

文章编号:1672-6561(2014)02-0073-08

投稿网址 <http://jese.chd.edu.cn/>

## 泥石流启动临界土体含水量及其预警应用

胡凯衡<sup>1,2</sup>, 马超<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**传统的泥石流预警方法多基于前期和实时降雨量等间接指标,但实际上直接影响泥石流启动的关键物理参数是土体含水量,通过分析土体含水量的变化来判断泥石流启动更为直接可靠。首先定义了泥石流启动的临界土体含水量的概念,然后基于国内外泥石流启动的观测试验数据,采用逐步回归分析方法,建立了临界土体含水量与土体渗透系数、孔隙度和颗粒曲率系数的经验关系,进而提出一种基于临界土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法。最后,以云南东川蒋家沟 1999 年 7 月 16 日发生的一场泥石流为实例进行演算和验证。结果表明:该方法在可靠性和准确性上优于传统利用临界线和暴发线判别泥石流的预测模型。

**关键词:**泥石流;预警;临界土体含水量;孔隙度;渗透系数;曲率系数;降雨

**中图分类号:**P642.23

**文献标志码:**A

## Critical Soil Moisture for Debris Flow Initiation and Its Application in Forecasting

HU Kai-heng<sup>1,2</sup>, MA Chao<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Most of traditional debris flow forecasting methods are based on indirect variables such as antecedent and real-time rainfalls. But the key factor influencing directly the debris flow initiation is soil moisture, which is more reliable for debris flow forecasting. Firstly, the concept of critical soil moisture for debris flow initiation was defined; secondly, based on the experimental and observation data of debris flow initiation at home and abroad, the empirical relationships between critical soil moisture and permeability coefficient, porosity, coefficient of particle curvature were obtained by the means of step-wise regression analysis; finally, the forecasting method for debris flow based on critical soil moisture and real-time rainfall was proposed. The method was tested and verified by the debris flow happened at Jiangjiagou of Dongchuan, Yunnan on 16 July, 1999. The results show that the reliability and accuracy of new forecasting method is better than the traditional forecast method for debris flow based on critical line and occurrence line.

**Key words:** debris flow; forecasting; critical soil moisture; porosity; permeability coefficient;

收稿日期:2013-09-18

基金项目:中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01);国家自然科学基金重点项目(41030742);中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目(110900K235)

作者简介:胡凯衡(1975-),男,江西瑞金人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:khhu@imde.ac.cn.

coefficient of curvature; rainfall

## 0 引言

自然界中,泥石流往往由上游沟岸或坡面的固体物质失稳进入沟道,并在沟道水流的动力作用下形成。初始形成的泥石流规模不大,在运动过程中通过侵蚀、裹挟松散物质,规模才逐渐增长<sup>[1-2]</sup>。

一般而言,坡面土体要达到一定的含水量(体积比,下同)才能启动形成泥石流。坡面土体的含水量是反映泥石流形成的直接参数。目前常用的前期降雨和当期降雨量预警指标,间接体现了降雨使土体含水量增加,抗剪强度和土体稳定性降低,从而使泥石流发生的可能性增大<sup>[3-6]</sup>。国内外许多泥石流预警模型多以“前期有效雨量-雨强/雨强历时”为基本模式<sup>[7-10]</sup>。但是前期有效雨量与流域下垫面特性、岩土体物理特性等有关,其计算过程中涉及的递减系数、前期降水衰减系数等重要常数的确定需要长时间的土体含水量和降雨量观测,且不同学者使用的计算方法以及得到的结果可能不一样<sup>[11-14]</sup>。不同泥石流沟的有效前期雨量衰减规律也不同。因此,前期降雨量预警模式存在局地性强、预警精度不高、参数不易确定等缺点。

针对“有效前期雨量-雨强/雨强历时”预警模型所存在的不足,笔者通过分析国内外大量泥石流形成过程中的土体含水量变化数据,直接以土体含水量为预警指标,提出泥石流启动临界土体含水量的概念和经验计算公式;经过云南东川蒋家沟泥石流观测数据的验证,所得到的方法和公式可应用于泥石流预警工作中。

## 1 泥石流临界土体含水量

### 1.1 泥石流形成过程中土体含水量变化

Cannon 等对美国加利福尼亚、科罗拉多火灾地区大量野外土体含水量和泥石流暴发时间监测表明,不同深度坡面土体(一般监测最大深度为 60 cm)在泥石流暴发时的含水量都未达到饱和<sup>[15-17]</sup>。以加利福尼亚南部桑加布里埃尔山区 2009 年发生的泥石流为例,167 mm 的累积雨量共造成 7 条流域产生泥石流,而流域中的土体含水量却始终维持在 22%,远小于饱和度 40%<sup>[18]</sup>。这些地区的泥石流在较好的地表植被条件下(比如火灾过后植被逐渐恢复后),可由径流触发转变为滑坡激发,1 h 激发雨量也逐渐增大<sup>[19]</sup>;蒋家沟暴雨泥石流的多年监测也

表明:降雨过程中,雨水在坡面松散土体最大可以下渗 60~80 cm,斜坡坡脚位置的土体含水量最大,但是都未超过孔隙度<sup>[20-21]</sup>;一些模型试验结果也表明,在土体启动时大部分土体处于未饱和状态<sup>[22-24]</sup>。这与传统认识的泥石流形成理论并不一致,尤其从非饱和和土力学角度来看,泥石流启动的原因应是土体饱和后短历时雨强造成孔隙水压力剧增、有效应力下降或丧失。事实上,降雨过程中土体含水量空间分布不均匀,垂直深度上土体含水量是非线性关系。对孔隙度大、强度低、颗粒间黏结程度差的坡面松散物源体来说,土体失稳不仅仅是由于含水量增加、抗剪强度减小、下滑力增加导致的,土体失稳在泥石流形成过程中只是初步阶段也是必不可少的阶段,降雨下渗在土体中形成壤中流以及表面形成地表径流也是非常重要的原因。在一些地区甚至径流作用在泥石流形成作用中更是起主导作用。例如,根据蒋家沟流域坡面径流和沟道汇流汇集过程的观测,大多是清水变成泥石流体的过程,在很多情况下,在坡面上就初步形成了小泥石流体或浆体<sup>[25]</sup>。美国加利福尼亚南部、科罗拉多地区火灾后的泥石流多是流域坡面土体含水量达到一定值后,由峰值降雨时段在引发一定水力条件的坡面径流激发形成的<sup>[26]</sup>。

### 1.2 临界土体含水量定义和经验计算公式

无论是土力类还是水力类的泥石流,暴发时刻大多在峰值降雨时段附近。随着雨水入渗,土体含水量逐渐增加,当含水量达到某个临界值时,源区坡面土体达到极限平衡状态,或者坡面土体入渗和失水达到动态平衡。后续的降雨强度如果能够达到或者超过渗透率,坡面产生地表径流而且土体失稳下滑,形成最初的泥石流。这一临界含水量称为泥石流启动的临界土体含水量。国内外研究中有关临界土体含水量的概念已有所涉及。例如,在 Brocca 等提出的一些降雨-径流模型中,土体水分平衡主要考虑了降雨入渗率、雨强、蒸发率以及因壤中流和深层土体渗透的土体排水率,临界土体含水量与饱和度并不一致<sup>[27]</sup>。杨大文等将遂川江流域实测土体含水量与不同时间的雨量结合起来,建立流域内不同点土体饱和度和警戒雨量的关系<sup>[28]</sup>。该结果间接反映了含水量越大,警戒雨量越小。实测的土体饱和度中也反映了临界土体含水量的概念。

通过对国内外大量降雨激发浅表层滑坡、泥石

流过程中土体含水量变化与土体物理参数的分析(表 1),发现泥石流暴发时的土体含水量与土体渗透系数、孔隙度以及颗粒级配存在正相关关系,用 Matlab 的 Stepwise 函数作交互式逐步回归分析,得到多重线性关系式

$$W_a = -1.12K + 0.46n + 0.12C_c - 0.165 \quad (1)$$

式中: $W_a$  为临界土体含水量; $K$  为土体渗透系数; $n$  为土体孔隙度; $C_c$  为土体颗粒的曲率系数, $C_c = d_{30}^2 / (d_{10}d_{60})$ ,其中  $d_{10}$ 、 $d_{30}$  和  $d_{60}$  分别是土体颗粒质量累计含量(质量分数,下同)为 10%、30% 和 60% 时的粒径。

式(1)拟合所用数据如表 1,判定系数为 0.896 5,调整判定系数为 0.883,均方根误差为 0.055 6。对方程显著性进行  $F$  检验,查表得到  $F_{0.05}(3,23)$  值为 3.028,远小于统计量  $F$  值(66.4),因此,回归公式显著。

从式(1)可以看出,临界土体含水量与渗透系数成负相关关系,与孔隙度和土体颗粒曲率系数成正相关关系。渗透系数越大,说明土体在一定水力梯度下可以很快下渗并在短时间内转化为壤中流。因内部壤中流流动和深层渗漏的土体排水速度与雨强大小接近时,土体含水量才达到临界值,并短时间维持在相对稳定的水平。孔隙度越大,说明水、气两相占据土体内部空间越大。一般而言,在非饱和阶段,土体内部颗粒之间具有一定的黏聚力和咬合力并使土体具备一定的抗剪强度,从而保持稳定。国内外许多研究证明土体启动时是非饱和的,土体内部需要更多的水才能使抗剪强度下降,下滑力增加。因此,临界土体含水量与孔隙度成正相关关系说明水分在松散碎屑坡面体稳定性中具有重要作用。土体颗粒的曲率系数反映了土颗粒粒径分布曲线形态。从表 1 中曲率系数可以看出,泥石流源区粒径级配累计曲线斜率比较连续,细颗粒在泥石流源区土体仍占很大部分。尽管级配连续,但是泥石流源区土体是不均匀的,存在不连续粒径,且均匀系数变化较大。由此说明临界土体含水量与曲率系数成正相关关系,曲率系数越大,土体内部存在不连续粒径,土颗粒间的存水空间越多,临界土体含水量越大。

另外,式(1)中的 3 个变量综合反映了流域内土体的平均最大蓄水量。临界土体含水量实际上与平均最大蓄水量物理涵义一致。超过临界土体含水量或者平均最大蓄水量的降水将从地表流走,形成地表径流,并聚集形成足够水动力条件的沟道水流。坡面汇流而来的初步小规模泥石流浆体与沟道水流

表 1 泥石流形成时的土体含水量、渗透系数、孔隙度以及曲率系数

Tab. 1 Soil Moisture, Permeability Coefficient, Porosity and Coefficient of Curvature when Debris Flow Formed

编号	$W_a$	$K/(mm \cdot s^{-1})$	$n$	$C_c$
1	0.500 0	0.023 510	0.75	3.333 333
	0.590 0	0.014 493	0.76	3.333 333
	0.660 0	0.004 667	0.69	3.333 333
	0.540 0	0.007 619	0.72	3.333 333
	0.480 0	0.003 704	0.76	3.333 333
	0.540 0	0.005 072	0.76	3.333 333
2	0.240 0	0.005 626	0.54	2.000 000
	0.133 0	0.005 626	0.45	0.408 333
	0.120 0	0.010 260	0.58	0.888 889
	0.113 0	0.087 760	0.58	0.888 889
	0.124 0	0.010 260	0.58	0.888 889
	0.103 6	0.087 760	0.58	0.888 889
	0.161 8	0.010 260	0.58	0.888 889
	0.152 6	0.005 626	0.45	0.408 333
	0.117 4	0.010 260	0.58	0.888 889
	0.152 9	0.005 626	0.45	1.125 000
3	0.326 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.310 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.357 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.237 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.340 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.340 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.352 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.378 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.313 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.347 0	0.003 819	0.69	1.481 481
	0.347 0	0.003 819	0.69	1.481 481

注:编号 1 的数据引自文献[29];编号 2 的数据引自文献[30];  
编号 3 的数据引自文献[24]。

汇集增大了其中的含沙量和携带固体物质能力。沟道水流在流经泥石流床时强烈侵蚀固体物质并形成泥石流。由于式(1)中的 3 个参数是泥石流源区土体物理特征值,所以该公式主要针对泥石流形成区的土体,尤其是细颗粒含量多的泥石流物源体。

2 基于临界土体含水量和实时降雨的预警方法

根据临界土体含水量的定义以及泥石流预警模式中有有效前期降雨难以精确计算的问题,笔者提出

一种基于临界土体含水量和实时降雨的泥石流预警

方法(图 1),该方法的具体流程如下。

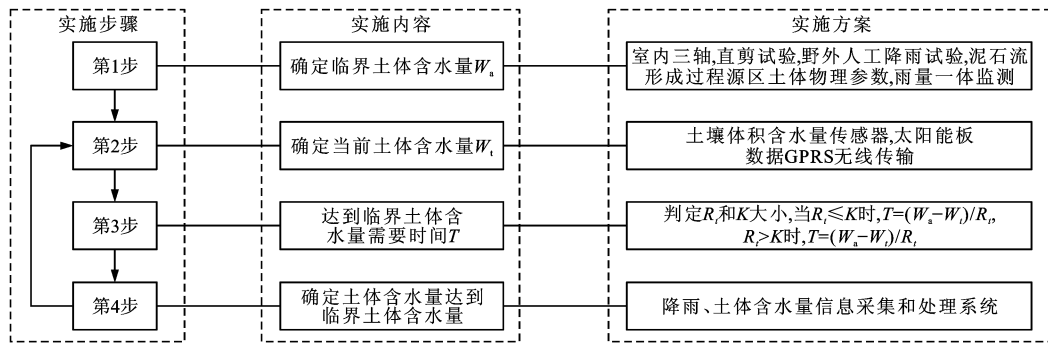


图 1 基于土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法实施过程

Fig. 1 Flow Chart of Debris Flow Forecasting System Based on Critical Soil Moisture and Real-time Rainfall

(1)计算泥石流启动的临界土体含水量。根据泥石流形成区的岩土体特征,利用式(1)计算对应临界土体含水量  $W_a$ 。

(2)计算当前土体含水量与临界土体含水量的差值。在得到临界土体含水量的情况下,通过土壤含水量传感器,以太阳光板和蓄电池作为电源,运用 GPRS 无线网络信息传输和室内数据接收终端,得到降雨过程中  $t$  时刻的土体含水量  $W_t$ 。通过室内数据处理系统反复计算差值含水量  $\Delta W$ ,其表达式为

$$\Delta W = W_a - W_t \quad (2)$$

(3)根据当前雨强计算达到临界土体含水量所需要的时间  $T$ 。具体计算方法为:通过雨量传感器,以无线网络方式发出和接收雨量值,通过室内系统判定  $t$  时刻雨强  $R_t$  和土体渗透系数  $K$  的大小;并选择大于渗透系数的计算公式和小于渗透系数的计算公式对达到临界土体含水量所需要的时间进行计算。

$$T = \begin{cases} (W_a - W_t)/K & R_t > K \\ (W_a - W_t)/R_t & R_t \leq K \end{cases} \quad (4)$$

(4)根据计算的  $T$  值进行预警,并每隔一定时间重复第(3)、(4)步直至达到临界土体含水量或降雨结束。如果  $T > 0$ ,则多通道数据反复确认降雨过程中土体含水量是否达到临界土体含水量,并每隔一定时间(比如 10 s)重复第(2)、(3)步操作内容。如果降雨一直持续且  $T \leq 0$ ,那么安排现场查看或发出泥石流即将发生的警报。如果降雨结束,则停止泥石流预警。

### 3 实例分析

笔者利用提出的基于临界土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法,对云南东川蒋家沟 1999 年 7 月 16 日泥石流进行演算。

#### 3.1 临界土体含水量确定

蒋家沟角砾土密度为  $1.954 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,孔隙度  $n$  为 0.381 8,渗透系数  $k$  为  $0.008 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $d_{10}$  为 0.01 mm, $d_{30}$  为 0.25 mm, $d_{60}$  为 3 mm,角砾土颗粒级配曲线的曲率系数  $C_c$  为 3.125(图 2)。由此得到蒋家沟泥石流暴发的临界土体含水量为 40.1%。陈晓清等在蒋家沟人工降雨激发滑坡失稳形成泥石流的试验中发现,尽管不同深度的土体含水量不同,但每一组试验中土体含水量最大值都介于 45% 和 35% 之间,且土体破坏前的土体含水量大致在 40% 上下剧烈波动<sup>[23]</sup>。土体在降雨作用下达到破坏前状态,其含水量剧烈变动,但是变动的幅度基本在 40% 左右。这与通过式(1)计算得到的土体含水量值基本相同。因此,蒋家沟源区土体含水量接近该值,泥石流暴发的可能性就越大。

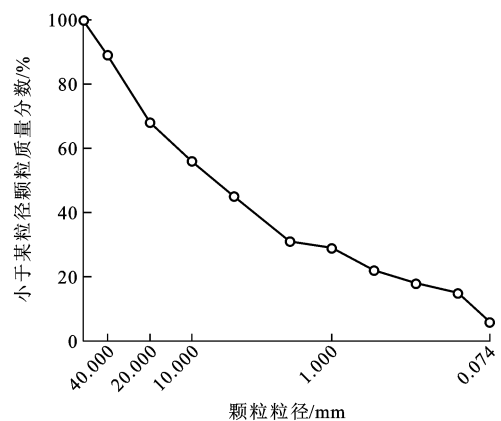


图 2 云南东川蒋家沟角砾土的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle Grading Curve of Breccia Soil in Jiangjiagou of Dongchuan, Yunnan

#### 3.2 演算过程

根据东川泥石流观测站提供的降雨数据,激发蒋家沟 1999 年 7 月 16 日泥石流的降雨过程见图 3。

(1)计算差值含水量。初始时土体含水量为 4%,



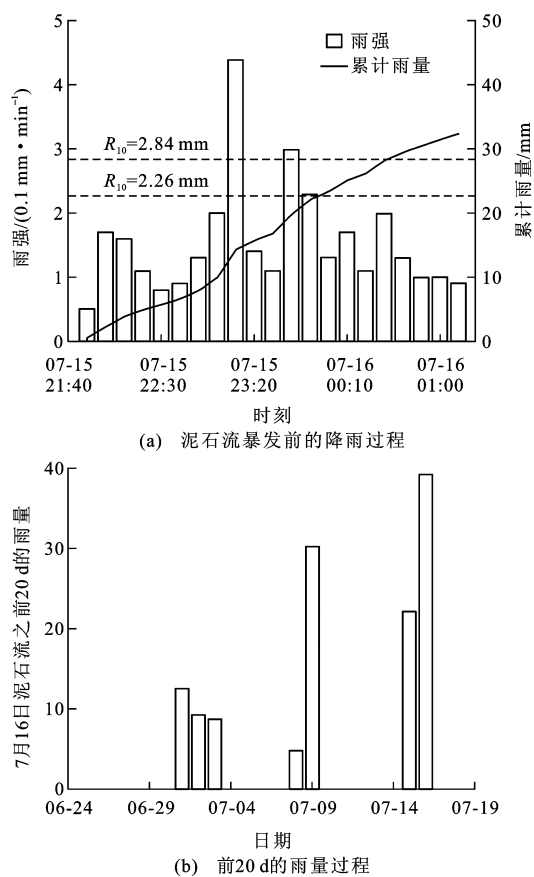


图 3 1999 年 7 月 16 日泥石流暴发前的降雨过程和前 20 d 的雨

Fig. 3 Rainfall Processes Before Occurrence of Debris Flow on 16 July, 1999 and During the 20 Days Before the Debris Flow

未达到临界土体含水量(40.1%),因此,在此时没有泥石流发生,差值含水量 ΔW 为 36.1%。

(2)比较雨强、渗透系数大小并计算每单位时间的土体含水量。蒋家沟角砾土的渗透系数为 0.008 07 mm·s<sup>-1</sup>,相当于每 10 min 降雨 4.84 mm,与该沟的始发雨强(5 mm)非常接近。渗透系数 0.008 07 mm·s<sup>-1</sup>是经过原位渗透试验得到的参数,即土体达到稳定渗透阶段时的渗透系数。渗透系数是随时间和土体含水量变化的,但无论渗透系数在降雨过程中如何变化,稳定渗透阶段的渗透系数在不同测试手段下差异不是很大。比如陈宁生等经人工降雨试验测得降雨开始时的土体初始渗透系数为 0.009 2 mm·s<sup>-1</sup><sup>[31]</sup>,相当于每 10 min 降雨 5.52 mm 的等效雨强。

通过实际 10 min 雨量(R<sub>10</sub>)与渗透系数的对比,以单位面积和单位垂直深度的土体作为分析对象得到每单位 10 min 末的含水量

$$W_t = W_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t RA}{HA}$$

(5)

式中:W<sub>t-Δt</sub>为 t-Δt 时刻(对应 t 时刻之初)的土体含水量;t 为实际降雨记录时刻;Δt 为单位雨量记录持续时间(这里为 10 min);R 为雨强;A 为土体面积;ΔtRA 为时间 Δt 内进入土体的降水体积;HA 为土体的总体积,H 为一般含水量传感器的探针长度(60 mm)。

(3)根据笔者提出的预警方法演算。由于蒋家沟没有实测的泥石流暴发过程土体含水量变化,这里在得到临界土体含水量、确定基本土体含水量和实际雨量过程后,根据提出的方法具体流程进行演算。演算结果见表 2。

表 2 基于临界土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法演算过程

Tab. 2 Calculation Process by the Forecasting Method for Debris Flow Based on Critical Soil Moisture and Real-time Rainfall

编号	时间段	R <sub>10</sub> /mm	W <sub>t-Δt</sub>	W <sub>s</sub> - W <sub>t-Δt</sub>	T/min
1	21:50~22:00	0.5	0.040 0	0.361 0	433.200 0
2	22:00~22:10	1.7	0.048 3	0.352 7	124.482 4
3	22:10~22:20	1.6	0.076 7	0.324 3	121.612 5
4	22:20~22:30	1.1	0.103 3	0.297 7	162.381 8
5	22:30~22:40	0.8	0.121 7	0.279 3	209.475 0
6	22:40~22:50	0.9	0.135 0	0.266 0	177.333 3
7	22:50~23:00	1.3	0.150 0	0.251 0	115.846 2
8	23:00~23:10	2.0	0.171 7	0.229 3	68.790 0
9	23:10~23:20	4.4	0.205 0	0.196 0	26.727 3
10	23:20~23:30	1.4	0.278 3	0.122 7	52.585 7
11	23:30~23:40	1.1	0.301 7	0.099 3	54.163 6
12	23:40~23:50	3.0	0.320 0	0.081 0	16.200 0
13	23:50~次日 00:00	2.3	0.370 0	0.031 0	8.087 0
14	次日 00:00~次日 00:10	1.3	0.408 3	<0.000 0	<0.000 0

注:次日 01:12:34 时刻,监测到泥石流;R<sub>10</sub>值始终小于渗透系数。

3.3 精度比较

将本文提出的预警方法与蒋家沟泥石流预报临界线和暴发线判别式进行结果对比,得到以下结果

$$R_{10} = 5.5 - 0.098(P_{a0} + h) > 0.5 \text{ mm}$$

(6)

$$R_{10} = 6.9 - 0.123(P_{a0} + h) > 1.0 \text{ mm}$$

(7)

式中:P<sub>a0</sub>为泥石流暴发前某一天的指数;h 为泥石流暴发前的当日降雨量。

临界线式(6)的物理意义是:在 10 min 雨强大于 0.5 mm 的降水过程中,某 10 min 降水量只要等于 5.5-0.098(P<sub>a0</sub>+h),则蒋家沟泥石流就可能暴发;暴发线式(7)的物理意义为:在 10 min 雨强大于

1 mm 的降水过程中,某 10 min 降水量只要等于  $6.9 - 0.123(P_{a0} + h)$ ,则蒋家沟就会暴发泥石流。

利用该次泥石流过程之前的降雨量过程和蒋家沟前期雨量计算公式,得到临界线和暴发线 10 min 雨量分别为 2.26、2.86 mm(图 3)。从该次降雨过程来看,23:10~23:20 时段 4.4 mm 的降雨是造成该次泥石流的主要原因。但泥石流暴发时并不与该次降雨过程的峰值雨量时段重合,滞后近 1 h。表 1 演算结果表明,该时段土体含水量并未达到临界土体含水量。而泥石流暴发时段雨强仅 0.9 mm,大于临界线而小于暴发线。从达到临界土体含水量和泥石流暴发时间上来看,达到临界土体含水量和泥石流暴发之间相差约 1 h,而原方法可提前预警 17~200 min<sup>[8]</sup>。因此,从临界土体含水量结合实时降雨过程来判别泥石流的发生更准确。笔者提出的基于临界土体含水量和实时降雨的预警方法比传统利用临界线和暴发线判别泥石流的物理意义更明确,方法更可靠。

## 4 结 语

(1)在泥石流形成过程中,一般理论认为前期降雨使源区土体饱和,短历时雨强造成饱和后的土体产生高孔隙水压力使土体失稳并转化为泥石流。但是国内外大量泥石流形成过程监测表明,源区坡面土体降雨过程和泥石流形成过程中土体都未达到饱和,且土体含水量存在一个临界值。由此,本文提出了临界土体含水量的概念,并通过拟合国内外野外监测数据得到计算临界土体含水量的经验公式。

(2)基于临界土体含水量的概念和经验公式,发展了一种基于临界土体含水量和实时降雨的泥石流预警方法。通过云南东川蒋家沟 1999 年 7 月 16 日暴发的泥石流的实际观测资料,对该方法进行了实例演算。演算结果表明,该场泥石流暴发时刻并未与峰值降雨时段重合,而是在达到临界土体含水量后约 1 h。

(3)由于临界土体含水量计算公式是经验性的,在后续研究中有必要从土体降雨入渗以及激发坡面土体失稳的物理过程并结合泥石流形成区监测进行深入研究,提出更具有物理意义的临界土体含水量概念,建立以水文学、水力学、泥沙运动学等为基础的预警模型。

## 参考文献:

## References:

[1] 崔 鹏. 泥石流起动条件及机理的实验研究[J]. 科学

通报,1991,36(21):1650-1652.

CUI Peng. Experiment Study on the Mechanism and Condition of Starting Up of Debris Flow[J]. Chinese Science Bulletin,1991,36(21):1650-1652.

[2] 崔 鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展,2014,33(2):145-152.

CUI Peng. Progress and Prospects in Research on Mountain Hazards in China[J]. Progress in Geography,2014,33(2):145-152.

[3] CAINE N. The Rainfall Intensity,Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows[J]. Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography,1980,62(1/2):23-27.

[4] WIECZOREK G F, GLADE T. Climatic Factors Influencing Occurrence of Debris Flows[M]// JAKOB M, HUNGR O. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin:Springer,2005:325-362.

[5] 马 超,胡凯衡,宋国虎,等. 汶川地震灾区帽壳子滑坡形成泥石流的过程和特征[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(4):98-103.

MA Chao, HU Kai-heng, SONG Guo-hu, et al. Processes and Characteristics of Debris Flows Induced by Mao-qiaozi Landslide in Wenchuan Earthquake Stricken Area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013,35(4):98-103.

[6] 谢 洪,刘维明,赵晋恒,等. 四川石棉 2012 年“7·14”唐家沟泥石流特征[J]. 地球科学与环境学报,2013,35(4):90-97.

XIE Hong, LIU Wei-ming, ZHAO Jin-heng, et al. Characteristics of Tangjiagou Debris Flow in Shimian of Sichuan in July 14,2012[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2013,35(4):90-97.

[7] 谭万沛,王成华,姚令侃,等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报:以攀西地区为例[M]. 成都:四川科学技术出版社,1994.

TAN Wan-pei, WANG Cheng-hua, YAO Ling-kan, et al. Regional Forecasting and Predicting of Rainfall Induced Debris Flows and Landslides: Take the Western Panzhihua as an Example[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press,1994.

[8] 陈景武. 降雨预报泥石流的原理及方法[C]//中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 第二届全国泥石流学术会议论文集. 北京:科学出版社,1989:84-90.

CHEN Jing-wu. The Principle and Method of Debris Flow Forecast Based on Rainfall[C]// Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources. Proceeding of the Second National Debris Flow Confer-

- ence, Beijing: Science Press, 1989: 84-90.
- [9] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, et al. The Rainfall Intensity-duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update[J]. *Landslides*, 2008, 5(1): 3-17.
- [10] 戚国庆, 黄润秋. 泥石流成因机理的非饱和土力学理论[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(3): 12-15.
- QI Guo-qing, HUANG Run-qiu. Study on Genetic and Mechanical Analysis of Debris Flow Based on Unsaturated Soils Mechanics[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(3): 12-15.
- [11] 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[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11-15.
- CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship Between Occurrence of Debris Flow and Antecedent Precipitation—Taking the Jiangjia Gully as an Example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1): 11-15.
- [12] 韦方强, 胡凯衡, 陈杰. 泥石流预报中前期有效降水量的确定[J]. *山地学报*, 2005, 23(4): 453-457.
- WEI Fang-qiang, HU Kai-heng, CHEN Jie. Determination of Effective Antecedent Rainfall for Debris Flow Forecast[J]. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(4): 453-457.
- [13] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(1): 33-35.
- LI Tie-feng, CONG Wei-qing. A Method for Rainfall-induced Landslides Prediction Based on Logistic Regression and Effective Antecedent Rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(1): 33-35.
- [14] 王裕宜, 邹仁元, 李昌志. 泥石流土体侵蚀与始发雨量的相关性研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(6): 34-38.
- WANG Yu-yi, ZOU Ren-yuan, LI Chang-zhi. Study on Relationship Between Erosion of Debris Flows and Critical Rain Quantity[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(6): 34-38.
- [15] CANNON S H, KIRKHAM R M, PARISE M. Wild-fire-related Debris-flow Initiation Processes, Storm King Mountain, Colorado[J]. *Geomorphology*, 2001, 39(3/4): 171-188.
- [16] SANTI P M, DEWOLFE V G, HIGGINS J D, et al. Sources of Debris Flow Material in Burned Areas[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 310-321.
- [17] CANNON S H, GARTNER J E, WILSON R C, et al. Storm Rainfall Conditions for Floods and Debris Flows from Recently Burned Areas in Southwestern Colorado and Southern California[J]. *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 250-269.
- [18] KEAN J W, STALEY D M, CANNON S H. In Situ Measurements of Post-fire Debris Flows in Southern California: Comparisons of the Timing and Magnitude of 24 Debris-flow Events with Rainfall and Soil Moisture Conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F4): 1-21.
- [19] MEYER G A, PIERCE J L, WOOD S H, et al. Fire, Storms, and Erosional Events in the Idaho Batholith[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(15): 3025-3038.
- [20] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- WU Ji-shan, KANG Zhi-cheng, TIAN Lian-quan, et al. Observation Investigations on Debris Flows in Jiangjia Ravine, Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [21] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001.
- WANG Yu-yi, ZHAN Qian-deng, YAN Bi-yu. Debris flow Structure and Rheology[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2001.
- [22] PONZIANI F, PANDOLFO C, STELLUTI M, et al. Assessment of Rainfall Thresholds and Soil Moisture Modeling for Operational Hydrogeological Risk Prevention in the Umbria Region (Central Italy)[J]. *Landslides*, 2012, 9(2): 229-237.
- [23] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流启动的人工降雨试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 106-116.
- CHEN Xiao-qing, CUI Peng, FENG Zi-li, et al. Artificial Rainfall Experimental Study on Landslide Transition to Debris Flow[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 106-116.
- [24] CHAE B G, KIM M I. Suggestion of a Method for Landslide Early Warning Using the Change in the Volumetric Water Content Gradient Due to Rainfall Infiltration[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(7): 1973-1986.
- [25] 李斌, 吴济难. 云南东川蒋家沟泥石流形成条件的初步分析[C]//中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 1981: 87-92.
- LI Jian, WU Ji-nan. Preliminary Analysis on the Formation Conditions of Debris Flows in Jiangjia Ravine,

- Dongchuan, Yunnan Province [C] // Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources. Proceedings of Debris Flows: The First Volume. Chongqing: Chongqing Branches of Science and Technology Press, 1981: 87-92.
- [26] LARSEN I J, MACDONALD L H, BROWN E, et al. Causes of Post-fire Runoff and Erosion: Water Repellency, Cover, or Soil Sealing? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 73(4): 1393-1407.
- [27] BROCCA L, BARBETTA S, MELONE F, et al. A Continuous Rainfall-runoff Model Derived from Investigations in a Small Experimental Basin [C] // SCHUMANN S A, HOLKO L. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. Goslar-Hahnenklee: IAHS Press, 2010: 179-185.
- [28] 杨大文, 龚伟, 刘志雨, 等. 基于分布式模型土壤含水量评估的山洪预警指标体系 [C] // 中国水利学会. 中国水利学会 2010 学术年会论文集: 上册. 郑州: 黄河水利出版社, 2010: 464-473.
- YANG Da-wen, GONG Wei, LIU Zhi-yu, et al. An Flooding Forecasting Method Based Distributed Model of Estimating Soil Moisture [C] // Chinese Hydraulic Engineering Society. 2010 Annual Conference Proceedings of Chinese Hydraulic Engineering Society: The First Volume. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2010: 464-473.
- [29] GRECO R, GUIDA A, DAMIANO E, et al. Soil Water Content and Suction Monitoring in Model Slopes for Shallow Flowslides Early Warning Applications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2010, 35(3/4/5): 127-136.
- [30] COE J A, KINNER D A, GODT J W. Initiation Conditions for Debris Flows Generated by Runoff at Chalk Cliffs, Central Colorado [J]. Geomorphology, 2008, 96(3/4): 270-297.
- [31] 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(1): 169-171.
- CHEN Ning-sheng, ZHANG Jun. The Research of Permeability on Loose Gravelly Soil in Debris Flow Original Area [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(1): 169-171.

## 长安大学教育部科技查新工作站(G01)简介

科技查新是为避免科研课题重复立项和客观正确地判别科研成果的新颖性、实用性和可推广性而设立的一项信息服务业务,由具有科技查新资质的查新机构承担完成。

长安大学“教育部科技查新工作站(G01)”于 2004 年 7 月,经教育部科技发展中心批准成立(教技发函[2004]8 号),具有在全国范围内开展科技查新工作的专业资质。

本工作站严格按照国家科技部《科技查新规范》开展以下业务工作:

1、为科研立项、成果鉴定、新产品开发、博硕士生开题等提供真实可靠的客观依据,保证每个查新项目的新颖性、科学性、可靠性。

2、开展课题检索,技术咨询,课题跟踪服务,为教师及专业技术人员、本科生、研究生提供原文及题录等,认真准确地为校内外用户提供全面的文献信息线索。

3、开展文献查收查引工作,为校内外用户提供论文被国内外著名检索刊物收录情况的报告。

长安大学图书馆具有丰富的文献资源,并且开通了 Dialog 国际联机检索系统,为科技查新工作奠定了良好的资源保障体系。同时,本查新站制定了严格的内部管理规定,查新人员在开展查新工作的过程中,能以质量为首要任务,热情认真地为会员服务。

欢迎广大科技工作者、教师、研究生和新老用户前来联系业务,我站将认真热情提供科技查新与文献信息服务。

联系人:刘壮生 徐芳 程海涛 张永梅

地址:陕西西安南二环路中段 长安大学校本部图书馆(北院)一楼信息部

电话、传真:029-82334377

网址: <http://lib.chd.edu.cn>; E-mail: [liuxin@chd.edu.cn](mailto:liuxin@chd.edu.cn)