

# 虎峪沟泥石流特征及其危险度评价

王启亮<sup>1</sup>, 吕义清<sup>2</sup>, 员孟超<sup>3</sup>

(1. 山西水利职业技术学院 山西 运城 044004; 2. 太原理工大学 山西 太原 030024; 3. 山西省地球物理化学勘察院 山西 运城 044004)

**摘要:** 虎峪沟位于山西省太原市西山地区, 该区泥石流的发生直接威胁着太原市城西一带居民的生命财产安全。为进一步查清该区泥石流的危害程度, 以虎峪沟潜在泥石流为研究对象, 在其流域地质环境调查的基础上, 对西山地区构造活动、河流下切形成的复杂地形地貌、自然风化及人类工程活动堆积的松散堆积物物源、不平衡降雨等各种作用相伴生的地质过程进行了研究, 并进一步采用危险度评价分析方法对虎峪沟泥石流进行了分析。结果表明, 虎峪沟泥石流的危险度  $R_d$  为 0.768, 属高度危险的泥石流沟, 若爆发仍将对下游造成威胁。

**关键词:** 虎峪沟; 泥石流; 危险度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0219-04

中图分类号: P694

## Characteristics and Risk Assessment of Debris Flows in Huyu Valley

WANG Qi-liang<sup>1</sup>, LU Yi-qing<sup>2</sup>, YUAN Meng-chao<sup>3</sup>

(1. Shanxi Vocational Technology College of Water Conservancy, Yuncheng,

Shanxi 044004, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

3. Shanxi Survey Pioneering Institute of Geophysics and Geochemistry, Yuncheng, Shanxi 044004, China)

**Abstract:** Huyu Valley is located in the Xishan area of Taiyuan City, Shanxi Province. The occurrence of debris flows in the valley directly threatens the security of the local people. To further identify the hazards of debris flows in the area, the geologic processes are studied through the investigation of potential debris flows in the valley, including tectonic activities in Xishan area, complex topography and geology formed from stream incision, loose deposit caused by natural weathering and human activities, and unbalanced distribution of rainstorms. A analytical approach to risk assessment is used to analyze debris flows in the valley. Results indicate that the risk degree of debris flows in the valley is 0.768, being a highly dangerous degree, and they may threaten the downstream if erupting.

**Keywords:** Huyu Valley; debris flow; risk assessment

虎峪沟为汾河一级支流, 位于太原市西山地区, 主沟发源于西山主峰庙前山, 由西南向东北穿越西城区汇入汾河。流域内发育若干条泥石流支沟, 威胁着下游特别是太原市河西一带工矿企业、学校、居民的安全。为此, 本研究在对虎峪沟泥石流的发育与分布状况进行调查的基础上, 采用地质分析等方法<sup>[1-2]</sup>对虎峪沟泥石流的情况作出了预测和评价。

## 1 自然地理与地质地貌背景

### 1.1 自然地理概况

虎峪沟流域呈西南—东北方向分布, 西南宽东北窄。流域内主峰庙前山海拔为 1 865.6 m, 是虎峪沟的发源地, 沟口海拔标高 898 m, 相对高差 970 m。

虎峪沟水系呈树枝状, 主沟沟谷地貌形态分段明显, 流域总面积为 50.17 km<sup>2</sup>。总体特征表现为坡面陡峻, 沟谷深窄, 沟床比降较大, 且支沟深长, 沟床比降大于主沟。流域人口密度 > 5 000 人/km<sup>2</sup>。

研究区属暖温带季风气候, 年降雨量一般为 300 ~ 800 mm 且主要集中在 6—9 月(可占全年降雨量的 60% ~ 80%), 最大年降雨量为最小年降雨量的 3 倍以上, 山区降雨量明显高于平川区。受季风影响明显, 降雨量的年内分配不均、年际变化悬殊、雨量随海拔增高而增大的特点决定了该区短历时暴雨频率高、长历时暴雨频率低, 且较大强度的暴雨主要集中在 7—8 月的总体特征。据统计, 西山地区暴雨每年都有发生, 且年 10 min, 1 h, 24 h 最大强度降雨量分别为 7.0 ~

收稿日期: 2010-07-13

修回日期: 2010-09-21

资助项目: 山西省太原市国土资源局项目“虎峪沟矿产地质环境综合治理”(201003)

作者简介: 王启亮(1964—), 男(汉族), 山西省临猗县人, 副教授, 主要从事环境地质教学与研究方面的工作。E-mail: wql.976@163.com。

通信作者: 吕义清(1970—), 男(汉族), 山西省河曲县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事环境地质与灾害地质的教学与研究。E-mail: lvyiqing@tyut.edu.cn。

15.5 mm, 16.0~35.0 mm, 36.0~138.5 mm。

## 1.2 地质条件

区内出露的地层有奥陶系石灰岩、石炭系砂岩与灰岩,二叠系砂岩与泥岩、三叠系砂岩和第四系冲积洪积层。主要断裂带为杜儿坪—南寒断裂带,该断裂带由杜儿坪断层和雅崖底断层构成地垒,走向为 $45^{\circ}$ ~ $65^{\circ}$ ,区内长度约 26.5 km,断层总体走向 $55^{\circ}$ ,倾向 $325^{\circ}$ ~ $340^{\circ}$ ,倾角 $60^{\circ}$ ~ $75^{\circ}$ ,为正断层,西南段断距 40 m 左右,中段 100~150 m,东段呈隐伏状。

## 2 虎峪沟泥石流形成条件

### 2.1 地形地貌条件

地貌类型属低中山,新第三纪以来,处于持续抬升状态,地势险峻,地形高差大,沟壑纵横。虎峪沟主沟全长 11 km,流域内共有大小毛沟 23 条,其中 5 km 以上的 2 条,1~5 km 的 13 条,0.5~1 km 的 8 条,沟道总长度 42 km,沟壑密度为 $0.81 \text{ km/km}^2$ 。侵蚀模数最高达 $10\ 000 \text{ t/km}^2$ 以上,水土流失面积占总面积的 80% 以上。总体特征表现为坡面陡峻,沟谷深窄,沟床比降较大,且支沟深长,沟床比降又大于主沟,为泥石流的运动提供了良好的地形地貌条件。据调查统计,坡面泥石流几乎全部发生在坡度大于 $40^{\circ}$ 的阴坡陡峭地段,其它地段不发育,说明地形条件是形成坡面泥石流的主控因素之一。虎峪沟整个沟域形态呈树枝状,流域形态对形成泥石流的暴雨径流影响较大,树枝状形态的沟域极有利于洪水迅速汇集、使松散固体物质被起动运移,形成泥石流。

### 2.2 物源条件

2.2.1 天然固体物源 流域内出露地层主要为石炭系、二叠系碎屑岩,仅边山及北部沟谷地带有小面积奥陶系碳酸盐岩出露,山坡覆盖有零星黄土及厚度不等的残坡积物,沟谷底部有全新统砂砾石分布。碎屑岩总体呈软硬相间,易于风化,特别是石炭纪地层,受采煤扰动强烈,岩体多处出现松动,产生大量松散岩体,成为泥石流主要固体物源之一。据调查,全风化层(残坡积层)厚度阴坡一般为 $0.4\sim 8.0 \text{ m}$ ,阳坡一般为 $0\sim 5 \text{ m}$ ,扰动松散岩体厚度一般为 $1\sim 10 \text{ m}$ ,最厚可达 $16 \text{ m}$ 。沟谷底部砂砾石呈松散状态,在泥石流流通运动过程中往往被冲刷带走,成为泥石流组成部分。根据野外筛分结果,砂岩全风化带地表可见最大粒径 $400\sim 1\ 500 \text{ mm}$ ,大于 $200 \text{ mm}$ 粒径一般占 $20\%\sim 40\%$ , $200\sim 20 \text{ mm}$ 粒径一般占 $15\sim 45\%$ , $20\sim 2 \text{ mm}$ 粒径一般占 $25\%\sim 42\%$ ,小于 $2 \text{ mm}$ 粒径一般占权重的 $10\%$ 以下;泥岩全风化带一般无大于 $20 \text{ mm}$ 粒径的颗粒, $20\sim 2 \text{ mm}$ 粒径占 $17\%\sim 55\%$ ,小于

$2 \text{ mm}$ 粒径占 $40\%\sim 80\%$ ;沟谷底部砂砾石地表可见最大粒径 $250\sim 1950 \text{ mm}$ ,大于 $200 \text{ mm}$ 粒径占 $6.2\%\sim 36\%$ , $200\sim 20 \text{ mm}$ 粒径占 $25\%\sim 40\%$ , $20\sim 2 \text{ mm}$ 粒径占 $28\%\sim 45\%$ ,小于 $2 \text{ mm}$ 粒径占 $4\%\sim 43\%$ 。在空间分布特征方面,具有由上游至下游粒径逐渐变细的特点。覆盖于基岩之上的黄土及黄土状土具有湿陷性,易被面流冲刷带走,陡岸边坡受洪水淘蚀易形成滑坡、崩塌,增加了泥石流的固体物源(表 1)。

表 1 虎峪沟泥石流沟天然固体物源统计

项目	砂砾石	黄土及黄土状土	残坡积物	合计
贮量/ $(10^4 \text{ m}^3)$	118.55	3 020.72	345.07	3 484.34

2.2.2 人工堆积物源 区内采煤、采石弃渣、生活垃圾大量堆放、人工修路、筑桥、堤、坝、渠等水工和土工建筑物破坏了原有斜坡的稳定性,易形成崩塌、滑坡,进一步形成了大量的松散堆积物。据不完全统计,虎峪沟煤矸石堆积总量约 $1.16\times 10^7 \text{ m}^3$ ,生活垃圾、工程垃圾、石渣堆放总量约 $2.99\times 10^4 \text{ m}^3$ ,为泥石流的形成提供了丰富物源。这些人工堆积物大都呈完全松散状态,极易被洪水冲刷带走。据筛分结果,新近堆积的煤矸石最大粒径 $500\sim 600 \text{ mm}$ ,大于 $200 \text{ mm}$ 粒径占 $14\%\sim 25\%$ , $200\sim 20 \text{ mm}$ 粒径占 $25\%\sim 56\%$ , $20\sim 2 \text{ mm}$ 粒径占 $21\%\sim 39\%$ ,小于 $2 \text{ mm}$ 粒径占 $5\%$ 以下,随着堆放时间增加,煤矸石逐渐被风化,大型煤矸石均发生自燃,使得粗粒径逐渐减少,而易被水流带走的细粒径物质逐渐增加。

### 2.3 气象条件

水是泥石流的组成部分,又是搬运介质的基本动力。水流携带大量泥沙(固体物质)集中运移便形成了泥石流。水的作用一方面浸润饱和和山坡松散物质,使其摩擦阻力减小,滑动力增大;另一方面是水流对边坡的淘蚀作用产生滑坡、崩塌等,增加了固体物质的来源。

谭炳炎<sup>[3]</sup>研究了山西省 10 min, 1 h, 24 h 可能发生泥石流的雨量限界值分别为 $6 \text{ mm}$ , $15 \text{ mm}$ , $30 \text{ mm}$ 。据统计,西山地区暴雨每年都有发生,且年 10 min, 1 h, 24 h 最大强度降雨量均超过该区可能发生泥石流的限界值。史料记载,山西发生特大山洪(泥石流)的频率约为 $1 \text{ 次}/100 \text{ a}$ ,可见泥石流发生的频率远低于暴雨的发生频率,而泥石流的形成在其它条件具备的前提下,与前期降水充沛继发性暴雨或长历时大暴雨密切相关。1996 年 7 月下旬至 8 月上旬石千峰至庙前山一带降雨量达 $480.3 \text{ mm}$ ,24 h 最大降雨量达 $279 \text{ mm}$ ,出现了 200 年一遇的特大暴雨,降雨量的充

沛使该区地表残坡积物已相对饱和,特别是因人类工程活动导致矿山地质环境破坏,地裂缝、地面塌陷、滑坡、崩塌等地质灾害发育,以该区虎峪河为主的沟谷形成多处大规模滑坡和矿山弃渣,将沟谷、河道堵塞,久日降雨在此蓄积,形成多处“水库”,随着降雨的继续,这些“水库”相继溢流决口,于8月4日,决口的洪水与滑坡体和矿山弃渣形成的泥石流直灌官地矿、杜儿坪矿及西山煤电集团机关所在地,洪流出山后沿迎泽西大街倾泄,最后汇入汾河,导致虎峪沟发生了特大泥石流,造成了巨大的经济损失。

### 3 泥石流特征

#### 3.1 泥沙沿程补给长度比

一般泥石流运动规律在空间分布上可分为形成区、流通区和堆积区。

虎峪沟流域呈狭长型,其形成区与流通区分界不明显,流通区与堆积区的界线也难以准确划定。松散物质来源除坡面风化残坡积物剥落外,还有滑坡、崩塌

和坡面泥石流堆积物和人工弃渣堆积,沿沟谷有堆积也有冲刷搬运,形成逐次搬运的“再生式泥石流”。泥沙沿程补给长度比大于80%。以出山口为界划分流通区和堆积区,形成区位于河谷上游段,面积占85%~90%;流通区段沟谷狭窄深切,流程相对较短,冲淤变幅在0.5~2.0 m之间;堆积区受地形和城市建筑限制呈稍宽的长带状。泥石流过后仅漫延至道路的淤泥就达 $4.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。泥石流沟分区特征值见表2。

#### 3.2 泥石流堵塞程度

虎峪沟泥石流上游区河谷形态多呈“V”型,由于崩塌、滑坡发育,堵塞程度较严重,未作任何“拦沙停淤”工程,对输导泥石流也存在一些不利因素;中游区河谷呈窄“U”型,采煤、采石弃渣、生活垃圾到处堆放,使泥石流输导很不通畅;中下游区,进入工矿企业居民生活区,河道束流变窄,桥梁居多,易拦截巨石树木;出山口处河道突然变宽,河床内有储煤场、洗煤场分布,堵塞径流;进入城区后束流河槽和排导工程又变窄,一旦发生泥石流,危害极大,对城区构成了新的威胁。

表2 虎峪沟泥石流沟分区特征

总面积/ $\text{km}^2$	总沟长/m	形成区		流通区		堆积区	
		面积/ $\text{km}^2$	主沟长/m	面积/ $\text{km}^2$	沟长/m	面积/ $\text{km}^2$	沟长/m
50.17	20 120	40.22	5 700	0.19	2 240	9.76	12 180

#### 3.3 泥石流流体特征

根据野外调查,采样测试和水文观测资料,虎峪沟“96°8'4”泥石流的流体容重为 $\gamma_c = 1.589 \text{ t/m}^3$ ,清水流量为 $113.918 \text{ m}^3/\text{s}$ ,泥石流洪峰流量为 $392.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,峰值流速 $V_c = 6.64 \text{ m/s}$ 。一次泥石流输移总量为 $5.89 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。泥石流冲出的最大石块运动速度为 $5.53 \sim 6.06 \text{ m/s}$ 。

### 4 泥石流危险度评价

沟谷泥石流危险度是指泥石流沟谷流域内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小。影响泥石流危险性的因素很多,其中主要有地形地貌、地质和水文条件及人类活动等<sup>[4-8]</sup>。刘希林等<sup>[9-11]</sup>通过对全国近100位泥石流专家的通信调查,并对调查结果进行统计处理,得出一次泥石流(可能)最大冲出量 $L_1$ 和泥石流发生频率 $L_2$ 为主要危险因子,流域面积 $S_1$ ,主沟长度 $S_2$ ,流域最大相对高差 $S_3$ ,流域切割密度 $S_6$ ,主沟床弯曲系数 $S_7$ ,泥砂补给段长度比 $S_9$ ,24 h最大降雨量 $S_{10}$ 和流域人口密度 $S_{14}$ 等共8项为次要危险因子。采用刘希林等建立的泥石流专家信息系统对虎峪沟沟谷泥石流的危险度进行评价。将泥石流危险度因子的赋值与其权重的乘积

之和定义为泥石流危险度 $R_d$  ( $0 \leq R_d \leq 1$ ),其公式为:

$$R_d = 0.2353GL_1 + 0.2353GL_2 + 0.1176GS_1 + 0.0882GS_2 + 0.0735GS_3 + 0.1029GS_6 + 0.0147GS_7 + 0.0588GS_9 + 0.0441GS_{10} + 0.0294GS_{14}$$

依据 $R_d$ 的取值划分危险度等级: $R_d \geq 0.8$ 为极度危险, $0.6 \leq R_d < 0.8$ 为高度危险, $0.35 < R_d < 0.6$ 为中度危险, $R_d \leq 0.35$ 为轻度危险。

泥石流危险度因子等级及其赋值标准见表3,虎峪沟危险度因子等级及其赋值结果见表4。通过计算,虎峪沟泥石流的危险度 $R_d$ 为0.768,属高度危险的泥石流沟,今后若暴发泥石流仍将对下游造成威胁。

### 5 结论

虎峪沟泥石流为一条潜在泥石流沟。本研究在以往工作成果基础上,通过对其流域的地理地质环境、形成条件及其特征进行分析。结果表明,虎峪沟泥石流规模大,形成机制复杂,是西山地区构造活动、河流下切形成的复杂地形地貌、自然风化及人类工程活动堆积的松散堆积物、不均衡降雨等各种作用共同作用而形成的地质过程的结果。树枝状形态的沟域极有利于洪水的汇集,易于形成泥石流;形成泥石流所需的

固体物源条件充分;该区具发生泥石流的气象条件;泥石流泥沙沿程补给长度比大、堵塞程度高、速度快、破坏性大,再次暴发的可能性,易发程度极高。运用

泥石流危险度评价方法,通过危险因子选取、分析、计算可得出,虎峪沟泥石流的危险度  $R_d$  为 0.768,属高度危险的泥石流沟,若爆发仍将对下游造成威胁。

表 3 泥石流危险度因子等级及其赋值标准

序号	危险因子及等级	小	中	大	极大
1	最大冲出量 $L_1/10^4 \text{ m}^3$	$\leq 1$	1~10	10~100	$\geq 100$
	赋值 $GL_1$	0	0.3	0.7	1.0
2	泥石流发生频率 $L_2/\%$	$\leq 10$	10~50	50~100	$\geq 100$
	赋值 $GL_2$	0	0.3	0.7	1.0
3	流域面积 $S_1/\text{km}^2$	$\leq 0.5$	0.5~10	10~35	$\geq 35$
	赋值 $GS_1$	0	0.3	0.7	1.0
4	主沟长度 $S_2/\text{km}$	$\leq 1$	1~5	5~10	$\geq 10$
	赋值 $GS_2$	0	0.3	0.7	1.0
5	流域最大相对高差 $S_3/\text{km}$	$\leq 0.2$	0.2~0.5	0.5~1.0	$\geq 1.0$
	赋值 $GS_3$	0	0.3	0.7	1.0
6	流域切割密度 $S_6/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$\leq 5$	5~10	10~20	$\geq 20$
	赋值 $GS_6$	0	0.3	0.7	1.0
7	主沟床弯曲系数 $S_7$	$\leq 1.10$	1.10~1.25	1.25~1.40	$\geq 1.40$
	赋值 $GS_7$	0	0.3	0.7	1.0
8	泥砂补给段长度比 $S_9$	$\leq 0.1$	0.1~0.3	0.3~0.6	$\geq 0.6$
	赋值 $GS_9$	0	0.3	0.7	1.0
9	24h 最大降雨量 $S_{10}/\text{mm}$	$\leq 25$	25~50	50~100	$\geq 100$
	赋值 $GS_{10}$	0	0.3	0.7	1.0
10	流域人口密度 $S_{14}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	$\leq 50$	50~150	150~250	$\geq 250$
	赋值 $GS_{14}$	0	0.3	0.7	1.0

表 4 虎峪沟危险度因子等级及其赋值

序号	危险因子	危险因子特征、等级及赋值		
		特征值	赋值 $G$	等级
1	最大冲出量 $L_1/10^4 \text{ m}^3$	588.81( $\geq 100$ )	1.0	极大
2	泥石流发生频率 $L_2/\%$	50(50~100)	0.7	大
3	流域面积 $S_1/\text{km}^2$	50.17( $\geq 35$ )	1.0	极大
4	主沟长度 $S_2/\text{km}$	5.7(5~10)	0.7	大
5	流域最大相对高差 $S_3/\text{km}$	0.97(0.5~1.0)	0.7	大
6	流域切割密度 $S_6/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	0.63( $\leq 5$ )	0	小
7	主沟床弯曲系数 $S_7$	1.23(1.10~1.25)	0.3	中
8	泥砂补给段长度比 $S_9$	0.8( $\geq 0.6$ )	1.0	极大
9	24h 最大降雨量 $S_{10}/\text{mm}$	279( $\geq 100$ )	1.0	极大
10	流域人口密度 $S_{14}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	5 000( $\geq 250$ )	1.0	极大

## [参 考 文 献]

- [1] 刘涛,张洪江,吴敬东,等.层次分析法在泥石流危险度评价中的应用[J].水土保持通报,2008,28(5):6-10.
- [2] 刘涌江,胡厚田,白志勇.泥石流危险度评价的神经网络法[J].地质与勘探,2001,37(2):84-87.
- [3] 谭炳炎.暴雨泥石流预报的研究[J].水土保持学报,2002,4(4):14-20.
- [4] 刘涌江,胡厚田,白志勇.泥石流危险度评价[J].水土保持学报,2000,14(2):84-87.
- [5] 杨宗佳,乔建平,陈晓林,等.泥石流危险度野外快速评价方法探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):17-20.

- [6] 陈宇,高攀,李卓航.四川茂县青林沟泥石流危险度评价[J].四川地质学报,2009,29(专辑):159-162.
- [7] 苏鹏程,倪长健,孔纪名,等.区域泥石流危险度评价的影响因子识别[J].水土保持通报,2009,29(1):128-132.
- [8] 刘希林,唐川,张松林.中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法[J].灾害学,1993,8(2):1-7.
- [9] 刘希林.区域泥石流危险度评价研究进展[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4):3-11.
- [10] 刘希林,唐川.泥石流危险性评价[M].北京:科学出版社,1995.
- [11] 刘希林,莫多闻.泥石流风险评价[M].成都:四川科学技术出版社,2003.