基于水文模型泥石流汇流预测*
——以蒋家沟一级支沟大凹子沟泥石流为例

庄建琦[1]，崔 鹏[2]，郭晓军[2]

（1. 长安大学 地质工程与测绘学院/西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室，陕西 西安 710054；
2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所/山地灾害与地表过程重点实验室，四川 成都 610041）

摘 要：泥石流是山区常见的自然现象，每年都会带来严重的经济损失和人员伤亡，严重影响到山区的经济发展。合理的预报成为一项经济有效的重要减灾手段，但是对于泥石流汇流过程的预报还没有一个科学有效的方法。利用 SCS 模型结合 ARCGIS 技术，初步探索泥石流汇流过程，对泥石流汇流过程和最大流量进行预测；并选择泥石流多发区大凹子沟小流域作为研究对象，根据实际泥石流汇流过程对模拟结果进行对比，主要获得如下认识：①采用 ARC-SCS 模型对 1999 年 6 月 16 日发生的泥石流汇流过程进行初步预测，结果显示，最大清水流量为 16.31 m^3/s，泥石流最大流量为 51.98 m^3/s，计算的泥石流最大流量与实际调查结果误差仅为 9.2%；②泥石流的整个汇流过程持续约为 40 min，根据野外实际调查结果来看，泥石流汇流过程计算误差较小。可见基于分布式水文模型泥石流流量预测具有一定的应用意义，预测结果可以促进泥石流工程防治的开展，为泥石流防治和预报提供基础。

关键词：泥石流；汇流；ARC-SCS 模型；水文模型；大凹子沟
中图分类号：S157.4；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2013)02－0055－05

0 引言

目前，泥石流预测预报研究很多，也取得了一系列成就[1-3]；其中泥石流规模预测是泥石流减灾最为关键的参数。泥石流规模预报分为泥石流总量和流量预报，前者主要针对一场泥石流的径流总量预报其发生规模，不具有过程意义；后者可以预报泥石流流量过程及最大流量，同时泥石流洪峰流量还影响到泥石流总量等参数[2,4]，也是泥石流防治工程设计的关键参数，这样的预报方式对于泥石流减灾更具有指导意义。

泥石流汇流模型的建立是泥石流规模预报的基础之一。目前已经对泥石流汇流模型开始探索，但是仅仅只是对泥石流最大流量的估算，没有真正获取泥石流的汇流过程[5-8]。由于泥石流的汇流始终伴随着清水汇流过程，因此获取合适的清水汇流过程，参考泥石流参数，可以简单地获取泥石流的汇流过程。随着水文模型的发展，泥石流汇流研究可以参考较为成熟的水文汇流模型，也可以借鉴适用于 GIS 系统集成的水文汇流模型[9]，如常用的 SWAT[10]、SCS 模型[11]等。Cui 等[12]利用 SCS 模型结合水流流速对地震灾区的泥石流进行了汇流模拟的尝试，结果较为理想。本文利用类似方法，将等时线方法结合 SCS 产流模型应用到泥石流多发流域蒋家沟流域，对其进行泥石流的汇流过程模拟，将水文模型在泥石流中的应用进行再一次尝试。

对于降雨控制型泥石流，其流量过程主要受到降雨的影响[13]。本文根据水文模型，结合经验公式计算泥石流最大流量及可能的汇流过程，为泥石流防治提供科学依据。同时，由于泥石流汇流过程的最大值是防治工程设计的必需参数，其研究结果也将为泥石流工程防治提供参数。

1 研究区域概况

大凹子沟是我国最为著名的泥石流沟－蒋家沟的一级支沟，也是蒋家沟流域内泥石流活动较为频繁的一条泥石流沟。沟口位于 103° 06′ 08′ E，26° 14′ 45″ N 之间，流域面积 1.93 km^2，自东向西在东川泥石流观测站汇入蒋家沟。流域左岸有三个支沟，右岸有两条支沟。流域内岩层破碎，地形陡峻，植被稀疏。区内崩滑区为泥石流的直接物源区（图 1），其松散固体物质总量为 9.396×10^6 m^3[5]，松散物质达到 4.9 m^3/m^2。可见流域内松散物质储量异常丰富，泥石流的形成和规模主要受到降雨控制，属于降雨控制型泥石流。

1.1 流域概况

大凹子沟最高海拔 2 180 m，沟口海拔 1 310 m，

* 收稿日期：2012－10－09　　修回日期：2012－12－04
基金项目：国家自然科学基金（41202244）；中国博士后科学基金资助项目（2012M521728）
作者简介：庄建琦（1982－），男，河南商丘人，博士，主要从事山地灾害评价和预测方面研究. E-mail：rockfans09@163.com

相对高差达 870 m，主沟沟长 2.01 km，平均比降是 403‰，大凹子沟位置和流域地势详见图 2。

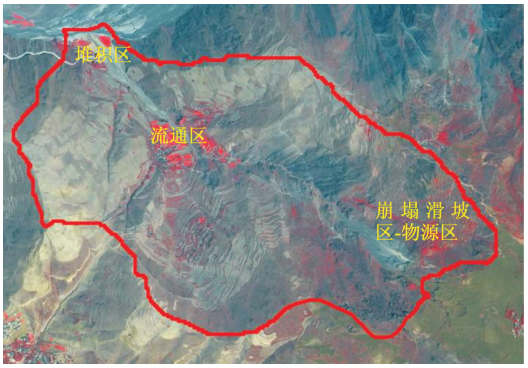

图 1 大凹子沟崩塌滑坡分布图

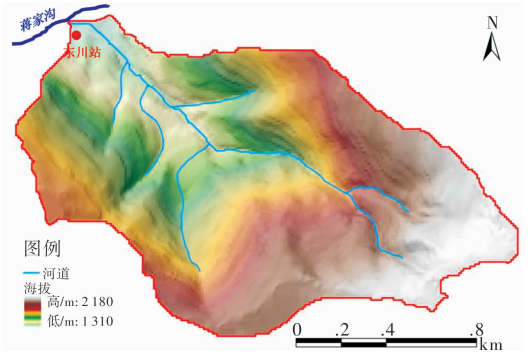

图 2 大凹子沟流域地势图

基于 1∶1 万 DEM 数据，利用 ARCGIS9.0 的 SURFACE 分析工具，获得各个坡度范围的面积（表 1）。从表 1 可以看出，大于 25°的陡坡和大于 35°的急陡坡面积达 1.53 km^2，占流域总面积的 74.12%，说明该流域主要以陡坡为主，崩塌滑坡体松散物质堆积物易于进一步的侵蚀搬运，并在水动力作用下形成泥石流。

表 1 大凹子沟坡坡度地表面积分级统计

坡度	<15°	15°~25°	25°~35°	>35°	合计
所占比例/%	8.27	17.61	33.91	40.21	100
面积/km^2	0.16	0.34	0.65	0.78	7.93

1.2 地质环境

流域位于小江南北向深大断裂带内，其东西两支在该流域下部蒋家沟主沟交会。该断裂带自晋宁运动以来一直频繁活动，新构造运动尤其活跃，导致构造带内断层交错，褶皱发育。小江断裂带也是强烈的地震带，地震破坏了山体的稳定性，降低了岩石强度，导致岩层破碎[14]，该区几乎每百年就发生一次 6 级以上的大地震（如 1733，1833，1966 年），其中震中在东川区的就有两次，而小震几乎年年发生[15]。强烈的地震活动（内营力）使蒋家沟流域的岩层更为松散破碎，在降雨、风力等（外营力）作用下，岩层风化崩解成细小固体颗粒，极大增加了流域内的松散固体物质，为泥石流的发生提供了丰富的固体物质。

1.3 气候环境

蒋家沟流域气候干湿季分明，垂直气候带明显。雨季为 5－10 月，降水量占全年总降水量的 85%以上，主要受来自印度洋的东南暖湿气流控制，该气流的水汽含量极为丰沛，受到地形因素影响，暴雨日数较多。每年 11 月－次年 4 月为旱季，由于在此期间，受干暖气流控制，西风环流从印度大陆吹来，造成气温高、降水少、风速大，有时也受北方来的干冷气流的影响，出现降水少、气温低的寒潮天气[16]。大凹子沟平时流量很小，仅 0.000 6 m^3/s。

1.4 泥石流概况

大凹子沟松散物质主要以崩塌为主，松散物质粒径较大，且流域面积较小，泥石流形成需要的水动力（降雨条件）较蒋家沟大，因此泥石流暴发频率低于蒋家沟，但是在充分的前期降雨和强降雨激发下，该流域泥石流暴发的频率维持在 1～2 次/年。

大凹子沟的泥石流规模较小，一般最大流量在 100 m^3/s 以内，历时短，与洪水历时一致，多在 30 min 以内结束，容重在 1.5～1.9 g/cm^3 之间。该流域的形成区非常集中，是泥石流形成和汇流研究的理想基地。但是该流域泥石流多数发生于夜晚，不易观测。在 1994 年 6 月 16 日 凌晨，大凹子沟暴发几年来规模最大的一次粘性泥石流，为连续流。该泥石流经东川站的时间为 06：15，粘性连续泥石流持续 20 min 多。从大凹子沟上游的雨量筒观测资料分析可知，该沟泥石流的激发雨量过程从 06：05－06：23 的降雨，整个过程的总雨量为 10.5 mm（图 3）。同时根据陈宁生等对这次泥石流的现场测量和计算，该泥石流最大流量为 94.7 m^3/s[5]。

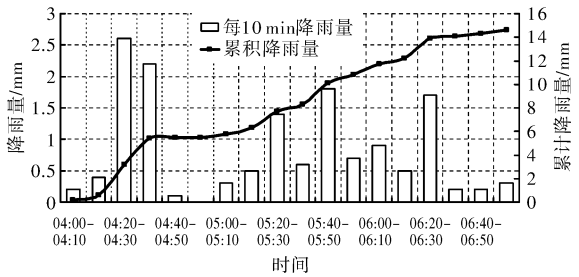

图 3 泥石流暴发过程中降雨量

根据对汶川地震后的流域情况和泥石流活动特征，大凹子沟具有与地震相一致的泥石流形成环境，流域内崩塌滑坡体分布广、多（图 1）。同时该流域 1965 年在沟口位置曾经暴发过 6.5 级地震，严重破坏山体稳定性，造成沟内崩塌、滑坡大面积分布，加上不合理的人为开发、陡峻的地形、

以暴雨为主的降雨，该沟成为我国乃至世界知名的频发性泥石流沟谷。研究表明该沟泥石流物质90%以上来自于崩塌、滑坡体，与汶川地震后强震区泥石流沟谷具有相似的环境条件[17]。同时，陈宁生等对该流域1994年的一场泥石流进行了汇流计算[5]，便于对比分析，因此选择该流域进行泥石流汇流计算。

2　泥石流汇流模型的构建

2.1　产流计算

SCS模型是美国水土保持局(SCS 1972)在1950年代提出的一种基于*CN*值的产流计算模型。由于其简单易行，所需参数较少，对观测数据的要求并不很严格等特点，而被广泛应用[9,18-19]。郭晓军等[20-21]和杨宇等[22]利用SCS研究了蒋家沟流域水文汇流过程，获得了较好的拟合效果，说明SCS模型可以进行该流域泥石流汇流计算。该方法的原理是：径流产生之前要先满足植被截留、填洼和渗透，径流开始后以渗透作为损失计算。实际的蓄水量与最大蓄水量的比率等于直接径流量与降雨量减去最初的吸收量的比率，数学表达式为[11]：

$$\frac{F}{S}=\frac{Q}{P-I_a}。\tag{1}$$

式中：P是一次性降雨总量(mm)；Q为径流量(mm)；I_a为初损(mm)，即产生地表径流之前的降雨损失；F为后损(mm)，即产生地表径流之后的降雨损失；S为流域当时的可能最大滞留量，mm，是后损的上限。

考虑到初损I_a未满足时不产流，一般假设一个流域的初损等于流域最大滞流量的20%，即$I_a=0.2S$，因此SCS模型产流计算公式一般表示为：

$$\begin{cases}\dfrac{(P\geqslant 0.2S)^2}{(P+0.8S)} & ,\ P\geqslant 0.2S;\\ 0 & ,\ P\leqslant 0.2S。\end{cases}\tag{2}$$

流域初始时最大可能滞留量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，模型通过引入*CN*值，可较好地确定S，公式如下：

$$S=\frac{25\,400}{CN}-254\ 。\tag{3}$$

*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。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、前期土壤湿润程度，其*CN*值也较大，反之亦然。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根据前5 d的降雨总量划分为3类，分别代表干(AMCI)、平均(AMCⅡ)、湿(AMCⅢ)三种状态(表2)。

表2　土壤前期湿润程度等级划分[9]

土壤水分状况	前5 d降水深度/mm	
	作物生长阶段	作物休眠阶段
AMCⅠ	<30	<15
AMCⅡ	30~50	15~30
AMCⅢ	>50	>30

2.2　汇流计算

SCS模型采用一条统一的单位线来计算径流输出过程，单位线的洪峰流量采用下列公式计算：

$$q=\frac{0.208\times AR}{t_p}。\tag{4}$$

汇流时间用下列公式计算：

$$t_c=\frac{5}{3}\,\frac{l^{0.8}(S+25.4)^{0.7}}{7\,069.7y^{0.5}}\tag{5}$$

式中：A为流域面积(km^2)；R为流域中每一点的径流量(mm)；t_p为峰现时间(h)；t_c为滞时(h)，即由净雨中心到洪峰出现时间的时距，两者之间关系为：$t_p=\dfrac{2\times t_c}{3}$；$S$为流域最大滞留量(mm)，$y$为流域平均坡度；$l$是水流流程[23]。

2.3　泥石流流量计算

泥石流流量受到清水流量和起动物质多少的制约，起动物质受到降雨的影响[7]。最直观和精确的泥石流流量就是现场观测和经过断面进行测量获得，由于地震之后许多区域和泥石流沟道无法进入，不能获得留痕和观测到真实的流量记录，对于泥石流预测和防治带来了很大的困难，中国泥石流学者根据大量的试验和野外观测，提出了适合中国的泥石流流量经验公式[7]：

$$Q_c=Q_B(1+\phi)D_c。\tag{6}$$

该公式在中国应用最广，是适应性最强的公式，得到广泛认同，本文根据此公式计算泥石流流量。根据经验，式(6)中的堵塞系数D_c的经验值见表3。

表3　泥石流堵塞系数

堵塞程度	没有堵塞	轻微	中等	严重
D_c值	1	1.5	2	2.5

为此，根据清水流量汇流过程，结合泥石流流量计算方法，将其集成在ARCGIS中，便可以获得泥石流的径流过程。

将上述公式利用ARCGINEER编程技术，集成在ARCGIS中，可以得到基于SCS模型的泥石流汇流模型，用以泥石流径流预测和风险分析。

3　泥石流汇流计算

根据大凹子沟基础地理信息资料，地表覆盖类型及土地利用情况分类标准以实际情况为依据，分别获取流域*CN*值、土地利用糙率值和降雨量，

具体步骤如下。

(1)*CN* 值是反映降雨前流域特征的一个综合参数，与流域前期的土壤湿润程度、坡度、植被、土壤类型和土地利用方式等因素有关。根据前期降水指数 API(前 5 d 降雨量)，利用设在该流域附近的雨量观测站资料，统计在该泥石流暴发前5 d 的降雨量(图 4)，可以看出，在泥石流暴发前该流域前期雨量达到了 59.7 mm，尤其是在泥石流暴发前日(1994 年 9 月 15 日)降雨量达到了 45.6 mm，土壤含水量很高。综合土地利用、土壤类型等综合指标，确定 1994 年 6 月 16 日泥石流前期的 *CN* 分布图(图 5)。

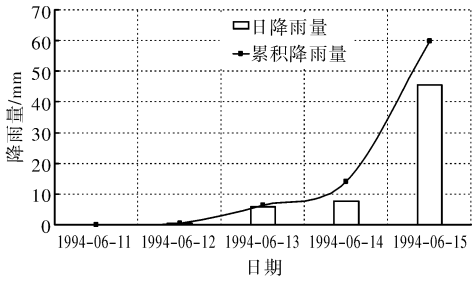

图 4 1994 年 6 月 16 日前 5 d 降雨量

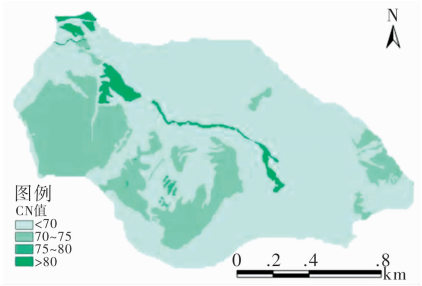

图 5 大凹子沟 *CN* 值分布图

(2)利用 GIS 中的分析模块，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，根据 SCS 汇流模型求出各点到流域出口的汇流时间，在同一个汇流时间区内各点流至流域出口所需的时间相同，根据降雨 - *CN* 值获取每个栅格的产流量，然后根据流长 - 回流时间可以获取单位出口的洪峰流量。

(3)由于降雨 - 汇流需要一定时间，因此在统计降雨时，根据流域大小，从泥石流暴发前 30 min 开始，按照每 10 min 为间隔进行统计(图 3)，输入模型计算产流。

4 结果及验证

利用 ARCGIS 技术，根据研究区 DEM、土地利用和土壤可以得到 ARC-SCS 模型参数。计算大凹子沟清水流量过程(1994 年 6 月 16 日 06：00 - 07：00)，利用上述公式计算的清水流量，结合泥石流流量计算公式，可以分别得到泥石流流量值。根据滑坡体位置、泥石流痕迹和陈宁生等描述，该次泥石流为连续流，堵塞程度较低，因此 取值 1.2。计算获知该次大凹子沟泥石流峰值流量为 104.7 m^3/s。

表 4 计算结果与实际调查对比

	野外调查	ARC-SCS 模型	误差
最大泥石流流量	47.6 m^3/s	51.98 m^3/s	9.2%

注：野外调查数据来自陈宁生等[5]。

由表 4 可以看出，通过对比陈宁生等利用等时线方法和野外调查获取的泥石流最大流量，利用 ARCGIS-SCS 模型获得的泥石流流量与实际泥石流流量基本相符，相对误差为 9.2%，说明基于分布式水文模型计算泥石流流量具有可行性，同时还可以获得泥石流流量过程。

基于分布式水文模型可以获得泥石流的汇流过程。由图 6 可以看出，从 06：10 开始水流迅速增大，到 06：25 左右达到最大，随后开始减弱，一直持续到 06：50 左右。对应的泥石流过程与实际相符。这与陈宁生等获取的泥石流汇流过程结果基本一致，说明该模型具有可行性。

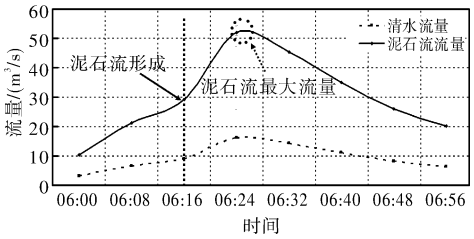

图 6 泥石流最大流量和汇流过程

相对于设计洪水经验公式，ARC-SCS 模型所需要的参数较少，而且可以通过 GIS 进行快速获取，方便计算。同时基于分布式水文模型计算的清水流量和泥石流流量，均可以获得其流量过程，而且均是可以通过 ARCGIS 技术实现可视化，避免了经验公式参数要求过多，只可以得到最大流量的缺点，而且计算速度和实现途径更加方面快捷，为泥石流预测和防治提供非常方便的工具。

虽然基于分布式水文模型的泥石流最大流量计算具有很多优点，但是其精度主要取决于清水流量的大小和汇流过程。目前基于分布式水文模型清水流量大小的预测需要大量的观测进行对模型校正，才能得到较合理的清水汇流过程。同时，在清水汇流过程中，松散固体物质补给路径和过程直接影响到泥石流汇流过程。在整个泥石流汇流过程中，固体物质是随时间和空间变化的，而且沟道堵塞情况也同样是随时间和空间变化，在计算泥石流汇流时并没有考虑这些因素。

5 结论

泥石流成为强震区灾后若干年内最主要的灾

害形式，采用合理的方法对泥石流最大流量进行估算，可为灾后重建和泥石流评价、防治提供科学依据。

泥石流汇流是泥石流预测研究的重点和难点，基于汇流过程可以获得泥石流最重要的两个参数－最大流量和径流总量。由于目前泥石流形成机理和过程研究薄弱，基于汇流过程的泥石流预测还处于探索阶段。本文利用模型 SCS，结合 ARGIS技术，初步探索了泥石流汇流过程，采用模型对类似于震后环境下的大凹子沟作为研究对象，对 1999 年 6 月 16 日发生的泥石流汇流过程进行初步预测，结果显示，最大清水流量为 16.31 m^3/s，泥石流最大流量为 51.98 m^3/s，计算的泥石流最大流量与实际调查结果误差为 9.2%，泥石流的整个汇流过程达到 40 min 左右，与实际情况基本吻合，说明该方法可以在松散物充足的情况下对泥石流的汇流进行预测。

参考文献：

[1] Cui P. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(9): 759－763.

[2] 张洪江，郑国强，程金花，等. 不同面积小流域山洪泥石流预报模型研究—以北京市密云县为例[J]. 灾害学，2011，26(1)：65－69.

[3] Iverson R M. The physics of debris flow[J]. Reviews of geophysics, 1997, 35(3): 245－296.

[4] 张怀珍，范建容. 基于地貌指数的汶川地震灾区单沟泥石流总量计算方法[J]. 灾害学，2012，27(3)：86－91.

[5] Rickenmann D. Empirical relationships for debris flows[J]. Natural Hazards, 1999, 19: 47－77.

[6] 陈宁生，韩文喜，何杰，等. 试析小流域土力类粘性泥石流的汇流过程[J]. 山地学报，2001，19(5)：418－424.

[7] 康志成，李焯芬，马霭乃，等. 中国泥石流研究[M]. 北京：科学出版社，2004.

[8] 陈宁生，高延超，李东风，等. 丹巴县邛山沟特大灾害性泥石流汇流过程分析[J]. 自然灾害学报，2004，13(3)：104－108.

[9] Jacobs J M, Myers D A, Whitfield B M. Improved rainfall/runoff estimates using remotely sensed soil moisture[J]. Jouroual of America Water Resources Association, 2003, 39(2): 313－324.

[10] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin(Tunisia)[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(8、10): 497－507.

[11] Bosznay M. Generalizat ion of SCS curve number method[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1989, 155(1): 139－144.

[12] Cui P, Hu K, Zhuang J, et al. Debris flow discharge calculation and inundation simulation[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1): 1－9.

[13] 崔鹏，庄建琦，陈兴长等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报：工程科学版，2010，42(5)：10－19.

[14] 陈循谦. 云南小江流域的泥石流灾害[J]. 灾害学，1990(2)：53－57.

[15] 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京：科学出版社，2000.

[16] 杜榕桓，康志成，陈循谦. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1987.

[17] 庄建琦，崔鹏，葛永刚，等. 5.12 地震后都汶公路沿线泥石流沟危险性评价[J]. 四川大学学报：工程科学版，2009，41(3)：131－139.

[18] 史培军，袁艺，陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报，2001，21(7)：1041－1049.

[19] Montes S. Hydraulics of open channel flows[M]. Reston: ASCE Press, 1998.

[20] 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.

[21] 郭晓军，崔鹏，庄建琦，等. SCS 模型在泥石流多发区降雨－径流模拟中的应用[J]. 水土保持通报，2010，30(2)：225－228.

[22] 杨宇，管群，胡凯衡，等. 基于 GIS 的泥石流流域分布式水文计算系统[J]. 计算机工程，2010，36(5)：260－263.

[23] 沈健聪. 介绍一个实用的小流域——设计洪水模型 SCS 模型[J]. 人民珠江，1989(1)：11－16.

The Runoff Process of Debris Flow Calculated based on Hydrological Model
——A Case Study on Dawazi Debris Flow Gully

Zhuang Jianqi[1], Cui Peng[2] and Guo Xiaojun[2]

(1. *School of Geological Engineering and Surveying of Changan University Key Laboratory of Western China Mineral Resources and Geological Engineering, Xi'an* 710054, *China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment/Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: Debris flow is a common natural phenomenon in mountain areas, bring serious economic and casualties each year, which seriously affected the economic development of mountainous areas. The reasonable prediction of debris flow is an importance cost-effective mitigation measures, but predicting the convergence process of debris flows does not have a valid scientific method. In this paper, take the debris flow in Jiangjia gully as example, the process of water flow process in a watershed was studied preliminarily by using the SCS model combined with hydraulic method, and then the debris flow runoff process was calculated using the empirical formula for debris-flow discharge combining the water flow. The results show that: (1) the peak discharge of water flow was equal to 16.31m^3/s, and that of debris flow was 51.98 m^3/s according to the ARC-SCS model of debris flow occurred on 1999-06-16 in Dawazi gully. The error between the calculated and measured values is 9.2%. (2) the debris flow convergence process lasts 40min, the debris flow convergence process of calculation is similar with actual result according to field investigation results. The debris flow runoff process predict based on distributed hydrological model can be used in mitigation of the debris flow, the prediction results can promote the prevention and control project carried out and provide the basic data for the debris flow prevention and prediction.

Key words: debris flow; accordant junction process; ARC-SCS model; hydrological model; Dawazi gully