

# 某地区地质灾害的发生机理及防治措施

邵庆辉

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年3月17日; 录用日期: 2022年4月21日; 发布日期: 2022年4月29日

## 摘要

近年来, 我国自然灾害频发, 特别是地震、洪涝、干旱等较大灾害多次发生, 对当地的公共安全构成严重威胁。此外, 我国局部山区地质环境复杂多样, 气候变化较大, 考虑降雨条件激发地质灾害的动态耦合作用, 本文以动态风险评估技术为指导, 构建地质灾害动态风险预警模型, 建立原型系统, 实现区域层面的地质灾害动态风险评估与应急预警, 为针对性地开展应急防灾提供可行的技术支持。与此同时, 地质灾害综合防治相关的调查评价、机理研究和监测预警是不容忽视的重要工作, 为地质灾害应急体系的重要环节, 也是指导科学防灾的关键阶段性过程。在探索降雨激发滑坡、泥石流的作用机制及灾变效应的基础上, 深入开展系统性工程处置和监测预警等防灾对策研究。

## 关键词

地质灾害, 滑坡, 应急预警, 防治对策

# The Occurrence Mechanism of Geological Disasters and Countermeasures in a Certain Area

Qinghui Shao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Mar. 17<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In recent years, natural disasters in China have occurred frequently, especially large disasters such as earthquakes, floods and droughts, which have posed a serious threat to local public safety. In addition, the geological environment of local mountainous areas in China is complex and diverse, and climate change is large. Considering the dynamic coupling effect of rainfall conditions to

stimulate geological disasters, this paper takes dynamic risk assessment technology as the guide, constructs a dynamic risk early warning model of geological disasters, establishes a prototype system, realizes dynamic risk assessment and emergency early warning of geological disasters at the regional level, and provides feasible technical support for targeted emergency disaster prevention. At the same time, the investigation and evaluation, mechanism research and monitoring and early warning related to the comprehensive prevention and control of geological disasters are important tasks that cannot be ignored, an important link in the emergency response system for geological disasters, and a key stage process to guide scientific disaster prevention. On the basis of exploring the mechanism and catastrophic effect of rainfall to stimulate landslides and mudslides, we will carry out in-depth research on disaster prevention countermeasures such as systematic engineering disposal, monitoring and early warning.

## Keywords

Geological Hazards, Landslide, Emergency Warning, Prevention and Control Measures

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

降雨作用下, 滑坡、泥石流的并发性和群发性是山区地质灾害的基本特点之一。由于具有相似的地质环境条件和相同的降雨触发作用, 山区内滑坡、泥石流往往相伴而生, 常常出现并发和群发现象, 有些滑坡在失稳之后甚至直接启动转化成为泥石流, 相互间形成一个连续性过程[1] [2] [3]。根据全省泥石流综合研究以及地质环境通报等资料统计, 全省山区泥石流(含隐患)共计约 620 余处, 其中 80%以上是由滑坡或崩塌转化形成的, 所占比例相对较大, 而且以分布于浙东南火山岩地区为多, 常表现沟谷型稀性的水石流特征。相对而言, 滑坡转化形成泥石流是泥石流的主要类型之一, 为泥石流形成启动的主要方式, 研究其如何形成并进行有效防治是值得关注的技术性问题的。

地质灾害是指自然因素或人为活动引发的危害人民群众生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷、地面沉降等与地质作用有关的灾害[4]。地质灾害的发生主要受到地质、地貌、岩性、降水、土壤、植被等自然环境因素的影响, 随着经济快速发展、人口剧增, 地质灾害的威胁逐渐增大, 人类活动对地质灾害的影响愈加明显。目前, 地质灾害研究主要集中在发生机制、预测预报、监测预警、风险评估与防治等方面[5]。中国地质灾害种类繁多, 爆发频繁, 强度和规模居世界前列。2000~2012 年间共发生地质灾害 33.9 万起, 伤亡 45,381 人[6]。Iverson 使用 Richards 方程的简化形式评估不同情况下降雨入渗作用对滑坡的发生、时机、深度和加速度的影响, 探讨了不同时间尺度上山体滑坡响应降雨及相关的物理过程[7]。本文通过选择衢江区白坞泥石流作为研究对象, 进行泥石流基本特征评价及成因条件剖析, 开展降雨作用下滑坡转化形成泥石流的链式作用机制研究, 分析启动模式和确定预警判据, 探索其综合防治可行的技术方法[8] [9] [10]。

### 1.1. 基本情况

衢江区白坞泥石流位于白坞口村里白坞自然村西北侧山体冲沟处, 在 2011 年 6 月 19 日强降雨期间发生。本处泥石流的发生, 系冲沟上游斜坡表层松散岩土体在降雨入渗及地表水流的冲蚀作用下发生滑坡, 松散滑坡物质再在沟内汇集的大量集中地表水流的冲刷侵蚀和携卷作用下, 混杂土石流一泄而下,

从而引发泥石流地质灾害[11]。

## 1.2. 地质环境背景

研究区位于亚热带季风气候区,降水丰沛,多年平均降雨量在 1900 mm 以上,最大年降雨量 2495.1 mm (1983 年),年内 6~7 月中旬为梅雨期,7 月中旬~9 月中旬为台风雨期,期间雨量占全年降雨量的 70% 以上。

泥石流冲沟位于侵蚀剥蚀丘陵区,流域平面形态呈上宽下窄的近似“舌”状,标高在 155~260 m 之间,流域高差在 100~120 m 之间,沟谷切割深度在 50~100 m 之间;主沟较明显,近东西走向,狭长、陡直,相对高差约 70 m,水平长度约 240 m,平均纵坡降在 350‰,横断面呈“V”型,冲沟两侧山体相对高差在 50~100 m,斜坡坡度在 25°~40°,植被发育一般,下游沟口区标高相对高差在 5~15 m 之间,整体地势呈西北高东南低,地形坡度在 10° 以内,主要为村庄居住区。

本区地层岩性主要为下白垩统西山头组( $K_1x$ )凝灰岩以及第四系松散堆积物。山体斜坡组成岩性为灰黑色流纹质熔结凝灰岩,块状构造,出露呈中风化为主,节理裂隙发育一般,岩体结构完整性较好,局部区段节理裂隙发育较密集,岩体结构完整性较差,上部全-强风化层呈松散砂土夹粉质粘土状,厚度在 0.5~1.0 m 左右。山体表层覆盖灰褐色、土黄色含碎石粉质粘土,结构松散,可塑状,中等压缩性,碎石含量在 10%~25% 左右,粒径一般在 1~5 cm 左右,局部大者可达 5~15 cm 左右,厚度一般在 0.5~1.5 m 左右,地形坳沟地带厚度在 1.0~3.0 m 左右,下游沟口区地势较缓地带达 2.0~4.0 m。村庄前侧地势低缓地带分布全新统冲洪层,岩性为灰褐色、土黄色含砾砂粉质粘土,厚度在 3.0~5.0 m 之间[12] [13]。

## 2. 泥石流基本特征及评价

### 2.1. 分区基本特征

泥石流冲沟流域形态呈小流域封闭状,流域面积 0.025 km<sup>2</sup>,自后缘山体斜坡至冲沟下游沟口区,整体地势逐渐降低,冲沟位于山间峡谷中,呈狭长条带形,为泥石流的物源形成区和主要流通区,下游沟口区地势相对低缓和开阔地带泥石流松散固体物质堆积。整体而言,泥石流区域受一定的地形制约,流域周界较为清晰,分区有一定的层次感。

#### 1) 形成区

泥石流形成区位于主沟上游标高 230~240 m 范围,水平长度 20~30 m,相对高差 10~15 m。本次泥石流发生的“2011.6.19”强降雨期间,形成区表层松散岩土体发生滑坡(图 1(a)),滑塌区宽度 15~25 m,坡面斜长 20~30 m,平面面积 300~350 m<sup>2</sup>,滑体厚度 1~3 m,滑坡物质方量 450~500 m<sup>3</sup>,主滑方向 140°,为小型浅层岩土质滑坡,系表层松散岩土体(以含碎石粉质粘土夹砂土等为主)沿其内部应力剪切薄弱面或与下伏基岩接触面发生向前缘临空方向的剪切滑移所致(图 1(b)),为泥石流形成的启动物源。目前形成的滑坡区仍分布松散岩土体厚度 1.5~3.0 m,结合滑塌区宽 15~25 m,坡面斜长 20~30 m,平面面积 300~400 m<sup>2</sup>,估算隐患体方量 550~650 m<sup>3</sup>,其发生滑坡可构成再次形成泥石流的启动物源。

#### 2) 流通区

冲沟流通段标高在 170~230 m 之间,相对高差在 60 m 左右,沟道狭长,较为顺直,水平长度 160 m,平均纵坡降在 350‰左右,横断面呈“V”型,冲沟两侧山体相对高差在 50~100 m,斜坡坡度在 25°~40°左右。形成区发生滑坡以后夹杂着大量地表水流顺冲沟向下方流通,大量泥石流物质自上游形成区顺沟向冲沟下游及沟口区流通和排泄,冲沟内部主要以流通为主,局部铲刮和携卷。泥石流物质主要为松散碎石夹砂土等,泥砂多被后期的洪流携带走,杂乱无定向性和分选性,可见流体性质主要为稀性的碎(块)石夹泥砂等混合物。



**Figure 1.** Overview of landslides formed upstream  
**图 1.** 上游形成滑坡概貌

### 3) 堆积区

堆积区标高在 155~170 m 之间, 相对高差在 5~15 m, 整体地势呈西北高东南低, 地形坡度在 10° 以内, 主要为村庄集中居住区, 由于地形的开阔以及地势高差的降低, 区内主要以堆积为主。

综上所述, 白坞泥石流属于由特大暴雨激发的、低频性的、一次性爆发规模为小型的、稀性的、沟谷型泥石流, 从形成启动机制上分析属于滑坡转化型泥石流[14]。

## 2.2. 易发程度评价

由于有利的地形地貌条件存在, 结合上游形成区松散岩土体和滑坡隐患等不良地质体的分布, 在大暴雨甚至特大暴雨激发作用下, 大量汇聚的集中地表水流浸润、冲蚀形成区松散固体物源而致失稳发生滑坡, 再大量地表水流夹杂着松散物质沿程流通、搬运甚至携卷, 从而沿沟冲泄而下启动发生泥石流, 依据泥石流勘查规范及泥石流易发程度综合评价表, 得知属于低易发泥石流。

## 2.3. 危害范围及程度

泥石流活动危险区范围包括形成区、流通区和堆积区, 而堆积区是泥石流主要的致灾部位。本处冲沟形成区仍残留滑坡隐患体和分布松散岩土体物质, 强降雨作用下再次发生滑坡可又一次形成启动泥石流, 危害程度等级属较大级。

## 3. 滑坡转化形成启动泥石流的链式作用模型

滑坡转化形成启动泥石流是指在强降雨作用下, 形成区斜坡松散岩土体在雨水或地表水流的浸润饱和及冲蚀作用下, 出现强度降低而致液化失稳发生滑坡, 松散物质夹杂着大量地表水流沿着冲沟向下方流通和排泄, 以此形成启动泥石流的过程[15]。

### 岩土体失稳平衡关系方程

根据分析, 堆积或分布于斜坡或沟道上的松散岩土体同时受到失稳切向力和抗滑力的作用[16], 建立其物理力学模型见图 2(a), 并做相关基本假定如下:

- 1) 坡体稳定性问题属平面应变问题;
- 2) 潜在滑移面(即下部存在的性质差异面或应力薄弱面)上的稳定系数是一定值, 由抗滑力和下滑力的比值来定义, 而且所有荷载的合力作用线均作用于松散岩土体的形心;

3) 降雨大于岩土体入渗率时, 表层松散岩土体达到饱和或过饱和后逐渐向非饱和带垂直下渗, 并且产生地表径流, 故而只考虑重力影响及地表径流对坡面的切向作用力;

4) 地下水的渗流流速相对较小, 此处暂不予考虑, 而且降雨雨滴的冲击力受环境影响也相对较小, 此处不予考虑。

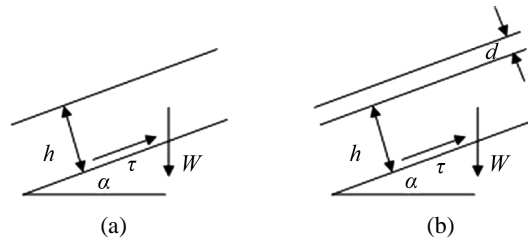


Figure 2. Generalized calculation model of loosely packed soil layer mechanics

图 2. 松散堆积土体层力学概化计算模型

根据上述模型, 斜坡或沟道上松散岩土体的失稳下滑力  $v$  为

$$v = W \sin \alpha = \gamma h \sin \alpha \tag{3-1}$$

式中:  $W$  是堆积体重量;  $\alpha$  是斜坡或沟道倾角;  $\gamma$  是堆积体重度;  $h$  是堆积体厚度。

考虑到松散堆积岩土体中孔隙的分布情况, 上式可转化为

$$v = h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w \eta_e n] \sin \alpha \tag{3-2}$$

式中:  $\gamma_d$  是堆积岩土体干燥状态下的重度;  $n$  是堆积体孔隙度;  $\gamma_w$  是水体重度;  $\eta_e$  是孔隙的充水系数, 当孔隙完全被水饱和时其值为 1。

对于松散堆积体的抗滑作用力  $\tau$  为

$$\tau = W \cos \alpha \tan \phi + C = \gamma h \cos \alpha \tan \phi + C \tag{3-3}$$

$$\tau = h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w \eta_e n] \cos \alpha \tan \phi + C \tag{3-4}$$

式中:  $c$  是潜在滑移面的粘聚力;  $\phi$  是潜在滑移面的内摩擦角。

强降雨作用下, 松散堆积体逐渐被水体浸润且渐趋饱和, 并且在表层产生地表径流, 失稳下滑力需考虑表层径流  $d$  的作用(见图 2(b)), 则松散堆积体的失稳下滑力  $v$  为

$$v = (W + \gamma_w d) \sin \alpha = (\gamma h + \gamma_w d) \sin \alpha \tag{3-5}$$

$$v = \{h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w n] + \gamma_w d\} \sin \alpha \tag{3-6}$$

式中:  $W$  是饱水后的堆积体重量;  $\gamma$  是饱水后的堆积体重度;  $d$  是径流水深。

相应地, 强降雨作用下松散堆积体饱和时的抗滑作用力  $\tau$  为

$$\tau = (W + \gamma_w d) \cos \alpha \tan \phi + C = (\gamma h + \gamma_w d) \cos \alpha \tan \phi + C \tag{3-7}$$

$$\tau = \{h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w n] + \gamma_w d\} \cos \alpha \tan \phi + C \tag{3-8}$$

根据松散堆积体沿潜在滑移面的抗滑作用力  $\tau$  和失稳下滑力  $v$ , 可确定强降雨作用下形成区松散岩土体的失稳平衡系数  $K$  为

$$K = \frac{\tau}{\nu} \quad (3-9)$$

由式可知：① 当  $K < 1$  (即  $\tau < \nu$ ) 时，在强降雨作用下松散堆积体失稳滑坡形成启动泥石流；② 当  $K > 1$  (即  $\tau > \nu$ ) 时，松散堆积体处于基本稳定状态；③ 当  $K = 1$  时，则其处于临界状态。

实际情况下，结合松散堆积体基本物理力学性质参数的确定，可以建立强降雨作用下，冲沟形成区松散岩土体在地表水体浸润并渐趋饱和且形成地表径流的情况下，出现强度降低而致液化失稳滑坡，形成启动泥石流的失稳平衡关系方程为

$$K = \frac{\tau}{\nu} = \frac{[h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w n] + \gamma_w d] \cos \alpha \tan \phi + C}{\{h[\gamma_d(1-n) + \gamma_w n] + \gamma_w d\} \sin \alpha} \quad (3-10)$$

#### 4. 泥石流防治对策

根据上述分析泥石流的发生的作用机制，基于此探索滑坡转化型泥石流的防治对策包括如下：

##### 1) 松散物源区系统截排水

在冲沟上游形成区分布的潜在滑坡区及附近地带修建截排水系统，主要有：

① 在后缘修建截水沟，顺地形条件而作，有效将汇聚的坡面水流旁引截除至场区以外，避免汇入潜在滑坡区；

② 充分利用地形和自然沟谷，潜在滑坡区布置“树枝状”排水系统，以阻止地表水冲刷坡面和渗入坡体内部；

③ 排除坡体内部地下水可以有效降低坡内岩土体的含水量和提高其有效应力，促进坡体稳定，可采用排水孔、排水盲沟等，必要时可与重力式挡配套结合使用；

④ 通过虹吸排水技术截排地表径流和地下水的影响，于潜在滑坡区后缘设置截水盲沟和集水池，在其下方沟侧斜坡稳定地带设置分流池，顶部集水池设置虹吸排水管将水流引排到下部分流池中，再从分流池中设置虹吸排水管将水流引排到沟口堆积区现状沟渠。

#### 5. 结语

综上所述，通过构建滑坡转化形成启动泥石流的链式作用模型以及降雨作用下松散物源液化失稳的平衡关系方程，分析岩土体内部含水量的变化对其抗剪强度、滑动趋势以及整体稳定状态的影响，确定滑坡转化泥石流的启动预警判据，实施松散物源区系统截排水及其是否引发滑坡形成启动泥石流的岩土体含水量实时动态监控的防治对策，从而为滑坡转化型泥石流的综合防治提供一种简单、可靠且行之有效的防灾思路和技术方法。

#### 基金项目

安徽理工大学研究生创新基金项目(2021CX2009)。

#### 参考文献

- [1] 胡伟卓. 洪涝灾害应急响应决策支持业务系统关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 首都师范大学, 2007.
- [2] 杨宗信, 王礼勇, 等. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 272-285.
- [3] 浙江省地质环境公报[R]. 杭州: 浙江省国土资源厅, 2017.
- [4] 殷跃平, 张颖, 康宏达, 费宇明. 全国地质灾害趋势预测及预测图编制[J]. 第四纪研究, 1996(2): 123-130.
- [5] Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., *et al.* (2012) Statistical Modelling of Europe-Wide Landslide Suscep-

- tibility Using Limited Landslide Inventory Data. *Landslides*, **9**, 357-369. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0299-z>
- [6] 刘传正, 刘艳辉. 论地质灾害防治与地质环境利用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1469-1476.
- [7] 徐中春, 吴绍洪, 戴尔阜, 李开忠. 中国地震灾害人口死亡风险定量评估(英文) [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(1): 83-90.
- [8] 麻士华, 李长江, 等. 浙江地区引发滑坡的降雨强度-历时关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 20-25.
- [9] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0220-2006 泥石流地质灾害防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [10] 赵晓萌, 卫星君, 王娜, 雷向杰. 降雨型滑坡灾害的特征聚合决策树预测模型[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 27-31.
- [11] 李朝安. 土力类泥石流源地土体起动预报模型初步研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 铁道科学研究院, 2004.
- [12] 李环禹, 陈朝晖, 范文亮, 文海家. 区域降雨型滑坡风险分析统计模型研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 103-111.
- [13] 林平一. 小汇水面积暴雨径流计算法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1958.
- [14] 秦文涛. 降雨特性对非饱和土边坡稳定可靠性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [15] 张明, 胡瑞林, 谭儒蛟, 崔芳鹏. 降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. 工程勘察, 2009, 37(3): 11-17.
- [16] 程国栋, 李新. 流域科学及其集成研究方法[J]. 中国科学(地球科学), 2015, 45(6): 811-819.