



# 台风暴雨型泥石流启动机制

王一鸣<sup>1,2</sup>, 殷坤龙<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074  
2. 浙江省第十一地质大队, 浙江温州 325003

**摘要:** 台风暴雨型泥石流指由台风暴雨直接激发的泥石流. 通过回归分析发现泥石流集聚爆发时间与最大 1 h 雨强出现时间几乎同步, 传统的泥石流启动理论难以很好地解释这种现象. 在分析该类泥石流启动过程的基础上, 采用二维极限平衡分析模型从斜坡稳定性角度分析泥石流形成区斜坡在短历时强降雨过程中的破坏过程, 认为在台风影响前期斜坡处于地下水渗流阶段, 随着降水不断入渗坡体, 土体基质吸力逐渐减少, 有效应力下降. 起关键作用的是出现超大短历时雨强, 斜坡出现显著地表径流, 其切向拖拽力一定程度上增加了斜坡的下滑力, 从而加速其失稳破坏. 这较好地解释了上述同步启动现象. 最后, 通过统计分析发现流域支沟启动比例与泥石流启动效率相关.

**关键词:** 泥石流; 台风暴雨; 启动机制; 短历时雨强; 工程地质.

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000 - 2383(2018)S2 - 0263 - 08

收稿日期: 2018 - 03 - 11

## Initiating Mechanism of Typhoon-Triggered Debris Flow

Wang Yiming<sup>1,2</sup>, Yin Kunlong<sup>1\*</sup>

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China  
2. The 11th Geological Brigade of Zhejiang Province, Wenzhou 325003, China

**Abstract:** Typhoon-triggered debris flow refers to the debris flow that was triggered by typhoon storm. By regression analysis, it is found that debris flow multi-outbreak and the huge rainfall intensity were almost synchronizing, but traditional debris flow initiating theory can hardly explain this phenomenon. On the basis of analyzing the initiating process of typhoon-triggered debris flow, a two-dimension limit equilibrium analytic model is introduced to analyze the failure process of the slope in the forming area of the debris flow watershed in terms of stability, while the huge rainfall intensity in short duration come along. It is supposed that in the early stage of the typhoon influence, the slope was on the underground water seepage stage, as the water infiltrated into the slope, the matric suction in the soil reduced, and effective stress descended. The huge rainfall intensity in short duration played a pivotal role; notable overland runoff appeared on the slope surface, the sliding force of the slope was expanded by the shearing force of the overland runoff and the slope failed more quickly. It explains the synchronizing phenomenon well. Finally, through statistical analysis, it is found that the debris flow initiating efficiency is relevant to the proportion of the tributary ditch initiating.

**Key words:** debris flow; typhoon storm; initiating mechanism; rainfall intensity in short duration; engineering geology.

作为浙东南山区一类主要的地质灾害类型(王一鸣等, 2012), 泥石流是一种介于滑坡和水流之间的含泥、沙和石块的固液两相流体, 属于一类特殊洪流, 其形成与发展与水源因素密切相关. 另一方面, 我国是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家(陈镭等, 2010), 而台风对中国影响的最重要方面是台风所带

来的降水(王咏梅等, 2008), 因此在台风影响区域, 经常由台风暴雨引发泥石流灾害(冯杭建等, 2016). 鉴于此类泥石流的启动演化过程及其致灾具有特殊性, 因此将台风暴雨所直接诱发的泥石流定义为台风暴雨型泥石流.

泥石流启动机制研究是泥石流研究的核心问题,

**基金项目:** 浙江省地质矿产专项资金项目(No.2016008); 温州市 2016 年公益性科技计划项目(No.S20160010).

**作者简介:** 王一鸣(1981 -), 高级工程师, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治和研究. ORCID:0000-0002-8862-4971. E-mail: wzyym@139.com

\* **通讯作者:** 殷坤龙, ORCID:0000-0002-3547-1633. E-mail: yinkl@126.com

**引用格式:** 王一鸣, 殷坤龙, 2018. 台风暴雨型泥石流启动机制. 地球科学, 43 (Suppl. 2): 263-270.

也是泥石流灾害防治的基础。目前国内外科研人员针对泥石流启动机制主要以野外观测、实验及理论研究为主(贺拿等, 2013)。康志成等(2004)在中国泥石流启动形成机理方面进行了开创性研究,并在云南小江流域建立了东川泥石流观测研究站,积累了大量宝贵的观测资料。戴福初等(1999)在对火山岩风化坡残积土开展室内偏压固结不排水剪和偏压固结常剪应力排水剪实验的基础上,分析了暴雨滑坡泥石流的形成机理和过程;崔鹏(1991)通过模拟实验总结了底床坡度、水分状况和颗粒级配对泥石流启动的影响,分析了泥石流启动的机理及条件;Takahashi(1991)对发生在高山地区的一类由水体侵蚀作用而形成的泥石流进行了专项实验研究,并运用颗粒流理论解释了这类泥石流启动过程中颗粒间的相互作用与流态化现象;Gabet and Mudd(2006)研究认为孔隙度超过临界孔隙度,从而产生超孔隙水压力使得土体液化而转化成泥石流;戚国庆和黄润秋(2003)基于非饱和土力学理论,对降雨型泥石流的启动机理进行了研究。尽管学者们在泥石流启动机理研究方面已取得一定进展,但是针对台风暴雨型泥石流的启动机理及其规律尚缺乏系统性研究,传统的泥石流启动理论难以很好地解释台风暴雨型泥石流同步爆发现象。

本文在介绍台风暴雨型泥石流特征的基础上,结合现场取样试验,从斜坡稳定性角度分析在台风暴雨过程中泥石流形成区斜坡的破坏过程,探究短历时强降雨激发泥石流启动特征与机制。

## 1 台风暴雨型泥石流特征

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省东南部乐清市的北部中低山区(局部位于永嘉县北部山区),行政上隶属于温州市,地处北纬  $28^{\circ}20'57.3''\sim 28^{\circ}27'03.4''$ ,东经  $120^{\circ}56'13.9''\sim 121^{\circ}04'21.0''$ ,东西长为 13.2 km,南北长为 11.4 km,总面积为 149.9 km<sup>2</sup>。

地貌上属括苍山脉南支(称雁荡山脉),以中低山为主,总体呈北东—南西走向,最高点海拔 1 057.1 m(百岗尖),最低点位于河谷平原,海拔高程约为 40 m。区内群山叠嶂,溪流潺潺,所在的大荆溪流域面积为 330 km<sup>2</sup>,主流长约为 32 km,平均流量为 13.83 m<sup>3</sup>/s,由西向东注入东海。

地质构造上属华南褶皱系浙东南褶皱带之温

州—临海拗陷北部,永嘉火山构造洼地的东部,分布了雁荡山破火山构造,褶皱不发育,断裂构造极为发育,区域地壳稳定。全区被下白垩统火山碎屑岩大面积覆盖,山体中上部大面积出露燕山晚期侵入岩,以斑状石英正长岩和碱长花岗斑岩为主。

气象上属中亚热带海洋型季风气候,四季分明,雨量充沛,沿海平原地区年平均气温为 17.9°C,海拔每升高 100 m,平均气温下降 0.55°C。年平均降雨量为 1 763.4 mm,降雨呈双峰型,即盛夏和冬季相对少雨,梅雨期和台汛期雨量充沛(图1)。

据余贞寿(2014)统计,1951—2012年间共有400个台风形成,其中影响温州的台风有185个,占比46.2%。由于温州三面环山、一面临海的特殊地形,导致台风降水量分布不均,主要存在两个降水极值中心,分别位于乐清、永嘉北部交界地区(即研究区附近)和苍南、泰顺、文成、平阳4县交界地区。1951—2012年间观测到的最大过程降水量排名前3位分别为:泰顺县九峰为1 249.7 mm(2009年第8号台风“莫拉克”)、乐清市龙西乡砩头为908.5 mm(2004年第14号台风“云娜”)和永嘉县鹤盛乡黄坑为896.6 mm(2005年第5号台风“海棠”)。同期的1 h最大降水量前3位分别为:乐清市龙西乡山岙头为300 mm(1971年第23号台风“贝芙”)、平阳县维新乡朝阳231 mm(2005年第13号台风“泰利”)和文成县东龙乡龙斗为219.4 mm(2005年第5号台风“海棠”)。

### 1.2 台风暴雨型泥石流特征

研究区所在的温州市近30年来有记载的泥石流活动事件有258处。具有以下特征:一是在空间分布上,内陆中、低山区的泥石流分布密度显著高于沿海丘陵区,分布密度最大的是瓯海区,达7.0条/(100 km<sup>2</sup>),其次在乐清市,分布密度达5.3条/(100 km<sup>2</sup>);二是泥石流规模小。主要分布在溪沟的两侧支沟,沟谷汇水面积接近80%介于0.01~1.00 km<sup>2</sup>。相应地,泥石流规

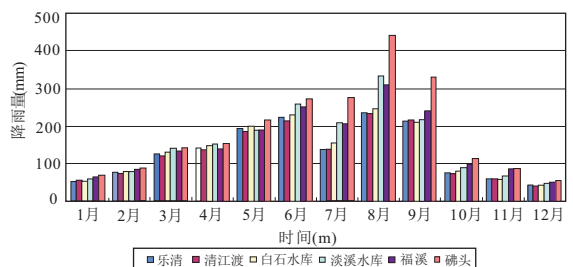


图1 研究区周边雨量站 1956—2002 年月平均降雨量  
Fig.1 Average monthly rainfall during 1956—2002 from rain-gauge stations near the study area

模一般也较小,堆积方量普遍小于 10 000 m<sup>3</sup>,属小型泥石流;三是沟谷地形高陡,纵比降有 90%以上介于 100‰~500‰,介于 200‰~400‰ 的沟谷占 50%以上;四是爆发频率低,近三十年尚未发现重复爆发的泥石流沟谷,属低频或极低频泥石流;五是泥石流爆发时间极不均匀,主要在台风暴雨期集聚爆发,1999、2004、2005、2010 和 2016 年这 5 个台风严重影响年份所爆发的泥石流数即达到 168 条,占总数的 65.1%。

研究区内的泥石流都在 2004 年第 14 号“云娜”台风影响期间发生。当时受超强降雨激发(硃头雨量站所记录的过程雨量达 916.1 mm,1 h 最大雨强达 95.6 mm),研究区内群发泥石流 26 处(图2),分布密度达 17.3 条/(100 km<sup>2</sup>)。泥石流对位于沟口和堆积扇上的人员和建筑物造成了严重冲击,导致了 42 人死亡或失踪。

## 2 泥石流启动与短历时雨强的关系

### 2.1 超大短历时雨强导致泥石流集群式启动

笔者曾利用近 20 a 来 4 次群发性泥石流事件中代表性雨量站资料对浙东南山区泥石流形成的临界雨量组合进行了统计分析,认为可以由过程雨量(24 h 雨强)与激发雨强(1 h 雨强)构成区域上预测泥石流爆发的临界雨量组合(王一鸣等,2011),激发雨强为 60 mm/h。

进一步的研究发现,在台风暴雨超越临界雨量组合的情况下,泥石流启动时段与短历时超大雨强的出现密切相关。研究区所在的温州市近 20 年来共发生单次超过 10 处的群发性泥石流事件4次,对

这4次泥石流群发时间(源于文字记录与访问亲历者)与最大 1 h 雨强出现时间进行回归分析(图3),发现泥石流集聚爆发时间与最大 1 h 雨强出现时间几乎同步。以研究区内 2004 年第 14 号“云娜”台风诱发的 26 处泥石流为例,据多位灾害目击或亲历者证实,

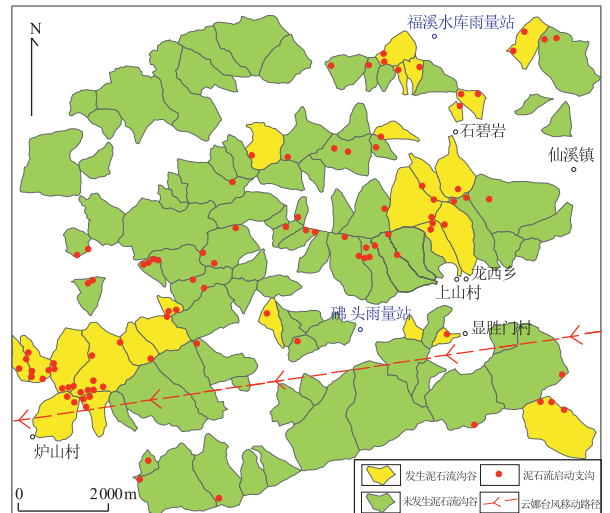


图 2 研究区沟谷及泥石流分布

Fig.2 Distribution of the debris flow gullies in study area

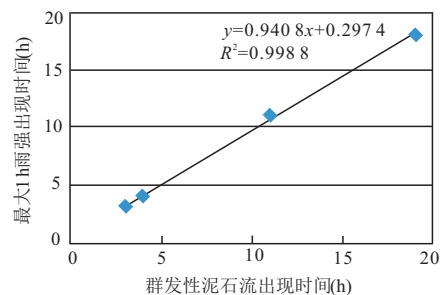


图 3 群发性泥石流与最大 1 h 雨强出现时间回归分析  
Fig.3 Timing regression analysis of debris flow multi-outbreak and the maximum 1 h raininess

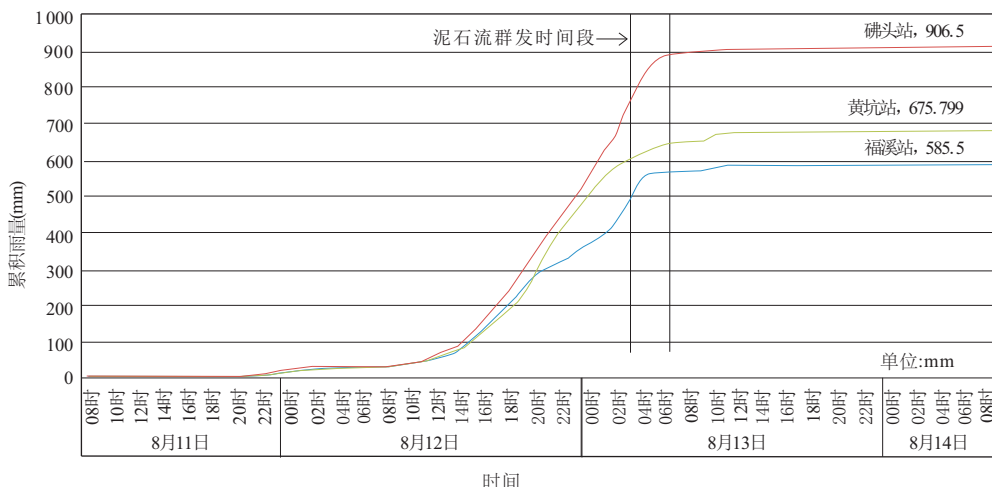


图 4 2004 年第 14 号台风“云娜”过程雨量与泥石流群发时间对比

Fig.4 Timing comparison between rainfall precipitation and debris flow multi-outbreak during the 14th typhoon “Rananim” in 2004

泥石流均发生于凌晨 3 点至 6 点的时间段，这与该区域出现超大短历时 (1 h) 雨强的时间段基本吻合 (图4)。又如 2016 年 9 月 15 日在研究区西南约 150 km 的泰顺县，当时由第 14 号台风“莫兰蒂”诱发 22 处群发性泥石流，几乎都在超大 1 h 雨强出现的时间段集中爆发。再如 1999 年 09 号热带风暴导致瓯海区、鹿城区、永嘉县大范围爆发泥石流 64 处以及 2005 年 13 号台风“泰利”导致文成县西坑一带群发泥石流 11 处，泥石流均爆发于 1 h 雨强最大时段。

泥石流爆发时段与超大 1 h 雨强的出现时间高度吻合，说明超大短历时 (1 h) 雨强是台风暴雨型泥石流的直接激发因素。对于浙江省同类泥石流的分维研究也佐证了上述结论，1 h 雨强的分维值比 24 h 雨强更小，说明其对泥石流的控制作用更强 (徐毅青和陈华, 2016)。

### 2.2 泥石流启动与短历时雨强的统计关系

不同短历时雨强，其激发泥石流启动的能力也存在区别 (图5)。研究区内雨强介于 60~70 mm/h 范围的区域面积为 91.1 km<sup>2</sup>，泥石流启动数为 40 处，泥石流启动密度为 0.44 处/km<sup>2</sup>；雨强介于 70~90 mm/h 范围的区域面积为 58.0 km<sup>2</sup>，泥石流启动数为 55 处，泥石流启动密度为 0.95 处/km<sup>2</sup>。70~90 mm/h 雨强区域泥石流启动密度是 60~70 mm/h 雨强区域的 2.2 倍，说明在降雨强度超过区域泥石流临界雨量的情况下，随着激发雨强 (1 h 雨强) 增大，泥石流启动密度显著增加。

对于不同坡度的支沟斜坡，其不同 1 h 雨强激发下启动泥石流数量与密度也明显不同 (图6)。对于坡度小于 20° 的支沟，区域内不存在泥石流启动现象，说明坡度 <20° 的支沟极不易启动泥石流；对于坡度范围在 20°~35° 的支沟，70~90 mm/h 雨强范围内泥石流启动密度是 60~70 mm/h 雨强范围的 3.0 倍；而对于 35° 以上的陡斜坡，二者启动密度相当，60~70 mm/h 雨强范围内泥石流启动密度是 70~90 mm/h 雨强范围的 1.1 倍。

不同短历时雨强所启动支沟的坡度也明显不同。60~70 mm/h 雨强启动泥石流的坡度均值为 34.2°，70~90 mm/h 雨强启动泥石流坡度均值为 31.1°。

总体上，短历时雨强大小与泥石流的启动密度呈正相关，随着短历时雨强的增大，其激发启动泥石流的能力也相应提高。对于 20°~35° 坡度范围的斜坡，70~90 mm/h 雨强启动能力明显强于 60~70 mm/h

雨强；而对于更陡的斜坡 (35° 以上)，则超过 60 mm/h 雨强的启动能力大致相当。

### 3 台风暴雨型泥石流启动过程机制

前人对山坡型泥石流成因机理进行了大量研究，认为暴雨入渗所导致的岩土体饱和是斜坡失稳启动的重要诱因 (王士革, 1999; 宋志等, 2016; 唐扬等, 2017; 张泰丽等, 2017)。经典的泥石流启动机制研究认为，暴雨入渗导致土体中基质吸力减少，孔隙水压力升高导致有效压力减少乃至局部液化，先后经历降雨入渗饱和、排水剪胀破坏、破裂面扩展、应变软化、加速解体直至流动等阶段，启动形成泥石流。对台风暴雨型泥石流而言，其启动发展经历了上述类似过程，但是上述理论尚不能很好地解释超大短历时雨强出现与该类泥石流集群式启动在时间上严格同步以及该类泥石流绝大部分由微型沟或负地形斜坡启动等现象。

本文选取研究区内的两条典型泥石流沟，从斜

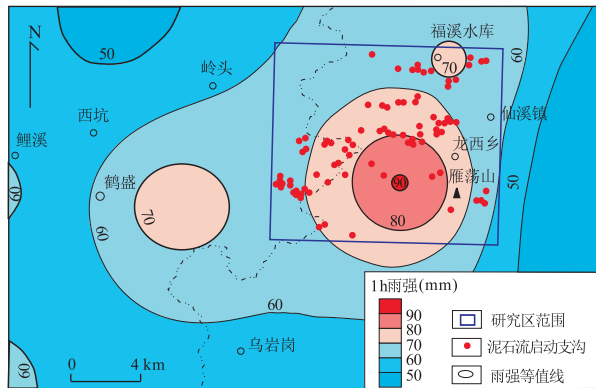


图 5 2004 年第 14 号台风“云娜”1 h 雨强等值线与泥石流启动支沟分布图

Fig.5 Isopleth of 1 h rainfall intensity during the 14th typhoon “Ranim” in 2004 and the distribution of debris flow initiating tributary drains

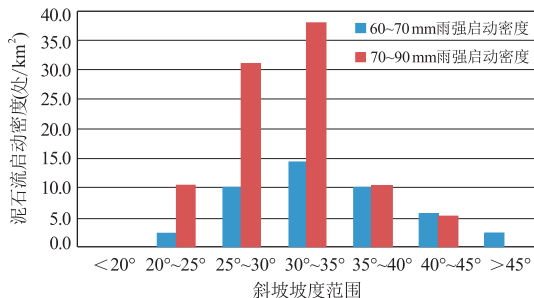


图 6 2004 年第 14 号台风“云娜”不同 1 h 雨强与支沟坡度范围泥石流启动密度图

Fig.6 Initiating density of debris flow in different gradients of the slope and 1 h rainfall intensities during the 14th typhoon “Ranim” in 2004

坡稳定性角度分析在台风暴雨过程中泥石流形成区斜坡的破坏过程, 探究短历时强降雨激发泥石流启动机制. 乐清市龙西乡上山村泥石流沟是 2004 年“云娜”台风影响期间造成灾害最重的泥石流沟谷. 永嘉县鹤盛乡炉山村泥石流具有汇水面积小, 地形上陡下缓, 大面积出露侵入岩以及老泥石流堆积显著等台风暴雨型泥石流的典型特征.

### 3.1 台风暴雨型泥石流启动过程

研究区泥石流均发生在山间溪流的两侧冲沟, 这些冲沟平面形态多呈树枝状, 一般由数条支沟汇聚形成主沟. 台风暴雨型泥石流启动形成一般经历两个阶段:

第一个阶段是斜坡失稳阶段. 形成区斜坡发生崩滑型失稳启动泥石流, 根据启动部位的不同可分为两类: 一类较为普遍, 是沟源地带沟床斜坡发生浅表滑坡或坡面泥石流启动支沟泥石流; 另一类是谷坡斜坡受侵蚀产生滑塌启动支沟泥石流, 上述两类启动方式都是支沟斜坡 (包括沟床和谷坡) 固体物质在强降雨激发下发生失稳破坏并向下运动启动泥石流, 均属于重力地质作用. 失稳的固体物质在随地表水流向下游运移过程中发生解体, 与洪水搅拌混合运动, 不断铲刮、掀揭和卷入沿程松散固体物质.

第二个阶段是失稳物质汇集阶段. 支沟的崩滑物质在重力和惯性作用下不断向下运动, 直至支沟与主沟的交汇处. 若主沟与支沟交汇处地形陡峻或支沟与主沟交汇角度较小, 则支沟泥石流容易直接汇入主沟洪流, 形成主沟泥石流. 若交汇处较为平缓或支沟与主沟交汇角较大, 固体物质容易在主、支沟交汇处停积雍高形成堆积坝体. 堆积坝体结构一般较松散且阻碍主沟洪水流动, 因而极易被洪水冲刷并发生溃决, 与洪水混合后形成主沟泥石流, 再次启动并向下游运移 (图7).

### 3.2 台风暴雨型泥石流启动模型

采用单宽为 1 m, 滑体大致等厚、滑床相对隔水的二维极限平衡分析模型, 分别构建泥石流启动之前泥石流形成区斜坡稳定性计算模型. 将台风暴雨期斜坡稳定发展划分为两个状态: 地下水渗流状态和地表径流状态.

地下水渗流状态是台风暴雨过程的常规工况, 降落在斜坡上的降水以入渗为主, 没有显著地表径流, 入渗的降水使得斜坡岩土体富水性增加乃至局部饱水, 产生动水压力, 斜坡的饱水程度与降雨强度和um时间相关 (图8). 在局部饱水工况下, 重力计算公

式为:

$$G_1 = \gamma(h - h_0) + (\gamma_s - \gamma_w)h_0, \quad (1)$$

式中:  $h$ . 滑体铅直厚度 (m);  $h_0$ . 滑体饱水部分铅直厚度 (m);  $\gamma$ . 滑体天然重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $\gamma_s$ . 滑体饱和重度 (kN/m<sup>3</sup>);  $\gamma_w$ . 水体重度 (kN/m<sup>3</sup>).

此时斜坡稳定性计算公式为:

$$K_1 = \frac{G_1 \cos \alpha \tan \varphi + C \sec \alpha}{G_1 \sin \alpha + h_0 \gamma_w \sin \alpha}, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ . 滑动面倾角 (°);  $\varphi$ . 滑动面摩擦角 (°);  $C$ . 滑动面粘聚力 (kPa).

当出现超大短历时雨强, 斜坡地表水体来不及下渗, 出现显著地表径流, 此时斜坡处于地表径流状态 (图8), 地表水体的剪切力进一步加剧斜坡失稳. 此时重力计算公式为:

$$G_2 = \gamma(h - h_0) + (\gamma_s - \gamma_w)h_0 + \gamma_w h_1, \quad (3)$$

式中:  $h_1$ . 滑体表部径流深度 (铅直高度)(m);  $h_1$  可由下式计算:

$$h_1 = \frac{[nx(P_i \cos \alpha - i_p)]^{0.6}}{J^{0.3}}, \quad (4)$$

式中:  $n$ . 曼宁系数;  $x$ . 滑坡距离坡顶的斜距 (m);  $P_i$ . 降雨强度 (mm/h);  $i_p$ . 平均入渗率 (mm/h); 按照刘正风 (2010) 研究得到的回归方程计算得到:  $J$ . 纵比降. 斜坡稳定性计算公式为:

$$K_2 = \frac{G_2 \cos \alpha \tan \varphi + C \sec \alpha}{G_2 \sin \alpha + \gamma_w h_0 \sin \alpha + \gamma_s h_1 \tan \alpha}, \quad (5)$$

### 3.3 台风暴雨型泥石流启动机制

分别在所选取的两条典型泥石流沟形成区斜坡周边采取系列土样, 测试并选定其物理力学参数如表1所示.

将上述参数代入公式 (2) 和公式 (5), 得到各典型泥石流沟在台风暴雨期不同状态下的稳定性动态变化特征 (图9), 由此可以得出台风暴雨型泥石流启动机制如下:

表 1 典型泥石流形成区斜坡土体参数表

Table 1 Parameters of the soil in the typical debris flow forming slopes

泥石流位置	$\gamma$	$\gamma_s$	$\gamma_w$	$h$	$\alpha$	$C$	$\varphi$
	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m)	(°)	(kPa)	(°)
上山村	17.0	17.7	10.0	2.8	40.5	18.8	13.9
炉山村	17.0	17.7	10.0	2.6	39.2	16.2	19.9



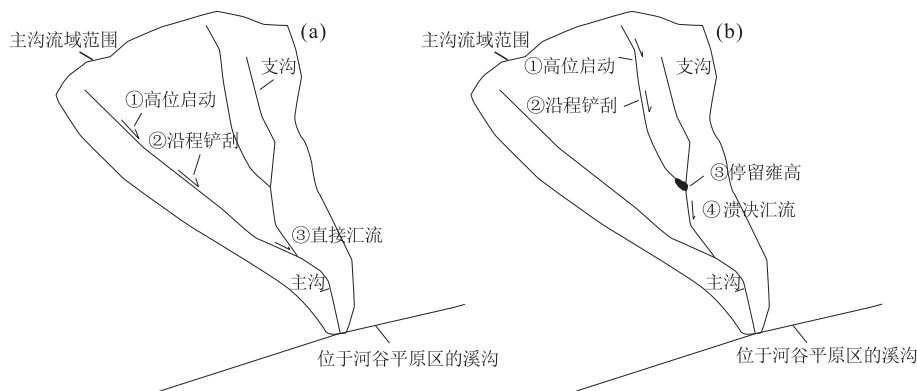


图 7 泥石流启动汇集入主沟方式

Fig.7 The manner of initiated debris flow influx into tap

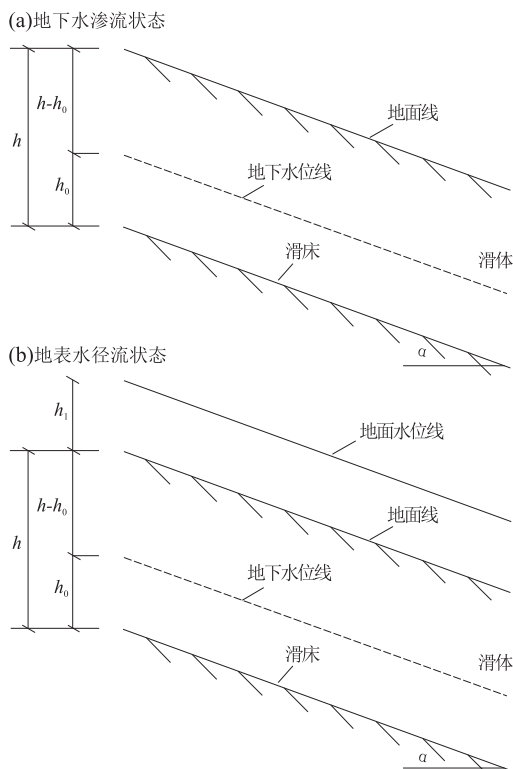


图 8 泥石流形成区斜坡二维极限平衡分析模型

Fig.8 Two-dimension limit equilibrium analytic model in debris flow forming area

在台风影响前期,出现断续或持续降水,随着降水不断入渗坡体,斜坡富水性不断增加,土体基质吸力逐渐减少。

随着降雨持续,斜坡局部饱水,地下水位随降雨进一步入渗而逐渐升高,孔隙水压力上升,斜坡岩土体有效应力下降。

若没有超大雨强出现,斜坡处于地下水渗流状态,其稳定性与地下水位的高低呈负相关,当地下水位较高时发生失稳破坏。表现在区域上就是大部分斜坡保持稳定状态,仅有个别支沟启动泥石流。

一旦出现超大短历时雨强,降雨量远超地表水

入渗量,导致斜坡表部出现显著的地表径流,则斜坡稳定性发展到地表径流状态。地表径流的切向拖拽力一定程度上增加了斜坡的下滑力,加速其破坏失稳。表现在区域上就是短历时强降雨影响范围内大量泥石流集群式启动。

考虑到台风过程中斜坡表部出现显著地表径流的时间在局部地域大体同步,从时间一致性上也可以印证短历时强降雨所导致的显著地表径流在泥石流启动过程中发挥了关键性作用。同时,上述启动机制也解释了该类型泥石流绝大部分由微型沟或负地形斜坡启动,而正地形斜坡鲜有泥石流启动的现象。

## 4 台风暴雨型泥石流启动效率

### 4.1 支沟启动数量与效率的关系

支沟一旦启动泥石流,在向下运移并汇入主沟的过程中并不一定能激发主沟形成泥石流。对研究区在 2004 年第 14 号台风“云娜”影响期间存在支沟启动泥石流的 56 条主沟进行了统计(表 2),流域内一条或数条支沟中仅有 1 条启动泥石流的主沟,其最终形成泥石流的比例仅为 41.9%;流域内有 2 条支沟同时启动泥石流的主沟,其最终形成泥石流的比例提高到 47.1%;对于流域内有 3 条及以上支沟启动的主沟最终形成泥石流的比例更高,达到 62.5%。这说明主沟流域内同时启动泥石流的支沟数量越多,其启动汇聚的固体物质量也明显增加,最终形成泥石流的概率就越高。

### 4.2 支沟启动比率与效率的关系

对研究区内的 108 条沟谷进行统计,除去 52 条沟谷不存在泥石流启动外,其余 56 条存在支沟启动泥石流的沟谷中,支沟启动比率对主沟最终形成泥石流的效率十分重要(表 3)。

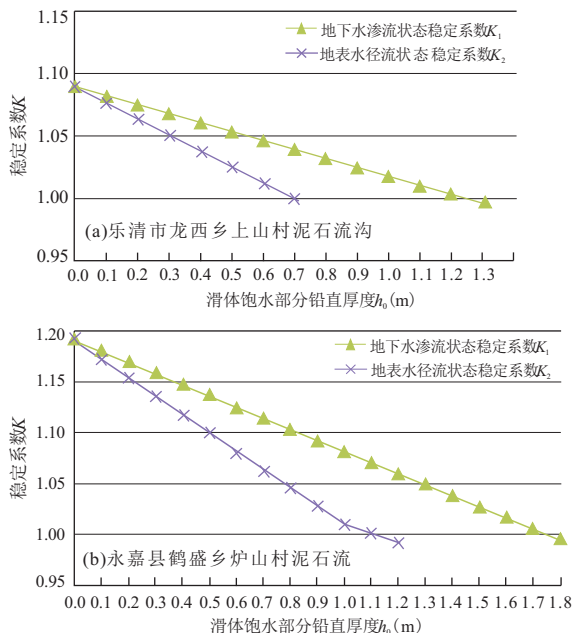


图 9 泥石流沟形成区斜坡稳定性与地下水水位动态变化关系  
Fig.9 Relationship between the dynamic change of underground water level and the forming slope stability of the debris flow

表 2 支沟启动数量与主沟形成泥石流比例关系

Table 2 Proportional relation between the number of initiating tributary drain and that of debris flow in the tap drain

启动泥石流的支沟数量	沟谷数量 (条)	主沟形成泥石流数量 (条)	沟谷形成泥石流比例 (%)
1 条	31	13	41.9
2 条	17	8	47.1
3 条及以上	8	5	62.5
合计	56	26	46.4

表 3 支沟启动比率与主沟形成泥石流效率关系

Table 3 Relation between the initiating ratio of the tributary drain and the forming efficiency of debris flow in tap drain

流域内启动泥石流支沟占总支沟数的比率 (%)	形成泥石流主沟数量 (条)	未形成泥石流主沟数量 (条)	主沟形成泥石流效率 (%)
0	0	52	0
(0, 20)	2	11	15.4
[20, 40)	12	7	63.2
[40, 60)	9	9	50.0
[60, 100]	3	3	50.0
合计	26	82	24.1

对于泥石流启动支沟比率在 20% 以内的主沟, 其泥石流的形成比例仅为 15.4%; 对于泥石流启动支沟比率超过 20% 的主沟, 其泥石流形成比例显著增加 ( $\geq 50\%$ )。这说明主沟形成泥石流需要一定的固体物质量, 当启动支沟比率在 20% 以下时, 沟谷的物质量较少, 发生泥石流的效率显著降低; 而当启动支沟比率提高到 20% 以上时, 沟谷内固体物质量显著提高, 因而主沟形成泥石流的效率也相应显著提高。

值得注意的是, 在泥石流启动支沟比率介于 20%~40% 时, 主沟形成泥石流的效率达到峰值

(63.2%), 这说明对研究区台风暴雨型泥石流而言, 主沟流域内有 20%~40% 支沟启动泥石流时的固液配比最易导致主沟形成泥石流。

### 5 结论

(1) 通过研究区及周边数次群发性泥石流的爆发特性看出, 台风暴雨过程中超大短历时雨强导致泥石流集群式启动, 且二者在时间上几乎同步。

(2) 研究了不同地形坡度与 1 h 雨强条件下的支沟泥石流启动特性。对于地形坡度小于 20° 的支沟, 不论降雨量是否超越临界雨强, 其启动泥石流的可能性小; 对于 20°~35° 以内的斜坡, 70~90 mm/h 雨强启动能力明显强于 60~70 mm/h 雨强; 而对于更陡的斜坡 (35° 以上), 则超过 60 mm/h 雨强的启动能力大致相当。

(3) 在分析台风暴雨型泥石流启动过程的基础上, 采用二维极限平衡分析模型从斜坡稳定性角度分析泥石流形成区斜坡在短历时强降雨过程中的破坏过程, 认为在台风影响前期斜坡处于地下水渗流状态, 随着降水不断入渗坡体, 土体基质吸力逐渐减少, 有效应力下降。起关键作用的是出现超大短历时雨强, 斜坡出现显著地表径流。地表径流的切向拖拽力一定程度上增加了斜坡的下滑力, 从而加速其失稳破坏。上述泥石流启动机制较好地解决了传统的泥石流启动理论难以解释台风暴雨型泥石流同步爆发现象的问题, 同时也解释了该类型泥石流绝大部分由微型沟或负地形斜坡启动, 而正地形斜坡鲜有泥石流启动的现象。

(4) 对台风暴雨型泥石流的启动效率进行了统计分析, 认为泥石流的启动不但与启动支沟数成正比, 而且与启动支沟与流域内支沟总数的比例也有重要的比例关系, 20%~40% 支沟启动泥石流时的固液配比最易导致主沟形成泥石流。

### References

Chen,L.,Xu,H.M.,Yu,H.,et al.,2010.Temporal and Spatial Variations in Precipitation of Typhoon Saomai (0608) before and after Its Landfall.*Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,34 (1):105–119(in Chinese with English abstract).

Cui,P.,1991.Experimental Study on Initiating Conditions and Mechanism of Debris Flow.*Chinese Science Bulletin*,36(21):1650–1652(in Chinese).

Dai,F.C.,Li,C.F.,Huang,Z.Q.,et al.,1999.Mechanism for Rainstorm-Induced Soil Slide-Debris Flows in Area with Volcanic Rock-

- Derived Soils. *Journal of Engineering Geology*, 7(2):147–153 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H.J., Zhou, A.G., Tang, X.M., et al., 2016. Development and Distribution Characteristics of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Regional Forecast. *Earth Science*, 41(12):2088–2099 (in Chinese with English abstract).
- Gabet, E.J., Mudd, S.M., 2006. The Mobilization of Debris Flows from Shallow Landslides. *Geomorphology*, 74(1–4):207–218. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.013>
- He, N., Chen, N.S., Zeng, C., 2013. Current Situation and Tendencies of Debris Flow Initiation Mechanism. *Journal of Catastrophology*, 28(1):121–125 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Z.C., Li, C.F., Ma, A.N., et al., 2004. Study on Debris Flow in China. Science Press, Beijing, 38–62 (in Chinese).
- Liu, Z.F., 2010. Formulation Analyses of Rainfall Intensity and Steady Infiltration Rate. *Straits Science*, (10):142–144 (in Chinese).
- Qi, G.Q., Huang, R.Q., 2003. Study on Genetic and Mechanical Analysis of Debris Flow Based on Unsaturated Soils Mechanics. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14(3):12–15 (in Chinese with English abstract).
- Song, Z., Deng, R.G., Ni, H.Y., et al., 2016. Mechanism and Characteristics of the Formation of Debris Flow in Xiongjiaogou of Shimian, Sichuan. *Geological Science and Technology Information*, 35(3):216–220 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y., Yin, K.L., Wang, Y., et al., 2017. The Landslide Rain Infiltration Based on the Improved Mein-Larson Mode. *Earth Science*, 42(4):634–640 (in Chinese with English abstract).
- Takahashi, T., 1991. Debris Flow. Monograph of IAHR. AA Balkema, Rotterdam.
- Wang, S.G., 1999. Hazard of Debris Flow on Slope and Its Control. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 10(3):46–51 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.M., Ren, F.M., Li, W.J., et al., 2008. Climatic Characteristics of Typhoon Precipitation over China. *Journal of Tropical Meteorology*, 24(3):233–238 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.M., Yuan, M.H., Yin, K.L., et al., 2011. Analysis on the Critical Rainfall for the Outbreak of Debris Flow in Southeast Mountain Area of Zhejiang Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 22(3):21–26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.M., Yin, K.L., Gong, X.F., et al., 2012. Debris Flow Distribution in Mountainous Southeastern Zhejiang. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 23(2):11–16 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y.Q., Chen, H., 2016. The Fractal Characteristics of Low Frequency Debris Flows in the Typhoon Rainstorm Region. *Bulletin of Science and Technology*, 32(4):55–58 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z.S., 2014. Atlas of Typhoon Storm Raininess in Wenzhou. China Meteorological Press, Beijing, 3–4 (in Chinese).
- Zhang, T.L., Zhou, A.G., Sun, Q., et al., 2017. Characteristics of the Groundwater Seepage and Failure Mechanisms of Landslide Induced by Typhoon Rainstorm. *Earth Science*, 42(12):2354–2362 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈镭, 徐海明, 余晖, 等, 2010. 台风“桑美”(0608) 登陆前后降水结构的时空演变特征. *大气科学*, 34(1):105–119.
- 崔鹏, 1991. 泥石流起动条件及机理的实验研究. *科学通报*, 36(21):1650–1652.
- 戴福初, 李焯芬, 黄志全, 等, 1999. 火山岩坡残积土地区暴雨滑坡泥石流的形成机理. *工程地质学报*, 7(2):147–153.
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2016. 浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报. *地球科学*, 41(12):2088–2099.
- 贺拿, 陈宁生, 曾超, 2013. 泥石流起动机理研究现状及趋势. *灾害学*, 28(1):121–125.
- 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等, 2004. 中国泥石流研究. 北京: 科学出版社, 38–62.
- 刘正风, 2010. 降雨强度与稳定入渗率关系的公式化分析. *海峡科学*, (10):142–144.
- 戚国庆, 黄润秋, 2003. 泥石流成因机理的非饱和土力学习理论. *中国地质灾害与防治学报*, 14(3):12–15.
- 宋志, 邓荣贵, 倪化勇, 等, 2016. 四川石棉熊家沟泥石流形成机理与成灾特征分析. *地质科技情报*, 35(3):216–220.
- 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等, 2017. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型. *地球科学*, 42(4):634–640.
- 王士革, 1999. 山坡型泥石流的危害与防治. *中国地质灾害与防治学报*, 10(3):46–51.
- 王咏梅, 任福民, 李维京, 等, 2008. 中国台风降水的气候特征. *热带气象学报*, 24(3):233–238.
- 王一鸣, 袁民豪, 殷坤龙, 等, 2011. 浙东南山丘区泥石流爆发的临界雨量分析. *中国地质灾害与防治学报*, 22(3):21–26.
- 王一鸣, 殷坤龙, 龚新法, 等, 2012. 浙东南山区泥石流分布规律. *地质灾害与环境保护*, 23(2):11–16.
- 徐毅青, 陈华, 2016. 台风暴雨区低频泥石流的分形特征. *科技通报*, 32(4):55–58.
- 余贞寿, 2014. 温州台风暴雨雨强图集. 北京: 气象出版社, 3–4.
- 张泰丽, 周爱国, 孙强, 等, 2017. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制. *地球科学*, 42(12):2354–2362.