

湖北省巴东县桐木园山坡型泥石流的形成机理及预警指标

——以2003-03-31强降雨过程为例

张永双¹, 吴树仁¹, 赵越¹, 何锋¹, 石菊松¹, 罗菊英²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081 2. 湖北省巴东县气象局, 湖北 巴东 444300)

摘要 2003年3月31日, 巴东县在连续强降雨作用下出现多处山体斜坡地质灾害, 造成大量房屋破坏和人员伤亡。通过现场综合调查, 笔者认为灾害比较严重的桐木园斜坡灾害体属于典型的山坡型泥石流, 着重剖析了该山坡型泥石流的变形特征及其成灾机理, 并探讨了斜坡浅表层松散岩土体快速变形的临界降雨阈值和预警指标。

关键词 山坡型泥石流; 成灾机理; 雨强; 预警

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1671-255X(2003)12-0833-06

2003年3月31日至4月1日, 因受冷空气影响, 巴东县境内连续出现狂风暴雨夹带冰雹, 诱发多处山体斜坡地质灾害, 比较严重的地质灾害体主要位于绿葱坡镇和茶店子镇长江支流桐木园河的两岸斜坡。据当地村民介绍, 3月31日午夜, 在连续强降雨作用下, 绿葱坡镇三尖观村所在的桐木园斜坡中部数十栋房屋顷刻间被顺坡而下的碎屑流淹没, 192人无家可归, 3人死亡。与该斜坡相邻的曹家湾一带出现岩体崩滑灾害, 同时, 位于桐木园河右岸、与桐木园斜坡走向一致的茶店子镇青岩村所在斜坡发生多处土体滑坡, 毁坏房屋12栋。本文着重介绍灾情比较严重的桐木园斜坡地质灾害, 认为桐木园斜坡的主要致灾体属于典型的山坡型泥石流, 通过对该山坡型泥石流变形特征及其成灾机理的系统分析, 探讨了斜坡浅表层松散岩土体快速变形的临界降雨阈值和预警指标, 对相似地区山坡型泥石流预警具有借鉴意义。

1 地质背景及灾害特征

调查区位于巴东县长江支流桐木园河两岸, 属

于构造侵蚀的中—高山河谷地貌, 桐木园河在调查区内呈近SN向延伸, 河谷横断面呈V字形, 河面宽30~40m, 河面高程约500m。山体主要由二叠系上统(P_2)灰岩、硅质岩、炭质页岩和三叠系下统(T_1)微晶灰岩、页岩组成, 岩层产状为 $340^\circ \angle 26^\circ$ 。在构造上, 该区处于巴东县茶店子向斜南翼, 向斜轴走向近EW向, 向东倾伏。根据区域地质资料, 调查区的周边NNE向断裂发育, 相应地在山体基岩中存在较多的构造节理和裂隙(图1)。

桐木园斜坡位于近SN向的桐木园河西侧, 坡向北倾, 斜坡高程500~1500m。受近EW向的桐木园河支流与桐木园河围限, 斜坡横向呈弧形延展, 剖面呈阶状, 坡度总体 28° 左右, 上段和下段较陡, 坡面较平直, 中间为缓坡。桐木园斜坡浅部由三叠系下统大冶组(T_{1d})薄至中厚层灰岩和薄层粘土页岩构成, 岩层面与坡面近于一致, 构成同倾顺向的斜坡结构类型。靠近斜坡表层为粘土页岩, 上覆厚0.5~4m的第四系残坡积粉质粘土夹碎块石, 碎块石成分以灰白—黄绿色粘土页岩碎片为主, 仅少量为灰岩碎块, 大小混杂于粉质粘土层中。该斜坡下部自西向东为

收稿日期: 2003-05-15; 修订日期: 2003-08-01

基金项目: 科技部重点专项资金项目(No.2001DIA20027)和国家自然科学基金项目(No. 40102025)资助。

作者简介: 张永双(1968—)男, 博士, 副研究员, 从事工程地质和地质灾害研究工作。E-mail: zhangyongshuang@email.com.cn

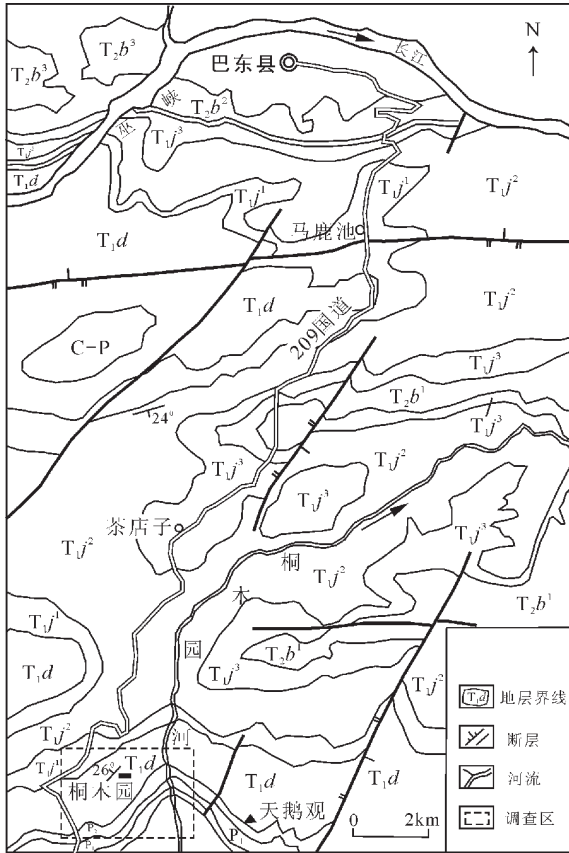


图1 桐木园斜坡地理位置和地质简图

Fig. 1 Location and geological sketch map of the Tongmuyuan slope

桐木园村1、2、3组,中上部为4组村民居住地。

桐木园斜坡地质灾害体由多个规模不同的山坡型泥石流和一个滑坡体组成,位于斜坡中部上段的山坡型泥石流,规模较大。在斜坡下段陡坡处可见多处呈“涓涓细流”下泄的碎屑流,散落于坡体之上。在斜坡西侧中段缓坡处还形成一弓形滑坡体,长约300 m,宽400 m,滑体平均厚度5 m左右(图2)。现场调查表明,主要致灾体是位于斜坡中部上段的山坡型泥石流,兼具滑坡和泥石流的某些特征,故也有人称之为“滑坡型泥石流”。该山坡型泥石流后缘具有滑坡弧形后壁的特征,第四系覆盖层与基岩之间的接触面为破坏界面,上部出现较大范围的裸露基岩层面(滑床),显示出的斜坡上段表层松散土体厚0.5~3 m,自上而下有逐渐变厚的趋势。在暴雨作用下,残坡积物构成的滑体启动后迅速转化为泥石流,在斜坡上段形成宽40 m、长300 m的长条状侵蚀凹槽。桐木园斜坡目前处于潜在不稳定状态,在

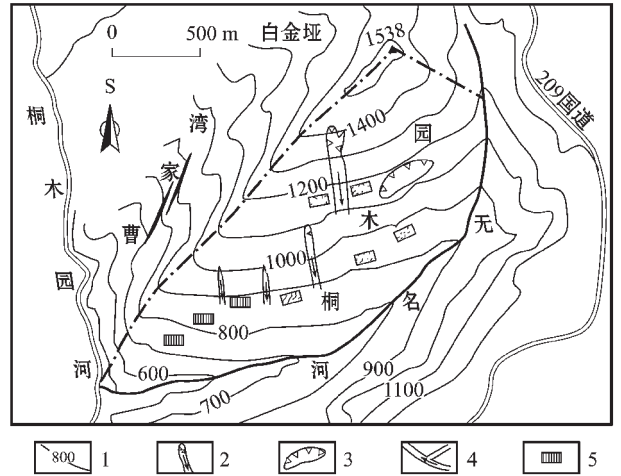


图2 桐木园斜坡变形体平面图

Fig. 2 Distribution of deformed masses on the Tongmuyuan slope

暴雨作用下再次发生地质灾害的可能性很大,因此,进行斜坡变形破坏相关因素分析,并研究山坡型泥石流灾害的成灾机理是非常必要的。

2 桐木园山坡型泥石流的成灾机理

2.1 形成条件

众所周知,泥石流的产生需要3个条件,即地形、物源和水动力条件。桐木园斜坡处于茶店子向斜翼部,与斜坡走向垂直的构造节理比较发育,不仅造成岩体的完整性降低,使风化剥蚀作用加剧,控制了坡面上微地貌的展布特征,还致使坡面沿走向方向呈波状,出现一些宽缓凹槽地形,成为汇集坡面流的地段。

桐木园斜坡表层为粘土页岩,岩层面光滑平整,上覆厚0.5~4 m的残坡积粉质粘土夹碎块石,土石比一般为7:3,土体结构较密实,干燥时处于相对稳定状态,但在饱水状态下极易发生坍塌。

暴雨为泥石流的产生提供了丰富的地表径流和动力条件。2003年3月31日至4月1日,巴东县出现大范围连续降雨,降雨持续10小时,连续降雨量达111 mm,最大降雨强度48.7 mm/h(图3)。由暴雨产生的强烈坡面流对趋于饱和的土体施加冲刷作用,促进了残坡积物的泥化、软化,大大降低了表层土与基岩间的摩擦力。此外,斜坡上人类活动和植被稀少也是产生斜坡泥石流不可忽视的因素。

2.2 山坡型泥石流的启动机理

近年来,人们越来越重视山坡型泥石流的特征、

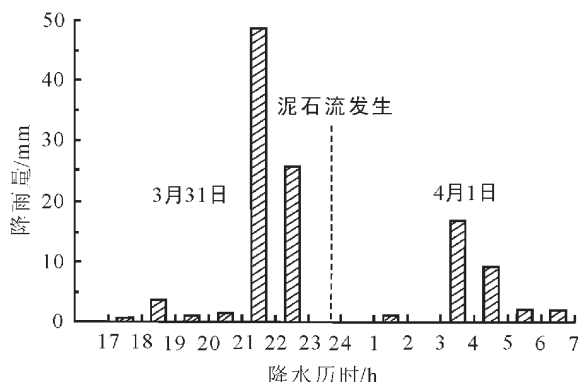


图3 巴东县3.31-4.1降雨量历时曲线

Fig. 3 Distribution of rainfall from 3.31 to 4.1 in Badong County

形成机理和危害方面的研究^[1-3],在许多地区山坡型泥石流的启动机理和判别成为人们十分关注的问题。下面以残坡积斜坡为例,阐述山坡型泥石流的启动机理。

实验表明,当土体含水量达到一定程度时,土体的抗剪强度随着含水量的增加而急剧降低^[4]。这说明,斜坡土体在暴雨激发下可以产生渗透液化,导致不可逆的剪切运动。假设斜面的坡度为 α ,重量为 G 的土体(图4),沿着斜面有切向分力(F)和法向分力(σ_n);在垂直应力下被土壤骨架支持的应力称为有效应力(σ),被孔隙水支持的应力称为孔隙压力(P_{we}),在忽略孔隙气体作用的条件下,总应力减去孔隙压力等于有效应力,即:

$$\sigma = \sigma_n - P_{we} \quad (1)$$

当土体含水量超过饱和含水量时,部分重力自由水留存于土中。暴雨来时,因排水不畅,应排出的水不能排出,而水又是不可压缩的,所以孔隙水必

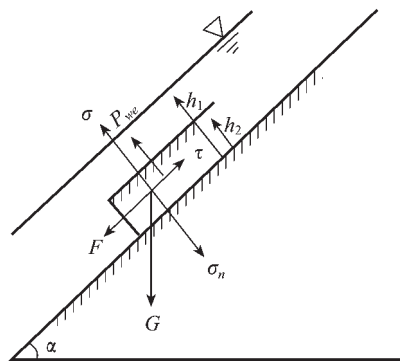


图4 斜坡土体重力和水动力作用示意图

Fig. 4. Schematic diagram of soil gravity and hydrodynamic processes on a slope

然承受由于孔隙度的减少而产生的挤压力。同时,原来疏松的颗粒,当大量水渗入后开始悬浮,以致于骨架压力转化为剩余孔隙压力。此时垂直于剪切面上的有效应力(σ)由于孔隙压力的增加而减小,当 $\delta_n = P_{we}$ 时,有效应力趋向于零,土体的抗剪强度接近最小值,土体在重力作用下开始失稳:

$$\tau = C + (\sigma_n - P_{we}) \tan \varphi \quad (2)$$

在特大暴雨时,来不及下渗的表面径流层形成盖层,盖层以下的孔隙水无法自由消散,产生的孔隙压力剧增,导致残坡积角砾土触变液化。积水盖层下孔隙水压力为:

$$P_{we} = (\gamma_s - \gamma_0) h_2 + \gamma_0 h_1 \quad (3)$$

式中 γ_s —土体容重 γ_0 —水的比重 h_2 —盖层下土层深度 h_1 —盖层上水层厚度。

将(3)式代入(2)式得:

$$\tau = C + [G \cos \alpha - (\gamma_s - \gamma_0) h_2 - \gamma_0 h_1] \tan \varphi \quad (4)$$

斜面上土体稳定性主要受土体的自重剪应力和抗剪强度的控制,如图4所示, $F = G \sin \alpha$, $\sigma_n = G \cos \alpha$, $\tau = C + G \cos \alpha \tan \varphi$,当土体处于极限平衡时, $F = \tau$,即:

$$G \sin \alpha = C + G \cos \alpha \tan \varphi \quad (5)$$

当重力 $G = [(\gamma_0 + C_v(\gamma_s - \gamma_0))g]$ 时,设 $C = 0$,简化公式(4)并代入(5)式,即可获得泥石流的临界抗剪强度或临界剪切流动坡度(α'):

$$\tan \alpha' = \frac{(\gamma_s - \gamma_0)(C_v \cdot g \cdot \cos \alpha - h_2) - \gamma_0(h_1 - g \cdot \cos \alpha)}{C_v(\gamma_s - \gamma_0)g \cdot \cos \alpha} \quad (6)$$

式(6)表明,斜坡土层的稳定状态主要受斜坡坡度、土层本身的性质和水动力条件等因素控制。一般地,当土体的容积含水量接近总孔隙度的持水量时所产生的抗剪强度最大,超过这一含水量值后,强度就下降,相应地剪切破坏就将开始。也就是说,当斜坡条件满足上式时,山坡型泥石流灾害就有可能产生,此时松散岩土体的抗剪强度接近于残余强度或更低。可见,在降雨条件下,对于某一特定的斜坡,降雨强度成为影响斜坡表层土体稳定的控制性因素。

2.3 暴雨山坡型泥石流的形成模式

上述暴雨斜坡泥石流的形成机理分析表明,暴雨山坡型泥石流是由于暴雨入渗、孔隙水压力升高而造成土体抗剪强度降低所致。随着孔隙水压力的进一步增加,基岩面附近局部土体出现剪胀,土体孔隙比增大,孔隙水压力降低,随着暴雨及地表径流的入渗,剪胀土体中的孔隙水压力恢复并增加,剪胀土体发生剪胀破坏,斜坡土体由剪胀破坏而出现张、剪

裂隙,并使土体中原有的垂直裂隙、孔穴等扩大、扩展。当入渗雨量足以使剪胀或剪胀破坏土体中孔隙水压力恢复时,斜坡土体继续变形。暴雨入渗使裂隙饱水,裂隙中的水分进一步向破坏土体快速入渗,土体剪胀破坏区扩展;随着土体应变的进一步增大,土体开始出现应变软化。在应变软化过程中,破坏土体中孔隙水压力增加,甚至部分土体出现液化现象,致使土体中剪应力集中并转移到相邻未破坏土体,使其所受剪应力增加并超过其抗剪强度而破坏。破坏的进一步扩展造成破坏面贯通,土体从源地滑出,在高陡斜坡形成的巨大势能和暴雨形成的地表径流作用下,饱水的滑动土体剧烈碰撞、剥离而解体,以碎屑流形式顺坡倾泻,产生的巨大冲击力直接冲毁斜坡中部的房屋,并造成人员伤亡。暴雨山坡型泥石流的形成过程可由图5概略表示。

3 山坡型泥石流预警指标探讨

3.1 短历时雨强指数预警

前已叙及,降水是激发泥石流活动的要素之

一。但是,大量研究表明,真正产生激发效应的并不是抽象概念的降水,而是短历时雨强,短历时雨强指数对泥石流活动有着重要的指示和判别意义^[5]。程尊兰等^[5]根据多个地区泥石流与短历时雨强关系的资料分析,获得了短历时雨强指数表达式:

$$H_a=H_{10}\cdot H_{60}+H_{24}\quad (7)$$

式中 H_a 为激发泥石流的短历时雨强指数 H_{10} 为激发泥石流的10分钟雨强 H_{60} 为激发泥石流的60分钟雨强 H_{24} 为激发泥石流的24小时雨强。

巴东县近10年来曾发生过多次山坡型泥石流灾害(表1),根据1991年、1998年和2003年山坡型泥石流短历时雨强计算的短历时雨强指数分别为:1807.2 997.5 865.9。这几次短历时雨强指数都在850以上。可以认为,当短历时雨强指数大于850时,巴东县境内与桐木园斜坡类似地质条件的顺向斜坡可能暴发山坡型泥石流(或土体滑坡)。

3.2 综合指数预警

在以往的统计分析中,我们经常会遇到这样的情况:降雨量足以形成泥石流,但却因固体物质不足

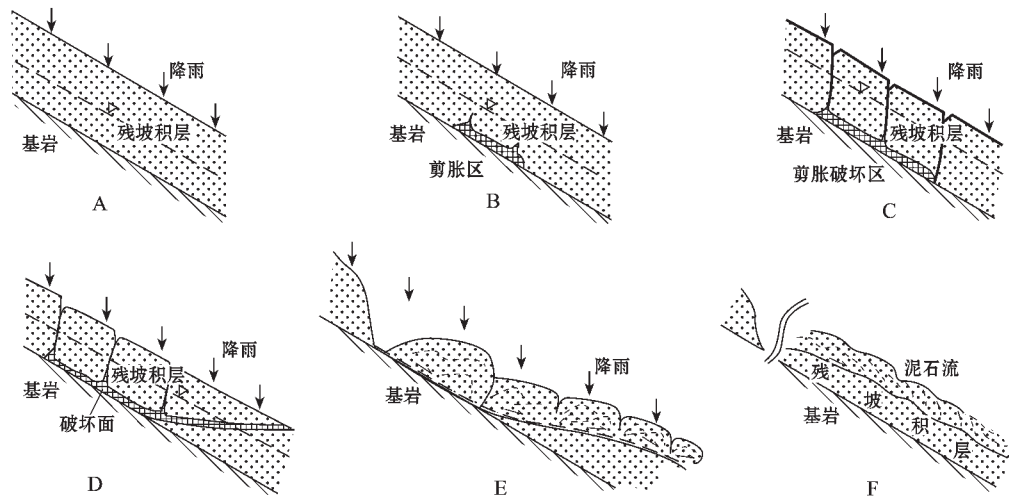


图5 暴雨山坡型泥石流的形成模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing the model of formation of slope rainstorm-induced debris flow
A—降雨入渗饱和 B—排水剪胀 C—剪胀破坏 D—破坏扩展贯通 E—滑动和解体 F—流动和堆积

表 1 巴东县相关年度泥石流的短历时雨强

Table 1 Intensities of short - time rainfall inducing debris flow in Badong County in related years

时段/min	10	60	1440	短历时雨强指数
1991 年 8 月 6 日	21.6mm	75.2mm	182.9mm	1807.2
1998 年 7 月 15 日	17.2mm	50.4mm	130.6mm	997.5
2003 年 3 月 31 日	15.5mm	48.7mm	111.0mm	865.9

而未暴发泥石流；一些地区在较少降雨的条件下引起了泥石流，而另一些地区虽然经受了较大的降雨过程，却未有泥石流的产生。可见，泥石流是多因素共同作用的结果。除短历时雨强外，还受到其他环境因素的制约。在斜坡暴雨泥石流的预报分析中，不考虑环境因素的降雨量单指标预测，常会造成激发泥石流的临界雨量值偏高。因此，应将泥石流与短历时雨强之间的关系修正为：

$$H_a=K \cdot (H_{10} \cdot H_{60}+H_{24}) \tag{8}$$

式中 H_a 为暴发泥石流的综合指数， K 为环境背景指数，其他符号同前。

环境背景指数(K)主要由泥石流活动性系数(K_1)、斜坡动力系数(K_2)和气候环境系数(K_3)等因素构成：

$$K=K_1+K_2+K_3 \tag{9}$$

泥石流活动性系数(K_1)主要指影响泥石流活动性的因素，包括斜坡结构、汇水条件和松散物质储量等，一般以泥石流活动强度表示。在国土资源部组织的国土资源调查中，三峡库区19个县市都已经开展了地质灾害综合调查和危险性区划工作，可以在此基础上考虑松散物质储量、斜坡结构和植被覆盖情况划分泥石流活动强度，从而确定泥石流活动系数的取值(表2)。桐木园斜坡由于为顺向坡、地表松散堆积层较厚，具有强活动性，故取值2.0。

斜坡动力系数(K_2)指泥石流活动的势能条件，主要包括山坡平均坡度和坡面斜长或相对高差等，也是山坡型泥石流活动的一个十分重要的因子。由于斜坡的坡面斜长或相对高差常与坡度具有一定的联系，故一般可按斜坡坡度确定动力系数取值(表3)。桐木园斜坡坡度总体为28°，故斜坡动力系数为0.9。

气候环境系数(K_3)主要指年降水量情况，一般按区域多年平均年降水量大小取值(表4)。一个地区的年降水量可以相对地反映该地区地表土体的天然含水量程度。巴东县自1990年以来，多年平均年降水量为1021.5 mm，故巴东县气候环境系数 $K_3=1.7$ 。

表 2 泥石流活动系数取值表

Table 2 Values of the coefficient of debris flow movement

活动强度	极强	强	中	弱	极弱
K_1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0

表 3 斜坡动力系数取值表

Table 3 Values of the slope dynamic coefficient

坡度/°	K_2	坡度/°	K_2
< 10	1.5	30 ~ 35	0.7
10 ~ 20	1.3	35 ~ 40	0.5
20 ~ 25	1.1	40 ~ 45	0.7
25 ~ 30	0.9	> 50	0.9

综合以上3方面因素，桐木园斜坡的环境背景指数为：

$$K=K_1+K_2+K_3=2.0+0.9+1.7=4.6$$

由此可知，桐木园斜坡暴雨山坡型泥石流的综合预警指数为：

$$H_a=K \cdot (H_{10} \cdot H_{60}+H_{24})=4.6 \times 850=3910$$

该值表示当短历时10 min、60 min、24 h的降水强度指数值与该斜坡环境背景指数值之乘积接近或大于4000时，可能激发山坡型泥石流。这一综合预警指数值可以推广至巴东县境内具有类似地质条件的斜坡。再推而广之，根据上述预报程式，在某地区山坡型泥石流预报时，可以假设该地区综合预警指数为一定值，即 H_a 的值不变，只要计算出某斜坡的环境背景指数值，就可以利用天气预报资料进行泥石流的预测，进而达到预警的目的。这种方法在理论和应用方面克服了单纯利用降雨指标预报的不足之处。

4 结 语

山坡型泥石流是发育在尚未形成明显沟谷的山体斜坡上的碎屑流，兼具滑坡和泥石流的某些特征，通常可以在几分钟至数小时内大量泥沙、石块倾泻

表 4 气候环境系数取值表

Table 4 Values of climate environmental coefficient

年降水量/mm	> 1300	1300	1250	1200	1150	1100	1050	1000	< 1000
K_3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

而下,顷刻之间给人类造成巨大灾难。从桐木园山坡型泥石流的特征和成灾机理可以看出,滑坡和泥石流虽然是2种不同的块体运动类型,但二者在许多情况下相伴而生,成为整个块体连续运动过程中的2个阶段,因而难以截然区分。

山坡型泥石流多属于堆积物一次性搬运,其防治应遵循“预防为主,治理为辅”的原则,在易发区应当开展科学的预警工作,这是减少山坡型泥石流灾害最有效的措施之一。需要说明的是,由于降雨资料较少,本文给出的泥石流预警判据还有待于进一步研究和在实践中逐步改进和完善。

参考文献:

- [1] 李树德. 滑坡型泥石流形成机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 519~522.
- [2] 王士革. 山坡型泥石流的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 45~50.
- [3] 戴福初, 李焯芬, 黄志全, 等. 火山岩残积土地区暴雨滑坡泥石流的形成机理[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 147~153.
- [4] 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.
- [5] 程尊兰, 朱平一, 刘雷激. 泥石流活动与雨强的关系[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(1): 118~120.

Formation mechanism of debris flow on the Tongmuyuan slope and its early warning index—A case study of the hard rain process on March 31, 2003 in Badong County, Hubei Province

ZHANG Yongshuang¹, WU Shuren¹, ZHAO Yue¹

HE Feng¹, SHI Jusong¹, LUO Juying²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Badong Meteorological Bureau of Hubei Province, Badong 444300, Hubei, China)

Abstract: Several slope geohazards induced by continuous rainstorm occurred in Badong County on March 31, 2003, which resulted in destruction of many houses and casualties. On the basis of field investigation, the authors believe that the severe hazard mass on the Tongmuyuan slope belongs to a typical slope-type debris flow, i.e. the debris flow on slope. Its deformation characteristics and corresponding formation mechanisms are analyzed and the critical rain threshold value and early warning indices for predicting the rapid deformation of loose rock-soil masses on the shallow slope surface are discussed.

Key words: debris flow on slopes; hazard formation mechanism; rain intensity; early warning