

徐兴华,肖双粟,冯杭建,等. 低频性沟谷型泥石流水动力学冲蚀启动机制及动态监控. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3):919-932. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220324.

Xu Xinghua, Xiao Shuangsu, Feng Hangjian, et al. Hydrodynamic Erosion Initiation Mechanism and Dynamic Monitoring of Low Frequency Gully Debris Flow. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3):919-932. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220324.

低频性沟谷型泥石流水动力学冲蚀 启动机制及动态监控

徐兴华¹, 肖双粟¹, 冯杭建¹, 吕庆²

1.浙江省地质院地质矿产研究所, 杭州 310007

2.浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058

摘要:位于浙江省西部衢北地区的杨家泥石流是典型的水体冲蚀形成的低频性沟谷型泥石流。结合杨家泥石流所处的地质环境背景,首先在分析其分区特征、类型和成因机制,评价泥石流易发性及危害程度的基础上,利用统计分析方法确立暴雨强度指标;然后采用力学计算和极限平衡分析理论,构建强降雨作用下冲沟水动力学冲蚀启动模型,确定临界径流深度;再构建降雨—泥水位—流量相结合的递进式多层次综合预警体系;最后于2012年10月在杨家泥石流冲沟开展单沟泥石流远程自动化监测网络体系建设,实施远程监测控制和预警。研究表明:杨家泥石流冲沟呈小流域封闭状,汇水区、形成—流通区和堆积区分区特征明显,杨家泥石流是由特大暴雨激发的、低频的、一次性爆发规模为小型的稀性水石流,为中易发泥石流;冲沟形成区松散物源地表径流深度超过1.0 m时,处于临失稳状态,松散物质易被冲刷侵蚀,可将此临界径流深度作为是否冲蚀启动泥石流的有效判据,并结合暴雨强度指标($R < 2.8$)和泥石流洪峰流量($Q_d = 31.83 \text{ m}^3/\text{s}$)确定泥石流综合预警指标;监测期间(2012-10-26—2022-10-10)研究区最大降雨发生于2019-06-19,经计算 $R = 2.4 < 2.8$,冲沟区处于安全雨情,沟道泥水位未达到地表径流的警戒限值,不具备泥石流形成启动的水动力条件,沟内流量(最大值为 $1.70 \text{ m}^3/\text{s}$)正常,未达到洪峰流量,未有泥石流发生或沟道堵塞等不良现象,此期间冲沟区较为稳定,再次发生泥石流的可能性小。建立以水动力学冲蚀启动特征参数为主的综合监测网络体系,可作为低频性沟谷型泥石流系统防灾控制的技术方法。

关键词:低频性;沟谷型泥石流;水力冲蚀;临界径流深度;远程监测;综合预警

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220324

中图分类号:P642

文献标志码:A

收稿日期:2022-11-28

作者简介:徐兴华(1983-),男,高级工程师,博士,主要从事地质灾害调查评价、监测预警和综合防治等方面的研究,
E-mail: xuehua-11@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(42277132, 42230702);浙江省基础公益研究计划项目(LGF21D020001, LTGG23D020001);浙江省重点研发计划项目(2021C03159);浙江省自然资源厅科技项目(2021-77);浙江省地质矿产研究所科技创新基金(ZD2020KJ05);2020年中央自然灾害防治体系建设资金项目(2020-04)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (42277132, 42230702), the Basic Public Welfare Research Program of Zhejiang Province (LGF21D020001, LTGG23D020001), the Key Research and Development Program of Zhejiang Province (2021C03159), the Science and Technology Project of Zhejiang Provincial Department of Natural Resources (2021-77), the Science and Technology Innovation Fund of Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources (ZD2020KJ05) and the 2020 Central Natural Disaster Prevention and Control System Construction Fund (2020-04)

Hydrodynamic Erosion Initiation Mechanism and Dynamic Monitoring of Low Frequency Gully Debris Flow

Xu Xinghua¹, Xiao Shuang¹, Feng Hangjian¹, Lü Qing²

1. Institute of Geology and Mineral Resources, Zhejiang Institute of Geosciences, Hangzhou 310007, China

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The Yangjia gully debris in Zhejiang Province is a typical low frequency gully debris flow formed by water erosion. Based on the background of geological environment, the subarea characteristics, types and formation mechanism of debris flow are analyzed, and the susceptibility and hazard of debris flow are also evaluated. Then the rainstorm intensity index is established by statistical analysis method. In addition, through mechanical calculation and limit equilibrium analysis theory, the hydrodynamic erosion initiation model is established to determine the critical runoff depth under rain condition. Based on these studies, the progressive hierarchical comprehensive early warning system is constituted by combining rainfall, mud water level and flow index. Finally the remote automatic monitoring network system of debris flow is built up from October, 2012 for monitoring control and early warning. The results show that the Yangjia gully is a small enclosed watershed with distinct zoning characteristics of catchment area, formation circulation area and accumulation area. The debris flow is a low frequency, small scale and diluted water stone flow triggered by extremely heavy rainstorm. The susceptibility of debris flow is moderate, and it will harm the village area at the downstream of the gully, and the degree of harm is relatively high. When the surface runoff depth of loose material sources in the gully formation area exceeds 1.0 m, these loose materials are in a critical unstable state and easy to be eroded. This critical runoff depth can be used as an effective criterion to determine whether the debris flow is started by erosion, and the comprehensive early warning index of debris flow can be determined by combining the R value of rainstorm intensity and flood peak flow Q_d of 31.83 m³/s. Through remote automatic monitoring, the R value (2.4) is less than 2.8 during the monitoring period (2012-10-26—2022-10-10), the gully area is in a safe rain situation, and the gully mud level does not reach the warning limit of surface runoff, so there is no hydrodynamic condition for the formation and start-up of debris flow. Moreover, the gully flow is normal, and the maximum value (1.70 m³/s) is much less than 31.83 m³/s, and there is no adverse phenomenon such as debris flow or channel blockage. The gully area is relatively stable throughout the monitoring period, and the possibility of debris flow occurring again is small. It is also confirmed that the comprehensive monitoring network system based on the characteristic parameters of hydrodynamic erosion start-up is an effective technical method for disaster prevention and control of low frequency gully debris flow.

Key words: low frequency; gully debris flow; hydraulic erosion; critical runoff depth; remote monitoring; comprehensive early warning

0 引言

山区泥石流的形成是水体和土体在一定条件下彼此结合成混合流体的过程,包括三大形成条件,即陡峭的地形地貌、丰富的松散物质来源和短时强降雨^[1]。根据浙江省小流域泥石流调查评价成果^[2],全省有记载已发生的泥石流地质灾害中,沟谷型泥

石流占 71.4%,全省 48 个山区县(市、区)分布泥石流隐患沟 1 570 余处,其中 90% 以上为沟谷型。近年来,有关人员对浙江省泥石流类型分布^[3]、气象特征^[4]、降雨阈值^[5]、预警预报^[6-7]及小流域防洪^[8]等方面有针对性地开展了研究工作,有效指导了全省泥石流防灾实践。此外,相关学者在沟谷型泥石流早期识别^[9]、崩滑启动条件^[10-11]、形成机理^[12-13]、危

险评价^[14]和观测试验^[15]等方面也开展了深入研究,并结合泥石流特点提出了针对性防治措施^[16]。

对于沟谷型泥石流,水体冲刷侵蚀是形成的主要模式之一,其水体冲蚀启动机制需要进一步探讨,结合浙江省泥石流低频性的特点,构建合适的监测预警技术体系以及有效指导低频性沟谷型泥石流防灾,具有现实的指导意义。本文选择浙江省杨家泥石流作为研究对象,首先查明泥石流沟分区特征,分析其类型及成因机制,进行易发程度和危害程度评价;然后结合其水体冲蚀形成以及低频性的特点,通过统计分析方法,采用力学计算和极限平衡分析理论,开展泥石流形成启动机制研究,构建水动力学冲蚀启动模型,确定临界径流深度;再结合暴雨强度指标和洪峰流量建立综合预警体系;最后通过开展单沟泥石流远程自动化监测网络体系建设,实施泥石流特征要素的动态监测控制与预警研究,以期探索对于低频性沟谷型泥石流综合防灾可行、可靠的防治技术方法。

1 研究区域

1.1 基本情况

杨家泥石流沟^[17]位于浙江省西部衢州市衢江区北部地区上方镇杨家村尖宅坞上游(图 1)。1972-08-03,在“7207”号台风暴雨的影响下,冲沟区发生大洪水,将冲沟内大量松散物质携卷而下,形成泥石流。据调查一次性冲出泥石流物质约 5 000 m³,冲毁下游沟口区部分耕种农田,幸未造成人员伤亡。

19720803 杨家泥石流为一处典型的水体冲蚀形成的沟谷型泥石流。

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 1 500 mm 左右,年内 5—7 月中旬为梅雨期,7 月中旬—9 月中旬为台风雨期,5—9 月汛期期间的降雨量占全年总降雨量的 70%以上。杨家泥石流发生时,所在地区 24 h 降雨量达 268 mm,最大降雨强度为 52.6 mm/h,降雨集中,降雨强度大,山区汇聚水流流量大、流速快。

本区位于侵蚀剥蚀低山丘陵区,流域面积 1.02 km²,平面形态呈上宽下窄的扇形状,最大高差在 500 m 以上,沟谷切割深度在 200~350 m 之间。主沟位于山间峡谷中,形态较明显,总长度为 500~600 m,近东西走向,顺直性较好,平均纵坡降 390‰。上游沟谷形态呈“V”形,中、下游沟谷形态呈“U”形;冲沟两侧山体相对高差在 200~350 m 之间,坡度多为 30°~45°,后缘坡度较陡,为 45°~50°,植被发育一般。下游沟口区相对高差在 15~25 m 之间,整体地势呈东高西低,地形坡度在 10°~15°之间,沟口区主要为村庄居住区和梯田耕种区。

本区地层岩性主要为前震旦系骆家门组(AnZl),岩性为灰色千枚状砂岩、粉砂岩、泥岩,中厚层状结构,具层理构造,产状为 305°∠65°。山体基岩出露以中风化为主,节理裂隙较发育,岩体结构较完整一较差;局部区段节理裂隙发育密集,岩体结

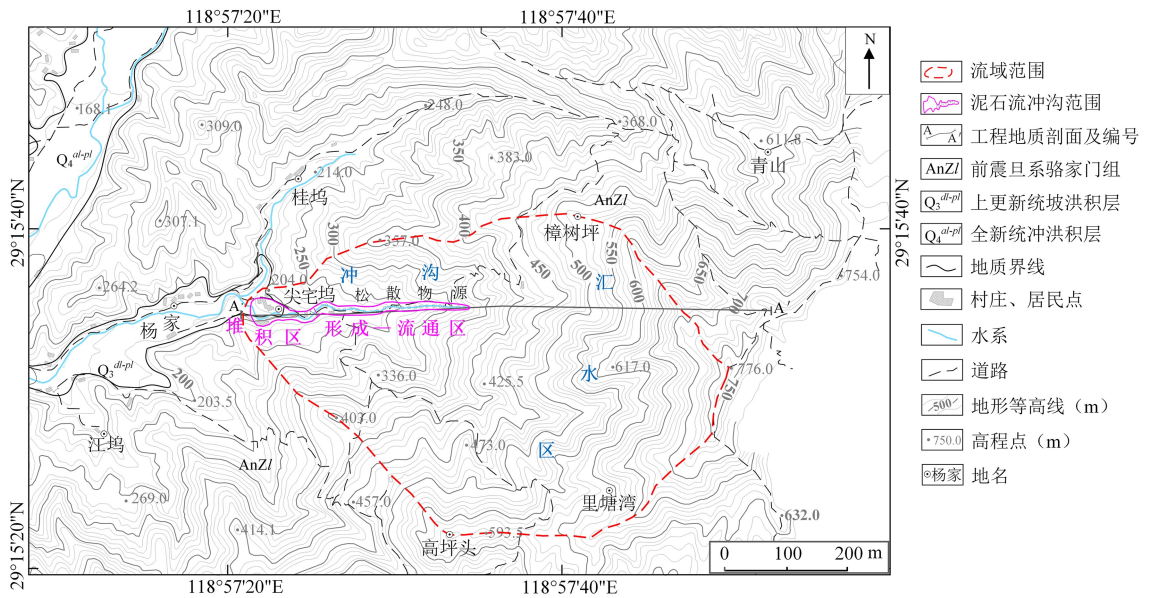


图 1 研究区泥石流沟平面图

Fig.1 Plan of debris flow gully in the study area

构完整性差。山体上部全一强风化层呈松散砂土状,厚度为 0.5~1.0 m。山体表层覆盖黄褐色、土黄色含碎石粉质黏土,结构松散,可塑状,中等压缩性,碎石体积分数为 10%~20%,粒径一般为 2~5 cm,局部大者达 5~10 cm,厚度一般在 0.5~1.0 m 之间,冲沟下游沟口区地势较缓地带可达 1.0~3.0 m。沟口下游村庄前侧地势低缓地带分布上更新统坡洪积层,岩性为灰黄色、土黄色含砾砂粉质黏土,厚度在 2.0~4.0 m 之间。

2 泥石流基本特征及评价

2.1 分区基本特征

杨家泥石流沟流域形态呈小流域封闭状,自后缘山体斜坡顶部至冲沟下游沟口区,整体地势自东向西逐渐降低。冲沟位于山间峡谷中,呈狭长条形,为泥石流的物源形成一流通区;下游沟口区地势相对低缓和开阔,为泥石流堆积区。

总体上泥石流冲沟区域受一定的地形制约,流域周界较为清晰,汇水区、形成一流通区、堆积区分区特征较明显(图 2)。

2.1.1 汇水区

汇水区自后缘山体斜坡顶部至冲沟上游,整体地势东高西低,呈小流域封闭状,标高在 330~750 m 之间,相对高差为 250~420 m,山体坡度一般在 30°~50° 之间。泥石流冲沟位于流域汇水区的底部,强降雨作用下,大量雨水和地表水沿流域汇水区山体斜坡向下方冲沟汇聚,于冲沟内顺地形向沟道下游出口处排泄。由于流域汇水区的集水特征及其封闭性质,冲沟下游出口处系其唯一的出水地段。

2.1.2 形成一流通区

形成一流通区主要位于冲沟中上游,狭长且陡直,标高在 200~330 m 之间,相对高差为 100~130 m,水平长度为 300~350 m,平面形态呈直线形,平均纵坡降在 390‰ 左右。

冲沟上游横断面呈“V”形,往下游变为“U”形,沟道宽度为 2~5 m,自上而下逐渐变宽。冲沟内侧分布较多松散固体物质,厚度一般为 0.5~1.5 m(图 3),局部沟段较厚,为 2~3 m 甚至更大,造成沟床严重淤积(图 4)。

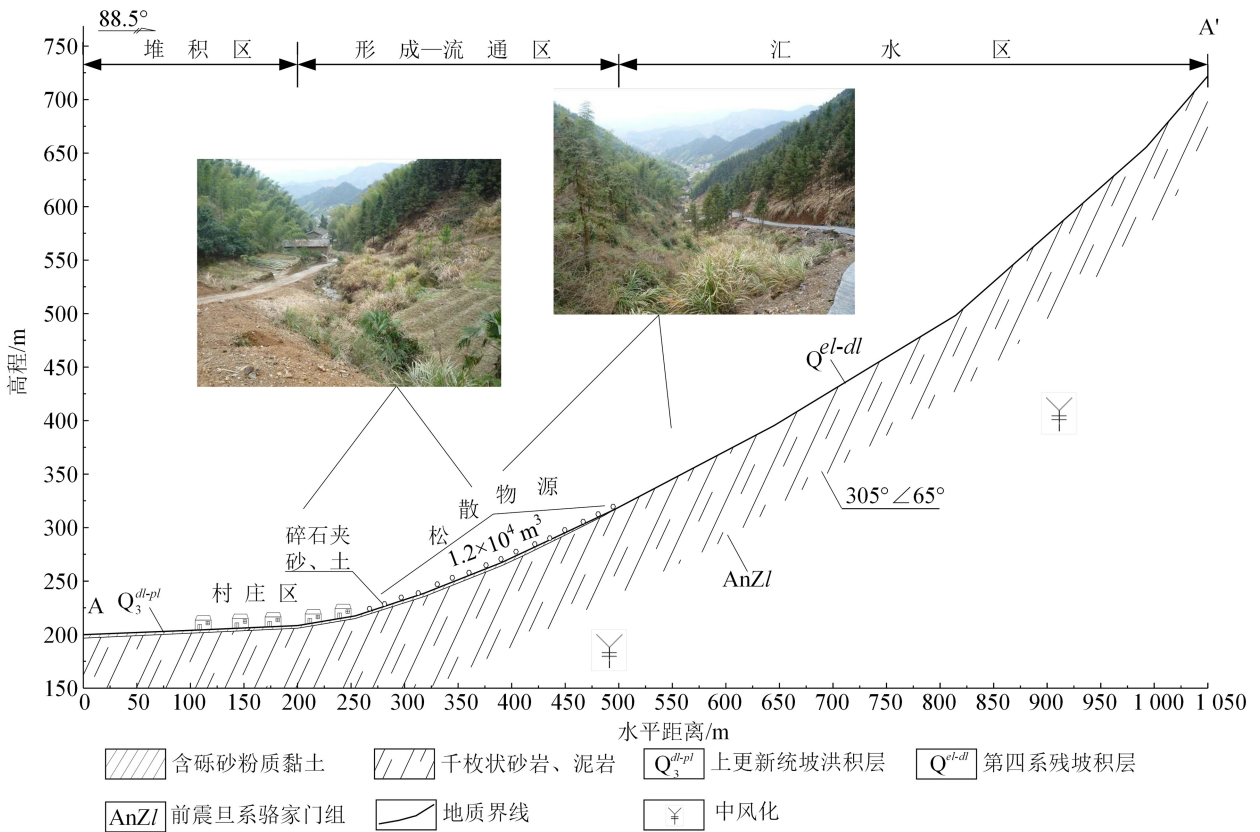


图 2 研究区工程地质剖面图

Fig.2 Engineering geological section of gully in the study area



图3 研究区泥石流冲沟内部松散物源分布

Fig.3 Loose materials distribution of flow gully in the study area



图4 研究区泥石流冲沟内淤积严重

Fig.4 Loose materials serious siltation of flow gully in the study area

冲沟下游村庄后侧还分布大量梯田,梯田以块石垒成,以松散碎石土为主,稳定性较差,局部挤占沟道(图2左)。两侧山体相对高差在200~350 m之间,坡度多为30°~45°,表层松散层厚度在1.0~2.0 m之间(图2右)。

根据调查,构成泥石流沟潜在松散物源的沟道内部及两侧松散堆积物密度为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,其中沟道中堆积的松散固体物质体积约 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,物源补给段较长,占冲沟长度的50%~60%。

2.1.3 堆积区

堆积区主要位于冲沟下游沟口开阔和地势低缓地带,整体地势呈东高西低,地形高差在15~25 m之间,地形坡度为10°~15°。堆积区主要分布着村庄、道路和农田,部分村民房屋和梯田等还挤占沟道。由于地形开阔以及地势高差较小,沟口堆积区

内主要以堆积为主,为泥石流潜在危险区。

2.2 类型划分及成因机制

杨家泥石流为沟谷型泥石流,属于由特大暴雨激发的、低频的、一次性爆发规模为小型的稀性水石流。其主要分类说明如下:

1)按集水区地貌特征划分属于沟谷型泥石流。流域形态呈上宽下窄的扇形,小流域封闭状,冲沟位于山间峡谷中,区域受一定的沟谷制约,流域周界较为清晰,上游汇水区、形成一流通区以及堆积区分区特征较明显。

2)按水源成因划分属于暴雨型泥石流。灾害发生时,降雨量和降雨强度都很大,1972-08-03当日降雨总量达268 mm,最大雨强为52.6 mm/h,且降雨量集中,为泥石流的形成启动提供了强有力的水动力条件。

3)按爆发频率划分属于低频性泥石流。自19720803杨家泥石流发生,至今50多a未有再次发生泥石流的历史资料记录,以往泥石流发生时间间隔较长。

4)按物质组成划分属于稀性水石流。泥石流物质主要为碎砾石、块石和砂土等,分布较杂乱,无定向性和分选性,可见流体性质主要以稀性的碎块石、泥沙夹杂含沙水流等混合物为主。

5)按一次性爆发规模划分属于小型。强降雨作用下,冲沟一次性冲出泥石流物质总量约 $5\,000 \text{ m}^3$,爆发规模为小型。

分析杨家泥石流成因机制可知,其形成启动模式以沟道水体冲刷侵蚀动力学模式为主,由强降雨作用下沟道洪水对内部松散堆积体进行冲刷、侵蚀进而形成的泥石流,其形成后威胁着下方沟口区村庄安全。

2.3 易发性及危害程度

根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》(T/CAGHP 006—2018)^[16]附录I“泥石流沟数量化综合评判及易发程度等级标准”,通过对反映泥石流冲沟易发程度的各个影响因素进行数量化评分,经各因素综合叠加评价其得分为89分,介于87~115分之间,该处属于中易发泥石流沟。

泥石流活动危险区范围包括形成一流通区和堆积区,其中泥石流堆积区是泥石流主要的致灾、成灾部位。杨家泥石流冲沟形成一流通区仍分布大量松散岩土体,潜在松散物源丰富,在极端强降雨作用下大量集中水流再次冲蚀启动泥石流。据统计^[17],再

次发生泥石流将危害下游沟口村庄区村民住户 20 余人的生命财产安全,危害程度属较大级。

3 泥石流形成启动机制

3.1 暴雨强度指标

3.1.1 理论模型

强降雨是诱发泥石流的关键因素,依据短期内降雨量的动态变化情况,基于统计分析方法确定反映泥石流爆发临灾的降雨量参数变量阈值。

结合历史泥石流灾害资料和降雨过程雨量信息,针对流域形态显著、有一定汇水面积和纵坡降较大的沟谷型泥石流,根据基本理论计算公式^[18],结合降雨基本特征分析,建立合适的泥石流降雨监测预警暴雨强度指标 R 为

$$R = \mu(H_{24}/100 + H_1/40). \quad (1)$$

式中: μ 为前期降雨量修正系数,无前期降雨时, μ 取 1.0,有前期降雨时, $\mu > 1.0$,一般 μ 取 1.1~1.2,本文取中间值 1.15 进行计算; H_{24} 为 24 h 最大降雨总量(mm); H_1 为 1 h 最大降雨量(mm)。

经统计分析,暴雨强度指标 R 与泥石流是否发生满足相应关系如下。

1) $R < 2.8$,安全雨情。

2) $R \geq 2.8$,可能发生泥石流的雨情,包括以下两种情况:① $2.8 \leq R < 3.5$,警戒雨情;② $R \geq 3.5$,灾害激发雨情。

由此可通过实时监测降雨量的动态变化,参照暴雨强度指标 R 值,分析引发泥石流灾害的可能性,及时进行降雨监测预警。

3.1.2 实际案例对比验证

以浙西衢北地区 20020815 特大型泥石流地质灾害^[17]为例。2002-08-14—15 该地区突发特大暴雨,区内西北部地区的双桥、太真等地爆发沟谷型泥石流,其中双桥黄蒙沟泥石流达重大级灾情。

由黄蒙沟地区实测降雨资料(图 5)可知,泥石流爆发前该地区 1、3、6 h 降雨量分别为 50.7、82.5 和 85.0 mm,同时前期降雨充分,泥石流发生前 24 h 的降雨总量为 179.4 mm。据统计可知,引发泥石流的主要降雨时段是爆发前 1~3 h,并且泥石流的发生与爆发前 24 h 的降雨量密切相关;本区泥石流爆发前 1~3 h 降雨量较大(1 h 大于 50 mm,3 h 大于 80 mm),并且前 24 h 的降雨总量较大(大于 120 mm),均为引发泥石流的有利降雨条件。结合降雨特征条件,由式(1)计算可得,引发泥石流的暴

雨强度指标 $R = 3.52 > 3.5$,为灾害激发雨情,表明该地区发生泥石流的可能性较大。实际情况下,经统计该区群发 5 处沟谷型泥石流。

对比同时期黄蒙沟地区邻近东部山区的杜泽庙前地区的实测降雨资料(图 5),结合庙前地区 2002-08-14 24 h 降雨总量及对应黄蒙沟泥石流发生前庙前地区 1~3 h 的降雨量,根据式(1)可确定庙前地区引发泥石流的暴雨强度指标 $R = 2.61 < 2.8$,可见该地区降雨未达到激发泥石流灾害的有利降雨条件,为安全雨情。实际情况下庙前地区没有发生泥石流地质灾害。

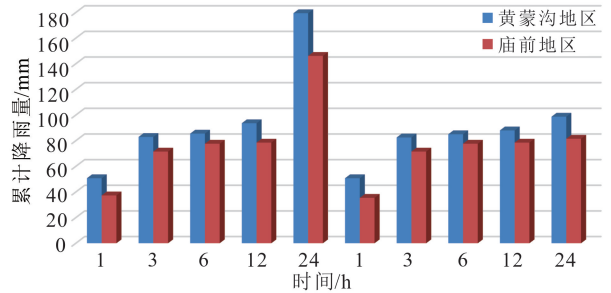


图 5 黄蒙沟及庙前地区降雨实测资料(2002-08-14—15)

Fig.5 Measured rainfall data in Huangmenggou and Miaoqian areas (August 14-15, 2002)

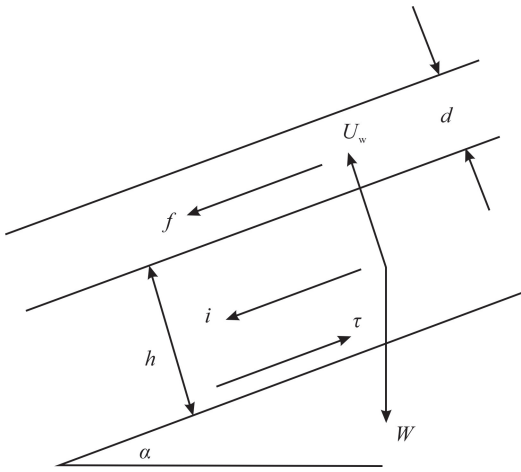
3.2 冲沟水动力学冲蚀启动模型

3.2.1 概化模型

低频性沟谷型泥石流是在降雨作用下,随着降雨的持续及降雨强度的增加,地表径流不断汇流底部冲沟,沟道内部径流水深逐渐增加,携带沙石的水流冲刷运动不断加剧,沟道内堆积的松散固体物质不断被表层水流逐层地侵蚀、搬移,甚至出现揭底现象,这些被冲刷搬移的沙石土体夹杂着混合水流,在一定地形因素作用下就形成沟谷型泥石流。

在降雨引发泥石流物质转化启动机制研究^[15-19]的基础上,结合本处泥石流冲沟特征进一步深化冲沟水力冲蚀作用条件,建立概化力学模型(图 6)。

相关假定如下:1)在降雨作用下,沟道表层松散固体物质已经达到饱和,松散固体物质中的孔隙水沿着坡面方向渗流,考虑地表径流而不考虑流速的影响;2)表层饱和和松散固体物质层受到地表汇聚水流的冲刷侵蚀作用。



f. 地表径流对表层松散固体物质的冲刷力(kN); τ . 表层固体物质与沟道接触层面间的抵抗启动力(kN);*i*. 松散固体物质层中水渗流产生的渗流力(kN); U_w . 孔隙水压力(kN);*W*. 表层松散固体物质的重力(kN);*d*. 地表径流的深度(m); α . 沟道的倾角($^\circ$);*h*. 饱和松散固体物质层的厚度(m)。

图 6 表层松散固体物质层受力分布模式图

Fig.6 Stress distribution pattern of surface loose solid materials in gully

3.2.2 失稳平衡关系方程

降雨作用下地表径流(含泥沙水流)对表层松散固体物质的冲刷力 *f* 为

$$f = \gamma_{sw} d \sin \alpha = [(\gamma_s - \gamma_w) C_s + \gamma_w] d \sin \alpha. \quad (2)$$

式中: γ_{sw} 为地表含泥沙水流的重度(kN/m³); γ_s 为松散固体物质的天然重度(kN/m³); γ_w 为水的重度(kN/m³); C_s 为地表径流含泥沙的体积分数。

降雨过程中松散固体物质层中雨水渗流产生的渗流力 *i* 为

$$i = \gamma_w h \tan \alpha. \quad (3)$$

根据研究资料^[15]统计可知,一般降雨作用下,表层岩土体饱和深度一般为 20~30 cm,在暴雨作用下有进一步加深的趋势,可达 40~50 cm。

降雨作用下沟道松散固体物质启动力 *v* 为

$$v = f + i + (W + \gamma_{sw} d) \sin \alpha = \gamma_{sw} d \sin \alpha + \gamma_w h \tan \alpha + (\gamma_{sat} h + \gamma_{sw} d) \sin \alpha. \quad (4)$$

式中, γ_{sat} 为饱水以后表层松散固体物质的饱和重度(kN/m³), $\gamma_{sat} = (\gamma_s - \gamma_w) C_g + \gamma_w$, C_g 为表层松散固体物质的体积分数。

积水盖层作用下的孔隙水压力 U_w 为

$$U_w = (\gamma_s - \gamma_w) h + \gamma_w d. \quad (5)$$

沟道表层松散固体物质的抵抗启动力 τ 为

$$\tau = [(W + \gamma_{sw} d) \cos \alpha - U_w] \tan \varphi + C = \{(\gamma_{sat} h + \gamma_{sw} d) \cos \alpha - [(\gamma_s - \gamma_w) h + \gamma_w d]\} \tan \varphi + C. \quad (6)$$

式中: C 为表层松散固体物质的黏聚力(kPa); φ 为松散固体物质的内摩擦角($^\circ$)。

由此,降雨作用下沟道表层松散固体物质的稳定状态可用抵抗启动力与其启动力的比值来表征,称为稳定系数 *K*,其理论计算式^[19]表示为

$$K = \frac{\tau}{v} =$$

$$\frac{\{(\gamma_{sat} h + \gamma_{sw} d) \cos \alpha - [(\gamma_s - \gamma_w) h + \gamma_w d]\} \tan \varphi + C}{\gamma_{sw} d \sin \alpha + \gamma_w h \tan \alpha + (\gamma_{sat} h + \gamma_{sw} d) \sin \alpha}. \quad (7)$$

3.2.3 泥石流冲蚀临界径流深度的确定

设定降雨作用下沟道表层松散固体物质的稳定状态处于临界状态,即 $K = 1$,基于此可确定泥石流冲蚀启动时的地表临界径流深度 d_k ^[19]为

$$d_k = \frac{(\gamma_{sat} h \cos \alpha + \gamma_w h) (\tan \varphi - \tan \alpha) - \gamma_s h \tan \varphi + C}{\gamma_{sw} \cos \alpha (2 \tan \alpha - \tan \varphi) + \gamma_w \tan \varphi}. \quad (8)$$

在降雨作用下,当其他条件都具备时,只要沟道内部地表径流超过临界径流深度,形成区的松散固体物质就可被冲刷侵蚀而形成泥石流,可将临界径流深度作为泥石流是否冲蚀启动的判据。

3.3 泥石流洪峰流量

通过实地调查确定冲沟相关特征参数,根据泥石流勘查规范^[18]采用雨洪法计算小流域暴雨峰值流量,参照相关水文图集手册^[20],可知其理论表达式为

$$Q_r = 0.278 \delta R_r S. \quad (9)$$

式中: Q_r 为暴雨峰值流量(m³/s); δ 为地区径流系数,通过水文图集手册^[20]查阅确定; R_r 为最大雨强(mm/h); S 为流域面积(km²)。

再结合冲沟堵塞程度,确定泥石流洪峰流量为

$$Q_d = (1 + \psi) Q_r D_c. \quad (10)$$

式中: Q_d 为泥石流洪峰流量(m³/s); ψ 为泥石流修正系数,可查表或通过泥石流及水的重度和固体物质比重换算所得; D_c 为冲沟堵塞系数,可根据堵塞程度及沟道特征查表^[18]所得。

3.4 综合预警体系

结合泥石流形成启动的降雨、地形和松散物源等要素条件,结合沟谷型泥石流水动力学冲蚀启动

机制,构建泥石流综合预警体系(图7),确定其递进式分层次综合预警指标如下。

1)降雨先期预警:实时监测冲沟区雨量变化信息,动态计算暴雨强度指标并判别雨情特征,进行降雨预警。

2)水体冲蚀启动预警:实施监测沟道泥水位深度变化,动态判别是否达到松散物源被冲蚀启动的临界径流深度,确定泥石流是否启动。

3)泥石流流通预警:实时监测沟道流体物质的流量变化,动态判别是否达到泥石流洪峰流量,确定泥石流规模及流通特征。

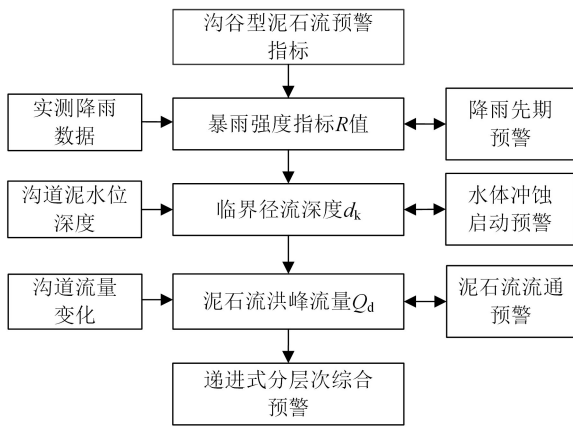


图7 泥石流综合预警体系

Fig.7 Comprehensive early warning system of debris flow

4 工程实例应用

4.1 预警指标确定

4.1.1 暴雨强度指标

根据泥石流降雨监测预警的暴雨强度指标,结合1972-08-03在“7207”号台风暴雨影响下杨家泥石流发生时的降雨特征参数值,综合确定该处泥石流可能发生的暴雨强度指标 $R = 4.59 > 3.5$,为灾害激发雨情,而且实际情况下该处发生了泥石流。

由此可用暴雨强度指标 R 值来动态反映冲沟是否具有再次发生泥石流的可能性。

4.1.2 泥石流冲蚀临界径流深度

根据调查,冲沟形成区松散固体物质堆积区的平均地形坡度约 21.3° ,堆积体厚度一般为 $0.5 \sim 1.5$ m,松散固体物质主要由基岩风化产物及表层松散岩土体组成,基本物性参数如下: γ_s 为 22.6 kN/m³, γ_{sat} 为 24.3 kN/m³, C 为 13.8 kPa, φ 为 19.8° 。

强降雨作用下,表层松散物质的饱和层深度一般在 0.5 m 左右,通过雨季野外实地调查方法并结合相关资料^[17]确定该处 γ_{sw} 在 $1.26 \sim 1.28$ kN/m³ 之间,根据实际情况取 1.27 kN/m³。

根据冲沟水动力学冲蚀启动形成泥石流的地表临界径流深度的平衡关系方程,将各项指标参数代入式(8),可得该处泥石流形成启动所需的地表临界径流深度 d_k 为 1.07 m。

可见在降雨作用下,随着降雨强度的增大,降雨量增加,沟道内地表径流深度不断增大。当其他条件都具备时,只要表层地表径流深度超过此临界径流深度,即可能对沟道内部分布的松散固体物质进行冲蚀进而形成泥石流。因此,可将其地表径流的临界径流深度 1.0 m 设定为警戒阈值,通过沟道泥水位的监测实施泥石流形成启动预警。

4.1.3 泥石流洪峰流量和泥水位深度校核

结合冲沟流域面积 1.02 km²,经查阅资料^[18,20]确定该地区径流系数 0.667 ,泥石流修正系数 0.599 ,以最大雨强 52.6 mm/h 为准,则根据前述理论表达式可确定暴雨峰值流量 Q_r 为 9.95 m³/s。

根据冲沟实际堵塞情况,堵塞系数可取 2.0 ,根据前述计算公式可知泥石流洪峰流量 Q_d 为 31.83 m³/s。

选取沟道形成区代表性断面,结合实际调查测绘可知断面面积 S_d 为 5.4 m²,则泥石流沟道平均流速为 $v_d = Q_d/S_d = 31.83/5.4 = 5.9$ (m/s)。

根据文献^[18],稀性泥石流流速公式表达式为

$$v_d = \frac{1}{\sqrt{\gamma_s \psi + 1}} \frac{1}{n} d_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中: v_d 为沟道平均流速(m/s); ψ 为泥石流修正系数; n 为平均河床糙率; I 为沟道纵坡比降(‰); d_h 为沟道泥水位深度(m)。

经查阅资料^[18,20]取平均河床糙率 0.067 ,结合沟道纵坡比降 390% ,基于式(11)代入相关物性及特征参数确定沟道泥水位深度 d_h 为 1.015 m。

经测算,降雨作用下冲沟形成区代表性断面在泥石流洪峰流量下的泥水位深度值与强降雨作用下沟道地表水流冲蚀形成启动泥石流所需的地表临界径流深度较为接近,这印证了泥石流形成启动水动力学冲蚀模型的合理和可靠性。

4.1.4 泥石流预警时效

结合泥石流冲沟形成区上游松散物源分布区至下游沟口村庄区顶部之间的沟道斜长(可经水平长度和倾角换算而得),根据确定的泥石流沟道平均流

速,可测算泥石流形成启动以后沿沟流通时间(即泥石流预警响应时间) T 为

$$T=(L/\cos \alpha)/v_d=(300/\cos 21.3^\circ)/5.9=54.7(\text{s}).$$

式中, L 为沟道水平长度(m)。

由此可见,强降雨作用下,地表水流汇集下方冲沟内部,冲沟形成区上游松散物源经冲蚀启动形成泥石流以后,大量松散物质夹杂着泥沙水流沿沟道流通至下游沟口区村庄的时间介于 50~60 s 之间。可见在所测算流通时间内,提前实施泥石流监测预警,村庄区可实现第一时间应急响应,能最大限度保证沟口区村庄人员安全。

4.2 自动化监测网络体系建设

4.2.1 监测技术体系结构

根据引发泥石流的影响因素,如诱发条件、物性变化和运动流通特征等,并结合相关技术规范要求^[21],分析降雨、泥水位、流量及红外摄像监控仪等监测设备的适用条件、使用范围及精度,构建泥石流远程自动化监测技术体系结构,开展远程自动化监测技术方法在泥石流单沟监测预警中的应用(图 8)。步骤如下。

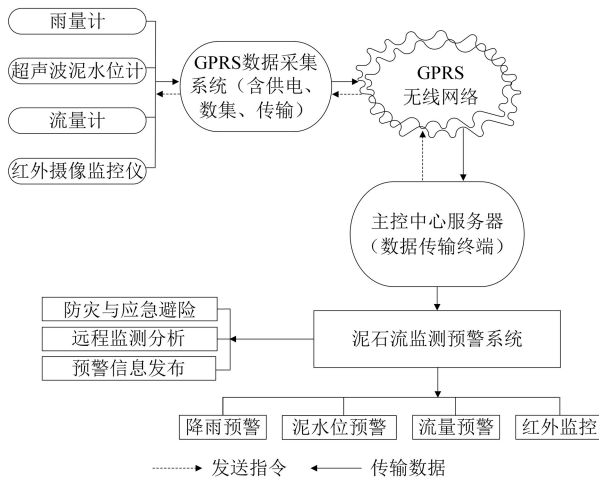


图 8 泥石流远程自动化监测网络体系结构

Fig.8 Network architecture of remote automatic monitoring of debris flow

首先,根据泥石流三区基本特征及边界条件,选择确定并布设安装雨量计、超声波泥水位计、流量计及红外摄像监控仪等监测仪器设备;然后,基于 GPRS 无线网络,通过数据采集系统及 GPRS 无线传输终端,从主控中心服务器发送指令控制各型监测仪器设备,包括开启、数据采集、闭合、工作状态反馈等控制操作;最后,将各型监测仪器设备的连续监测

数据传输入主控中心服务器,进行实时动态化曲线查询与显示。据此实现泥石流沟远程自动化连续监测控制与实时信息动态反馈,并通过监测预警为泥石流防灾减灾提供决策依据。监测仪器设备布设见图 9。

泥石流监测网络体系布设的基本要求如下:

- 1)在形成区上游汇水区附近布设雨量监测系统,实时监测流域内及附近地区的雨量变化情况,通过确定降雨量临界阈值,进行降雨预警。
- 2)结合预警响应时效问题,在沟道形成区上游物源区布设超声波泥水位监测系统,监测沟道泥水位变化,为确定地表径流是否超出泥石流启动的临界径流深度提供依据,进行泥水位监测预警。
- 3)考虑沟道汇流作用,在沟道流通区中下游布设流量监测系统,监测沟道流体的流量变化,判断泥石流规模及流通特征,进行流量监测预警。
- 4)在沟道流通区附近布设红外摄像监控仪,实时监控和记录泥石流形成发展及流动变化特征。

4.2.2 远程自动化监测系统建设

根据杨家泥石流沟的实际条件,通过现场地形地质条件调查,于 2012 年 10 月针对性地布设安装各型监测设备,组建单沟泥石流远程自动化监测系统(图 10)。本研究选取 2012-10-26—2022-10-10 期间的监测数据进行预警分析。

在系统现场建设过程中,雨量监测系统由雨量计和数据采集系统组成,超声波泥水位监测系统由超声波泥水位计、数据采集系统和钢管支架组成,沟道流量监测系统由流量计、数据采集系统、钢管支架和量水堰槽组成;所有监测系统采用太阳能+蓄电池的方式供电,并通过数据采集系统基于无线网络进行数据传输及信号控制(图 11)。

4.3 研究区自动监测控制与预警

4.3.1 区域降雨预警

根据监测期间(2012-10-26—2022-10-10)杨家泥石流冲沟区降雨量监测动态变化曲线(图 12)可见:每年的 5—9 月雨汛期是全年中降雨较为集中的时段,日降雨量多在 20 mm 以上,其中 5—7 月中旬梅雨期降雨量较大,日降雨量在 40~120 mm 之间;最大日降雨量发生于 2019-06-19,达 121 mm,同时该日也发生最大雨强 35 mm/h;较大雨强一般发生于日降雨量超过 100 mm 的日期,日降雨量与雨强相互对应变化。

据统计,在上述监测期间,雨汛期日降雨量基本

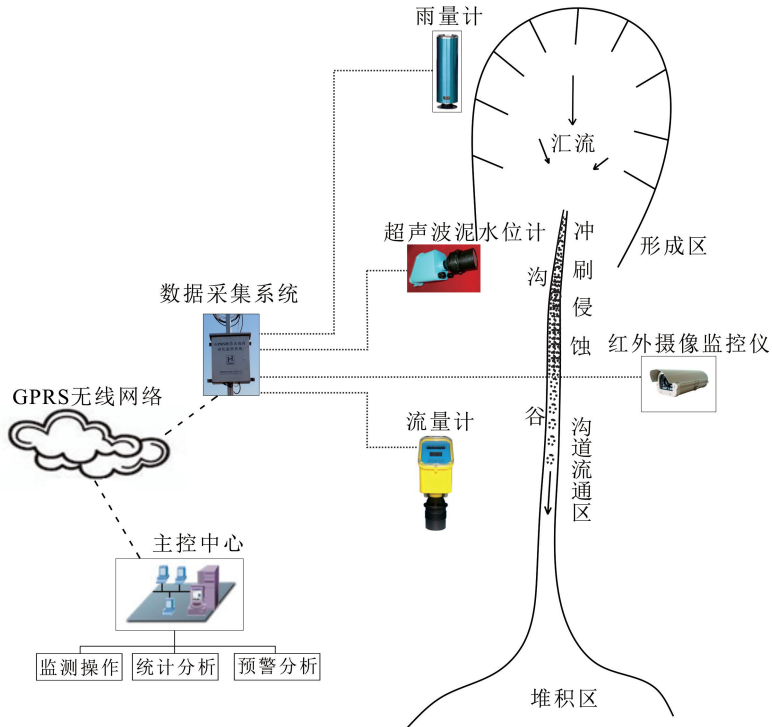


图 9 研究区监测仪器设备布设示意图

Fig.9 Layout diagram of monitoring instruments in the study area

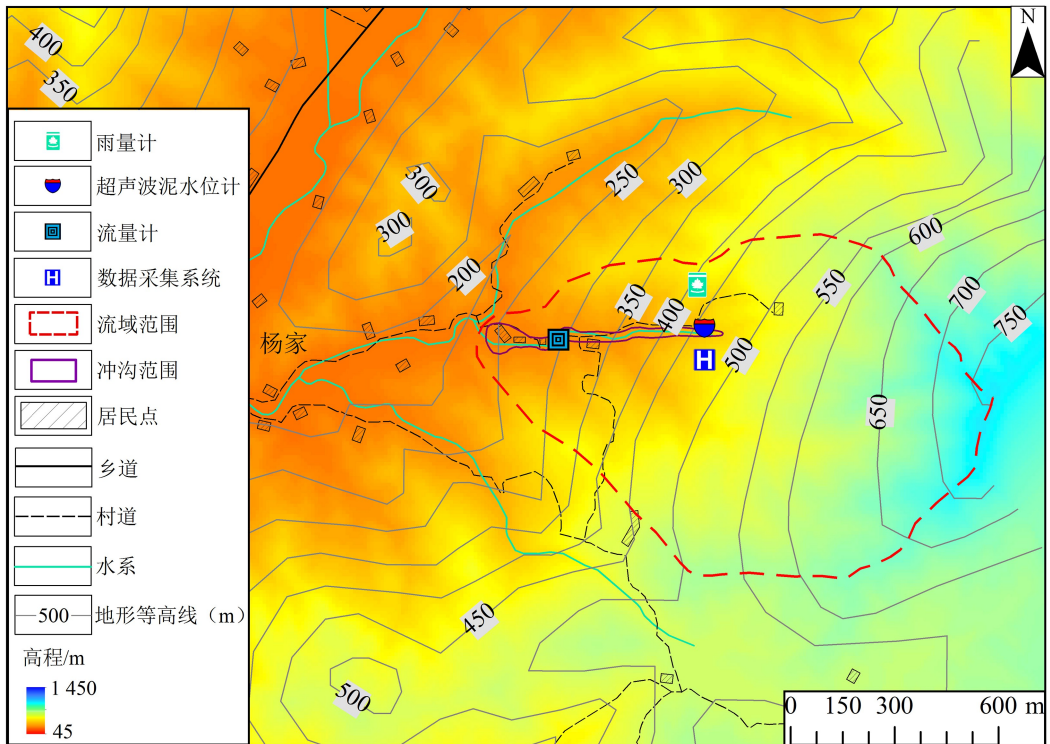


图 10 研究区泥石流监测网络体系布局

Fig.10 Monitoring network system layout of debris flow in the study area



a. 雨量监测系统布置;b. 超声波泥水位监测系统;c. 沟道监测断面;d. 沟道流量监测系统;e. 沟道量水堰槽。

图 11 研究区监测网络系统现场建设图

Fig.11 Site construction of monitoring network system in the study area

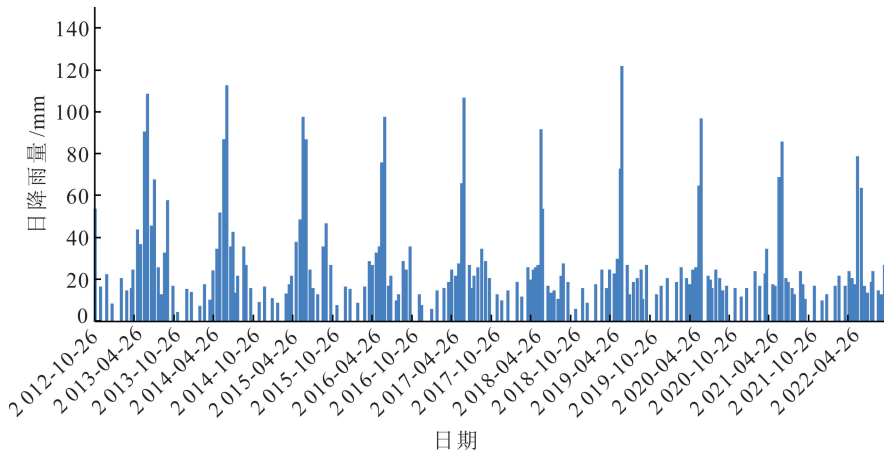


图 12 研究区降雨量动态变化曲线

Fig.12 Dynamic change curve of regional rainfall in the study area

未超过 121 mm,最大雨强未超过 35 mm/h,未达到 19720803 杨家泥石流发生时的 24 h 降雨量和最大雨强;其余非雨汛期日降雨量和雨强均较小。

通过计算可知,2019-06-19 强降雨作用下杨家泥石流冲沟的暴雨强度指标 $R = 2.4 < 2.8$,为安全雨情,可知在监测期间该处冲沟由降雨引发泥石流地质灾害的可能性小。实际情况下该处冲沟未发生岩土体滑塌、沟道混蚀或泥石流等灾害地质现象。现场情况与暴雨强度指标计算结果相符,也反映出杨家泥石流冲沟发生泥石流的低频性特点。

4.3.2 泥石流沟动态监测预警

通过在杨家泥石流冲沟区科学布设超声波泥水位监测系统(设置于形成区上游)和流量监测系统(设置于流通区中下游),可分别对沟道中的地表泥水位深度和流量变化进行实时监测。首先,进行泥水位监测预警,分析和判断泥石流是否发生;然后,进行泥石流流量监测预警,通过流量特征比较,判断泥石流是否冲刷流通,或泥石流发生以后的流量变化及其流通情况。

由监测期间冲沟内泥水位实时动态变化曲线

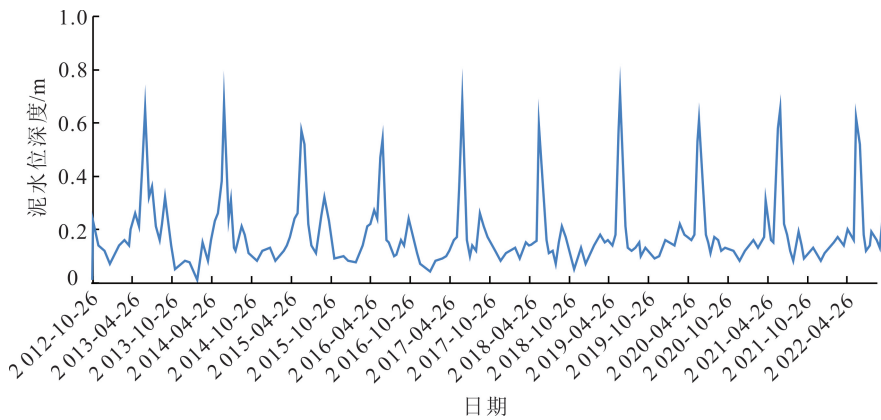


图 13 研究区冲沟内泥水位动态变化曲线

Fig.13 Dynamic change curve of flow gully mud water level in the study area

(图 13)可知:冲沟内侧地表泥水位深度随降雨量而变化;每年的 5—9 月雨汛期降雨较为集中,其中 5—7 月中旬梅雨期降雨量较大,冲沟内泥水位深度相应增大,在降雨量较少时,泥水位深度逐渐降低,其余少雨或无雨时段,深度变化不甚显著;而且在监测期间沟道内地表泥水位深度最大为 0.7 m,未达到持续强降雨条件下的泥石流冲蚀临界径流深度(d_k)值 1.0 m。可见该处冲沟不具备泥石流形成启动的水动力学条件。

根据监测期间冲沟流量实时动态变化曲线(图 14)结合图 13 对比可见,冲沟内流体流量相应于降雨量和泥水位深度有对应变化;每年的 5—9 月雨汛期降雨较为集中,其中 5—7 月中旬梅雨期降雨量增大,随之冲沟内泥水位深度增大,流量相应增大,在降雨量较少时泥水位深度降低,流量也相应降低,其

余少雨或无雨时段,冲沟内流量较小;监测期间冲沟内实测流量最大为 470 t/h,换算成标准计量值为 $1.70 \text{ m}^3/\text{s}$,远未达到持续强降雨条件下的泥石流洪峰流量(Q_d)值 $31.83 \text{ m}^3/\text{s}$ (114 600 t/h)。可见上述监测期间冲沟未有泥石流发生或沟道堵塞等不良迹象。

4.4 监测效果与综合评价

结合杨家泥石流冲沟区降雨量、冲沟泥水位及流量的动态变化,通过对比分析和综合研究可知,在监测期间本区不具备泥石流地质灾害发生的有利降雨条件,物源分布区和冲沟内部未见岩土体滑塌和冲刷侵蚀迹象,冲沟地表泥水位深度和流量等特征指标均在受限范围内,均未达到极端强降雨条件下的警戒限值。综合可见,上述监测时期内杨家泥石流冲沟区较为稳定,发生泥石流地质灾害的可能性小。

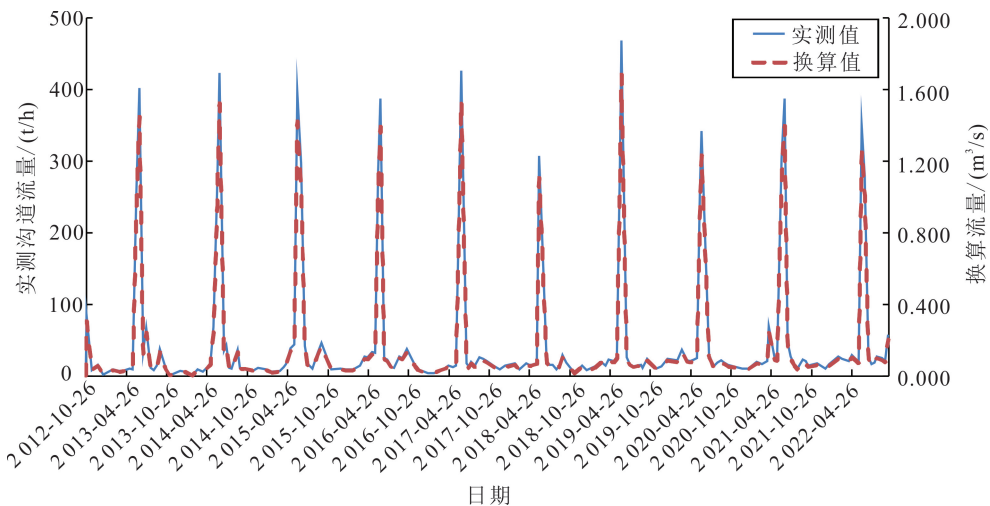


图 14 研究区冲沟内流量动态变化曲线

Fig.14 Dynamic change curve of flow gully water flow in the study area

5 结论

1)杨家泥石流是沟谷型泥石流,属于由特大暴雨激发的、低频的、一次性爆发规模为小型的稀性泥石流,经测算形成区松散物源冲蚀临界径流深度 d_k 为1.0 m,超过此限值时,沟道内松散物源可冲蚀启动形成泥石流,将其作为水动力学作用预警判据,连同暴雨强度 R 值($R < 2.8$)和泥石流洪峰流量($Q_d = 31.83 \text{ m}^3/\text{s}$)共同构成综合预警指标。

2)结合泥石流预警响应时效问题,考虑沟道汇流条件,在上游汇水区附近布设雨量监测系统,在形成区上游布设超声波泥水位监测系统,在流通区中下游布设流量监测系统,通过数据采集系统,基于无线网络,构建泥石流远程自动化监测网络体系,实时监测降雨、泥水位、流量等参数,动态反映泥石流形成启动的诱发条件、物性变化及运动流通性,通过实施远程监测预警,实现第一时间应急响应。

3)通过单沟泥石流特征参数实时监测,研究区监测期间暴雨强度指标 $R = 2.4 < 2.8$,冲沟区处于安全雨情,冲沟泥水位深度未达到临界径流深度限值,沟内流量(最大值为 $1.70 \text{ m}^3/\text{s}$)也未有异常或突变迹象。上述时期内该处冲沟区相对较稳定,未具备泥石流发生的有利降雨及水动力条件,再次发生泥石流地质灾害的可能性小。

参考文献(References):

[1] 唐邦兴,周必凡,吴积善,等. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
Tang Bangxing, Zhou Bifan, Wu Jishan, et al. Debris Flows in China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000.

[2] 浙江省地质矿产研究所. 浙江省小流域泥石流地质灾害综合研究报告[R]. 杭州: 浙江省地质矿产研究所, 2011.
Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources. Comprehensive Research on Geological Hazard of Debris Flow in Small Watershed of Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, 2011.

[3] 岳丽霞,王永,余淑姣,等. 浙江省泥石流类型及分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 185-189.
Yue Lixia, Wang Yong, Yu Shujiao, et al. Debris Flow Types and Their Distribution in Zhejiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 185-189.

[4] 陈海燕,潘小凡,吴利红,等. 浙江泥石流气象特征分析[J]. 灾害学, 2005, 20(1): 61-64.
Chen Haiyan, Pan Xiaofan, Wu Lihong, et al. Analysis of Meteorological Feature of Mud-Rock Flow in Zhejiang[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(1): 61-64.

[5] 王一鸣,袁民豪,殷坤龙,等. 浙东南山丘区泥石流爆发的临界雨量分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 21-26.
Wang Yiming, Yuan Minhao, Yin Kunlong, et al. Analysis on the Critical Rainfall for the Outbreak of Debris Flow in Southeast Mountain Area of Zhejiang Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 21-26.

[6] 殷坤龙,张桂荣,龚日祥,等. 基于Web-GIS的浙江省地质灾害实时预警预报系统设计[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 19-23.
Yin Kunlong, Zhang Guirong, Gong Rixiang, et al. A Real Time Warning System Design of Geo-Hazards Supported by Web-GIS in Zhejiang Province, China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(3): 19-23.

[7] 冯杭建,李伟,麻土华,等. 地质灾害预警预报信息发布系统: 基于ANN和GIS的新一代发布系统[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 187-193.
Feng Hangjian, Li Wei, Ma Tuhua, et al. Geological Disasters Early Warning and Forecast Information-Releasing System: A New Generation of Releasing System Based on ANN and GIS[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 187-193.

[8] 浙江省水利厅. 浙江省小流域防洪避洪规划编制技术导则[R]. 杭州: 浙江省水利厅, 2005.
Department of Water Resources of Zhejiang Province. Technical Guide for Planning Preparation of Flood Control and Evacuation for Small Watershed in Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Department of Water Resources of Zhejiang Province, 2005.

[9] 宋志,邓荣贵,陈泽硕,等. 摩西河泥石流堵断大渡河物理模拟与早期识别[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(1): 163-170.
Song Zhi, Deng Ronggui, Chen Zeshuo, et al. Physical Simulation and Early Identification of Dadu River Blocking Due to Moxi River Debris Flow[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1): 163-170.

[10] 郭晓军,李泳,崔鹏. 泥石流源地坡面土体活动随机性规律实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014,

- 44(4): 1260 - 1268.
- Guo Xiaojun, Li Yong, Cui Peng. Experiment on Random Law of Slope Soil Movement in the Source Area of Debris Flow[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1260 - 1268.
- [11] 刘鑫, 张文, 李根, 等. 高位远程崩滑碎屑流-泥石流灾害链的演变过程与影响范围预测: 以“4·5”四川洪雅县铁匠湾地质灾害链为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1799 - 1811.
- Liu Xin, Zhang Wen, Li Gen, et al. Research on Evolution Process and Impact Range Prediction of High Level Remote Collapse and Landslide-Debris Flow Disaster Chain: Taking the “4·5” Tiejiaowan Geological Disaster Chain in Hongya County, Sichuan Province as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1799 - 1811.
- [12] 亓星, 余斌, 朱渊. 滑坡碎屑堆积体形成泥石流的实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1950 - 1959.
- Qi Xing, Yu Bin, Zhu Yuan. Experimental Study on the Clastic Deposition Forming Debris Flow [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(6): 1950 - 1959.
- [13] 冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 等. 低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 35 - 44.
- Feng Wenkai, Jia Bangzhong, Wu Yiyong, et al. Characteristics and Mechanism of Landslide-Debris Flow Chain Disaster in Low Mountain and Hilly Terrain[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 35 - 44.
- [14] 王子亮, 常鸣, 刘沛源, 等. 安宁河流域典型沟谷泥石流危险性评价: 以冷渍沟为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 31 - 38.
- Wang Ziliang, Chang Ming, Liu Peiyuan, et al. Hazard Assessment of Typical Gully Debris Flow in Anning River: A Case Study at the Lengzi Gully[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 31 - 38.
- [15] 陈晓清. 滑坡转化泥石流启动机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- Chen Xiaoqing. The Mechanism Research on the Fluidization of the Landslide Translating into Debris Flow[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [16] 王常明, 刘辛磊, 王飞. 品字形桩林防护结构对泥石流冲击桥墩作用的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1773 - 1784.
- Wang Changming, Liu Xinlei, Wang Fei. Influence of Three-Pile Structure with Trefoil-Shaped Distribution on Impact of Debris Flow on Bridge Pier[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1773 - 1784.
- [17] 浙江省第七地质大队. 衢州市衢江区农村山区调查评价报告[R]. 衢州: 浙江省第七地质大队, 2015.
- Zhejiang Seventh Geology Group. Evaluation Report of Geological Disasters at Qujiang District in Quzhou City, Zhejiang Province [R]. Quzhou: Zhejiang Seventh Geology Group, 2015.
- [18] 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行): T/CAGHP 006—2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- Specification of Geological Investigation for Debris Flow Stabilization: T/CAGHP 006—2018 [S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [19] 匡乐红. 区域暴雨泥石流预测预报方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- Kuang Lehong. Method for the Forecasting of Regional Rainstorm-Induced Debris Flow [D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [20] 浙江省水利厅. 浙江短历时暴雨图集[R]. 杭州: 浙江省水利厅, 2003.
- Department of Water Resources of Zhejiang Province. Atlas of Short Duration Rainstorms in Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Department of Water Resources of Zhejiang Province, 2003.
- [21] 滑坡崩塌泥石流监测规范: DZ/T 0221—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Code for Monitoring of Landslide, Collapse and Debris Flow: DZ/T 0221—2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.