

诸暨市应店街镇崩滑流形成机理与致灾模式分析

陈锦坤^{1*}, 张津源¹, 陆军寰²

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²诸暨市自然资源和规划局, 浙江 绍兴

收稿日期: 2025年10月24日; 录用日期: 2025年12月3日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

本文以浙江省诸暨市应店街镇为研究区, 针对该区域典型的地质灾害——崩塌、滑坡、泥石流(合称“崩滑流”)开展形成机理与致灾模式研究。研究区属低山丘陵地貌, 地质构造复杂, 岩性以凝灰岩、花岗岩等为主, 风化强烈, 为崩滑流的发生提供了物质基础与地形条件。研究表明, 其形成机理是“内在条件”与“外在诱因”共同作用的结果。内在条件主要包括陡峻的斜坡地形、松软破碎的岩土体结构以及密集的节理裂隙; 外在诱因则以强降雨为主导, 尤其是梅汛期和台风雨的持续高强度降水, 导致岩土体饱和、自重增加、力学强度骤降, 从而诱发崩塌与滑坡。人类工程活动, 如切坡建房、公路开挖等, 则进一步破坏了斜坡的天然稳定性。基于此, 总结出其致灾模式主要表现为三种: 1) 区内地质灾害形成过程中, 地形地貌、岩土体性质是孕灾地质条件, 降雨及人类工程活动为关键致灾因子; 2) 从地质灾害成灾模式分析, 区内滑坡主要为土质或岩土质滑坡, 主要成灾模式是降雨型滑坡, 滑动形式以推移式为主; 3) 崩塌主要为岩质崩塌和岩土质崩塌两类, 岩质崩塌致灾模式主要为倾倒式、岩土质崩塌致灾模式为推移式。

关键词

崩滑流, 形成机理, 致灾模式, 应店街镇

Analysis of the Formation Mechanism and Disaster-Causing Patterns of Landslides, Debris Flows in Yingdianjie Town, Zhuji City

Jinshen Chen^{1*}, Jinyuan Zhang¹, Jundou Lu²

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Zhuji City Natural Resources and Planning Bureau, Shaoxing Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 陈锦坤, 张津源, 陆军寰. 诸暨市应店街镇崩滑流形成机理与致灾模式分析[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(12): 1573-1583. DOI: 10.12677/ag.2025.1512146

Abstract

This study focuses on Yingtianjie Town, Zhuji City, Zhejiang Province as the research area to investigate the formation mechanisms and disaster-causing patterns of typical geological hazards, specifically collapses, landslides, and debris flows. The research area is characterized by low-lying mountainous and hilly terrain with complex geological structures. The dominant rock types are tuff and granite, which are highly weathered, providing the necessary material foundation and topographic conditions conducive to the occurrence of collapses, landslides and debris flows. The research findings indicate that the formation mechanism arises from the combined influence of “internal conditions” and “external triggers”. The internal conditions primarily consist of steep slope terrain, a loose and fragmented rock and soil mass structure, and well-developed joints and fractures. The external triggers are predominantly heavy rainfall, particularly prolonged high-intensity precipitation during the plum rain season and typhoon-related rainfall, which leads to saturation of rock and soil masses, increased self-weight, and a sharp reduction in mechanical strength, thereby inducing collapses and landslides. Human engineering activities, such as residential construction and road excavation, further compromise the natural stability of slopes. Based on this analysis, the disaster-causing patterns are categorized into three main types: 1) In the process of geological hazards development in the region, topography and geomorphology, as well as the physical and mechanical properties of rock and soil masses, constitute the fundamental geological conditions for geological hazards, whereas rainfall and human engineering activities serve as the primary triggering factors; 2) Landslides in the area are predominantly of the soil or rock-soil type, with rainfall being the dominant trigger, and the failure mechanism primarily characterized by translational sliding; 3) Collapses are mainly classified into rock falls and rock-soil collapses, with the former typically occurring through toppling failure and the latter through sliding failure.

Keywords

Landslide and Debris Flow, Formation Mechanism, Disaster-Causing Pattern, Yingdianjie Town

Copyright © 2025 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

应店街镇地处诸暨北西端，位于扬子准地台 - 常山 - 诸暨台隆 - 航埠 - 章村台拗，地貌上总体属于龙门山低山丘陵区，间有山间谷地，沿凰桐江两岸有带状分布的冲积平原。应店街镇地势总体西高东低，西部最高海拔为 939 m，东部最低点海拔为 18 m，高差达 921 m，山区地形切割相对较强烈，植被较发育，地形坡度 15°~45°，土壤类型多，气候温和，光照充足。应店街镇属于浦阳江流域，主要为凰桐江、次坞溪。镇内各支流均属雨源型，自然落差大，源短流急，流量和水位受降雨控制，随季节变化较大，镇内 3~9 月为丰水期，4~6 月常有洪水，9 月至次年 2 月为平、枯水期。境内分布山塘水库 47 座，其中较大的水库为：幸福水库、双龙水库、上游水库和西湖水库。

应店街镇前第四系地层出露较为完整，地层层序完整，出露有上元古界、古生界、中生界地层。区内侵入岩为燕山晚期花岗岩($\epsilon\gamma 23$)和下白垩统流纹斑岩($\lambda\pi K1$)，燕山晚期花岗岩($\epsilon\gamma 23$)分布在应店街镇北

侧崇柱村 - 板西村一带，下白垩统流纹斑岩($\lambda\pi K1$)分布于应店街镇西南侧丰周村一带，其岩性均以酸性花岗岩为主。

据浙江省诸暨市地质灾害风险普查报告统计，截至 2022 年 12 月，工作区共分布历史地质灾害及隐患 86 处，其中有滑坡 11 处，崩塌 69 处，泥石流 6 处，通过对工作区历史地质灾害点的统计分析，总结归纳地质灾害的形成条件和影响因素，分析突发性地质灾害与地形地貌、地质条件、人类工程活动和降水等的关系，总结区内地质灾害形成机理和致灾模式。

2. 应店街镇地质灾害成灾模式

2.1. 滑坡

应店街镇滑坡从主控影响因素角度分析，其主要致灾模式是降雨型滑坡。

对于一些小型的土质、岩土质滑坡，滑坡形成之前，自然斜坡较陡，局部存在汇水条件，坡脚局部松散土层及风化层较厚，受建房、修路等人类工程活动影响，坡脚切坡形成人工边坡，导致下部临空，斜坡平衡条件被打破，受强降雨作用影响，大量雨水下渗使得坡体自重应力增加，渗透的地下水在坡内形成水压力，同时软化了岩土体和结构面，促使其物理力学强度降低，坡体开始出现裂缝、前缘土体出现小崩小塌现象，当变形进一步扩大突破平衡条件时，滑体下滑并堆于坡脚或对造成坡下建筑损坏[1] [2] (图 1)，该类滑坡规模一般较小，滑动速度较快，滑动形式以推移式为主。

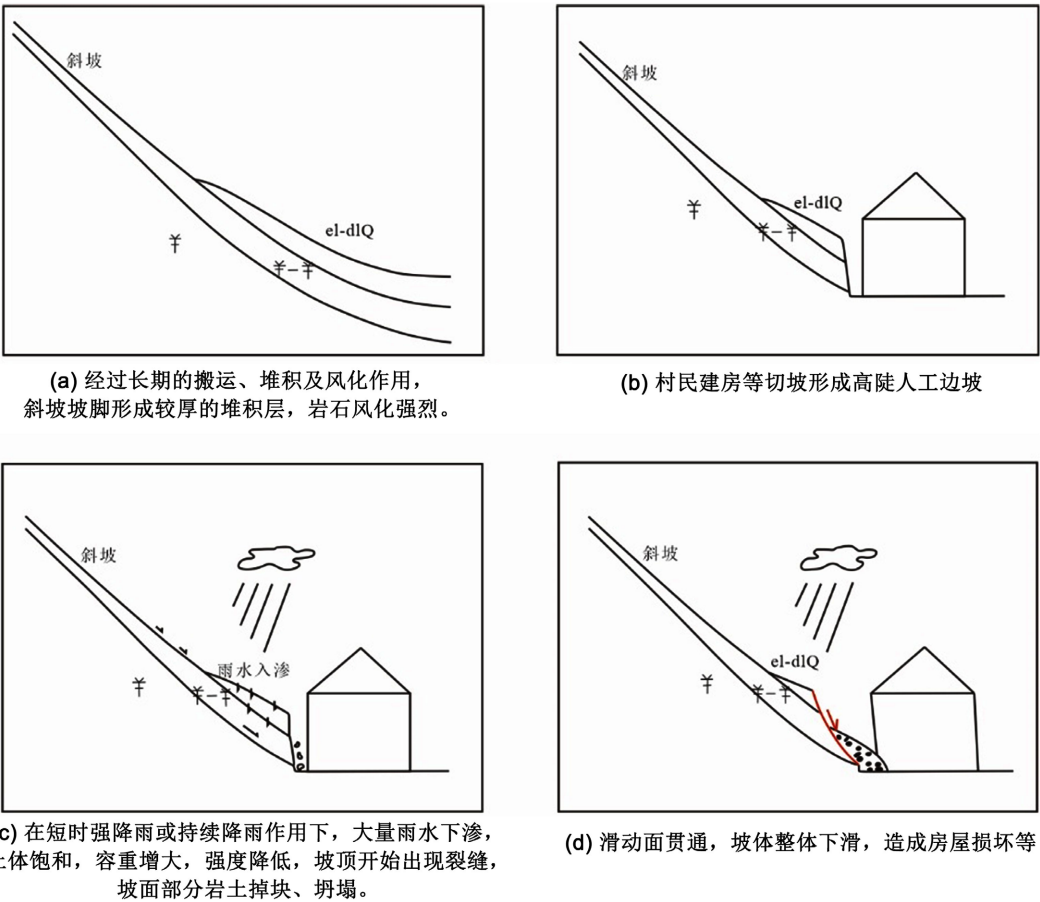


Figure 1. The schematic diagram of the disaster-causing pattern of small-scale landslides
图 1. 小型滑坡致灾模式示意图

对于规模较大的滑坡,其致灾模式相对较复杂,从斜坡变形破坏过程和力学性质上分析,归纳为“蠕滑-拉裂”模式[3](图2)。此类滑坡演化过程大致为:斜坡体表层蠕滑阶段(斜坡体变形初期在自身重力叠加降雨、坡脚切坡等因素下,表层开始发生蠕滑变形,变形从无到有,坡体表面开始出现微小裂缝,变形不明显,但变形速率缓慢。随着蠕滑变形的继续,斜坡体后缘产生拉应力)后缘拉裂阶段(随着斜坡体变形的继续进行,首先斜坡体后缘出现弧形拉裂现象,有局部轻微下错现象,并且出现向前扩展趋势,但后缘弧形拉裂缝并未贯通[4]。斜坡体左右边界大致同一方向陆续出现拉裂缝,但并未贯通。斜坡体前缘时常出现渗水现象等)蠕滑-拉裂阶段(该阶段后缘弧形拉裂缝变形破坏深度进一步加深,裂缝宽度变大,下错高度加大,且逐渐闭合。滑坡左右边界也逐渐开始闭合,向后与后缘弧形拉裂缝逐渐连接,向前发展至滑坡前缘剪出口。滑坡前缘岩土体鼓胀明显,渗水点水体出现浑浊现象。这些变形迹象预示着滑面贯通,滑坡即将向下滑移启动)。

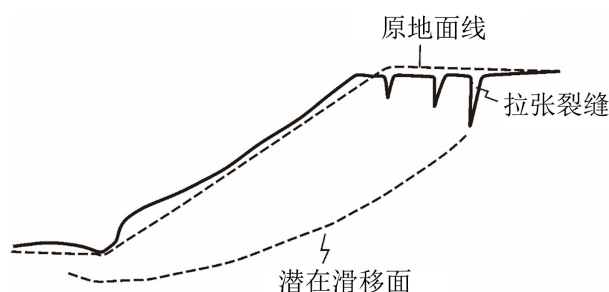


Figure 2. The schematic diagram of the disaster-causing pattern of large-scale landslides
图2. 大型滑坡致灾模式示意图

2.2. 崩塌

综合崩塌发生的致灾因子及孕灾条件,将工作区内崩塌分为滑移式、倾倒式两种。

滑移式崩塌:此类崩塌主要发生于岩土质斜坡中,其中岩体发育2~3组结构面,其中一组近直立,较发育,同时也有一组中等倾外,相对发育较少。在人工边坡形成过程中,岩土体上部陡裂张开,迹长增加;而倾外结构面被改造程度相对较弱。当陡缓结构面可以组合成危岩体时,由较缓一组结构面形成控制滑面,因此应力集中[5]。在降雨等作用下,其上部岩土体发生滑移失稳。其成灾模式为拉裂-滑移(图3)。

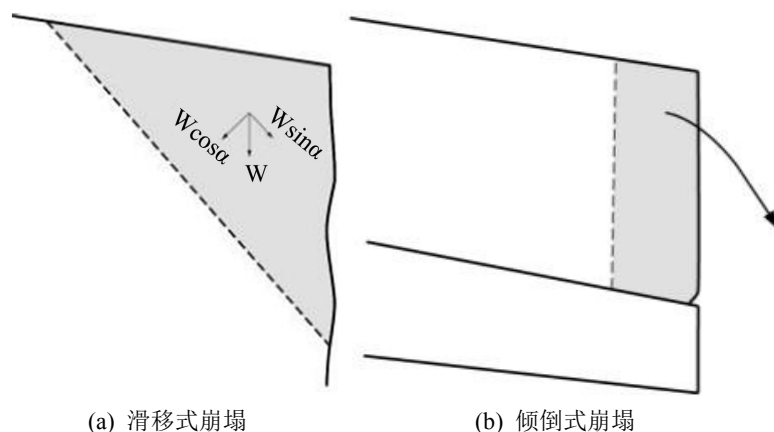


Figure 3. The schematic diagram of the collapse pattern
图3. 崩塌模式示意图

倾倒式崩塌：此类崩塌主要发生于岩质斜坡中，岩体中发育一组与层面近于垂直的结构面。边坡开挖后，坡肩附近，中陡倾结构面朝着临空方向发生悬臂梁式张开，工程性质变差，随着倾倒程度进一步增加，岩体在重力作用下发生倾倒-折断破坏，其成灾模式为倾倒-折断[6]。

2.3. 泥石流

综合崩塌发生的致灾因子及孕灾条件，区内泥石流主要为坡面型泥石流。

一般发生在 30 度以上的山坡坡面上，不透水层埋藏较浅，表层有较好的植被覆盖，无沟槽水流，水动力为地下水浸泡和有压地下水作用，在同一坡面上可多处同时发生，成梳状排列，突发性强，无固定流路[7] (图 4)。

致灾模式：坡面土体失稳，主要是在有压地下水作用下和后续强暴雨诱发产生。暴雨过程中的狂风可能造成林、灌木拔起和倾倒，使坡面局部破坏。前期降雨充分，松散土层内部饱水，地下水变成有压水流，破坏表层根系网状构造或土体表层硬壳结构。松散土体由于饱水后 c 、 ϕ 值降低，土体骨架变形、塑化、液化后发生破坏[8] [9]。

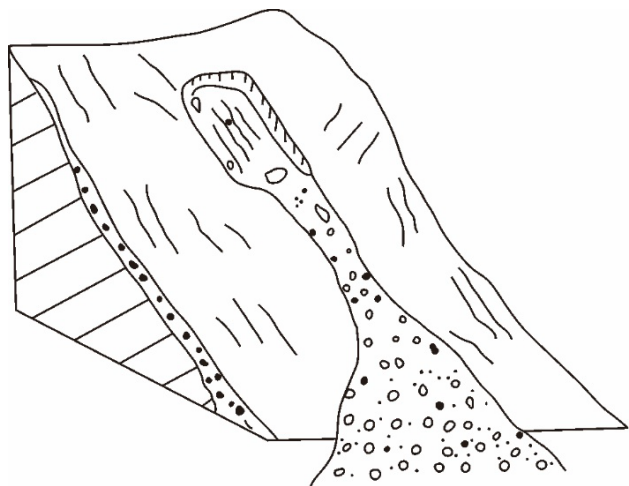


Figure 4. The schematic diagram of the debris flow
图 4. 泥石流示意图

3. 典型地质灾害点剖析

3.1. 诸暨市应店街镇扎箕坞村滑坡

3.1.1. 基本情况

2021 年 6 月 10 日 17 点 06 分左右，受强降雨影响，诸暨市应店街镇扎箕坞村丁大中等 3 户屋后边坡发现裂缝(图 5)，存在滑坡隐患，威胁边坡坡脚丁大中等、丁汉龙、丁灿金 3 户 14 人(7 间房)生命财产安全，威胁财产约 140 万，危害程度中等；于 2021 年 7 月 29 日，台风“烟花”登录期间造成强降雨，扎箕坞村水塘西侧梯田发生小范围垮塌，威胁坡下居民生产财产安全，威胁财产约 60 万，危害程度中等。

滑坡未见明显滑动迹象，仅见后缘裂缝(图 6)，推测滑坡周界呈“圈椅状”，滑坡前缘位于坡脚(图 7)，高程约+45 m，滑坡后缘(裂缝位置)高程约+65 m，相对高差 20 m，ZK02 钻孔中滑体厚度可达 10.23 m，可见明显滑带泥，由钻孔数据推测，坡面上潜在滑体方量约 4000 m³，属于小型岩土质滑坡。滑坡体大部分仍堆积在坡面上，且滑坡后缘发育拉裂缝，长度约 14.3 m，主滑方向 106°，滑坡方量约 4000 m³。



Figure 5. Lateral margin fracture (self-photographed, Jun. 2021)
图 5. 侧缘裂缝(自摄 2021 年 6 月)



Figure 6. Posterior edge fracture (self-photographed, Jun. 2021)
图 6. 后缘裂缝(自摄于 2021 年 6 月)



Figure 7. Bulging at the front edge of the slope toe (self-photographed, Jun. 2021)
图 7. 坡脚前缘隆起(自摄于 2021 年 6 月)



Figure 8. The cracking of the retaining wall (self-photographed, Jun. 2021)
图 8. 坡脚挡墙开裂(自摄于 2021 年 6 月)

滑坡周界呈“圈椅状”(图 8), 滑坡后缘呈弧形, 宽约 6 m, 高程约+54 m, 前缘宽约 10 m, 高程约+48 m, 相对高差约 6 m; 长度约 8 m, 滑体厚度约 2 m, 本次下滑积体约 50 m³, 主滑方向 77°, 堆积体位于下方梯田上。

目前该滑坡已完成治理, 治理措施采用: 分级削坡 + 坡脚挡墙 + 修筑截一排水沟等综合治理措施。

3.1.2. 滑坡形成机理分析

(1) 地形地貌: 滑坡处于侵蚀剥蚀低丘区凹部, 斜坡总体坡度在 25°~40°, 相对有利于地表水的入渗, 下部因切坡建房形成陡坡临空面, 为坡体的变形破坏发展提供了有利的地形条件, 是形成滑坡的主要内在因素之一。

(2) 地层岩性: 根据野外地质灾害调查和野外地质勘探揭露, 滑坡体为第四系残坡积土、全风化泥岩, 第四系残坡积土土层和全风化泥岩层厚度大, 结构松散, 保水性较强, 遇水易软化, 扰动易破坏。而下部滑床为中风化条带状灰岩, 岩性整体较完整, 物理力学性质较好且厚度较大, 其工程地质性质相对较好, 透水性较强, 起防水作用。综合上述因素, 全风化与强风化接触面成为该滑坡的控滑结构面, 亦是形成滑坡的主要内在因素之一[10]。

(3) 降雨: 滑坡所在山体存在较大汇水面积, 持续降雨, 大量雨水入渗至松散土体中, 一方面增大了土体重度, 降低了土体力学强度, 另一方面产生较大的水压力, 导致坡体失稳, 从而形成滑坡险情[11]。

(4) 人类工程活动: 山体坡脚因较早期切坡建房取土石, 形成临空面, 打破山体原有的平衡状态。坡脚处自建浆砌块石挡墙, 墙体薄且砂浆用量不足, 所设置的排水孔堵塞严重, 未起到相应排水作用。

3.1.3. 滑坡成灾模式分析

根据滑坡的地质环境条件及收集的滑坡形态与变形特征资料分析, 该滑坡的致灾模式如下: 由于山体开挖形成高边坡, 外侧临空, 在强降雨的诱发下, 大量的雨水入渗, 导致滑体自重增加, 下滑力增大, 当下滑力大于抗滑力, 坡体原有的应力平衡状态已被打破, 使斜坡稳定性急剧降低, 坡体开始出现裂缝, 蠕滑变形, 向下滑动。

3.2. 诸暨市应店街镇崇柱村崩塌

3.2.1. 基本情况

2021 年 7 月 24 日 12 时 00 分左右, 诸暨市应店街镇崇柱村石柱坞自然村朱纪安屋后发生崩塌地质灾害(图 9)。经现场实地调查, 崩塌方向为 27°, 长约 16 m, 宽约 3 m, 平均厚度约 1.05 m, 方量约 96 m³。

崩塌未造成财产损失及人员伤亡，属小型岩土质崩塌，威胁坡脚朱纪安 1 户 4 人 5 间房的人身和财产安全，威胁财产约 50 万元。



Figure 9. The collapse site (self-photographed, Jul. 2021)

图 9. 崩塌处(自摄于 2021 年 6 月)

该崩塌形成原因主要为所处斜坡松散层厚度较大，力学性质较差，加之早期切坡建房形成较高陡边坡，且未采取防护措施，破坏了山体的自然平衡状态。受极端强降雨的影响，易造成土体的裂隙不断扩张、连通，抗剪性能降低，在外力或自重下从而形成崩塌地质灾害。

该边坡为早期人工切坡开挖形成，造成边坡高陡，之后一直未防护。整个人工边坡高约 7 m，边坡高陡，坡向约 27°，坡度约 75°。边坡上部土层为残坡积层，残坡积层厚约 1~2 m；边坡下部为全-强风化层，风化较强烈，基岩节理发育，岩体整体较完整。边坡坡体岩性为浅肉红色钾长花岗岩，边坡上部植被以灌木为主。

3.2.2. 崩塌形成机理分析

崩塌地质灾害形成机制包括内因和外因两个方面，它们是相互联系，相互补充的。其中内因方面的地质因素包括：地形地貌因素、岩土体因素、水文地质因素等，外因方面主要为持续强降雨和人类活动。

(1) 地形地貌因素

由于崩塌所处地形属于低山丘陵区，自然斜坡坡度较陡，切坡建房形成高陡临空面，利于崩塌的产生。

(2) 岩土体工程地质因素

崩塌区坡面岩土体主要由残坡积层和全强风化层组成，残坡积层松散，厚度较大，而全、强风化基岩，节理裂隙发育，风化强烈，岩体破碎，厚度较大，物理力学性质差，易造成坡体失稳。因此，岩土体工程地质性质差是引发边坡失稳的内在因素。

(3) 降雨因素

强降雨期间，由于坡体岩土体较为松散，空隙较多，降雨后地表水下渗对坡体稳定性影响较大，在短时强降雨作用下，岩土体更易吸水饱和，进而造成边坡的失稳产生崩塌。因此，降雨是崩塌的主要诱发因素[12]。

(4) 人类工程活动

斜坡山体人类工程活动强烈，由于切坡建房，形成约高陡边坡，局部岩土体临空条件改善，使其原有应力平衡状态被破坏，岩体在卸荷作用下失稳，这是诱发边坡崩塌的外在因素。

3.2.3. 崩塌致灾模式分析

斜坡山体切坡建房，形成高陡边坡，外侧临空，坡体岩土体破碎，物理力学性质差，在降雨作用下，雨水下渗导致岩土体更易吸水饱和，最终在自重应力和雨水的共同作用下，岩土体沿软弱面等发生破坏，

产生崩塌[13]。

目前该滑坡处于治理后试运行期阶段，治理措施采用：格构护坡 + 坡脚挡墙 + 修筑截排水沟等综合治理措施(图 10)。



Figure 10. The collapse after governance (self-photographed, Aug. 2023)
图 10. 治理后的崩塌处(自摄于 2023 年 8 月)

3.3. 诸暨市应店街镇寨头村泥石流

3.3.1. 基本概况

2021 年 7 月 24 日 12 时 05 分左右，应店街镇寨头村寨头自然村孟均义等户屋后发生坡面泥石流地质灾害(图 11)。

根据现场调查，坡面泥石流形成区位于自然斜坡中部浅凹槽处，坡高约 70 m，坡度约 40°，整体呈椭圆圆形，长约 20 m，宽 10 m，厚度 1 m，方量约 200 m³，冲击方向约 215°，湍急的水流携带表层的残坡积层、碎石及滑体物质冲向流通区，部分泥石流成分受坡面植被影响，滞留在坡面，大部分堆积在坡底，导致屋后堆积物长约 50 m，宽约 10 m³，厚约 2 m，方量约 500 m³。泥石流物质主要为自然斜坡表层残破积土层及少量强风化基岩。本次坡面泥石流未造成人员伤亡和财产损失，属小型坡面泥石流。目前该区域已完成坡面堆积物清理及混凝土排水渠修建等综合治理工作(图 12)。



Figure 11. Location of debris flow (self-photographed, Jul. 2021)
图 11. 泥石流发生处(自摄于 2021 年 7 月)



Figure 12. The debris flow after governance (self-photographed, Aug. 2023)

图 12. 治理后现场(自摄于 2023 年 8 月)

3.3.2. 泥石流形成机理分析

泥石流地质灾害形成机制包括内因和外因两个方面，它们是相互联系，相互补充的。其中内因方面的地质因素包括：地形地貌因素、岩土体因素、水文地质因素等，外因方面主要为持续强降雨和人类活动[14]。

(1) 地形地貌因素

该处为构造低山地貌，微地貌特征为坡面存在小冲沟，整体为凹形坡，形态为坡面、冲沟复合断面，主体形态呈舌形，坡长约 146 m，坡面宽 15.3~8.7 m，主要分布于高程+236 m 至+184 m。

(2) 岩土体工程地质因素

坡面岩土体主要由残坡积层和全强风化层组成，残坡积层松散，厚度较大，约为 2 m，而全、强风化基岩，节理裂隙发育，风化强烈，岩体破碎，厚度较大，物理力学性质差，易造成坡体失稳。因此，岩土体工程地质性质差是引发边坡失稳的内在因素。

(3) 降雨因素

强降雨期间，由于坡体岩土体较为松散，空隙较多，降雨后地表水下渗对坡体稳定性影响较大，在短时强降雨作用下，岩土体更易吸水饱和，使土体软化，土体处于过度饱和状态，自重增加，静水压力增强，抗剪性能显著降低，造成土体不利结构面不断扩张、连通，最后在重力作用下向下滑塌，从而引发了坡面泥石流[15]。因此，降雨是泥石流的主要诱发因素。

3.3.3. 坡面型泥石流致灾模式分析

坡面型泥石流区一般处在山坡浅凹槽部位，易形成汇水通道，且坡面残坡积层和全风化层，结构松散，易渗水、吸水过度饱和，受持续性强降雨的影响，降雨形成的坡面径流冲刷残坡积土层，雨水通过松散空隙进入残坡积层中，使残坡积土体软化，土体处于过度饱和状态，自重增加，静水压力增强，抗剪性能显著降低，造成土体不利结构面不断扩张、连通，最后在重力作用下向下滑塌，从而引发了坡面泥石流。

4. 结论

(1) 孕灾条件与触发因子统一：区内崩滑流灾害共享同一套形成机制。地形地貌与岩土体性质是内在的孕灾地质条件，而降雨及人类工程活动是关键致灾因子。这三类灾害在此同一背景下被触发，并常相互关联。

(2) 崩滑机制分化并供给物源：滑坡与崩塌的成灾模式具体分化。滑坡以降雨型为主，滑动形式以推移式为主；崩塌则分化为岩质的倾倒式与岩土质的滑移式。这些崩滑事件不仅是独立灾害，其产生的松散固体物质更是下游泥石流形成的主要物源。

(3) 构成“崩-滑-流”灾害链条：在强降雨这一共同核心诱因下，灾害常呈链生式发展。高位的崩塌、坡面的滑坡为沟谷提供了大量固体物质，当这些物质被洪水冲刷、启动后，便可能演变为更具冲击和输移能力的泥石流，形成完整的灾害链，为我国南部山区的灾害链式反应提供了理论依据。

参考文献

- [1] 叶旭光, 王新刚, 刘凯, 等. 典型降雨诱发型堆积层滑坡机理研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(1): 101-110.
- [2] 黄朝阳. 福建寿宁武曲降雨诱发型滑坡稳定性评价[J]. 福建地质, 2024, 43(4): 297-305.
- [3] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质论评, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [4] 陈悦丽, 赵琳娜, 王英, 等. 降雨型地质灾害预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30(2): 142-153.
- [5] 陈莉. 滑移式崩塌稳定性分析[J]. 陕西水利, 2019(6): 19-21.
- [6] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
- [7] 刘传正, 王建新. 崩塌滑坡泥石流灾害链分类研究[J]. 工程地质学报, 2024, 32(5): 1573-1596.
- [8] 郭智辉, 简文彬, 刘青灵, 等. 基于现场原型试验的斜坡降雨入渗分析及入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1635-1647.
- [9] 杨海龙. 坡面泥石流成因探讨——以福建省浦城县西岩泥石流为例[J]. 生态与资源, 2025(7): 60-62.
- [10] 赵建军, 赖琪毅, 马彦飞, 等. 花岗岩地区群发性降雨滑坡孕灾条件敏感性研究——以桂东南北流市为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 63-71.
- [11] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003(4): 101-105.
- [12] 刘艳辉, 唐灿, 李铁锋, 等. 地质灾害与降雨雨型的关系研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 656-661.
- [13] 杨义, 江兴元, 李阳春, 等. 降雨入渗条件下堆积型滑坡渗流侵蚀过程与稳定性数值模拟——以贵州省下街滑坡为例[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(1): 26-33.
- [14] 郭剑, 崔一飞. 滑坡-泥石流转化研究进展[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 762-779.
- [15] 吴庆华, 朱国胜, 崔皓东, 等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 118-127.