

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.05

甘肃肃南县长达坂沟泥石流成灾机理和防治措施建议

庞伟军, 常 刚, 苟海瑞, 张乾翼

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 长达坂沟“7·4”泥石流危害巨大。结合沟道发育特征和泥石流堆积形态, 分析了以滑坡、崩塌和坡面风化侵蚀为泥石流潜在物源的转化特征, 探讨了“7·4”泥石流的径流过程和成灾机理, 并对其发展趋势进行了预测。认为长达坂沟泥石流目前处于发展壮大期, 沟道物源的转化具波浪形缓急过程, 排导沟渠坡降比和过流断面的变化是影响阵流运动形态的关键, 也是长达坂沟泥石流成灾的主要控制因素。最后, 针对“7·4”泥石流发育特征和成灾模式, 探讨了“柔性桩板墙高坝拦挡+顺直排导”的工程措施在长达坂沟泥石流防治中的应用可行性。

关键词: 泥石流; 堆积形态; 径流; 成灾机理; 防治措施

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0029-06

Disaster mechanism of debris flow of Changdaban Gully in Sunan County of Gansu Province and suggestions for its prevention

PANG Weijun, CHANG Gang, GOU Hairui, ZHANG Qianyi

(Northwest Research Institute Co., Ltd. of China Railway Engineering Corporation, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The “7·4” debris flow of the Changdaban gully is very harmful. Combining the development characteristics of Changdaban Gully and debris flow accumulation form, this paper analyzes the transformation characteristics from landslide, collapse and slope erosion into debris flow, discusses the run-off process and disaster mechanism of “7·4” debris flow, and forecasts the development trend of debris flow of the Changdaban gully. It is considered that the debris flow of the Changdaban gully is still in the period of development and expansion. The transformation of channel source into debris flow is characterized by a wavy process changing between fast and slow, the change of slope ratio and flow section of drainage ditch is the key to affect movement form of debris flow, also the main controlling factors for the formation of debris flow disaster. Finally, according to the development characteristics and disaster mode of “7·4” debris flow, the feasibility of applying the engineering measures “flexible pile wall dam combined with straight drainage ditch” to debris flow control is discussed.

Keywords: debris flow; accumulation form; run-for; disaster mechanism; prevention measures

0 前言

泥石流形成过程复杂、暴发突然、来势凶猛、历时短暂、破坏力强。我国每年直接成灾的泥石流至少数十处^[1], 严重影响着山区居民的生命财产安全、资源

开发和可持续发展。2015 年 7 月 4 日, 因突降暴雨, 甘肃省肃南县长达坂沟继 2011 年 7 月泥石流^[2]后再次发生泥石流灾害, 造成山口区域 18 户居民房屋毁坏, 约 100 人无家可归, 职教中心、博物馆等重大建筑场地被冲击、淤埋, 213 省道交通中断, 电力、通讯线路

收稿日期: 2017-05-05; 修订日期: 2017-07-18

第一作者: 庞伟军(1986-), 男, 甘肃白银人, 地质工程专业, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为地质灾害防治与岩土设计。E-mail: 709881249@qq.com

等严重受损。泥石流的发生一度导致肃南旅游业停运、学校停学、建筑损坏、灾民安置、用水、用电困难等,给肃南地区的经济发展造成了很大的损失。

调查统计,长达坂沟泥石流堆积区域内常住人口 1 900 人,公共固定资产 21 910 万元,泥石流的孕育产生势必对其形成巨大的安全隐患。为充分保障长达坂沟及类似沟道泥石流影响区内的居民和财产安全,文章以长达坂沟“7·4”泥石流灾害发生前后的地质调查成果为基础,分析探讨类似沟道泥石流的发育特征和成灾机制,并提出针对性工程防治措施,以对类似沟道泥石流成灾模式的正确认识和防治措施提供依据和参考。

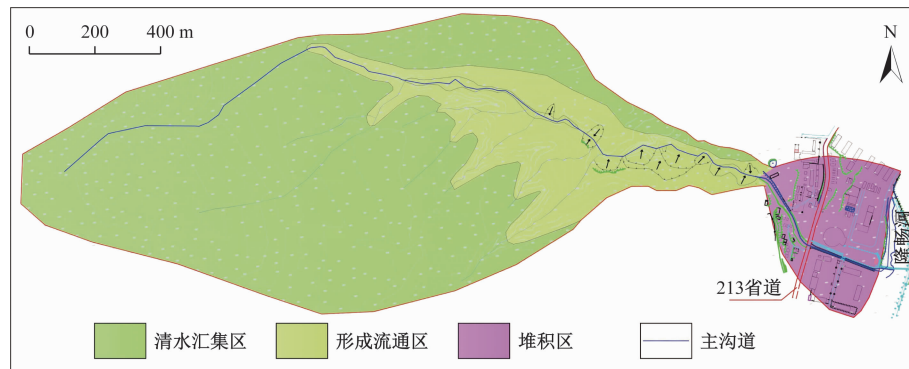


图 1 长达坂沟地形及泥石流分区图

Fig. 1 Map showing the topography of the Changdaban Gully and debris flow partition

流域内地层以白垩系上统(K_1)砂泥岩和第四系中更新统(Q_2)冲洪积卵砾石层为主。前者下伏于后者底部,紫红色,出露于中下游沟道及下游侵蚀坡面,风化强烈,岩体破碎,下游坡面多呈粉土、黏土状,雨水极易软化流失。后者分布于中下游侵蚀山梁顶部及上游岸坡,半泥质胶结,卵砾石分选性较差,层内中下游胶结黏粒含量高,但风化严重,胶结程度较差,稳定性较低,上游黏粒含量低,胶结程度较好,稳定性较高。

1 长达坂沟基本特征

1.1 工程地质条件概况

长达坂沟呈“V”字型发育于肃南县城隆畅河左岸冲洪积台地中,以下切侵蚀作用而形成(图 1)。上游沟道较浅,岸坡多稳定,坡顶为倾向沟道的凹洼台地,地形较平缓。中下游台地地貌已消失,下切深度大,多超过 50 m,沟道狭窄,谷坡陡峭,坡度多 30°以上,部分岸壁呈近直立状。流域内以上游台地面为最高海拔,约 2 650 m,最低处为沟口堆积扇边缘,海拔 2 320 m,相对高差 330 m 左右。

1.2 沟道特征

长达坂沟流域面积 1.25 km²,主沟道总长 2.9 km,受区域地质环境作用,在汇水下切侵蚀中形成了独特的“缓-陡-缓”纵坡特征(表 1)。沟口内中下游段纵坡降为上游、沟口外平均坡降的 2 倍,且区间坡降变化大,最大达 459.05‰。纵观整体沟道,中下游段为目前长达坂沟汇水主要下切变化区间,坡降大,洪水流速快,下切冲蚀力强,沟道稳定性差。

表 1 长达坂沟沟道分段特征

Table 1 Segmentation feature of Changdaban Gully

沟道分段	沟道长度/m	平均坡降/‰	沟道形态	地层岩性	谷坡形态
沟口外	省道下	210	25.92	堆积扇下拉沟槽,宽缓,“U”字型为主	冲洪积堆积为主
	省道上	350	113.67		
沟口内	中下游	1 250	176.37	砂泥岩及风化残积物,冲洪积堆积物,半胶结卵砾石	坡度大,坡面陡缓起伏大
	上游	1 090	80.86	半胶结卵砾石为主	坡度小,坡面平整,植被发育

1.3 物源分布及流域分区

长达坂沟泥石流物源主要集中于中下游沟道,类型以滑坡、崩塌和坡面风化侵蚀为主。滑坡主要发育

在全-强风化砂泥岩中,共 6 处,滑动方向垂直沟道,剪出口位于沟底;崩塌体 1 处,发育于卵砾石层,规模受卵砾石层底部白垩系泥岩变形的控制。坡面侵蚀物

在沟道内大量分布,物体以泥岩风化残积物和卵砾石层胶结物软化后的卵砾石为主。

根据物源分布、流域形态和前人成果^[2],长达坂沟可分为清水汇集区、形成流通区和堆积区三部分(图1)。清水区占总面积的69.69%,由沟道中上游顶部凹洼台地及上游浅沟道组成;形成流通区占总面积的20.14%,为泥石流物源分布沟道及坡面;堆积区位于沟口地形开阔地带,扇形堆积地貌明显。

2 “7·4”泥石流成灾过程

2.1 泥石流堆积物质组成及堆积过程

以213省道为界,“7·4”泥石流体现出了两种堆积形态(图2)。省道至沟口区域为泥、石堆积区,具明显扇形堆积龙头和叠瓦式堆积形态,堆积厚度较大,物质多以卵砾石为主;省道下游至隆畅河以泥流堆积为主,以上游泥石流堆积龙头为源头在地形的控制下向周围扩散漫流,厚度从省道处侧向下游逐渐减小。省道外侧排导渠为卵砾石、泥流混合堆积,在渠端头发育一小型卵砾石堆积扇。

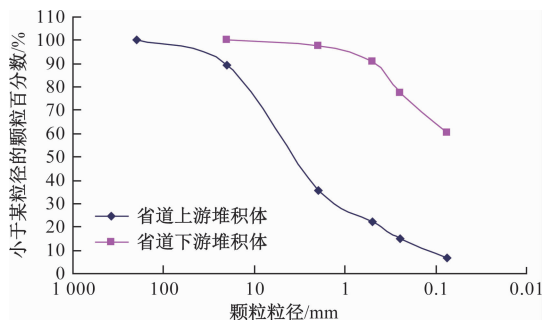


图2 泥石流堆积体颗粒组成分析

Fig. 2 Grain size analysis of the debris-flow deposits

从堆积形态反映出,“7·4”泥石流的发展体现出了三个过程:a. 起初阶段,泥石流固体含量少,稠度低,流速大,流体完全从排导渠排泄,在渠末端部形成扇形堆积体;b. 固体含量迅速增多,稠度逐渐变大,流量上升,流速降低,省道处排导渠堵塞,沟口形成扇形漫流堆积,并形成第一道阵流龙头,龙头处固体物质流速降低,固液分离^[3],液体以泥流的形式随地形向四周流动扩散;c. 以阵流形态继续发展,省道上游形成叠瓦式堆积形态,省道外以液相为主的泥流被分离向外流动。

2.2 物源转化过程

崔鹏等^[4-5]将具有类似于泥石流流体组成和结构特征的松散堆积物称为准泥石流流体。在此提出潜在泥石流流体概念,即将具有相应稳定度但经一定的作

用变形后可转化为准泥石流流体的固体物质作为潜在泥石流流体。长达坂沟泥石流流固体含量多以粒径>2mm为主,其次为粉黏粒,中间砂粒较少。这种物质组成在地层岩性起决定性作用的基础上,与潜在泥石流流体至准泥石流流体再至泥石流流体的转化形式有很大关系。

2.2.1 滑坡

根据泥石流前后调查对比,滑坡物质的转化受滑坡性质的约束,转化速度具波浪缓急特征,表现为:(1)滑动后自稳的滑坡:滑体由强风化破碎岩体组成,当表层岩块被润滑软化且洪流冲击力大于岩块间咬合力时脱离母体转化为泥石流,作用至一定程度后前缘滑体将产生坍塌溜滑,并迅速转化为泥石流流体,形成物源转化的一个高峰期,直至下一个掏蚀变形的开始。该转化过程中,潜在泥石流流体至准泥石流流体转化缓慢,准泥石流流体至泥石流流体转化速度快,但转化物源量较少,不会影响到滑坡的整体稳定。灾后堆积体中大粒径白垩系泥质砂岩块体及漂石均为此种转化方式形成。(2)已破坏的滑坡松散堆积体:以土坝的形式堆积在沟道,洪流中起到了短暂的拦截作用,当土体逐渐渗水,强度降低不能承受上游水压、渗透压力或积水翻坝时迅速溃决,形成泥石流一次阵流高峰,此后滑坡中厚缘松散体紧接着滑动再次形成土坝,这种转化过程中,潜在泥石流流体、准泥石流流体和泥石流流体的转化速度均较快,且物源量大。长达坂沟该种滑坡数量较多,泥石流阵流具多处堆积土坝溃决的叠加作用。

2.2.2 崩塌

以中更新统黏粒含量高、胶结程度差的卵砾石层为基础,分为崩塌堆积体和潜在崩塌体。前者作为准泥石流流体在沟道内多和滑坡破坏堆积体具相同的物质转化形式。后者为潜在泥石流流体,向准泥石流流体的转化一定程度上受崩塌堆积体的制约,并形成间断式的变形破坏过程,当一次崩塌堆积体全部被冲蚀后,卵砾石层底部被快速软化掏蚀,卵砾石层因卸荷和临空作用出现第二次的崩塌破坏直至再次稳定。

2.2.3 坡面侵蚀

长达坂沟坡面侵蚀对泥石流物源的贡献体现为小雨蓄量、暴雨释量的循环过程。砂泥岩坡面在小雨作用下,渗水软化,风化速度加快,坡面残积准泥石流流体厚度逐渐增加,暴雨作用下,残积体快速饱水,强度降低,以坍塌溜滑的形式直接融入沟道洪流形成泥石流流体。卵砾石层坡面胶结物长期软化流失,导致卵砾石脱离坡面滚落堆积于沟道,形成准泥石流流体,暴雨时沟

道松散卵砾石直接转化形成泥石流流体。坡面侵蚀物源转化周期通常较长,一次暴雨泥石流后,物源的再次蓄量补充过程缓慢。“7·4”泥石流中,坡面侵蚀物源转化量大,灾后谷坡及沟道均出露强-中风化砂泥岩,灾前坡面松散残积体和沟道堆积体全部转化流失。

2.3 泥石流径流特征

泥石流径流是由液体和固体共同流动形成的一个复杂过程。宏观上,因固体颗粒的含量不同,表现出塑性蠕动流、粘性阵流、阵型连续流和稀性连续流等不同运动形态;微观上,泥石流属于固液两相流^[6],是固液两项间相互作用力不断发生变化的流体。长达坂沟泥石流径流形态严格受沟谷比降、沟道特征、物源数量级补给形式的影响和控制。根据堆积特征,其在径流过程中具明显的黏性阵流和洪水-泥石流相间的特征。

采集现场堆积体进行模拟反演,长达坂沟“7·4”泥石流最大流体容重为 $1.6 \sim 1.7 \text{ t/m}^3$ 。在不考虑沟床糙率影响的情况下,根据余斌^[7]黏性泥石流平均运动速度公式(式1)和流体运动缓急程度判断参数 F_r

(福劳德数,式2)计算长达坂沟“7·4”泥石流径流特征值(表2)。

$$U = 1.1(gR)^{\frac{1}{2}}S^{\frac{1}{3}}\left(\frac{D_{50}}{D_{10}}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

式中: U ——黏性泥石流运动平均速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;

g ——重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$;

R ——黏性泥石流运动水力半径/ m ;

S ——黏性泥石流运动纵比降;

D_{50} ——泥沙颗粒中百分比小于 50% 的颗粒粒径;

D_{10} ——泥沙颗粒中百分比小于 10% 的颗粒粒径。

$$F_r = V/\sqrt{gH} \quad (2)$$

式中: F_r ——流体福劳德数;

V ——流体运动速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;

H ——为流体水深/ m 。

$F_r > 1$, 流体为急流; $F_r < 1$, 流体为缓流; $F_r = 1$, 为临界状态。

表 2 长达坂沟“7·4”泥石流径流特征值

Table 2 Run-for characteristics of the “7·4” debris flow in the Changdaban Gully

位置	平均纵坡比 S	过流断面		水力半径 R/m	重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	D_{50}/mm	D_{10}/mm	平均流速 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	F_r
		流深/ m	流宽/ m						
沟道内 中下游	0.176	1.50	3.60	0.818	9.80	3.750	0.125	4.09	1.07
沟口	0.131	1.20	5.00	0.811				3.69	1.07
沟道外 省道上	0.114	0.80	8.50	0.673				3.21	1.15
省道上	0.026	1.00	4.50	0.692				1.99	0.63

可看出,同一阵流,在不同沟道位置受纵坡比和过流断面形态的作用其流速值是不相等的,流动缓急程度也不尽相同。长达坂沟“7·4”泥石流在沟道中下游流速最大,为 4.09 m/s ,出沟口后流速略降低,但 F_r 值仍大于 1,呈急流状态,下穿 213 省道后,流速急剧减小,为沟内流速值的一半, F_r 值小于 1,呈缓流状态(计算中,纵坡比、过流断面值为现场实测值,粒径值见图 2)。

2.4 泥石流成灾机理

泥石流是各种自然和人为因素共同作用的结果,通常自然因素为不可控作用,人为因素在可控基础上决定了成灾的主要特征。长达坂沟“7·4”泥石流的成灾模式很大程度上受到了人为排导工程的控制,沟口外人工排导渠在下穿 213 省道时呈倒“八”字型布设,沟渠变窄,坡降变小,造成泥石流下穿 213 省道时直接呈叠瓦式淤积,完全堵塞排导渠,最终形成了以 213 国道为界,上游淤积掩埋、下游翻坝冲击的特有成灾破坏

模式。

采用表 2 数据,根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T 0220—2006)中泥石流流量计算公式:

$$Q_c = W_c \times V_c \quad (3)$$

式中: Q_c ——泥石流流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$;

W_c ——过流断面面积/ m^2 ;

V_c ——泥石流流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

计算得表 2 对应位置处泥石流流量分别为: $22.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $22.11 \text{ m}^3/\text{s}$, $21.08 \text{ m}^3/\text{s}$, $8.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明同一阵流在 213 省道以上流量值几乎相等,不会产生淤积现象,过 213 省道后流量值迅速降低,泥石流流体大量淤积,完全堵塞排导沟渠。

为进一步反映排导沟渠坡降比和过流断面对泥石流成灾特征的影响,采用表 2 沟内中下游数据分别推演坡降比和过流断面与泥石流流速和流量的变化关系(图 3~图 5),计算中,除对比影响因子外其他影响因子假设为固定值。

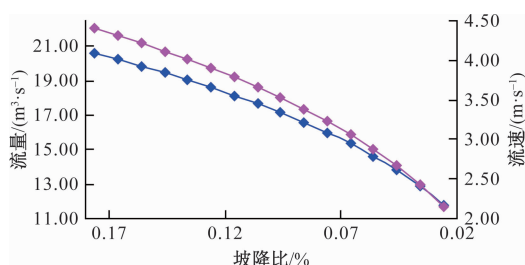


图3 坡降比与流速、流量的关系

Fig. 3 The relationship between slope ratio, velocity and flow rate of debris flow

(蓝线为流速, 粉红线为流量, 下同)

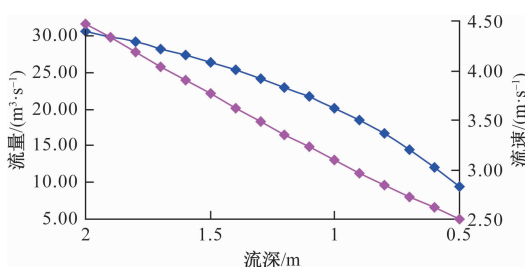


图4 流深与流速、流量的关系

Fig. 4 The relationship between flow depth, velocity and flow rate of debris flow

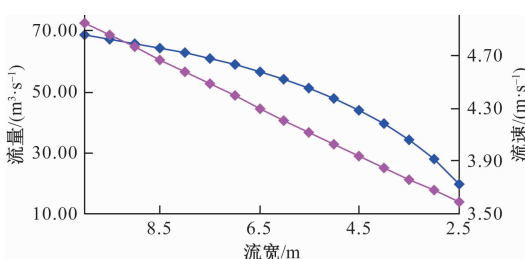


图5 流宽与流速、流量的关系

Fig. 5 The relationship between flow width, velocity and flow rate of debris flow

可看出,流速和流量随坡降比、流深、流宽的减小均呈降低趋势,但流速降低幅度逐渐增大,流量在随坡降比降低幅度增大的情况下,相对流深、流宽的降低幅度逐渐减小。故在泥石流防治布设排导工程时,需避免下游排导渠纵坡降和过流断面的减小,特别是纵坡降的减小对流量的影响最为明显,更易引发泥石流流体的堆淤现象。

3 泥石流发展趋势

由“7·4”泥石流现场调查:长达坂沟发源于祁连山麓冲洪积台地,汇水面积大、能力强;泥石流形成区沟谷下切强烈,谷坡植被覆盖率低,滑坡、坍塌及坡面风化侵蚀变形严重,特在“7·4”暴雨及泥石流掏蚀冲

刷作用下,已产生的病害体稳定程度降低,新的病害体大量发育;区内年降雨量较少,但过于集中,每年6~8月为降雨集中期,暴雨较多。

故长达坂沟泥石流形成条件成熟,由潜在泥石流流体、准泥石流流体物源含量判断,该沟泥石流当前处于发展壮年期,泥石流暴发规模将进一步增大。

4 防治措施探讨

针对沟谷深切、沟道狭窄、纵沟比降大及多数量、大体积的滑坡、崩塌物源转化特征,结合“7·4”泥石流成灾机理、发展趋势和沟口排导条件,长达坂沟泥石流的防治需主要解决以下几个问题:

a、沟口排导纵比降小,堆积场地有限,将物源尽可能阻挡在沟道内。

b、阻止滑坡、崩塌和坡面浸蚀等潜在泥石流流体的进一步发育和转化,从源头减少泥石流物源。

c、完善疏导沟口排导措施,防止泥石流固体物源的再次淤埋堆积。

基于以上关键问题,在普通排导、拦挡的基础上,长达坂沟泥石流的防治试用了“柔性桩板墙高坝群拦挡+改沟顺直排导”的综合防治措施。

(1)沟道内设置10~15 m高桩板墙坝体群(图6),在拦蓄大量泥石流固体物源的基础上,经坝群的沟道回淤,对沟岸滑坡、崩塌和坡面侵蚀等物源起到回填反压、稳固作用,达到减少泥石流物源的目的。同时坝后适量布设若干排钢筋石笼,形成柔性桩板墙高坝,降低泥石流携带巨石对坝体的冲击。

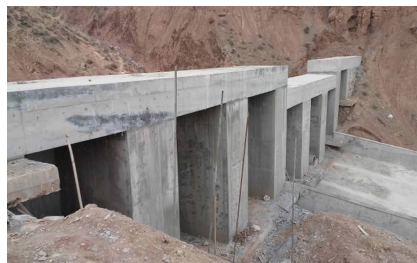


图6 长达坂沟桩板墙拦挡坝效果图

Fig. 6 A photo showing the sheet-pile intercepting dam in the Changdaban Gully

(2)根据2.1节成灾特征,沟口外改沟顺直排导渠,避免纵向上排导渠坡降比、过流断面和流向的变化,保证泥石流的导流通畅性。

5 结论

(1)长达坂沟后缘汇水面积大,中下游沟道深切,

潜在泥石流流体丰富,在集中降雨条件下,泥石流形成条件成熟,暴发规模呈增大趋势。

(2)长达坂沟泥石流潜在物源以滑坡、崩塌和坡面风化浸蚀为主,转化过程具波浪式急缓特征,导致泥石流径流呈阵流形态。

(3)排导渠(沟道)纵坡比和过流断面的变化是长达坂沟泥石流成灾的主要控制因素,形成了以 213 省道为界,上游淤积掩埋、下游翻坝冲击的特有成灾破坏模式。

(4)泥石流流速、流量随坡降比、流深、流宽的减小而减小,但流速减小幅度均不断增大,流量的减小幅度随坡降比不断增大,随流深、流宽不断减小。

(5)“柔性桩板墙高坝群拦挡+顺直排导”综合防治措施适合长达坂沟及类似沟道泥石流的防治,不仅能达到拦、排的作用,且从根本上可减少泥石流潜在物源。

参考文献:

- [1] 刘丽,陈洪凯. 泥石流运动力学研究现状及趋势[J]. 重庆交通大学学报, 2010, 29(2): 233 - 239.
LIU Li, CHEN Hongkai. Research status and trend about dynamics of debris flow [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010, 29(2): 233 - 239.
- [2] 丁宏伟,姚兴荣,赵玉苹,等. 甘肃省肃南县长达坂沟泥石流发育特征及防治对策[J]. 甘肃地质, 2015, 24(1): 59 - 64.
DING Hongwei, YAO Xingrong, ZHAO Yuping, et al. Development characteristics and countermeasures

for debris flows of Changdaban Gullies in Sunan County, Gansu Province [J]. Gansu Geology, 2015, 24(1): 59 - 64.

- [3] 龚成勇. 粘性泥石流运动机理及数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.
GONG Chengyong. The movement mechanism of viscous debris flow and study of numerical simulation [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [4] 冯自立,崔鹏,何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 8 - 13.
FENG Zili, CUI Peng, HE Siming. Mechanism of conversion of landslides to debris flows [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 8 - 13.
- [5] 崔鹏. 泥石流启动条件及机理的实验研究[J]. 科技通报, 1991(21): 1650 - 1652.
CUI Peng. Experimental research for starting conditions and mechanism of debris flow [J]. Bulletin of Science and Technology, 1991(21): 1650 - 1652.
- [6] 张万顺,赵琰鑫,崔鹏,等. 沟道二维泥石流运动和冲淤数值模型研究[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 71 - 79.
ZHANG Wanshun, ZHAO Yanxin, CUI Peng, et al. Two-dimensional numerical model for debris flow motion and gully bed evolution [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 71 - 79.
- [7] 余斌. 粘性泥石流的平均运动速度研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 524 - 531.
YU Bin. Study on the mean velocity of viscous debris flows [J]. Advances in Earth Sciences, 2008, 23(5): 524 - 531.

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部