

文章编号:1672-6561(2013)04-0098-06

## 汶川地震灾区帽壳子滑坡形成泥石流的过程和特征

马 超<sup>1,2,3</sup>, 胡凯衡<sup>1,2</sup>, 宋国虎<sup>1,2,3</sup>, 田 密<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:**实地调查了汶川地震灾区北川县帽壳子滑坡转化为坡面泥石流和沟道泥石流的基本特征和形成过程, 并利用能量守恒原理和 Takahashi 泥石流运动模型对其运动特征进行了分析。结果表明: 对于强震诱发的滑坡, 其层间碎块石土体强度低, 滑坡体内部裂隙发育, 在强降雨作用下容易转化为泥石流; 滑坡转化为坡面泥石流的过程为岩土体沿基岩面下滑→撞击→强碎屑化→流动→快速停积; 滑坡转化为沟道泥石流的过程为滑坡体崩滑→弱碎屑化→水流掺混→掏蚀沟道→流动堆积; 滑坡转化为坡面泥石流后, 起始速度较快, 但没有沟道限制和水力作用, 因此运动阻力较大, 冲出距离远小于沟道泥石流; 利用 Takahashi 泥石流运动模型计算得到的沟道泥石流冲出距离与实际观察值比较吻合。

**关键词:**泥石流; 滑坡; 汶川地震; 转化过程; 运动特征; 崩滑; 坡面流

**中图分类号:** P642.2      **文献标志码:** A

## Processes and Characteristics of Debris Flows Induced by Maoqiaozi Landslide in Wenchuan Earthquake Stricken Area

MA Chao<sup>1,2,3</sup>, HU Kai-heng<sup>1,2</sup>, SONG Guo-hu<sup>1,2,3</sup>, TIAN Mi<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, 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:** Basic characteristics and forming processes of Maoqiaozi landslide transformed into slope debris flow and gully debris flow in Beichuan county of Wenchuan Earthquake stricken area were investigated, and the motion features of transformation process were analyzed with energy conservation principle and Takahashi debris flow motion model. The results show that for the landslide induced by strong earthquake, the intensity of interlayer tatter rubble soil body is weak, and fracture in landslide body develops, so that the landslide can be easily transformed into debris flow under the condition of strong rainfall; the process of Maoqiaozi landslide transformed into slope debris flow is sliding-collision-strong fragmentation-fluidization-quick accumulation along the basement surface for rock-soil body; the process of Maoqiaozi landslide transformed into gully debris flow is landslide body collapse-weak fragmentation-water flow mixing-sapping gully-flow accumulation; after landslide transforming into slope debris flow, starting velocity is fast, and there are no hydraulic process and high resistance, so that motion resistance is large and runoff

收稿日期: 2013-01-04

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-JS305);

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: 马 超(1986-), 男, 四川盐亭人, 工学博士研究生, E-mail: sanguoxumei@163.com。

distance is much less than that of gully debris flow; the runout distance of gully debris flow calculated by Takahashi debris flow motion model is very close to the field observing value.

**Key words:** debris flow; landslide; Wenchuan Earthquake; transformation process; motion feature; collapse slide; overland flow

## 0 引言

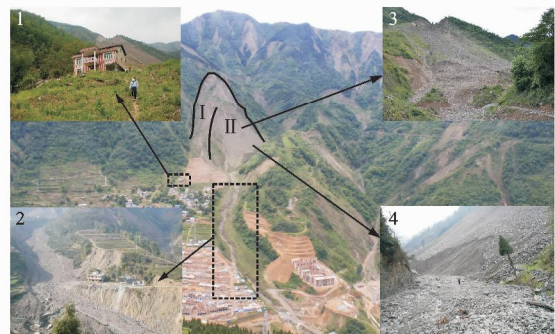
滑坡和泥石流是2种常见的地质灾害。滑坡是斜坡上岩土体沿连续贯通的破坏面以一定加速度向下运动的过程与现象<sup>[1]</sup>。泥石流是一种介于滑坡和高含沙水流之间的固液两相流体,具有暴发突然、运动速度快、短历时等特点<sup>[2-6]</sup>。滑坡在强降雨作用下,从原来位置以滑动、坠落、滚动等方式在缓坡上或沟道中运动,随着颗粒碎屑化和水的参与,往往会转化为泥石流。这种运动兼具有滑坡和泥石流的运动特点,称为“滑坡型泥石流”。李树德等根据岩土体极限平衡理论,按受力运动形式将滑坡型泥石流分为滑坡型和崩塌型两类,并将这两者的发展过程分为饱和松散体直接演变型和崩塌后再遇水搅拌型<sup>[7-8]</sup>。滑坡型泥石流暴发突然,来势迅猛,速度快,搬运能力和破坏性强,运动范围所波及之处建筑物严重受损甚至全部摧毁。如四川南江白梅垭滑坡、云南个旧老熊洞冲滑坡、四川普格标水岩滑坡,转化为泥石流后都造成很大的灾害<sup>[9]</sup>。滑坡转化为泥石流尤其是转化为沟谷型泥石流和坡面型泥石流,过程复杂,实际观测较少,其机理和动力学过程研究还处于初级阶段。目前,滑坡转化为泥石流过程一般认为是滑动剪切面上的固体物质液化、颗粒物碎屑化以及底部岩土体内部产生不排水荷载,造成孔隙水压力上升和有效应力下降,从而完成转化。另外,还有坡面碎屑体的广泛库伦破坏、滑体的动能转化为内部颗粒的振动能、液化层厚度增加、黏性颗粒积聚等机理<sup>[10-14]</sup>。

汶川地震发生后,许多地震引发的滑坡在降雨的作用下转化为泥石流,造成二次灾害。笔者以四川省北川县花石板沟中游帽壳子滑坡型泥石流为研究对象,在野外实地调查和收集相关资料的基础上,对该滑坡形成大型坡面泥石流和沟道泥石流的过程及特征进行分析和计算,以期为震后滑坡型泥石流的研究提供借鉴。

## 1 滑坡基本特征

帽壳子滑坡位于北川老县城附近的花石板沟中游右侧(图1)。滑坡后缘、左右两侧分别以山脊线

和支沟分水岭为界。滑坡形态不规则,平均纵长460 m,平均横宽240 m,厚度20~30 m,后缘高程1 250 m,坡脚高程900 m。坡度现为30°~35°,坡向88°。震前滑坡表面为良好植被所覆盖,未见滑动的明显迹象,地震对表面植被造成破坏,大部分坡体表面裸露。滑坡坡脚现已被后期洪水冲刷形成约20 m的临空面。根据灾后出露典型滑坡洼地几何特征和地质灾害勘察设计资料,推断滑坡体厚度约25 m<sup>[15]</sup>(图2)。映秀—北川断层从沟口穿过,距滑坡超过800 m。断层附近多发育枝状断裂,并出露地表。这些枝状小断裂与主断层走向基本一致,使断层附近岩石强烈挤压,形成很多支离破碎带。构成帽壳子滑坡的岩土体主要为第四系全新统残坡积( $Q_4^{el+dl}$ )、滑坡堆积物( $Q_4^{del}$ )。下覆基岩主要以寒武系下统清平组钙质泥质粉砂岩( $Q_4^{sef}$ )为主,节理裂隙较发育,产状345°/40°,另外沟道中还有第四系全新统泥石流堆积物。滑坡体呈碎裂和散体结构,主要为碎块石土、粉质黏土以及粉砂岩,另有部分片岩。碎块石土分布似层状,以强风化砂岩和粉质砂岩为主,厚度0~5 m。粉质黏土和粉砂岩多夹杂在似层状分布的碎块和块石土之间。滑坡后壁残留黄褐色粉质黏土。滑坡后壁凹槽中残留的片岩之间夹杂着泥质体。造成该滑坡失稳的主要因素为:层间碎块石土体间夹杂泥质和黏土,砂岩、片岩自身抗风化能力和强度弱,抗剪强度较低,很容易发生破坏变形;滑坡体的岩土体以大颗粒居多,占60%左右(图



1—滑坡体 I 形成的坡面泥石流冲毁房屋;2—滑坡体 II 下滑后形成沟道泥石流;3—帽壳子滑坡近景;4—坡脚被流水冲刷形成的临空面

图1 帽壳子滑坡照片

Fig. 1 Photos of Maoqiaozi Landslide

3);岩土体节理、裂隙极为发育,滑坡坡脚被常年流水冲刷和切割,造成临空面条件好;汶川地震主断裂与该滑坡距离很近,强震动引起非构造地裂缝。

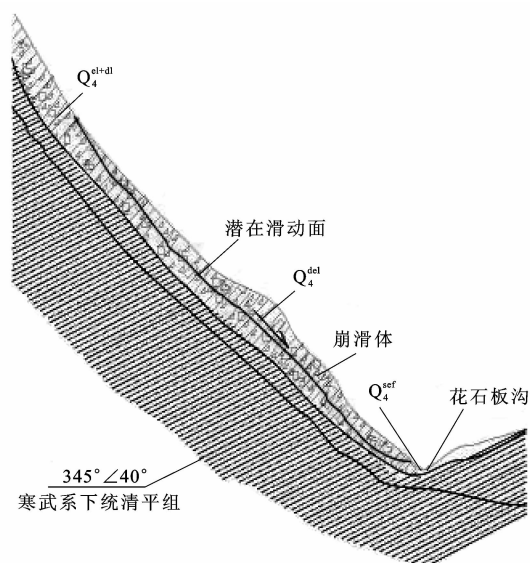


图2 帽壳子滑坡地质剖面

Fig. 2 Geological Profile of Maoqiaozi Landslide

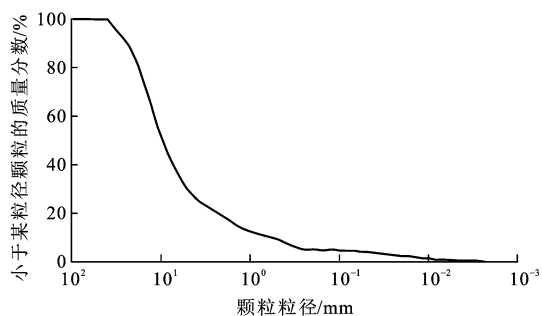


图3 帽壳子滑坡中部固体物质颗粒级配

Fig. 3 Grain Composition of Solid Materials in the Middle of Maoqiaozi Landslide

## 2 滑坡型泥石流形成过程

### 2.1 激发条件

2008年“9·24”降雨过程是造成帽壳子滑坡失稳的触发因素,前期降雨时间长,雨量充沛。因层间碎块石结构具有结构松散、孔隙度大等特征,且强烈地震震动使碎块石土体内部裂隙面扩张,滑坡体表面多发育裂隙(图4)。长时间的降雨使碎块石土体内部充水,导致土体质量增加,下滑力增大,抗滑力减小,稳定性降低。根据室内直剪对滑坡土体抗剪强度进行分析:当干密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、体积含水率为32%时,黏聚力基本丧失,且土体未达到饱和状态。据附近雨量站观测记载,2008年9月23日至24日6时,西山坡总雨量275 mm,24日凌晨4时至6时

雨量总计 $195 \text{ mm}^{[16]}$ 。另据附近村民回忆:9月24日凌晨3时至4时,花石板沟内响声如雷,据此判断帽壳子滑坡在该时段内失稳下滑,转化为泥石流。滑坡体Ⅱ轴线方向与花石板沟下游沟道方向基本顺直,约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 土体参与到泥流过程。滑坡体Ⅱ转化而成的沟道泥石流共掩埋下游7处房屋,造成20多人死亡,形成长约2.13 km、平均宽47 m、面积约 $0.2 \text{ km}^2$ 的条带状堆积带。泥石流冲出花石板沟口后,与魏家沟和席家沟泥石流汇合,掩埋了北川老县城的大部分区域。



图4 滑坡体表面的裂隙

Fig. 4 Outcropped Cracks on Landslide Surface

### 2.2 形成过程

根据残留滑坡体、坡面泥石流和沟道泥石流堆积物组成以及灾后微地形变化,大致分析该滑坡体在“9·24”降雨作用下转化为大型坡面泥石流和沟道泥石流的过程。

对于滑坡体Ⅰ转化为大型坡面泥石流,其过程为:岩土体沿基岩面下滑→撞击→强碎屑化→流动→快速停积。其依据是:①滑坡体Ⅰ滑动过后,出露的滑床为基岩面,基岩走向与滑动方向大致呈 $90^\circ$ ;②滑坡体失稳进入支沟短距离滑行后,与沟岸撞击并填满沿滑动路径的支沟局部段(图5),后续滑坡体继续向前运动,运动的方式是以滚动为主;③堆积区的坡面泥石流堆积物比原滑坡岩土体组成粒径要小,因此岩土体在运动中有碎屑化过程;④运动过程中细颗粒物质运移现象明显。滑坡向泥石流转化的关键是滑坡体运动过程中碎屑化以及细颗粒的造浆过程。但滑坡体Ⅰ下滑后,运动中的造浆过程为“原生型”<sup>[17]</sup>,即泥石流中的细颗粒物质和水体由滑坡体自己补给。尤其是堆积区前缘多为大颗粒物质聚集,泥石流浆体作为搬运介质,将碎屑化后的块体搬运至较长距离处。

滑坡体Ⅱ失稳下滑后直接进入沟道转化为沟道泥石流,造成严重灾害。其过程为:滑坡体崩滑→弱



图5 坡面泥石流滑动撞击阶段原始运动轨迹

Fig. 5 Original Moving Path of Slope Debris Flow During Sliding and Collision

碎屑化→水流掺混→掏蚀沟道→流动堆积。其依据是:①滑坡体上部残留的层间碎块石是该滑坡体的主要成分,每一层间面与水平面夹角不等,最大为 $50^\circ$ ,几乎与原滑坡坡度一致,滑动过后出露的滑坡体主要为粗颗粒,细颗粒较少。②滑坡体Ⅱ沿坡面运动的方式以崩滑为主,具有滑坡和崩塌的共同运动特征。既有碎块石沿层面滑动,也有块石坠落、滚动、崩落和岩块间相互撞击。构成层间碎块石结构的粉质砂岩和强风化砂岩强度低,降雨不断渗入内部,造成层间岩土体向外弯曲。在自身质量增加的同时,抗弯区段应力很快接近碎块石岩土体的抗剪强度。2008年9月24日5时至6时的强降雨不仅造成抗剪强度下降,还严重冲刷层间块石土体的细颗粒,抗弯曲段失去抵抗力支撑,层间岩土体瞬间崩滑。③由于岩土体强度低,在崩滑的过程中碎屑化,但与滑坡体Ⅰ形成坡面泥石流不同,滑坡体Ⅱ没有剧烈的撞击过程,碎屑化程度不足,因此在沟道中随处可以见到大块石。④虽然滑坡体Ⅱ以极快的速度进入沟道,但受沟道两岸边界地形条件约束,沟道比降较小,滑坡体在进入沟道后与沟道中水流有较长时间的掺混过程,造成崩滑体动能迅速消减。在转化为泥石流的过程中,碎屑化后的滑动块体沿沟道滑垫面、沟岸坡补给固体物质。沟道水流一方面起到掺混的作用,另一方面与细颗粒一起参与造浆过程,有利于泥石流运动。

### 3 滑坡型泥石流运动特征

滑坡型泥石流运动过程与水力类泥石流不同,没有阵性流过程。水力类泥石流过程一般是洪水→稀性泥石流→黏性泥石流→稀性泥石流→洪水的过程,且整个过程时间要长。而滑坡型泥石流是短时间内完成一次性的滑动、流动堆积,运动速度明显快

于一般水力类泥石流。

#### 3.1 坡面泥石流运动速度

滑坡体Ⅰ在支沟中运动100 m后沿惯性方向与支沟沟岸撞击,消耗部分动能;撞击后,崩滑体解体分散;崩滑体经过加速运动后,由于堆积区地貌起伏大,运动过程中无水参与,沿程阻力较大,短时间内运动停止。假设滑体从高位崩滑至坡脚的过程中,势能一部分转化为动能,一部分克服摩擦阻力,则加速段的运动加速度为

$$a = g \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi_m) \quad (1)$$

式中: $a$ 为加速度; $g$ 为重力加速度; $\alpha$ 为崩滑体加速段坡度( $50^\circ$ ); $\varphi_m$ 为岩土体运动时的动摩擦角,取 $\tan \varphi_m = 0.5$ 。

根据能量守恒原理,崩滑体在斜坡上某一瞬间具有的总能量等于崩滑前系统的总能量,则崩滑体在斜坡上运动的某一瞬间的能量平衡方程为

$$\frac{1}{2} m v_0^2 + mgh = \frac{1}{2} m v_i^2 + mgh \frac{\tan \varphi_m}{\tan \alpha} \quad (2)$$

式中: $v_0$ 为崩滑体开始运动时具有的初速度; $m$ 为崩滑体质量; $h$ 为高差(重心到坡脚的高差); $v_i$ 为崩滑体加速运动过程中某一瞬时速度。

岩土体的组成是碎块石土体,与岩质类崩滑体的启动有区别:帽壳子滑坡崩滑体的启动是一个岩土体本身变形能不断积累和释放的过程,而岩质类崩滑体具有非常大的启动速度(变形累积的弹性应变能转化为动能)。因此,帽壳子滑坡崩滑体的启动速度可以忽略不计,即初速度为0,由此可得到帽壳子滑坡崩滑体在坡面上运动的某一瞬时速度为

$$v_i = \sqrt{2gh \left(1 - \frac{\tan \varphi_m}{\tan \alpha}\right)} \quad (3)$$

对于滑坡体Ⅰ,从后缘到坡脚高差350 m,假设滑坡体的重心在中部,则 $h$ 为175 m,估算滑坡体Ⅰ在坡脚处的瞬时速度为 $44.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对滑坡体Ⅱ,从后缘到坡脚高差400 m,则 $h$ 约为200 m,则滑坡体Ⅱ在坡脚处的瞬时速度为 $47.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 3.2 沟道泥石流特征

##### 3.2.1 表观密度

花石板沟泥石流固体物质中,大块石较多。对沟口堆积扇颗粒组成测试发现:泥石流主要以碎块石为主,大部分直径为10~20 cm,难以准确统计。通过冲毁房屋内的坡面泥石流残留样品配成泥石流样品,计算得到表观密度为 $2.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。根据沉积物计算泥石流表观密度方法<sup>[18]</sup>,收集沟道中的泥石流固体颗粒样品,取得粒径大于2 mm颗粒

的质量分数(86%),可计算得到泥石流表观密度为 $2.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。上述2种方法计算的表观密度很接近,说明该泥石流为黏性泥石流。

### 3.2.2 流速和流量

在滑坡体下方沟道顺直段选择测量断面,采用云南东川蒋家沟的流速计算公式计算泥石流平均流速<sup>[19]</sup>。断面平均泥深为3 m,沟道坡降为21.2%,沟床粗糙率取0.3,得到平均流速为 $7.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;断面面积为 $32 \text{ m}^2$ ,则流量为 $227 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。据雨洪修正法,以20年一遇的暴雨为设计频率推算典型断面流量为 $215 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[20]</sup>;雨洪修正法推算值较断面实测值偏小。帽壳子滑坡在“9·24”降雨过程中形成滑坡型泥石流可能造成实测流速较雨洪修正法要大,实测洪峰流量也比雨洪修正法推算值要大。

### 3.2.3 冲出距离

假定沟道横截面为矩形或梯形,宽度不变,沟道基本顺直,流体速度均匀,流体中固相浓度保持恒定,则可利用Takahashi泥石流运动模型对滑坡体转化为沟道泥石流后的冲出距离<sup>[21-22]</sup>进行计算。计算公式为

$$X_L = \frac{V_u^2 \cos^2(\theta_u - \theta)}{g(S_f \cos \theta - \sin \theta)} \left(1 + \frac{gh_u \cos \theta_u}{2V_u^2}\right)^2 \quad (4)$$

式中: $X_L$ 为冲出距离; $\theta_u$ 为加速段坡度,本文滑坡体表面坡度为 $50^\circ$ ; $\theta$ 为沟道坡度,假定为 $20^\circ$ 不变; $V_u$ 为泥石流开始堆积时的速度,即滑坡体在坡脚时的最大速度,也是滑坡型泥石流在沟道中运动时的初速度; $h_u$ 为泥深,3 m; $S_f$ 为阻力梯度,取 $1.12 \tan \theta$ 。

由式(4)得到,滑坡体II转化为沟道型泥石流后的冲出距离为2.02 km。实际调查的冲出距离为2.13 km,计算值与实际值比较吻合。

## 4 结 语

(1)滑坡型泥石流同时具有滑坡和泥石流的运动特点,运动速度快,冲击力强,破坏性强。通过对四川北川县帽壳子滑坡型泥石流的调查,分析了帽壳子滑坡转化成大型坡面泥石流和大型沟道泥石流的过程。前者的转化过程为:岩土体沿基岩面下滑→撞击→强碎屑化→流动→快速停积。后者的转化过程为:滑坡体崩滑→弱碎屑化→水流掺混→淘蚀沟道→流动堆积。

(2)由滑坡体I和II在坡面上运动时的最大速度与实测沟道泥石流的速度可以看出:滑坡转化为坡面泥石流后,起始速度较快,但运动过程中阻力较大,能量损失大,冲出距离不远;沟道泥石流运动速

度由于沿程受沟道边界限制,加上运动过程中水的参与和颗粒物碎屑化有利于沟道泥石流运动,能量损失小,因此冲出距离较远。

(3)根据现场调查和计算,帽壳子滑坡型泥石流转化为沟道泥石流后形成黏性泥石流,流量约为 $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。利用Takahashi泥石流运动模型对帽壳子滑坡型泥石流转化为沟道泥石流后的冲出距离进行计算,计算值与实测值比较吻合。

### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社,1995.  
HU Guang-tao. Landslide Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House,1995.
- [2] 康志成,李焯芬,马藹乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004.  
KANG Zhi-cheng, LI Zhuo-fen, MA Ai-nai, et al. Research of Debris Flow in China[M]. Beijing: Science Press,2004.
- [3] 胡凯衡,丁明涛. 滑坡泥石流风险评估框架体系[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(2):26-30.  
HU Kai-heng, DING Ming-tao. Discussion on Framework of Landslide and Debris-flow Risk Assessments [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2013,24(2):26-30.
- [4] 陈远川,陈洪凯,唐红梅. 基于地貌演化阶段的公路泥石流危险性评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2013,33(5):45-51.  
CHEN Yuan-chuan, CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Hazard Assessment of Debris Flow Along Highway Based on Geomorphic Evolution Stages[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2013,33(5):45-51.
- [5] 马超,胡凯衡,赵晋恒,等. 震后泥石流的激发雨量特征——以汶川地震和集集地震后泥石流为例[J]. 灾害学,2013,28(4):89-94.  
MA Chao, HU Kai-heng, ZHAO Jin-heng, et al. Analysis of the Rainfall Parameters of Debris Flows After Strong Earthquake—Example of Debris Flows After Wenchuan Earthquake and Chichi Earthquake [J]. Journal of Catastrophology,2013,28(4):89-94.
- [6] 宋志,李宗亮,巴仁基,等. 贡嘎山东坡雅家埂河特大型泥石流动力学特征[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(4):416-419.  
SONG Zhi, LI Zong-liang, BA Ren-ji, et al. Kinetic Characteristics of Oversize Mud-rock Flow in Yajiangeng River of Eastern Gongga Mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2010,32(4):416-419.

- [7] 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.  
LI Shu-de. Formation Mechanism of the Landslide-type Debris Flow[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1998, 34(4): 519-522.
- [8] 李树德, 曾思伟. 论泥石流的另一种类型——滑坡型泥石流[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 66-71.  
LI Shu-de, ZENG Si-wei. On Another Type of Debris Flow—The Landslide-type Debris Flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 2(4): 66-71.
- [9] 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): 20-22.  
XIE Hong, WANG Cheng-hua, LIN Li-xiang. Landslide-induced Debris Flow Disaster and Its Characteristics in Biaoshuiyan Gully[J]. The Chinese Journal of Geology Hazard and Control, 2000, 11(3): 20-22.
- [10] SASSA K, WANG G H. Mechanism of Landslide-triggered Debris Flows: Liquefaction Phenomena Due to the Undrained Loading of Torrent Deposits[M]// JAKOB M, HUNGR O. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin: Springer, 2005: 81-104.
- [11] WANG G H, SASSA K, FUKUOKA H. Downslope Volume Enlargement of a Debris Slide-debris Flow in the 1999 Hiroshima, Japan, Rainstorm[J]. Engineering Geology, 2003, 69(3/4): 309-330.
- [12] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起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 Translation to Debris Flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 106-116.
- [13] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 滑坡型泥石流转化机制环剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 822-832.  
ZHANG Ming, HU Rui-lin, YIN Yue-ping, et al. Study of Transform Mechanism of Landslide-debris Flow with Ring Shear Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 822-832.
- [14] IVERSON R M. Debris-flow Mechanics[M]// AKOB M, HUNGR O. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Berlin: Springer, 2005: 105-134.
- [15] 四川省地质工程勘察院. 四川省地震灾区 2008 年重大地质灾害北川县西山坡滑坡群(泥石流)应急勘查报告[R]. 成都: 四川省地质工程勘察院, 2009.  
Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation. Emergency Exploration Report of Xishanpo Landslide Group (Debris Flow) in Beichuan County Which Is One of 2008 Major Geological Disasters in Earthquake Stricken Area of Sichuan Province[R]. Chengdu: Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, 2009.
- [16] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川 9·24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.  
TANG Chuan, LIANG Jing-tao. Characteristics of Debris Flows in Beichuan Epicenter of the Wenchuan Earthquake Triggered by Rainstorm on September 24, 2008[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 751-758.
- [17] 陈自生. 高位滑坡的运动转化形式[J]. 山地研究, 1992, 10(4): 225-228.  
CHEN Zi-sheng. Motion Transformation of High-locality Landslide[J]. Mountain Research, 1992, 10(4): 225-228.
- [18] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789-796.  
YU Bin. Research on the Calculating Density by the Deposit of Debris Flows[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789-796.
- [19] 康志成. 我国泥石流流速研究与计算方法[J]. 山地研究, 1987, 5(4): 247-259.  
KANG Zhi-cheng. A Velocity Research of Debris Flow and Its Calculating Method in China[J]. Mountain Research, 1987, 5(4): 247-259.
- [20] CUI P, HU K H, ZHUANG J Q, et al. Prediction of Debris-flow Danger Area by Combining Hydrological and Inundation Simulation Methods[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1): 1-9.
- [21] TAKAHASHI T. Estimation of Potential Debris Flows and Their Hazardous Zones; Soft Countermeasures for a Disaster[J]. Journal of Natural Disaster Science, 1981, 3(1): 57-89.
- [22] 马超, 胡凯衡, 崔鹏, 等. 汶川地震灾区坡面和沟谷泥石流冲出距离计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(6): 759-765.  
MA Chao, HU Kai-heng, CUI Peng, et al. Empirical Approaches to Calculating Runout Distance of Hillslope Debris Flow and Channelized Debris Flow in Wenchuan Earthquake Zone[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(6): 759-765.