

文章编号: 1008-2786-(2015)1-108-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000015

## 四川德昌茨达“8·24”群发性滑坡型 泥石流之地形条件

朱云波 余斌 王治兵 马敏 亓星 朱渊

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059)

**摘 要:** 2004-08-24, 四川省德昌县茨达乡暴发了群发性滑坡型泥石流, 给当地居民生活和生产造成了严重的损失。此次群发性泥石流范围较小, 地质和水文条件比较接近, 由此认为地形条件是控制泥石流发育的关键因素。在分析地形条件对滑坡型泥石流形成的影响基础上, 从其形成机理出发, 选取研究区各沟谷流域面积  $A$ , 沟床比降  $J$ , 沟谷两侧斜坡  $25^\circ \sim 45^\circ$  坡度所占百分比  $S$  等 3 个重要地形因子进行研究, 对比相互关系, 建立起此次泥石流暴发的临界曲线和综合地形因子  $G$ ,  $G = S \times (A/A_0)^{0.15} \times J^{0.8}$ , 得出在地质和降雨条件都相近的情况下, 地形因子  $G$  越大, 地形条件越好, 越容易暴发泥石流。因此可用  $G$  因子划分区域内沟谷泥石流的易发等级, 并为滑坡型泥石流的危险性评价和预警预报提供了新的研究思路。

**关键词:** 泥石流; 地形条件; 山坡坡度; 流域面积; 沟床比降; 地形因子

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

我国的西南山区是泥石流危害的重灾区, 泥石流常由局地暴雨所引发, 已成为经济建设的一大阻碍<sup>[1]</sup>。滑坡型泥石流便是其中较为常见的一种类型, 此类泥石流具有预测难、治理难的特点, 往往给人类造成较大的灾难。一般暴雨引发的泥石流很多都与滑坡息息相关<sup>[2]</sup>, 有的泥石流暴发时间距离滑坡发生的时间较久远, 但也有的泥石流暴发是紧随滑坡的发生, 如 1974-09-14 四川省南江县白梅垭由于连续暴雨引发滑坡并转化为泥石流<sup>[3]</sup>, 1999-06-22 四川省普格县标水岩沟暴发的大规模泥石流也是由于较大面积滑坡所致<sup>[4]</sup>, 前人对上述滑坡泥石流作了详细调查研究。

暴雨诱发的多沟群发性滑坡型泥石流是此类灾害的极端型式, 由于多沟并发以及灾害面广, 其造成的危害程度容易叠加并带来更大的灾难。如 1999-12-16 南美洲的委内瑞拉 VAGARS 州 21 条沟同时暴发泥石流, 摧毁城镇, 造成 1.5 万人死亡和 250

亿美元的经济损失<sup>[5]</sup>。2010-08-07 甘肃舟曲县城后山的罗家峪、三眼峪同时暴发泥石流, 导致舟曲县城 1 435 人遇难, 331 人失踪, 直接经济损失 6.5 亿元<sup>[6]</sup>。此两次群发性泥石流中, 滑坡均为主要松散固体物源。

四川省德昌县是泥石流高发地区, 近年来发生多起群发性泥石流事件<sup>[7]</sup>。2004-08-24T3:00, 暴雨引发宽裕乡凉锋沟等 10 条沟谷暴发沟床起动型泥石流, 致使 7 人死亡, 10 人失踪; 同日早上 7 时, 茨达乡境内陈家沟、春颠湾沟、马家沟、垮土湾沟、麻湾沟及其一级支沟共 10 条沟谷暴发滑坡型泥石流(图 1), 造成 3 人死亡、多户房屋被毁和大量耕田被淤埋。相比德昌县其他乡镇的泥石流沟, 茨达乡这 10 条沟泥石流属于滑坡诱发。

茨达乡和平村茨达河两岸近 50 km<sup>2</sup> 的范围内共分布有 22 条沟谷泥石流, 包括陈家沟等 10 条暴发泥石流的流域和 12 条未暴发泥石流的流域, 在此

收稿日期(Received date): 2014-03-03; 改回日期(Accepted): 2014-06-05。

基金项目(Foundation item): 中国地质调查局项目(编号: 12120113010100)。[China Geological Survey Found (No. 12120113010100).]

作者简介(Biography): 朱云波(1988-), 男(汉族), 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治及相关工作。[Zhu Yunbo(1988-), male, Han nationality, born in Meishan of Sichuan, graduated student, Undertaking research on geological disasters.] E-mail: 842926020@qq.com

相对较小的区域内,地震活动和降雨条件等对泥石流的影响可认为大致相当,地质条件也近似相同。地质、地形和降雨是泥石流形成的三大基本条件,当地质和降雨条件近乎一致的情况下,地形条件便成为控制泥石流爆发的关键因素<sup>[8]</sup>。

本文选取茨达乡作为研究区,将沟谷细化到一级支沟,并以此统计并着重分析地形条件对滑坡型泥石流发育的影响,提取流域面积 $A$ 、沟床比降 $J$ ,各沟有利山坡坡度所占比例 $S$ 等3个关键参数进行研究,得到一个综合的地形因子 $G$ ,从而使抽象的地形条件得以量化,有利于对比研究,并且在相同的岩性等地质条件和降雨条件下,可以由 $G$ 因子判断滑坡型泥石流的易发程度,对后期此类泥石流的危险性评价、防灾减灾以及预警预报工作具有重要意义。

## 1 滑坡型泥石流特征

### 1.1 研究区概况

德昌位于西昌的南面,研究区位于德昌西南部茨达乡和平村境内茨达河两岸(图1),面积48.6 km<sup>2</sup>。德昌属于亚热带季风气候区,夏季,受来自孟加拉湾、印度洋西南暖湿季风和副热带西太平洋高压系统的加压、西伸、北进影响,阴雨连绵,日照少,空气潮湿,降雨量显著增多,多年平均降雨量1 047.4 mm,以6—9月的降水日数最多,均在20 d/月以上,集中了全年降水量的90%,且夜间降水量明显多于白天。茨达乡又为德昌县的多雨区,年平均温度15.5°,多年平均降雨量最高达1 400 mm,加之境内高山耸峙(1 520~2 983 m),沟谷众多,属于

泥石流高发地区<sup>[9-10]</sup>。

研究区位于扬子准地台内的凉山隆褶带,属于康滇古陆攀西裂谷系的中段。由于构造运动影响,断裂发育,断层主要以S-N向为主。新构造运动时期,区内上升作用表现明显,导致河谷深切,岩体裂隙十分发育,阶地较狭窄,并以基座阶地为主<sup>[11]</sup>。区内出露元古代和古生代地层,岩性主要为石英正长岩和辉长岩。

### 1.2 形成过程

2004-08-23—25,德昌县境内出现强降雨,县城所在地德州镇为大雨,宽裕、茨达两乡为暴雨。其中8月22日20时至23日8时茨达乡、宽裕乡的降雨量分别达到100.2 mm和76.8 mm;8月23日20时至24日8时茨达、宽裕乡的降雨量分别为73.6 mm和84.1 mm,宽裕一带降雨主要集中在凌晨2—3时<sup>[7]</sup>,茨达一带降雨主要集中于凌晨5—6时。此段时间,局地暴雨中心的位置由宽裕向茨达一带转移。根据实地调查,宽裕乡境内8月24日3时左右10条沟暴发群发性沟床起动型泥石流,茨达乡境内马家沟、垮土湾沟、麻湾沟、陈家沟、春颠湾沟及其一级支沟共10条沟谷于8月24日7时(简称“8·24”)左右暴发群发性滑坡型泥石流(表1)。茨达乡泥石流灾害的发生时段相对宽裕乡泥石流灾害约有4 h滞后,且茨达乡此次泥石流最终的暴发时间相对于茨达暴雨的峰值过程也有1 h的滞后。

从泥石流形成的降雨条件来看,局地暴雨是直接的激发因素。对于滑坡型泥石流来说,滑坡的发生与当天降雨和前期降雨有密切关系,在时间上相对降雨过程也有明显的滞后性<sup>[12]</sup>,因此此类泥石流的发生会有较明显的滞后。8月22日夜间的暴雨为茨达乡群发性滑坡型泥石流的发生提供了大量的前期降雨。23日夜间接至24日凌晨再次出现降雨,暴雨中心正好位于宽裕乡一带,随后降雨中心逐渐南下,向茨达转移,降雨强度也逐渐降低。随着降雨的累积,雨水不断渗透进入土体,使茨达乡境内陈家沟等10条沟谷流域内岸坡松散土体孔隙水压力增大,土体内摩擦角和内聚力大大降低,加之山洪不断掏蚀沟谷坡角使斜坡稳定性遭到破坏,于凌晨7时左右形成滑坡型泥石流。

### 1.3 形成机制

对于滑坡型泥石流的形成机理,前人已进行大量的研究工作,主要集中于研究滑坡直接转化为泥石流。李树德<sup>[13]</sup>对滑坡型泥石流的分类、临界结构

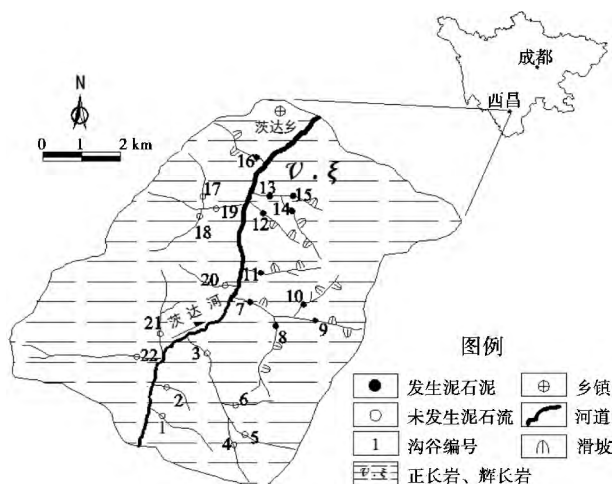


图1 研究区图

Fig. 1 Drainage map of study area

等进行了分析和阐述;胡明鉴<sup>[14]</sup>通过室内人工降雨滑坡型泥石流试验,揭示了滑坡转化为泥石流的过程;胡卸文<sup>[15]</sup>对蒋家沟滑坡泥石流转化机理进行了详细研究;F. C. Dai<sup>[16]</sup>提出,滑坡型泥石流形成的首要原因是滑坡土体剪胀造成的黏土力破坏和应变软化效应。在许多情况下,滑坡与泥石流相伴而生,滑坡型泥石流兼具滑坡和泥石流的特征,它包含两个连续阶段的不同过程(先滑坡,后泥石流)<sup>[13]</sup>;J. G. Emmanuel<sup>[17]</sup>等人认为,滑坡转化为泥石流的关键在于不排水效应使滑坡在剪切过程中形成不排水环境,土体剪缩而引起孔隙水压力变大,产生超孔隙水压力从而使滑体液化形成泥石流。

综合国内外研究,滑坡型泥石流形成机理过程可大致概括为:1. 持续降雨的入渗作用导致土体逐渐饱和并软化,基质吸力和抗减强度逐渐减小,土体

局部出现剪切破坏并产生剪切裂隙,雨水不断渗入裂隙使其饱水,孔隙水压力增大形成超孔隙水压力,剪切裂隙逐渐扩展连通形成剪切面,土体强度进一步降低,最终至局部岩土体因剪切面抗剪强度低于剪应力而沿滑动带下滑;2. 在自身重力和水的作用下,下滑岩土体沿途铲刮、碰撞、剥离解体形成泥石流或下滑进入主沟道遇水再形成泥石流,因此,滑坡型泥石流包括狭义的坡面型泥石流和滑坡滑入沟床后形成泥石流<sup>[13]</sup>。

滑坡演变为泥石流的主要方式有:1. 当滑坡直接形成泥石流进入沟床后,若遇充足的水源和较大的沟床比降等有利地形,流体继续顺沟向下游冲刷铲刮,不断卷入新的物质进而扩大泥石流规模并导致整个沟谷形成泥石流;2. 当滑坡体下滑堆积于沟道,若降雨持续补给,流域内迅速汇流后经较大纵坡

表 1 研究区泥石流情况统计  
Table1 Statistics about debris flow in study area

编号 Numbers	沟名 Gully name	地层岩性 Lithology	是否发生 Whether there	形成机理 Formation mechanism	形成因子 Formation factor <i>G</i>	<i>S</i>	<i>A</i> /( km <sup>2</sup> )	<i>J</i>
1	1 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.149	0.41	0.59	0.312
2	2 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.189	0.51	0.35	0.352
3	3 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.135	0.33	3.74	0.255
4	4 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.202	0.46	1.32	0.339
5	5 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.189	0.37	1.18	0.419
6	6 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.197	0.49	0.42	0.377
7	陈家沟	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.338	0.61	7.85	0.325
8	陈家沟-1	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.313	0.58	2.90	0.379
9	陈家沟-2	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.385	0.73	1.21	0.434
10	陈家沟-3	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.232	0.48	1.36	0.381
11	麻湾沟	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.317	0.70	0.58	0.411
12	垮土湾沟	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.289	0.57	0.51	0.484
13	马家沟	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.236	0.51	1.74	0.345
14	马家沟-1	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.261	0.52	0.88	0.433
15	马家沟-2	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.230	0.54	0.54	0.386
16	春颠湾沟	<i>V</i> ξ	发生	滑坡起动型	0.243	0.63	0.95	0.306
17	17 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.177	0.41	0.71	0.374
18	18 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.139	0.36	0.45	0.353
19	19 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.154	0.35	6.95	0.250
20	20 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.171	0.43	0.84	0.327
21	21 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.151	0.42	1.27	0.265
22	22 号沟	<i>V</i> ξ	未发生	滑坡起动型	0.129	0.34	4.64	0.224

注: *V* ξ: 正长岩、辉长岩

的沟道急泻而下形成水动力充足的高含沙山洪,洪水起动松散滑坡堆积体向下游搬运,沿途不断搅拌混合形成泥石流。余斌<sup>[18]</sup>等人对沟床起动型泥石流的地形特征进行了研究,对于滑坡型泥石流,地形条件对其的影响规律目前尚无定量化的结论,这正是本文的重点研究内容。

由于研究区范围小,岩性、土层等地质状况总体较为单一,降雨条件也可认为大致相同。当形成泥石流的三大条件(即地质、降水和地形)中的地质和降水2个条件相近似时,决定泥石流暴发与否的主要因素就只有地形条件。因此可以单独研究地形条件对此类泥石流的影响。

## 2 地形对滑坡型泥石流发育的影响

### 2.1 地形因子的对比与选取

泥石流发育的地形条件通常与流域面积、山坡坡度、沟道长度、相对高度、沟床比降和沟谷发育程度等有关。流域面积的大小,大体能反应出泥石流发育的阶段,也是评判泥石流活动强度的一个标志<sup>[19]</sup>。一般来说,泥石流多数形成于流域面积较小的沟谷内,较小的集水区面积易于泥石流的形成与活动<sup>[19]</sup>;山坡坡度的陡缓不仅影响松散碎屑物质的聚集和分布,而且影响坡面汇流条件,泥石流发育的山地,山坡坡度一般较陡;沟床比降是泥石流物质由势能转化为动能的底床条件,它的大小同时影响着沟道汇流和径流冲刷能量的大小,是影响泥石流形成和运动的重要因素<sup>[20]</sup>;相对高度决定着泥石流的势能大小<sup>[22]</sup>,高差越大,泥石流动力条件就越足;沟道长度对泥石流的运动起着制约作用,较长则不易于泥石流的输送。

地形参数不仅对泥石流的形成发挥着重要作用,而且相互之间也有一定关联性。通常面积较小的流域,沟谷正处于地貌发育的初级或旺盛阶段,沟道长度较短,但流水侵蚀作用强烈,地形陡峻,沟床比降和山坡坡度均较大;较大的山坡坡度为松散碎屑物质向沟内汇集提供了良好的条件;而沟床比降大则使聚集在沟道内的固体物质更易在暴雨径流的作用下形成泥石流。随着流域面积的增加,沟谷发育越渐成熟,沟床比降和相对切割程度也随之降低,沟道长度的增加使固体物质的搬运距离增大,这些变化均不利于泥石流的发生,其泥石流的活动将逐渐衰退甚至趋于停止。因此在一定范围内,较小的

流域面积比较有利于泥石流的形成。根据李丽等人研究<sup>[21]</sup>,流域沟床比降和发育程度均与流域面积存在线性相关性,变化趋势一致。而且流域面积越大,泥石流形成区面积占流域总面积的比例就越小,形成区是泥石流形成所需松散固体物质的主要来源区。流域面积越大,流域内主要物源补给区所占比例就越小,在流域面积较大的沟谷内,松散固体物质的补给也往往较为集中,加之一次补给量有限,在水源丰富的情况下,即使在支沟或中上游某区段形成泥石流,也可能被稀释转化成洪水<sup>[22]</sup>。由此,流域面积的大小在泥石流的形成和发展中具有重要作用。

由上可知,流域面积和沟床比降是极其重要的地形参数,对于滑坡型泥石流来说,流域面积的大小同时还直接影响流域内水动力条件和滑坡总物源量的大小,而沟床比降的计算包含沟道长度、相对高度两个参数,在一定程度上囊括出了沟床比降与它们的关系,也能在一定程度上反映二者对泥石流的影响。由于本研究区泥石流属滑坡诱发所致,而在地质和降雨条件大致相同的情况下,影响滑坡发生的另一个重要的地形因素是山坡坡度。王士革<sup>[23]</sup>认为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 是滑坡发育最有利坡度;朱渊等提出 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 是最有利于滑坡发生的坡度<sup>[24]</sup>;钟敦伦<sup>[25]</sup>等研究得出:96%以上的滑坡坡度位于 $27^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 山坡;李丽<sup>[21]</sup>等研究认为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 是浅层滑坡最为发育的坡度。但不同地区具体条件不同,应略有差异,尤其土质状况的不同会使坡度范围有细微区别,我们折中选取 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 坡度范围进行研究。经调查统计研究区内的坡度分级,并对比滑坡型泥石流的发生, $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 是研究区沟谷山坡所占比例最高也是最有利于滑坡发育的坡度范围。

因此从抓住关键因素和便于进行统计分析以使抽象的地形条件量化处理的角度,仅选用沟谷的流域面积、沟床比降、流域内 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 坡度所占比例3个地形要素作为研究因子,以期对所有参数进行概括简化,突出重点,方便比较。

### 2.2 引入无量纲因子计算

流域面积相对较大的沟谷通常发育有多条支沟,各支沟地形特点的不同会导致泥石流暴发情况的不同,本文研究对象精确到泥石流沟的一级支沟。利用 Arcgis 软件对各流域山坡坡度进行统计,得到对应流域 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 坡度所占比例 $S$ (无量纲因子),同时将流域面积除以单位面积以转化为无量纲因子

$A^*$  公式如下

$$A^* = A/A_0 \quad (1)$$

式中  $A^*$ : 流域面积(无量纲);  $A$ : 流域面积( $\text{km}^2$ );  $A_0$ : 单位面积( $\text{km}^2$ )。

流域的沟床比降  $J$  是沟道相对高度  $H$  与其长度  $L$  的比值。沟床比降越大,越有利于松散固体物质的起动,反之则不利于泥石流的形成。

首先提取出影响滑坡型泥石流比较重要的两个相关因子  $S$  和  $A^*$ ,以研究区 22 条沟谷作为对象,统计分析  $S$  与  $A^*$  的关系趋势如图 2。

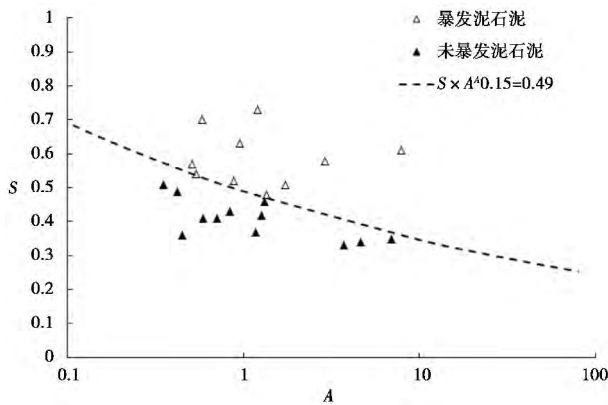


图 2 研究区各沟谷  $S-A$  图

Fig. 2  $S-A$  diagram of gully

$S$  随  $A$  有明显的变化,且趋势线  $S \times (A/A_0)^{0.15} = 0.49$  也大致能将泥石流和非泥石流沟区分开。如果将  $S$  和  $A$  结合起来用一个地形参数  $T$  表示,  $T = S \times (A/A_0)^{0.15}$ , 则  $T$  也为无量纲因子。现将  $T$  因子和  $J$  因子进行对比分析(图 3)。

通过  $T$  与  $S$  的关系对比,拟合出临界曲线( $A/A_0$ ) $^{0.15} S \times J^{0.8} = 0.21$ 。曲线下为 1#~6# 和 17#~

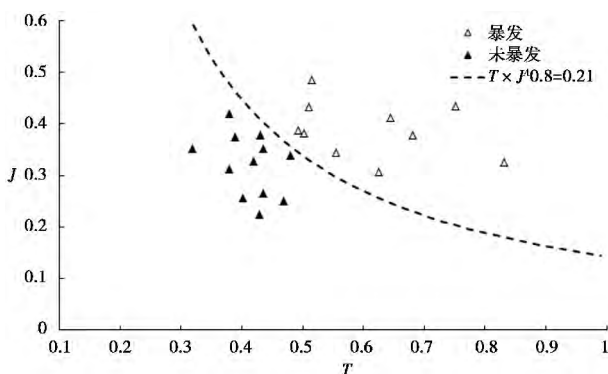


图 3 研究区各沟谷  $J-T$  图

Fig. 3  $J-T$  diagram of gully

22# 沟,即未暴发泥石流沟,曲线上方为陈家沟、垮土湾沟、麻湾沟、春颠湾沟及其各支沟,即暴发泥石流的沟谷区分开,但此公式仅由此研究区各沟谷地形因子分析得出,对不同地质和降雨条件下的适用范围需进一步研究。

通过分析关系图趋势变化,得到一个新的地形无量纲因子  $G$ 。

$$G = T \times J = S(A/A_0)^{0.15} \times J^{0.8} \quad (2)$$

式中  $G$ : 综合地形因子;  $T$ : 地形因子;  $S$ : 坡度因子;  $A$ : 流域面积( $\text{km}^2$ );  $A_0$ : 单位面积( $\text{km}^2$ );  $J$ : 沟床纵比降。

地形因子  $T$  较好地反映出坡度因子随流域面积的变化趋势,由  $T$  因子和沟床纵比降  $J$  得到的综合地形因子  $G$ ,不仅能够表示出沟谷内有利于滑坡发生的坡度特征,还能反映出其与流域面积和沟床比降之间的关系。因此,  $G$  因子能够较好地概括出滑坡型泥石流沟谷的地形条件,是评价泥石流沟地形条件的综合量化因子,且  $G$  因子表达式中各因子指数的大小关系为坡度 > 纵比降 > 流域面积,表明 3 者在滑坡型泥石流形成之地形条件中的重要程度。

研究区内岩性以石英正长岩、辉长岩为主;地质、气候水文条件可认为近似相同。从表 1 与图 3 可看出,陈家沟、陈家沟-1、陈家沟-2、麻湾沟的  $G$  值明显大于其他各沟,说明其孕育着更好的形成泥石流的地形条件,因此暴发频更高,这与野外调查结果基本一致(表 2)。由此可得出在地质和降雨条件都近似的情况下,沟谷  $G$  因子越大,越容易暴发滑坡型泥石流。

同时,根据地形因子  $G$  对滑坡型泥石流暴发的影响(对于非滑坡型泥石流而言,如沟床起动型泥石流,由于成因机理不同,在地形因素上更强调沟谷形状系数等参数的作用,余斌等人对此已有相应研究<sup>[18]</sup>)以及泥石流的实际暴发情况,可将该区域的泥石流沟划分为 3 部分(图 4),即当  $G > 0.3$  时,为极容易暴发泥石流的沟;当  $G$  值介于  $0.21 \sim 0.3$  时,为较容易暴发泥石流的沟;当  $G < 0.22$  时,为不容易暴发泥石流的沟,即在“8·24”未暴发泥石流的沟。在暴发泥石流较容易的沟谷中,对陈家沟-3 的判断稍有偏差,这可能是只考虑了沟谷地形因素而没有考虑其他诸如人为因素等的影响的原因,但总体来说  $G$  因子的判别效果较理想。通过对研究区沟谷泥石流易发程度的划分,可以有针对性的对其进行重点防治。

表 2 研究区泥石流沟地形参数及暴发情况统计

Table 2 The topography parameters and outbreak frequency statistics on gully debris flow in study area

泥石流沟名称	流域面积 Basin area	坡度比例	$J$	$T$	$G$ 值	泥石流暴发情况
Gully name	$A/(\text{km}^2)$	Slope proportion( $S$ )			$G$ Value	Debris flow events
陈家沟	7.85	0.61	0.325	0.769	0.338	2004 年和 2005 年均暴发, 一年内暴发 2~3 次
陈家沟-1	2.9	0.58	0.379	0.691	0.313	2004 年暴发 1 次 2005 年暴发 3~4 次
陈家沟-2	1.21	0.73	0.434	0.629	0.385	2004 年暴发 1 次 2005 年暴发 3~4 次
陈家沟-3	1.36	0.48	0.381	0.769	0.232	2004 年暴发 2005 年暴发 2~3 次
麻湾沟	0.58	0.70	0.411	0.526	0.317	2004 年暴发 1 次 2005 年暴发 3 次
垮土湾沟	0.51	0.57	0.484	0.565	0.289	2004 年暴发 1 次
春颠湾沟	0.95	0.63	0.306	0.487	0.243	2004 年暴发 1 次
马家沟	1.74	0.51	0.345	0.589	0.236	2004 年暴发 1 次
马家沟-1	0.88	0.52	0.433	0.590	0.261	2004 年暴发 1 次
马家沟-2	0.54	0.54	0.386	0.499	0.230	2004 年暴发 1 次

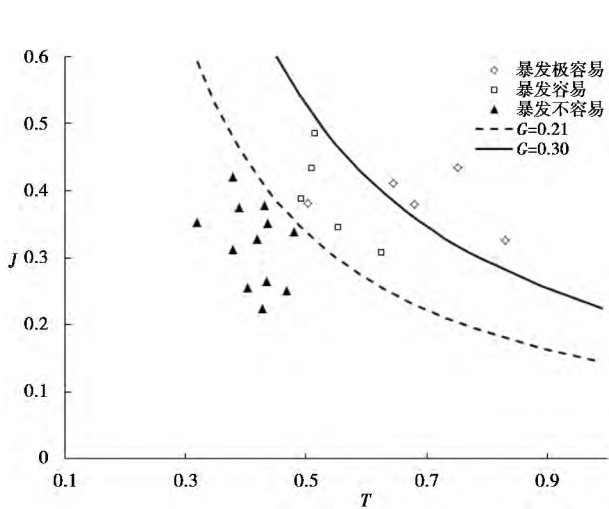


图 4 研究区泥石流沟暴发频率划分

Fig. 4 Outbreak frequency division on gully debris flow in study area

3 结论

1. 德昌“8·24”茨达群发性泥石流暴发时间比宽裕群发泥石流有 4 h 滞后, 且相对其区域降雨峰值时间也滞后 1 h。本次群发性泥石流激发因素主要为较大的前期累积雨量, 验证了滑坡的发生需要足够前期雨量的入渗, 进而导致后期的泥石流发生的认识。
2. 研究区内马家沟、垮土湾沟、麻湾沟、陈家沟、春颠湾沟 5 条沟谷均暴发了滑坡型泥石流, 研究发现: 沟谷内最有利于浅层滑坡发育的山坡坡度集中在 25°~45°。

3. 针对本文所研究的发生滑坡型泥石流的沟谷所有地形参数而言, 流域面积  $A$ 、沟床比降  $J$ 、山坡坡度中 25°~45°所占比例  $S$  等 3 个因子更为重要, 由它们所综合得到的  $G$  因子能够更好地反应出此类滑坡型泥石流的地形条件,  $G = SA^{0.15} \times J^{0.8}$ , 且  $G$  因子越大, 表明地形条件越好, 越容易暴发泥石流。
4. 滑坡型泥石流各地形因素重要性关系为: 山坡坡度 > 沟床纵比降 > 流域面积, 且山坡坡度和沟床纵比降的作用远大于流域面积的作用。

参考文献(References)

[1] Xie Hong, Zhong Dunlun, Wei Fangqiang, et al. Debris flow hazards and their formation causes in mountain urban area of China [J]. Mountain Research 2006 24( 1): 79 - 87 [谢洪, 钟敦伦, 韦方强, 等. 我国山区城镇泥石流灾害及其成因 [J]. 山地学报, 2006 24 (1): 79 - 87]

[2] Tan Wanpei, Wang Chenghua. Zonal Forecast of Rainfall-induced debris flow and landslide [J]. Chengdu: Sichuan Sciences and Technique Press, 1994. [谭万沛, 王成华. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.]

[3] Li Tianchi, Zhang Shucheng, Kang Zhicheng. Sliding debris flow [G] // Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences ( No. 4). Beijing: Sciences Press, 1984: 171 - 177 [李天池, 章书成, 康志成. 滑坡型泥石流 [G] // 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊( 第四号). 北京: 科学出版社, 1984: 171 - 177]

[4] Xie Hong, Wang Chenghua, Lin Lixiang. Landslide-induced debris flow disaster and its characteristics in Biaoshuiyan Gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2000, 11( 3): 20 - 27 [谢洪, 王成华, 林立相. 标水岩沟滑坡型泥石流灾害及特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11( 3): 20 - 27]

- [5] Lopez JL, Perez D, Garcia R. Hydrologic and geomorphologic evaluation of the 1999 Debris flow event in Venezuela [G]//3rd International Conference on Debris-flow Hazards, Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Davos, Switzerland, Sept. 13 - 15, 2003.
- [6] Yu Bin, Yang Yonghong, Su Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu country, Gansu province on August 7 2010 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 437 - 444 [余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃舟曲 8.7 特大泥石流调查研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 437 - 444]
- [7] Su Pengcheng, Wei Fangqian, Gu Linkang, et al. Characteristic and Causes of Group-occurring Debris Flow in Dechang County, Sichuan Province [J]. Mountain Research, 2010, 28(5): 593 - 606 [苏鹏程, 韦方强, 顾林康, 等. 四川省德昌县群发性泥石流的特征和成因 [J]. 山地学报, 2010, 28(5): 593 - 606]
- [8] Yu B, Li L, Ma Y, et al. Research on topographical factors in the formation of gully type debris flows [G]//River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM2011. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 1 - 10
- [9] Liu Xilin, Zhao Yuan, Liu Xiuzhen, et al. Disaster risk assessment of typical debris flows in Dechang County of Sichuan [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(1): 11 - 16 [刘希林, 赵源, 刘秀珍, 等. 四川省德昌县典型泥石流灾害风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 11 - 16]
- [10] The Editorial Commission of Dechang Country Local Annals. Dechang Country annals [M]. Chengdu: Sichuan People Publishing House, 1998. [德昌县地方志编纂委员会. 德昌县志 [M]. 成都: 四川人民出版社, 1998.]
- [11] Liu Xilin, Ni Huayong, Su Pengcheng. Characteristics of debris flow disaster in Liangfeng Gully of Dechang County, Sichuan and the Countermeasures [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 68 - 72 [刘希林, 倪化勇, 苏鹏程. 四川德昌县凉风沟泥石流灾害特征及防治对策 [J]. 灾害学, 2005, 20(3): 68 - 72]
- [12] Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Zhang Yuxing. Research on the relationship between landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 82 - 85 [张玉成, 杨光华, 张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究 [J]. 灾害学, 2007, 22(1): 82 - 85]
- [13] Li Shude. Formation mechanism of the landslide-type debris flow [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 519 - 522 [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]
- [14] Hu Mingjian, Wang Ren. Testing study on the correlation among landslide debris flow and rainfall in Jiangjia valley [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 824 - 828 [胡明鉴, 汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 824 - 828]
- [15] Hu Xiewen. Loose material type and its supplementary to debris flow in Jiangjia valley ravine basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28( Suppl. 1): 166 - 169 [胡卸文. 蒋家沟流域松散物源类型及其与泥石流的转化机理 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28( 增刊 1): 166 - 169]
- [16] Dai F C, Lee C F, Wang S J. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong [J]. Engineering Geology, 1999, 51(3): 279 - 290
- [17] Emmanuel J G, Simon M M. The mobilization of debris flows from shallow landslides [J]. Geomorphology, 2006, 74(2): 207 - 218
- [18] Yu B, Li L, Wu Y, Chu S. A formation model for debris flows in the Chenyulan River Watershed, Taiwan [J]. Natural Hazards, 2013, 68: 745 - 762
- [19] Tan Wanpei. Study on the debris flows forecast and its divisions formed by disasters rainstorm in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(2): 48 - 53 [谭万沛. 中国灾害暴雨泥石流预报分区研究 [J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 48 - 53]
- [20] Lun Guoxing, Zhou Bin. Impact of landform to debris flow disasters in Lanzhou [J]. Gansu Geology, 2011, 20(4): 65 - 70 [伦国星, 周斌. 地形地貌条件对兰州市泥石流灾害形成影响分析 [J]. 甘肃地质, 2011, 20(4): 65 - 70]
- [21] Li Li. The Topographic factor study on the group of gully-shaped debris flow in strong earthquake. [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. [李丽. 强震区群发性沟谷型泥石流地形因子研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.]
- [22] Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences. Research and Prevention of Debris Flow [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2000. 249 - 251 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2000: 249 - 251]
- [23] Wang Shige. Hazard of debris flow on slope and its control [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(3): 45 - 48 [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 - 48]
- [24] Zhu Yuan, Yu Bin, Chen Yuanjing, et al. The "6 · 06" Disaster characteristics and forming mechanism of debris flow in Wangmo, Guizhou [J]. Mountain Research, 2012, 30(5): 599 - 606 [朱渊, 余斌, 陈源井, 等. 贵州望谟打蒿沟 "6 · 06" 泥石流特征 [J]. 山地学报, 2012, 30(5): 599 - 606]
- [25] Zhong Dunlun, Xie Hong, Cheng Zunlan, et al. A comprehensive prevention study on mountain disasters in low mountains and hills area in Xiuyan Man Autonomous County [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1993: 59 [钟敦伦, 谢洪, 程尊兰, 等. 低山丘陵区(岫岩满族自治县) 山地灾害综合防治研究 [M]. 成都: 四川科技出版社, 1993: 59]

## Topographic Research of Group-Occurring Landslide-induced Debris Flow in Dechang ,Sichuan

ZHU Yunbo ,YU Bin ,WANG Zhibing ,Ma Min ,QI Xing ,Zhu Yuan

( State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection ,Chengdu University of Technology ,Chengdu 610059 ,China)

**Abstract:** A group debris flows by landslides were triggered on August 24 , 2004 in Cida , Dechang County ,Si-chuan ,China. The geological and rainfall conditions are roughly the same in the study area because the catchment size is less than 50 km<sup>2</sup>. The only factor of determination of triggering debris flow must be topographical factor. The basin area  $A$  ,channel gradient  $J$  ,and the percentage ( $S$ ) of catchment area with hill slope of 25° ~ 45° are selected as the topographical parameters. A new factor  $G = SJ^{0.8} (A/A_0)^{0.15}$  ( $A_0$  is unit area = 1 km<sup>2</sup>) is proposed as a single topographical indicator ,which may be used as a threshold for the formation of gully type debris flows by landslides. The probability of debris flow formation increases with increasing  $G$  – values. The role of slope is far more important than the role of area of catchment ,and the channel gradient. With the topographical factor  $G$  ,one can divide the risk grade of gully debris flow by landslides. It may be used for other areas with the geological factor and rainfall factor because the relationship is partly from the formation mechanism of gully type debris flow by landslides.

**Key words:** debris flow; topographical conditions; hill slope; basin area; channel gradient; topographic factor

### 封面照片: 克柳切夫火山

克柳切夫火山( 英文名 klyuchevskoy ,Kliuchevskoi 或 klyuchevskaya) 位于俄罗斯远东地区的勘察加半岛中东部 ,北纬 56.057° ,东经 160.638° ,主火山最高海拔 4 835 m ,是勘察加半岛最高的火山。整个克柳切夫火山群形成于大约 30 万年前 ,包括克柳切夫、托尔巴奇克、卡缅、贝兹莫内和卡亚布利日尼亚亚等火山 ,覆盖了大约 5 500 km<sup>2</sup> 的面积。克柳切夫火山相对年轻 ,主体形成于 7 000 多年前。它在最近的时期非常活跃 ,几乎每年都要爆发 ,引发大量的火山灰、熔岩流、火山碎屑流和火山泥石流。比如 ,1994 年 10 月的一次亚布里尼型爆发 ,产生了 13 km 高的火山灰云和 100 m 宽、2 ~ 6 km 长的火山碎屑流。高温的熔岩流导致冰雪融水引发了火山泥石流 ,冲毁了距离火山口 30 km 处 Klyuchi 镇的公路 ,并进入勘察加河。最近监测到的一次火山爆发 ,发生于 2013 年 10 月 20 日。

( 胡凯衡)