇流时间区内各点流至流域出口所需的时间是相同的。运用下列公式进行叠加运算:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= q_{1,1} \\
 Q_2 &= q_{2,1} + q_{1,2} \\
 Q_3 &= q_{1,3} + q_{2,2} + q_{3,1} \\
 &\vdots \\
 Q_n &= q_{1,n} + q_{2,n-1} + \dots + q_{n-1,2} + q_{n,n-1} \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$q_{m,n}$ 为第 m 个以汇流时间区第 n 小时流到出口流量, 最终算出不同时间到达出口的总流量 Q_n 。

蒋家沟流域推移质含量非常大, 而且泥石流爆发时常堵塞整个沟道, 因此在该流域建立水文站进行水文数据实测的难度很大。由于沟床是由泥石流堆积体构成, 因此平时沟道变迁频繁, 不能形成固定河道, 所以只能每日人工手测其流量和流速等水文资料。蒋家沟流域的特殊性造成降雨径流实测资料获取难度大, 实测序列较少, 且难以保证时间序列的连

续性。笔者 2008 年 7—9 月之间在蒋家沟观测了 5 次降雨之后的径流量, 由于观测难度太大, 每次暴雨都只获得了一次至两次实测径流数据。利用这 5 场暴雨对模型进行检验, 经过反复调整参数, 确定初损参数 $I_a=0.17S \sim 0.18S$ 时开始产流, 据此对这 5 次降雨进行产汇流计算模拟, 模拟结果比较令人满意的, 在有限数据的模拟中, 误差均在 10% 以内, 说明 SCS 模型可以在蒋家沟流域进行径流模拟, 模拟结果可以用来弥补实测资料的不足。这 5 次降雨的观测值与相应时刻的模拟值见表 5。图 1 是 9 月 3—4 日蒋家沟流域基于 SCS 模型的模拟径流过程与实测值, 尽管只能测到一个时间点的流量, 但是从这个观测数据可以发现, 模拟结果还是可以接受的。

表 5 蒋家沟流域降雨—径流实测值与模拟值

观测时间	实测值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	相对 误差/%
20080726 17:00	0.71	0.76	7.46
20080727 18:00	0.57	0.63	9.70
20080728 17:00	0.75	0.80	6.63
20080801 18:00	0.66	0.60	9.73
20080802 8:00	0.72	0.79	8.99
20080830 15:00	0.73	0.66	9.66
20080903 17:00	0.90	0.93	3.33

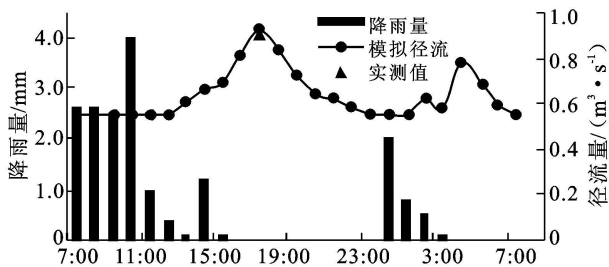


图 1 蒋家沟流域 2008 年 9 月 3—4 日
降雨实测径流与模拟径流过程

5 结论

(1) 根据地貌将蒋家沟流域划分成 27 个子流域, 并且根据子流域内土地利用类型、土壤类型提出了该流域不同 AMC 等级下的产流 CN 值, 并绘制出了各场降雨中蒋家沟流域的 CN 分布图。

(2) 调整了模型中的参数, 确定了初损参数 $I_a=0.17S \sim 0.18S$ 时开始产流, 模拟值与实际测量值最为接近, 符合蒋家沟的实际情况。蒋家沟流域处于干热河谷区, 植被稀疏, 因此植物截流量较小, 同时受该区水文地质条件影响, 蒋家沟流域裂隙地下水丰富,

因此少量降雨便可能引起产流, 致使初损值较一般流域偏低。

(3) 由于蒋家沟流域是泥石流沟, 水文资料获取难度很大, 因此每次降雨之后只能获得有限次的径流观测资料, 对仅有 5 次降雨中 7 个时刻的径流进行模拟, 模拟精度均在 90% 以上, 表明 SCS 模型可以用来进行蒋家沟流域的降雨—径流模拟和预测, 同时用单位线法所得到的径流过程曲线可以用来弥补实测资料的局限性。

(4) 本研究通过对初损参数的调整和 CN 值的调整, 得出了蒋家沟流域的径流曲线, 为蒋家沟降雨—径流模拟和泥石流的形成及输送的进一步研究提供理论基础。但模型中只是简单地假设初损值为流域最大滞留量的 0.17~0.18 倍, 具体影响初损参数的因子以及影响的过程还有待于进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(4): 243-250.
- [2] 穆宏强. SCS 模型在石桥铺流域应用研究[J]. 水利学报, 1992, 23(10): 79-83.
- [3] 张建云, 何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(12): 345-350.
- [4] 徐秋宁, 马孝义, 姜宗科, 等. 小型集水区降雨径流计算模型研究[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 139-142.
- [5] 王白陆. SCS 产流模型的改进[J]. 人民黄河, 2005, 27(5): 24-26.
- [6] 彭立志, 游进军. 改进的 SCS 模型在流域径流模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 20-24.
- [7] 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流域降雨—径流关系中的应用[J]. 水利发电学报, 2005, 24(6): 58-62.
- [8] 许彦, 潘文斌. 基于 ArcView 的 SCS 模型在流域径流计算中的应用[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 177-179.
- [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] 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] 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.
- [12] 陈宁生, 张军. 泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 169-171.
- [13] 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[J]. 山地学报, 2006, 10(24): 190-197.