

# 西吉县某滑坡型泥石流特征及成因机理

康登成 梁新富 徐磊 杨凌雪 段佳

宁夏回族自治区水文环境地质调查院, 中国·宁夏 银川 750021

**摘要:** 本文以 2022 年宁夏西吉县某滑坡型泥石流为研究对象, 聚焦其发生的地质环境背景及发育特征。通过系统分析, 揭示了地形地貌、地层岩性、水文地质等内在因素与人类工程活动等外在因素在灾害形成中的协同作用机制, 并对其发展趋势进行科学预测。结合宁南黄土区独特的地质环境条件, 提出了排查发生滑坡型泥石流的潜在区域、布设监测传感器、深化形成机理与成灾模式研究等针对性防治建议, 为该区域滑坡型泥石流的防灾减灾提供参考。

**关键词:** 滑坡型泥石流; 发育特征; 成因机理; 宁南黄土区; 人类工程活动; 地质灾害防治

## Characteristics and Genetic Mechanism of a Landslide-Type Debris Flow in Xiji County

Kang Dengcheng, Liang Xinfu, Xu Lei, Yang Lingxue, Duan Jia

Hydrological and Environmental Geology Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, China Ningxia Yinchuan 750021

**Abstract:** Taking a landslide-type debris flow that occurred in Xiji County, Ningxia in 2022 as the research object, this paper focuses on the geological environment background and development characteristics of the disaster. Through systematic analysis, the study reveals the synergistic mechanism of internal factors (such as topography and geomorphology, stratum lithology, and hydrogeology) and external factors (such as human engineering activities) in the formation of the disaster, and makes a scientific prediction of its development trend. Considering the unique geological environment conditions of the loess area in southern Ningxia, targeted prevention and control suggestions are put forward, including investigating potential areas prone to landslide-type debris flows, arranging monitoring sensors, and deepening research on formation mechanisms and disaster-causing models. These suggestions provide a reference for the prevention and mitigation of landslide-type debris flows in this region.

**Keywords:** Landslide-type debris flow; Development characteristics; Genetic mechanism; Loess area in southern Ningxia; Human engineering activities; Geological disaster prevention and control

## 0 引言

滑坡型泥石流作为一种极具破坏力的地质灾害, 严重威胁着人类的生命财产安全与生态环境。它通常是高位滑坡在滑移一段距离后直接转化为泥石流, 运动过程复杂, 具有爆发突然、来势凶猛、速度快等特点, 危害远超一般滑坡和泥石流。

2022 年 8 月 31 日, 宁夏西吉县某地突发一起因渣土堆载引发的滑坡型泥石流灾害。此次灾害导致沟脑何丑水厂蓄水池西北角围墙出现长达数米裂缝, 直接威胁蓄水池的安全, 同时也对下方铁家窑水库的安全形成考验。为确保蓄水池的安全, 于 2023 年对临近蓄水池的滑源区采取了排水固结、沟道培厚、安全监测等防治措施。经过近两年的运行, 治理效果良好, 未再次发生滑坡灾害。

宁南黄土区地质环境复杂, 具备滑坡型泥石流孕育发生

条件。本文以该区域西吉县某典型灾害为研究对象, 成果可进一步丰富该区域滑坡型泥石流的理论研究体系, 为同类地质环境研究提供案例参考与数据支撑, 助力地质灾害防治与研究创新发展。

## 1 地质环境背景

### 1.1 气象水文

西吉县属温带大陆性季风气候, 整体呈现“干旱少雨、寒暑分明”的特征。年降水量仅 350~450 毫米, 且 60%~70% 集中于夏季, 多以短时暴雨形式降落, 易引发水土流失。昼夜及季节温差显著, 春秋季节气温波动频繁。

境内沟谷发育, 均属葫芦河水系。受区域气候影响, 多数沟谷水文呈显著季节性变化: 雨季降水集中时短暂蓄水, 旱季多干涸或断流。为缓解水资源短缺, 当地修建了小型水库、蓄水池等水利设施, 承担生活供水、农业灌溉

及防洪调蓄功能,如铁家窑水库侧重城市灌溉与防洪,何丑水厂蓄水池主要保障全镇生活饮用水供应。

### 1.2 地形地貌

该滑坡型泥流发育于黄土丘陵冲沟,地处宁南黄土丘陵核心区。该区域梁峁沟壑纵横交错,地形起伏较大。冲沟深切,沟谷狭窄,谷坡陡峭,沟床纵坡降较大,局部可达100%以上。这种独特的地形地貌为滑坡型泥流的形成提供了极为有利的地形条件。

### 1.3 地层岩性

该区域上部广泛分布着厚度不均的 $Ma$ 黄土,其土质疏松、孔隙度大,且垂直节理发育显著,富含碳酸钙等矿物成分。这些特性导致 $Ma$ 黄土在饱水状态下抗剪强度大幅下降,极易发生湿陷与崩塌现象。下伏基岩以新近系彭恩堡组的泥岩、粉砂质泥岩为主,这类岩层具有弱透水性,且遇水后易软化、强度衰减。地下水在岩土接触带易形成富集,进一步加剧黄土体的饱水程度,使其抗剪强度持续降低,最终沿岩土接触面发生崩塌与滑坡,为泥流提供了丰富的固体物质来源。

### 1.4 地质构造与地震

区内地质构造相对不发育,没有明显的大型断裂和褶皱构造。该区域地震动峰值加速度为0.20g,抗震设防烈度为Ⅷ度。

### 1.5 水文地质

区内地下水主要为松散岩类孔隙水,分为第四系黄土类土潜水与砂砾石潜水。黄土类土潜水赋存于 $Ma$ 黄土孔隙,在黄土与泥岩、泥质砂岩接触带富集,水位埋深受接触面起伏影响,因黄土持水弱,水量贫乏。砂砾石潜水分布于沟谷底部砂砾石层,补给不足导致水量较少。而本次滑坡型泥流所在沟谷地下水较丰富,以泉水形式出露并汇聚成溪流,为灾害发生提供了关键水源支撑。

### 1.6 人类工程活动

主要人类工程活动为水利与道路建设,是滑坡型泥流形成的重要诱因。何丑水厂蓄水池修建改变原有地形地貌,周边形成人工填方区;国道G566施工时,含粉土、砖块、混凝土块等的渣土被杂乱堆填沟谷,成分复杂且土体不均。这些堆填物改变了沟谷原始形态与岩土体结构,增加松散物质储量,在重力与水流作用下易失稳滑动,为灾害提供物质基础。

## 2 发育特征

该滑坡型泥流平面形态独特,整体呈“T”字型(图1)。其运动方向明确,整体沿沟谷向西运移,最终在沟

口及库区堆积。此次泥流影响范围较大,影响区面积约 $7.4 \times 10^4 m^2$ 。从空间分布上看,可清晰地分为滑源区、流通区和堆积区三个部分。自滑源区后缘至堆积前缘的距离较远,约870m,高程在1917~1977m之间,沟谷纵坡降达到75‰,较大的纵坡降为泥流的快速运移提供了强大的动力条件。

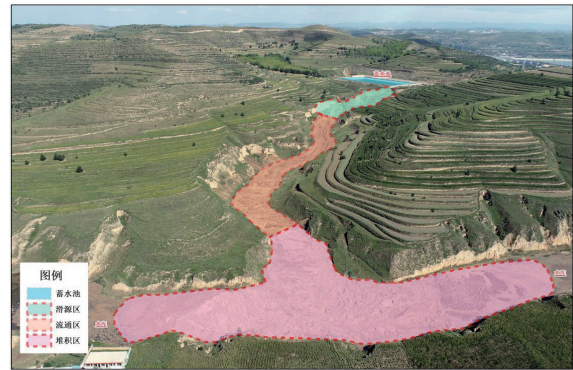


图1 滑坡型泥流分区图

### 2.1 滑源区特征

滑源区位于沟壑、紧邻何丑水厂蓄水池,原始地貌为天然沟谷,岩土界面有多处泉水出露,沟底分布2~3m厚粉土层。受长期地下水浸泡,粉土层完全饱水,抗剪性能显著下降,整体稳定性极差。

滑坡后形成典型圈椅状后壁(高5~15m),滑源区属小型滑坡,长约220m、宽约80m、面积 $1.55 \times 10^4 m^2$ ,体积约 $10.0 \times 10^4 m^3$ 。滑坡导致地下水出露,在坡体表面汇集形成地表溪流,既加剧表层土体侵蚀,又软化深层土体,使滑坡体稳定性持续下降,存在二次灾害诱发风险。

### 2.2 流通区特征

流通区位于沟谷中部,长约470m、宽25~55m,是泥流物质从滑源区向堆积区输送的关键通道。前期泥流以强烈下切侵蚀为主,流体携带的泥沙、石块刮铲沟床,使其持续加深;后期泥流能量消耗、流速降低,下切侵蚀减弱,伴随部分物质堆积。

堆积体以粉土为主,呈流塑态,含水量高、土体松软。堆积体中偶见混凝土块、砖块等建筑垃圾,既体现人类工程活动的影响,也增加了泥流物质复杂性,改变其物理性质与运动特性,且建筑垃圾形状、大小各异,进一步导致泥流流速、流向多变。

### 2.3 堆积区特征

堆积区位于沟口及库区,是泥流物质最终堆积地,总长约180m(沟谷段100m、库区段80m),沟谷段宽45~60m、库区段宽约495m。堆积体中心表面呈绳状,两

端呈龟裂状。

堆积体以粉土为主,混有建筑垃圾,表面覆盖玉米、杂草等植被。表部干湿混合,表层因光照、通风蒸发变干,下部与地面接触水分难散失,呈流塑态。堆积区改变库区地形地貌,可能影响蓄水能力与水质,对库区生态环境及水利设施安全构成潜在威胁。

### 3 成因机理

#### 3.1 内在因素

##### 3.1.1 地形地貌

黄土丘陵地貌梁峁沟壑纵横、地形起伏剧烈,为滑坡型泥石流形成提供了关键地形条件。该区域沟谷纵坡降达75‰,能让水流快速汇集并获得较大流速与能量,在强降雨等触发因素下,轻易携带大量泥沙、石块向下游运动,促发泥石流发生。同时,沟谷狭窄深切的形态约束泥石流运动,进一步增强其冲击力与破坏力。

##### 3.1.2 地层岩性

马兰黄土与下伏基岩的工程地质性质,是滑坡型泥石流发生的重要基础。马兰黄土质地疏松、孔隙度大、垂直节理发育且富含碳酸钙,饱水后抗剪强度骤降,易陷陷崩塌,受外力作用时易变形破坏,为泥石流提供丰富固体物质。下伏基岩多为泥岩、粉砂质泥岩等软弱岩石,遇水软化、强度降低,经地下水长期作用易形成软弱夹层。其弱透水性及软弱性进一步削弱坡体稳定性,使滑坡更易发生并触发泥石流。这种地层岩性组合特征,显著增加了区域滑坡型泥石流的发生风险。

##### 3.1.3 水文地质

地下水对土体稳定性及滑坡型泥石流形成的作用至关重要。研究区域整体地下水贫乏,但沟谷底部地下水仍显著影响岩土体稳定:使其饱水、增自重、降抗剪强度,埋下灾害隐患。地下水位上升会增大孔隙水压力、减小有效应力,降低抗滑力,强降雨导致水位骤升时易诱发灾害。同时,地下水渗流会潜蚀冲刷岩土体,破坏结构并形成软弱面,为滑动提供条件。

#### 3.2 外在因素

人类工程活动是该滑坡型泥石流的关键诱发因素,以沟谷渣土堆载和何丑水厂蓄水池建设影响最显著,二者通过改变地形、增加松散物质、干扰水文条件促使地质灾害发生。

国道 G566 施工时,渣土被无序填入沟谷,改变原有地形与岩土体结构,大幅增加松散物质储量,这些物质在重力与水流作用下易失稳滑动,提供了核心物质条件。

何丑水厂蓄水池修建改变区域排水条件,导致地下水流径与排泄路径偏移,使沟谷局部地下水富集、土体饱和,抗剪强度剧降,叠加上部渣土重力,最终诱发滑坡与泥石流。

#### 3.3 形成过程分析

滑坡型泥石流的形成是多阶段、多因素协同作用的结果,完整呈现了从弃渣堆积到最终形成地质灾害的演化链条。国道修建产生的粉土、砖块等弃渣无序堆于沟谷,未压实且土体松散,成为灾害起点。重力作用下,沟谷软弱土体率先滑移,弃渣重量加大下滑力、加速滑动,滑移土体刮铲牵引两岸坡体,形成连锁反应,扩大滑动规模。滑移土体混合后具备流动性形成泥石流,向下运移中不断裹挟沟谷土体,规模持续扩大。至沟口水库后,地形骤开使流速骤降,泥流向两侧扩展,含水量减少后失去下切能力,最终在沟谷及库区堆积,重塑区域地形。此过程中,黄土丘陵地形提供运动空间,马兰黄土与软弱基岩是物质基础,地下水降低土体稳定性,人类工程活动加剧风险,弃渣重力与降雨则最终触发灾害。

### 4 发展趋势预测

2023 年滑源区实施排水固结、沟道培厚等防治措施并禁止沟谷堆载渣土,经两年管控未再出现险情,但灾害基础条件仍存、隐患未彻底消除。当前该滑坡型泥石流风险等级较高,极端降雨、气温波动、地震等多重因素叠加,分别通过加速岩土体饱和、削弱稳定性、破坏岩土体结构等方式,共同加剧灾害再次发生的风险。

### 5 结语

(1) 西吉县某滑坡型泥石流灾害特征与空间分区明确,由内外因素协同形成。内在因素为基础:地处黄土丘陵区,沟谷狭窄纵坡大,马兰黄土疏松水敏强、下伏泥岩遇水软化,沟底地下水富集降低岩土体抗剪强度。外在因素是诱因:沟谷渣土堆载与何丑水厂蓄水池建设,改变地形、增加松散物质、扰水文条件,促发灾害。

(2) 宁南黄土丘陵区黄土类滑坡型泥石流的核心致灾因素,是黄土独特的工程地质性质。自然降雨入渗、地下水浸泡或人为活动引发的局部积水,会增加黄土坡体自重、削弱土体稳定性,打破应力平衡诱发滑坡。滑坡体运动中裹挟沿途物质,转化为流速更快、冲击力更强的泥石流,形成“滑坡启动-物质裹挟-泥流转化”的完整链式灾害。

(3) 为应对宁南黄土区滑坡型泥石流灾害,建议从三方面推进:一是全面排查潜在发生区,建立动态隐患点清单;二是在水库、蓄水池等关键设施周边布设土壤含水率、地下水位、坡体位移等多参数实时监测传感器,持续监测

分析核心指标,提升预警精准性与时效性;三是深入研究灾害形成机理与成灾模式,建立适配区域的风险评估模型,为科学防治提供理论支撑。

#### 参考文献:

[1] 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) [J]. 1998,34(4):107-110.

[2] 崔鹏, 陈晓清. 滑坡型泥石流的形成与运动机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(增刊2):3456-3463.

[3] 张座雄, 刘兴荣, 王之君等. 黄土滑坡型泥石流主要影响因素研究进展[J]. 中国水土保持, 2023,(09):50-53.

[4] 许强, 彭大雷, 范宣梅等. 甘肃积石山 6.2 级地震

触发青海中川乡液化型滑坡-泥石流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版) [J]. 2024.

[5] 王兰民, 许世阳, 王平等. 2023 年积石山 6.2 级地震诱发大规模黄土液化流滑的特征与启示[J]. 岩土工程学报. 2024, 46(2):235-243.

[6] 马许平, 曾庆利, 廖立业等. 舟曲虎家崖滑坡直接转化泥石流的特征、过程与机理研究[J]. 工程地质学报. 2022,32(1):170-182.

[7] 李为乐, 许强, 范宣梅等. 汶川地震触发的滑坡型泥石流特征及形成机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(6): 1186-1195.