

引用格式:胡旭东,沈已桐,胡凯衡,张晓鹏,许文年.震区泥石流物源与冲出量的关系——以四川汶川县簇头沟为例[J].山地学报,2022,40(3):369-383.

HU Xudong, SHEN Yitong, HU Kaiheng, ZHANG Xiaopeng, XU Wennian. Relationship between debris flow sediments and amount of debris flow discharges in earthquake affected region: A case study of the Cutougou valley in Wenchuan county, Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(3): 369-383.

震区泥石流物源与冲出量的关系 ——以四川汶川县簇头沟为例

胡旭东^{1a,1b}, 沈已桐^{1c}, 胡凯衡², 张晓鹏², 许文年^{1a,1b}

(1. 三峡大学 a. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室; b. 土木与建筑学院; c. 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:汶川地震诱发的崩滑体不断地动态演变,为泥石流提供了丰富的松散固体物源,造成震后数年间暴发多次群发性泥石流灾害。分析震区崩滑体(物源)时空上的变化以及与泥石流规模(冲出量)大小的关系,可为震后灾害链的长期效应和防灾减灾提供科学依据。目前,冲出量多基于单次泥石流或多次泥石流后形成的堆积物进行估算,利用遥感技术结合现场踏勘来确定泥石流冲出物的相关研究不多。本文选取汶川震区簇头沟流域为研究对象,通过野外调查、遥感解译和冲出量计算模型构建相结合的方法,分析流域内物源动态演变特征,探究沟道内崩滑体物源量变化与簇头沟多次泥石流冲出量的关系。结果表明:(1)簇头沟下游支沟物源量在2013年泥石流后不断减少,而上游支沟内物源量自2019年泥石流后增加显著;(2)三次泥石流的物源量与冲出量呈现一定的线性关系,而总冲出量相对于流域内总物源量的占比不足5%,仍有大量物源堆积于沟道内;(3)主沟道拦沙坝的拦蓄能力逐年下降,需继续加强清淤力度,且上部沟道和支沟亦应增加相应的防治措施。本研究有助于认识震区崩滑体演变特征及其对震后泥石流的影响,并为优化泥石流灾害防治工程选址提供理论指导。

关键词: 泥石流;物源;动态变化;泥石流冲出量;地震;遥感解译;汶川;簇头沟

中图分类号: P954

文献标志码: A

物源、水动力和地势条件是影响泥石流爆发的三个重要因素^[1-2],研究泥石流物源的变化规律,是研究泥石流形成条件的基础。物源条件与泥石流的规模、频率密切相关。地震是泥石流物源产生的重要原因。强震在震区内不但产生大量的同震松散崩滑体,堆积在山麓坡脚,在短期内降雨激发下,形成大规模群发性泥石流^[3],同时也在一些稳定斜坡造成内部损伤,极有可能演化成崩滑灾害^[4-5],最终成

为丰富的物源,补给下一次泥石流灾害。因山体不稳定而造成的崩滑灾害,在部分震区5~10年左右才会逐步显现^[6],要经过10年左右的时间其活动性才能衰减至震前水平^[7-8]。在震区泥石流活动的衰减期,即使是同一条泥石流沟,其内部物源的活动性也会长期处于一个动态变化的过程中。物源条件作为三个条件中最难定量分析的部分^[9],对其在时空上进行动态监测与量化,可为防灾减灾工作提供科

收稿日期(Received date):2021-09-15; 改回日期(Accepted date):2022-04-29

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(42001002);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金(KLMHESP-20-02);长江科学院开放研究基金(CKWV2021888/KY);湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20201205)[National Natural Science Foundation of China(42001002); Open Found of Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences(KLMHESP-2002); CRSRI Open Research Program(CKWV2021888/KY), Major Projects of Science and Technology Research Plan of Hubei Provincial Department of Education(D20201205)]

作者简介(Biography):胡旭东(1991-),男,博士,讲师,主要研究方向:地质灾害减灾理论与技术[HU Xudong(1991-), male, Ph. D., lecturer, research on theory and technology of geological disaster reduction] E-mail: hxd@ctgu.edu.cn

学准确的依据^[10]。

野外调查、数值模拟和遥感解译三种方法是泥石流物源调查的基本手段^[11-14]。野外实际调查是研究泥石流物源方量、物源转换最直接的手段,但由于受到地形、人力、时空、财力等条件的限制,不易长期、全面地获取位于地形陡峭、远离沟道以及未做监测地区的准确数据^[11]。通过数值模拟,重现泥石流启动、运动和堆积过程,反演泥石流物源变化,可有效减少野外工作的投入,但理想条件下模拟结果与实测具有一定的差距^[12]。研究泥石流物源的动态变化,其难点主要在于区域范围内时空资料的准确收集。得益于遥感影像精度的提高,遥感技术可准确判断泥石流沟内物源面积变化趋势^[13],通过与野外实际调查的配合,能清晰地展示泥石流流域内的物源变化^[14],并且受时间与地理条件约束较小,是理想的泥石流物源调查方法。

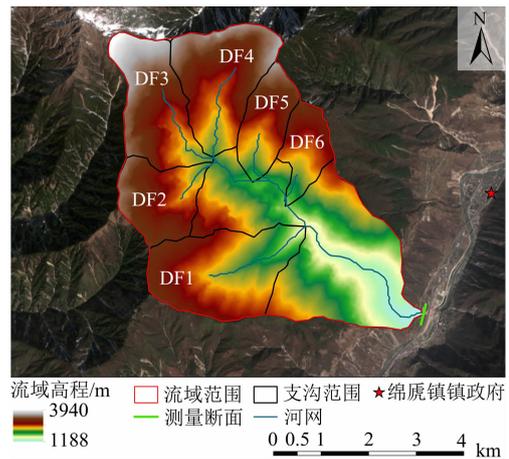
单次泥石流活动的最大冲出量,是指泥石流固体物质冲出量^[9],可依据数据判断泥石流灾害的最大活动规模^[15]。通过对比冲出量和研究区总物源量的比例可以判断当地松散物源的冲出程度,从而预测未来泥石流发生的可能性。对冲出量的计算方法^[16-19],多基于单次泥石流或多次泥石流后形成的堆积物进行估算,利用遥感技术估算并结合现场踏勘来确定泥石流冲出物的方法,现有研究却不多。

都汶公路(都江堰—汶川)是2008汶川震区的交通生命线,公路沿岷江河谷谷底布线。同震地质灾害严重摧毁了公路主线^[20],震后公路沿线是泥石流重灾区^[11,14,21]。簇头沟位于岷江右岸,沟口近于直角,与岷江主线相交。震后发生大型泥石流堵江事件,三次堵断岷江,摧毁或淤积河沟口处都汶公路主线,给当地带来巨大经济损失。基于现有对于冲出量的计算方法,难以确定当地不同频次泥石流的冲出量,影响灾情判识与防灾措施的实施。

本研究以簇头沟为例,通过野外实地调查和遥感解译相结合的方法,分析了当地震后多年内物源的动态变化;基于地形、水动力条件,简化了泥石流冲出量计算模型,分析了该流域震后三次泥石流的运动特征与危害规模,对比了三次泥石流发生前后沟内物源总量和冲出量的时空变化,探究了泥石流物源变化与冲出量之间的关系。本研究可为岷江流域地质灾害的勘测设计与风险评估提供依据。

1 研究区域

簇头沟,又名锄头沟,位于汶川县绵虎镇(图1),流域面积21.60 km²,区域范围为103°25'23"E ~ 103°29'08"E, 31°20'28"N ~ 31°20'34"N。流域距离2008年汶川地震的震中映秀镇32 km,域内山体、坡面主要由火成岩和变质岩组成,岩性较为松散,加之流域所处地区为半干旱季风气候区,5—9月的降雨量达全年降水总量的70%^[21],给当地地质灾害的发生提供了十分有利的条件。据调查,该沟在1930年初期到2008年间从未有泥石流灾害发生的记录,但在汶川地震后,沟内物源激增^[21-22],于2013年7月10日、2019年8月20日、2020年8月17日爆发了泥石流灾害。



DF1 ~ DF6 为支沟名称。

图1 簇头沟位置和地形图

Fig. 1 Location and geomorphology of the Cutoukou valley, Wenchuan county, China

2 泥石流的形成条件与致灾机制分析

2.1 地形条件与流域内区域划分

簇头沟主沟长5.44 km,流域内最大高差2752 m,平均比降312‰(表1)。本文根据获取的DEM数据(表2),利用Arcgis 10.5的水文分析工具,对流域内流量>1000、>2000、>5000和>8000的河网分别进行了提取。通过参考其他研究者对簇头沟支沟的划分结果^[22]与对当地实际调查时山脊线的划分,最终选取了流量>5000的河网进行提取。被提取的流域在本次研究中作为支沟进行研究,剩余部分归于坡面泥石流,共在沟内提取出六条支沟,分别命名为DF1~DF6,如表1和图1所示。

表 1 研究区流域及其支沟基本信息

Tab. 1 Topographical data of the Cutougou valley and its branches

| 名称 | 面积/km ² | 主沟长/km | 比降/‰ | 最低点高程/m | 最大高差/m |
|---------|--------------------|--------|------|---------|--------|
| DF1 | 3.69 | 2.95 | 457 | 1571 | 1392 |
| DF2 | 1.95 | 1.83 | 628 | 2020 | 1214 |
| DF3 | 2.79 | 2.58 | 544 | 2104 | 1836 |
| DF4 | 3.15 | 2.45 | 539 | 2029 | 1311 |
| DF5 | 1.51 | 2.09 | 637 | 1819 | 1544 |
| DF6 | 1.18 | 1.61 | 686 | 1721 | 1342 |
| 其他坡面泥石流 | 7.32 | - | - | - | - |
| 全流域 | 21.59 | 5.44 | 312 | 1188 | 2752 |

表 2 相关遥感数据获取方式

Tab. 2 Acquisition of remote sensing images

| 数据名称 | 数据精度 | 数据类型 | 获取时间 | 获取方式 |
|-----------------------|-----------|--------|-----------------|---|
| ALOS PALSAR | 12.5 m | DEM 数据 | 2011 | https://search.asf.alaska.edu/ |
| Landsat 4 | 30 m | | 2007-09 | |
| 无人机航拍影像 | 1.0~2.5 m | | 2008-05—2008-07 | |
| 无人机航拍影像 + Worldview 2 | 1.0~2.5 m | | 2011-04 | 未获取遥感影像, |
| 无人机航拍影像 + Pleiades | 0.5~2.0 m | 遥感影像 | 2013-04 | 遥感解译结果获取自文献[23], |
| Spot 6 | 1.5 m | | 2015-04 | https://doi.org/10.5281/zenodo.1405489 |
| Spot 6 | 3.0 m | | 2017-04 | |
| Spot 6 | 3.0 m | | 2018-04 | |
| Sentinel-2 | 10 m | | 2017-09 | |
| Sentinel-2 | 10 m | | 2019-09 | |
| Sentinel-2 | 10 m | 遥感影像 | 2020-11 | https://earthexplorer.usgs.gov/ |
| Sentinel-2 | 10 m | | 2021-02 | |
| 高分 2 号 | 1.0 m | 遥感影像 | 2020-02 | 北京数字空间有限公司购买 |
| 无人机航拍影像 | 0.1 m | DSM 数据 | 2021-03 | 无人机野外实地飞行 |

流域内河网呈树状分布,六条支沟面积占整个流域面积的 66.1%,其中支沟 DF1、DF3 和 DF4 面积最大,占流域总面积的 40.0%。所有支沟高差均超过 1500 m,且除 DF1 外各支沟的比降均在 500‰ 以上,支沟内陡峭的地形会加速其流域内物源的补给,遇强降雨时利于流域内径流的汇集。

2.2 三次泥石流爆发前后的降雨变化及特征

本文选取流域内三次泥石流发生前后三日的 GPM (Global Precipitation Measurement) 降雨数据 (间隔时间 30 min,精度 0.1° × 0.1°),研究泥石流

发生前后的降雨变化。获取 GPM 数据后,将其从原本的世界标准时 (UTC) 转换为北京时间,通过 Arcgis10.5 软件处理出流域所在位置的栅格并记录其值,并以 2 h 为一时段整理数据并绘图,相关降雨结果如图 2 所示。

从爆发前后的降雨数据来看,三次泥石流爆发前后的降雨有着以下特点:首先从爆发当日 0 时—24 时的总降雨量来看,2013 年、2019 年和 2020 年分别为 140.66、94.34 和 48.78 mm,当日降雨量呈现明显的下降趋势,当地泥石流的降雨阈值在震后

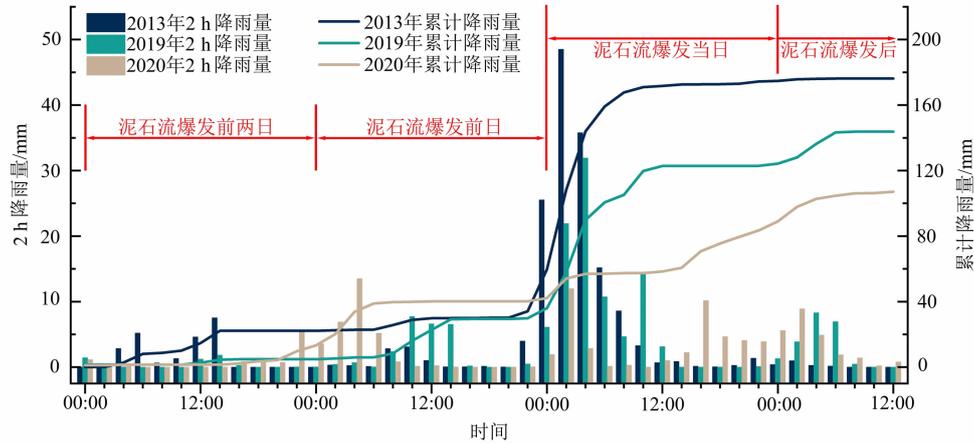


图 2 三次泥石流前后三日降雨数据

Fig.2 Precipitation of three days before and after three debris flow occurrences

多年逐渐减小。其次,三次降雨的集中程度有所差异。2013年泥石流的降雨主要集中于凌晨与上午,爆发当日凌晨降雨量飙升,随后逐渐下降并于当日14时后停止降雨,仅0时—10时内累计降雨量达125.02 mm,占当日降雨量的88.88%。2019年泥石流的降雨过程与2013年相似,也是主要集中在爆发当日的凌晨及上午,在2时—12时这一时段内,降雨量就达83.72 mm,占当日总降雨量的88.74%。2020年泥石流发生当日的降雨不同于2013年和2019年。该次降雨时段相对分散且历时较长,一直持续到了爆发次日中午,没有明显的集中降雨时段。且该次泥石流,在爆发前日的2时—8时还经历过一场降雨量为25.60 mm的规模降雨,相较于2013年和2019年,受前期降雨影响明显。

2013年、2019年和2020年的泥石流发生当日的降雨最强时段分别出现在2时—4时、4时—6时和2时—4时,该时段降雨量分别为48.53、31.92和11.97 mm。降雨最强时段的降雨量依次减少,且集中在0时—6时。降雨是泥石流发生的激发条件,簇头沟流域的降雨特征,会使泥石流在夜间汇集,无疑大大增加了当地的防控难度。

2.3 物源计算与动态变化分析

2.3.1 物源解译结果获取

Fan^[23]等通过汶川地震影响地区多年的遥感影像(2005—2018年),对研究区域内的崩塌、滑坡和沟道堆积物进行解译并公开其研究结果。本文获取了Fan^[23]等所作的解译数据,提取其中关于簇头沟流域的解译结果。由于沟道堆积物的体

积难以估计,且会影响对各支沟内崩滑体方量的估算结果。因此本次研究根据提取的河网数据(流量>5000)识别出了各支沟的主沟和支沟的沟道筛选了Fan^[23]等数据中对沟道堆积物的解译结果,由此获取了2007—2018年内簇头沟泥石流崩滑体的解译结果数据。簇头沟流域在2019和2020年都发生了泥石流,但Fan^[23]等的解译结果只跟踪到了2018年。为了还原簇头沟震后三次泥石流的物源变化,本研究还收集了该流域的2017、2019、2020、2021年的Sentinel-2卫星数据和2020年的高分2号卫星数据。通过人工解译的方法获取了2019年泥石流爆发后(根据2019年9月Sentinel-2数据和2020年2月高分2号卫星数据解译)与2020年泥石流爆发后(根据2020年11月和2021年2月Sentinel-2数据解译)簇头沟内的崩滑体的解译结果(图3),同Fan^[23]等的数据进行对比可知,流域范围、流域内沟道等标志物的匹配基本一致。相关数据获取途径见表2。

2.3.2 物源活动性定义及对比数据选取

在对选取年份簇头沟内崩滑体解译完毕后,将相邻年份的解译结果进行对比,并定义了三个活动等级来表示物源的活动性:

(1)相较于上一次解译结果,崩滑体面积减少的区域被定义为减少,图中用蓝色标记;

(2)相较于上一次解译结果,崩滑体面积不变的区域被定义为不变,图中用白色标记;

(3)相较于上一次解译结果,崩滑体面积增加的区域被定义为增加,图中用红色标记。依此对沟

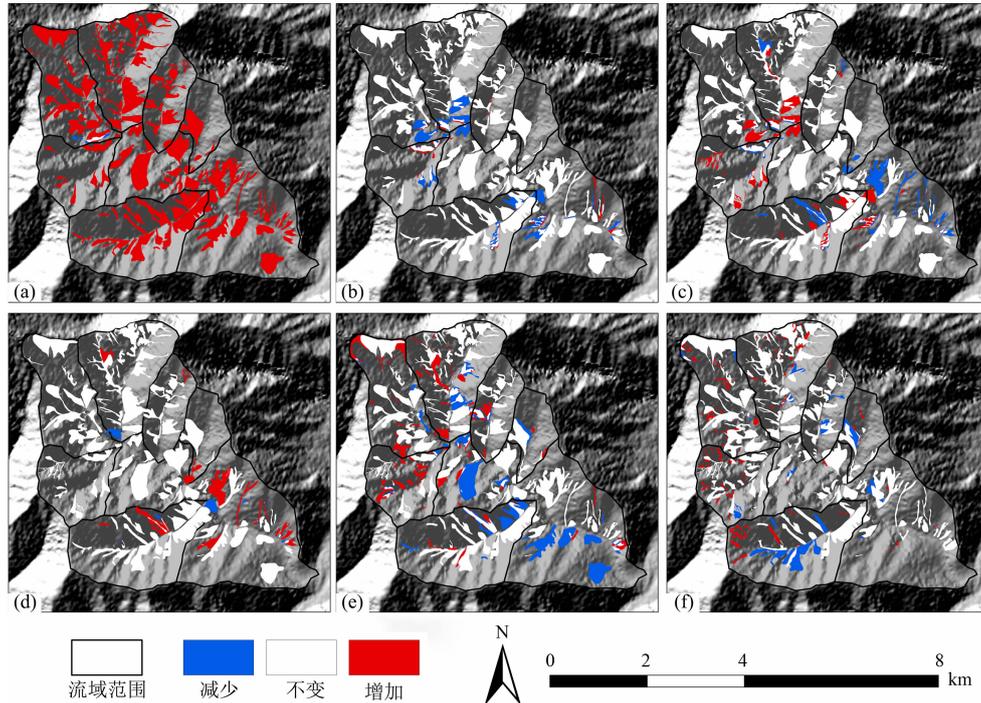


图3 簇头沟流域内物源动态变化图:

(a) 2007—2008年;(b) 2008—2011年;(c) 2011—2013年;(d) 2013—2015年;(e) 2015—2019年;(f) 2019—2021年

Fig. 3 Graphical variation in storages of landslide sediments in the Cutougou valley:

(a) 2007—2008; (b) 2008—2011; (c) 2011—2013; (d) 2013—2015; (e) 2015—2019; (f) 2019—2021

内崩滑体物源进行分类,并分别计算了面积,崩滑体变化如图3所示,面积变化如图4所示。由于2015年与2017年、2018年的解译结果变化过小(全流域面积变化小于 0.06 km^2),且在2013年9月—2019年7月这段时间内并无泥石流灾害的发生。所以2015年的解译结果直接与2019年9月的解译结果相比较。

2.3.3 物源量计算方法及结果

物源量的计算是量化解译结果的重要手段。关于崩滑体物源量的计算,学界提出了包括线性、非线性、幂函数在内的多种计算经验公式^[14,24-26],但各计算公式在进行计算时对不同地区的适用性不一,结果会因此会有较大的差异。蒋志林^[27]在对比Fan^[24]等、Guzzetti^[25]等、Larsen^[26]等和Tang^[14]等所提出的经验公式时,发现对于同一条沟不同的计算结果能够相差4100万 m^3 以上,因此选择合适的经验公式,对于数据的准确性尤为重要。

研究区域内可能包含成百上千个崩滑灾害,测量每一个崩滑体的精确数据是十分困难且不实际的^[26]。因此现有研究多选用只与滑坡面积相关的

幂函数经验公式,通过确定研究区当地的滑坡面积-体积经验指数,来计算崩滑体的体积。计算如下:

$$V = \alpha A^\gamma \quad (1)$$

式中, V 为崩滑体体积(10^4 m^3); A 为崩滑体面积(m^2); α 为面积-体积修正系数; γ 为滑坡面积-体积经验指数,不同地区的 α 和 γ 一般不同。

Larsen^[26]等收集了4231个滑坡的几何数据,用来评估基岩和土壤滑坡的相对体积-面积比例,并研究划定了公式(1)中 γ 具体范围,目前在滑坡相关的研究中使用广泛。但在实际带入簇头沟数据进行计算后发现,仅2008年簇头沟的崩滑体总方量就能达2480万 m^3 ,对比蒋志林^[11]等对于汶川地区物源量的计算结果,其值比岷江地区其他泥石流单沟总方量高数倍甚至数十倍。计算结果也与严炎^[21]等在对簇头沟的考察中,预估当地松散物源量约1108万 m^3 的结果相差甚远,可见Larsen的计算公式在簇头沟的适用性欠佳。方群生^[28]等认为汶川-映秀地区的经验公式应该为:

$$V = 2.132A^{1.058} \quad (2)$$

该公式通过对汶川地区多条泥石流沟内的滑

坡数据进行拟合得出,更加适用于汶川地区的物源量计算。因此本次研究选用公式(2)对簇头沟内各支沟每年的物源量进行计算,相关计算结果见表3。

2.3.4 物源变化分析

通过图3可以看出汶川地震极大地影响了当地的崩滑体物源活动性,且在地震过后数年内,当地崩滑体的变化也十分频繁。对比2007—2008年间的

影像,地震之前几乎没有崩滑体的解译结果,几乎沟内所有解译出的崩滑体都在2008年后产生。在地震发生之后的7年内(2008—2015年)以DF3和DF4为代表的支沟内的崩滑体面积、方量变化频繁。这两条支沟在2008—2011年间崩滑体面积大量减少,但在2011—2013年却又大量增加。崩滑体面积在此期间内大量减少或大量增加,究其原因,应为大地震造成流域内山体不稳定,使得当地在震

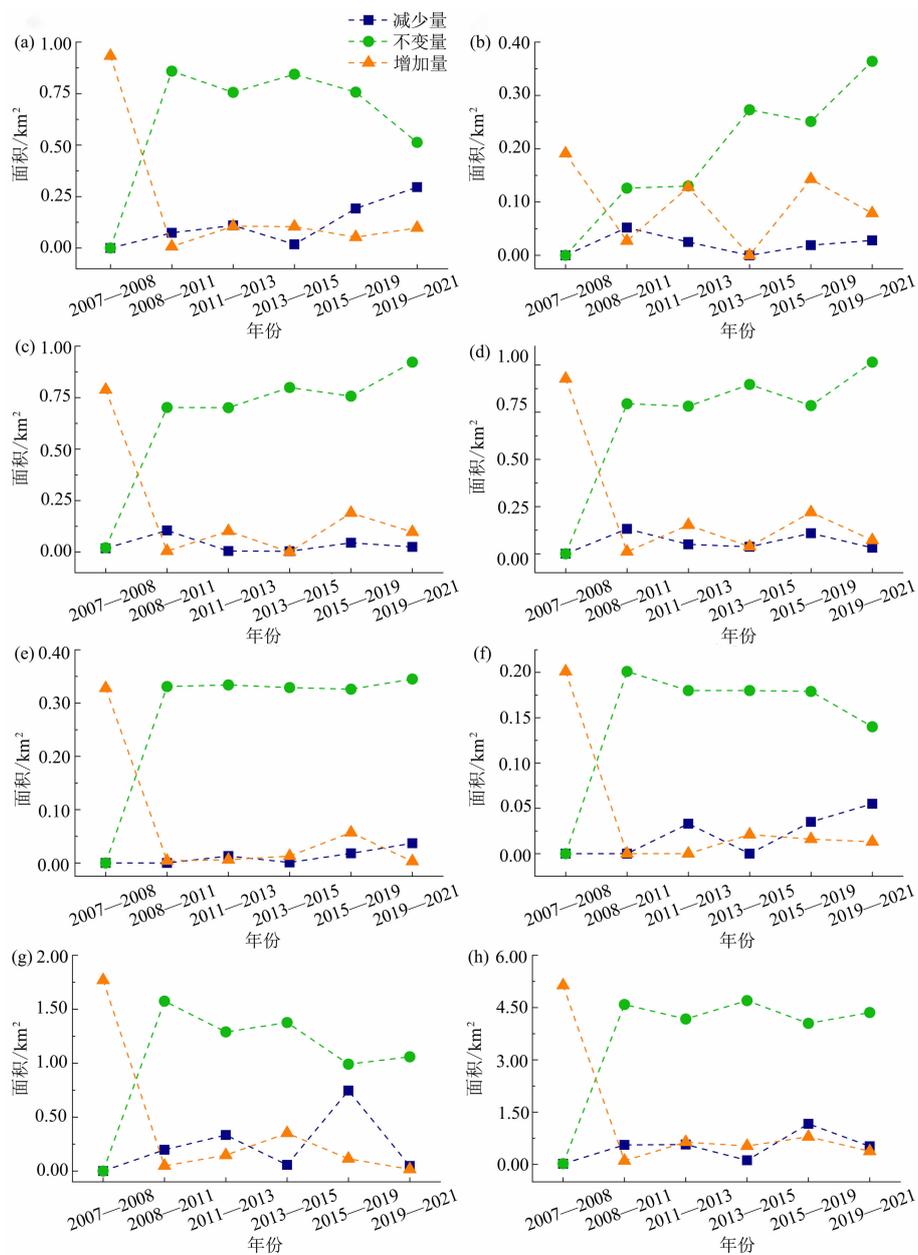


图4 簇头沟流域内各支沟物源面积变化图:

(a) DF1; (b) DF2; (c) DF3; (d) DF4; (e) DF5; (f) DF6; (g) 其他坡面泥石流; (h) 全流域

Fig.4 Change in the storage areas of landslide sediments in the Cutougou valley and its branches:

(a) DF1; (b) DF2; (c) DF3; (d) DF4; (e) DF5; (f) DF6; (g) the other slope debris flows; (h) the whole region

表 3 根据各年份解译结果推算出的簇头沟内崩滑体物源量

Tab. 3 Estimated storage of landslide sediments in the Cutougou valley obtained in terms of interpretation of each year

| 名称 | 各年份崩滑体物源量/(10 ⁴ m ³) | | | | | |
|---------|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 2008 年 | 2011 年 | 2013 年 | 2015 年 | 2019 年 | 2021 年 |
| DF1 | 441.49 | 408.02 | 406.03 | 449.00 | 380.16 | 282.11 |
| DF2 | 82.44 | 65.19 | 113.31 | 120.29 | 177.35 | 200.76 |
| DF3 | 379.66 | 329.21 | 376.68 | 374.70 | 448.50 | 484.66 |
| DF4 | 438.49 | 378.17 | 441.99 | 442.49 | 477.62 | 518.94 |
| DF5 | 146.08 | 149.38 | 151.74 | 152.68 | 172.11 | 155.52 |
| DF6 | 87.01 | 87.01 | 77.42 | 87.01 | 84.26 | 65.19 |
| 其他坡面泥石流 | 868.73 | 793.06 | 697.23 | 847.44 | 528.04 | 512.88 |
| 全流域 | 2443.89 | 2210.04 | 2264.40 | 2473.62 | 2268.04 | 2220.06 |

后多年时间内处于恢复和新地质灾害接连出现的状态^[6-8],这种状态在流域内还在持续。

通过对比不同年份各支沟内物源量的变化(图 4)可知,2013 年泥石流发生后,簇头沟内物源量增加最多的为中下部地区的坡面泥石流和 DF1 支沟,而在 2019 年泥石流爆发后,这两个区域内的崩滑体物源有大面积的减少的现象。与此同时,高海拔地区的支沟 DF2、DF3、DF4 和 DF5 在此次泥石流灾害中,山体的不稳定性逐渐展露,活动性为“增加”的物源较往年开始增多。2020 年泥石流灾害后,支沟 DF1 及中部坡面泥石流的物源量进一步大范围减少,而支沟 DF1、DF2、DF3、DF4 和 DF6 的上部支沟,崩滑体物源面积却继续增加。在 2019 年、2020 年解译结果中,崩滑体被定义为“增加”的区域,沟内上游支沟占大多数。且这些地区山地陡峭,比降高于流域平均水平(表 1),结合图 2 所得出的当地产生泥石流所需的雨强越来越小、上游支沟内物源不减反增的现状,推测未来物源仍有向下移动汇集的可能。

3 泥石流的运动特征与危害规模

3.1 冲出量计算与变化

3.1.1 冲出量计算模型构建

簇头沟沟口处堆积体,是三次泥石流爆发后累加所致。为计算出三次冲出物的具体方量,应在考虑整体的前提下,对沟口堆积扇的层次进行具体划分。在对沟口处冲出物的解译结果进行对比时发现(图 5a),三次冲出物的面积逐渐扩大,且堆积体形

状类似于棱台。依此规律,本文通过参考李彦稷^[18]等、常鸣^[19]等对于堆积扇体积的计算方法,改良并构建了簇头沟不同层次泥石流堆积扇的体积估算模型。以泥石流堆积扇断面颗粒层理为依据对三次冲出物进行划分(图 5b 和图 5c),以棱台体积的计算方法为依据计算泥石流体积,模型简图如图 6 所示,棱台的计算公式为:

$$V_L = \frac{1}{3}H(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1S_2}) \quad (3)$$

式中, V_L 为棱台体积(10⁴ m³); H 为棱台高度(m); S_1 为棱台上底面积(m²); S_2 为棱台下底面积(m²)。

在对沟口整个堆积体的体积进行计算时,基于以下四个假设进行计算:

- (1) 棱台的上底面 $GHIJ$ 始终与下底面 $ABCD$ 平行,且面 $ABEF$ 为上底面 $GHIJ$ 在下底面 $ABCD$ 的投影;
- (2) 高速公路右缘为上底面的右边界 HI ;
- (3) 上一层泥石流能把下一层泥石流完全包裹住;
- (4) 每层棱台都为与顶部和底部相平行的棱台。

将整个堆积扇可以简化为一个多层棱台,依此推导出堆积体体积的计算公式为:

$$V_i = \frac{1}{3}H_i(S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_iS_{i+1}}) \quad (4)$$

式中, V_i 为第 i 次泥石流发生后,沟口棱台状堆积体的体积(10⁴ m³); H_i 为第 i 次泥石流发生后沟口棱台状堆积体顶部距离底部堆积体的高度(m); S_i 为第 i 次泥石流发生后沟口棱台状堆积体下底面积

(m^2); S_{i_i} 为第 i 次泥石流发生后沟口棱台状堆积体上底面面积(m^2)。

通过上层大棱柱体积减去下一层棱柱体积可以得到每一层冲出物的体积,计算如下:

$$V_{ci} = V_i - V_{i-1} \quad (5)$$

式中, V_{ci} 为第 i 层冲出物的体积($10^4 m^3$)。

3.1.2 模型计算所需参数获取及范围划分

在对簇头沟沟口处实地考察时,本文选取了相对完整的、颗粒层理清晰的断面进行拍摄取样(图 5a 和图 5c),并依此断面计算堆积体的高度 H_i 。泥石流在运移至下游平坦地区时,由于重力分异或颗粒分选效应会出现“上细下粗”、“上粗下细”、“粗细颗粒混杂”三种不同的粒序分布特征,且根据野外实地调查经验,“粗细颗粒混杂”的粒序分布较为少见。图 5d 为图 5c 方框内的堆积扇断面颗粒分布的简图,整个断面呈现上“上细下粗”、“上粗下细”、“上粗下细”三个明显的分层,隶属于三次不同的泥

石流冲出物,从上到下对应 2020 年泥石流、2019 年泥石流和 2013 年泥石流,再往下颗粒分布并不明显。图 5e 为指示卷尺,长度为 1.7m,根据指示物的长度,本文换算三个分层在取样断面的厚度从上到下约为 2.1~2.3 m、2.3~2.5 m 和 3.2~3.3 m,最下面一层堆积物和底部之间的距离约 1.3 m。利用 Arcgis 10.5,通过采样点距沟口处公路距离与堆积体总长的比例换算,得出 H_3 的高度约为 15.1 m, H_2 的高度约为 11.0 m, H_1 的高度为 6.3 m,最下面一层堆积物和底部之间的距离 2.5 m,堆积物最高处距离底部的距离为 17.6 m。对比 2021 年的无人机航拍的高程数据测得其实际高差约为 17.7 m,误差合理。

对于上下底面积 S_i 及 S_{i_i} 则通过解译遥感影像进行划定及计算。在对比同一年内不同时间的遥感影像时发现,由于岷江水位变化的原因,岷江流域沟口堆积扇范围在上半年和下半年变化较大(图 5b),

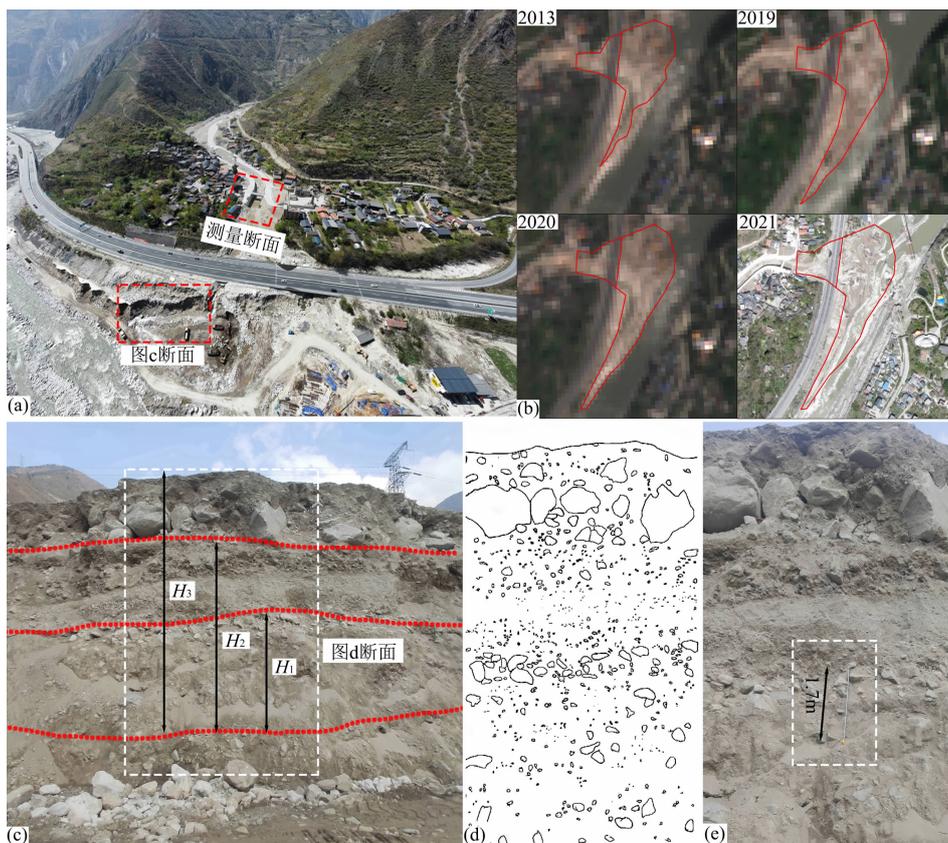


图 5 沟口堆积扇影像:(a)沟口堆积扇航拍全景;(b)历次泥石流堆积扇沟口处影像及堆积扇解译结果;
(c)堆积扇沉积物断面及分层;(d)堆积扇断面结构简图;(e)长度标尺

Fig. 5 Images of debris flow fans took at gully mouths: (a) aerial panorama of debris flow fan at gully mouth;
(b) images took at gully mouth and its interpretation for each occurrence; (c) cross section of debris flow fan;
(d) diagram of cross section of debris flow fan; (e) length scale

因此本次研究关于沟口堆积扇上下底面的解译统一选用了2017年9月、2019年9月与2020年11月三个时间上处于下半年的遥感影像(图5b)。由图5a、图5b、图6b可以看出高速公路旁有一条宽约2m左右的护坡带。除沟口外,堆积扇的覆盖范围并未触及护坡,因此在对沟口堆积体进行解译时未将护坡部分划入识别范围内。

3.1.3 冲出量计算结果对比及分析

通过 Arcgis 10.5 对遥感影像进行识别并计算,相关结果如表4所示。簇头沟的冲出方量,在2013、2019和2020年分别为11.50万、11.91万、11.04万 m³,从发生规模来看,2019年发生规模最大,2020年最小。在计算三次泥石流冲出量之后,将结果与常鸣^[19]等的计算结果进行了对比,其模型具体计算方法为:

$$V_D = (D + B + S) \times A_s / 3 \quad (6)$$

式中, V_D 为泥石流堆积物总方量(10⁴ m³); D 为堆积区的后缘宽(m); B 为前缘宽(m); S 为中部最高点宽(m); A_s 为内部三角形的面积(m²)。

根据其设计的计算方法,检验了簇头沟地区泥石流的冲出量,具体方法与数据结果如表4与图7所示。

表4 根据常鸣^[19]等的计算方式得出的簇头沟流域具体数据

Tab. 4 Specific data of the Cutougou valley obtained according to the calculation method of Chang et al. ^[19]

| 年份 | D/m | B/m | S/m | A_s/m^2 | $V_D / (10^4 m^3)$ | 冲出量 / (10 ⁴ m ³) |
|------|-------|--------|-------|-----------|--------------------|---|
| 2013 | 36.31 | 467.41 | 125 | 707.84 | 14.83 | 14.83 |
| 2019 | 54.99 | 531.77 | 125 | 1267.81 | 30.08 | 15.24 |
| 2020 | 54.99 | 558.48 | 125 | 1821.89 | 44.84 | 14.77 |

对比表4与表5中两种冲出量数据,本文所计算出的冲出量值与常鸣^[19]等计算出的冲出量结果基本一致。反映出对待簇头沟这类底面面积不规则的堆积扇,本文的计算方法有可靠的精度。

通过将三次泥石流的物源体积与冲出量的线性拟合,发现在簇头沟两者之间有着较强的线性关系。每年的泥石流冲出量约为当年沟内崩滑体总体积的

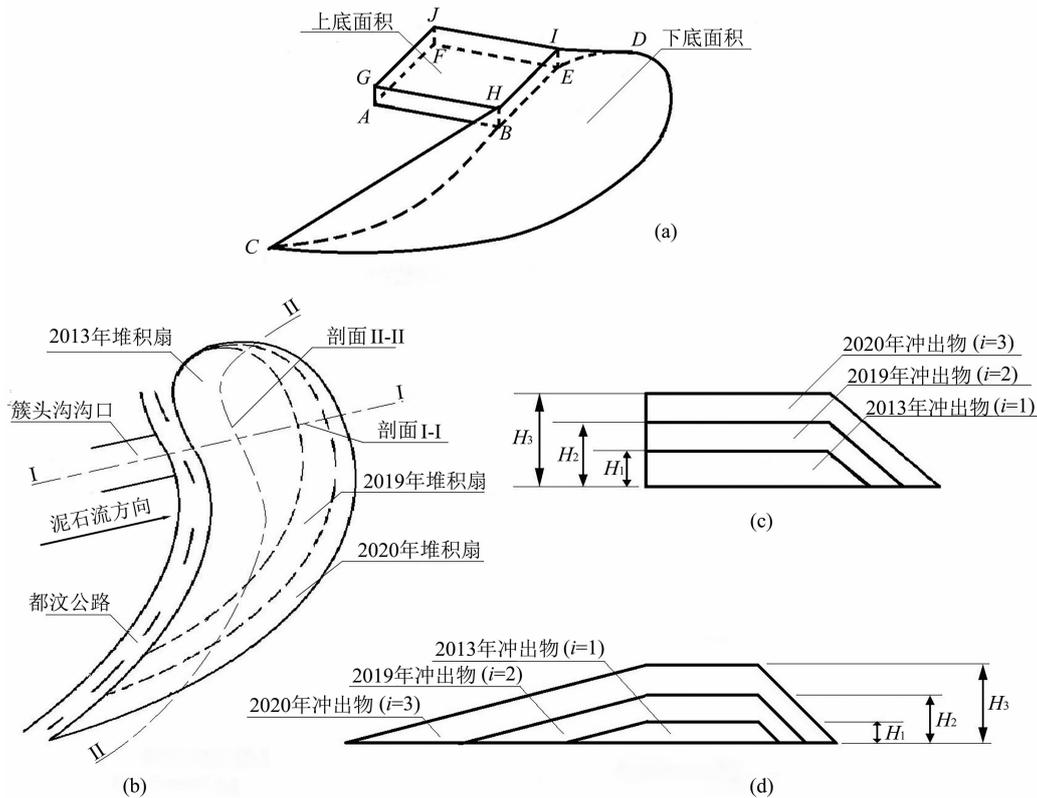


图6 簇头沟沟口堆积扇简图: (a) 沟口堆积扇三维简图; (b) 沟口处堆积扇俯视图; (c) 图b中剖面I—I; (d) 图b中剖面II—II
 Fig. 6 Schematic diagram of debris flow fan at gully mouth of the Cutougou valley: (a) schematic diagram of debris flow fan at gully mouth; (b) the vertical view of debris flow fan at gully mouth; (c) profile I—I in Fig. b; (d) profile II—II in Fig. b

0.5% (图8)。三次泥石流的冲出总量也不及沟内物源总量的5%,这表示流域内依旧蓄存大量的物源。2013年泥石流是大地震后的第一场泥石流,沟道内空间相对宽裕,而2019年泥石流又是2013年泥石流后的第一场泥石流,因此造成了沟内总物源量2013年大于2019年,但冲出量却较小的现象。

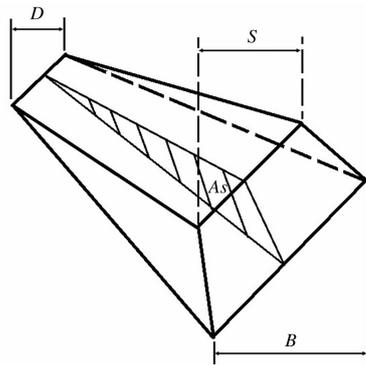


图7 常鸣^[19]等的计算模型

Fig. 7 Calculation model referred to Chang et al. ^[19]

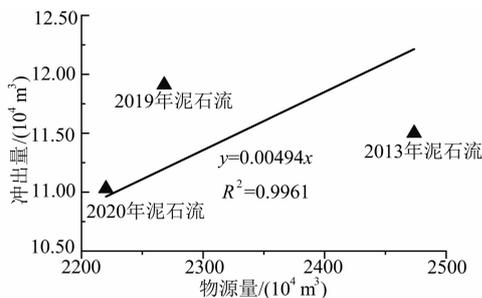


图8 三次泥石流线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting results of three episode of debris flow

3.2 泥石流运动特征参数与破坏性

3.2.1 动力学参数选取及计算方法

泥石流流速和冲击力是反应泥石流发生时其破坏力的重要特征,簇头沟沟口正对都汶公路,为在日后更好地开展防护工作,对于其沟口处泥石流的流速、冲击力计算十分有必要^[29-30]。根据实际采样测量与对比相关文献^[21],簇头沟泥石流的容重约为 $18 \sim 19 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。《泥石流灾害防治工程勘察规范(试行)》(T/CAGHP 006-2018)中的推荐公式 I. 15 和 I. 18,能充分考虑研究区内泥石流的致灾特征,且相关参数获取相对容易,适于簇头沟当地的泥石流流速和对公路桥墩的冲击力的计算。测量流速的断面如图1与图5a所示,其具体公式如下:

$$V_c = \frac{1}{n_c} H_c^{2/3} I_c^{1/2} \quad (7)$$

$$\delta = \lambda \frac{\gamma^c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (8)$$

式中, V_c 为泥石流断面平均流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); n_c 为泥石流沟床粗糙率,通过参考《泥石流灾害防治工程勘察规范》,并采用内插法^[20]获取; H_c 为断面处最大泥深(m),选取上文所获得的泥石流厚度进行计算; I_c 为水力坡降; δ 为泥石流整体冲击压力(kPa); γ^c 为泥石流重度($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$),三次泥石流都取值 $18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; α 为被冲击物受力面与泥石流冲压方向的夹角($^\circ$),三次泥石流都取值 90° ; g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; λ 为建筑物形状系数,桥墩近似于椭圆形,取值1.0。

3.2.2 动力学计算结果与破坏性综合分析

根据所取断面的计算结果(表6),三次泥石流

表5 簇头沟三次泥石流详细数据

Tab. 5 Detailed data of three episode of debris flows in the Cutougou valley

| 爆发时间 | 沟口堆积扇厚度/m | 位于堆积体的位置 | 高程 H_i /m | 下底面面积 S_i /m ² | 上底面面积 $S_{i'}$ /m ² | 冲出量 v_i /(10 ⁴ m ³) |
|------------|-----------|------------|-------------|-----------------------------|--------------------------------|--|
| 2013-07-10 | 6.3 | 下($i=1$) | 6.3 | 32 521 | 7068 | 11.50 |
| 2019-08-20 | 4.7 | 中($i=2$) | 11.0 | 38 944 | 7638 | 11.91 |
| 2020-08-17 | 4.1 | 上($i=3$) | 15.1 | 41 962 | 8067 | 11.04 |

表6 泥石流动力学参数计算结果汇总表

Tab. 6 Summary of calculation results of debris flow dynamic parameters

| 年份 | 纵坡 I_c /% | 最大泥深 H_c /m | n_c^{-1} | 流速 V_c /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 冲击力 δ /(kPa) |
|------|-------------|---------------|------------|--|---------------------|
| 2013 | 8.89 | 6.3 | 10.0 | 10.18 | 190.21 |
| 2019 | 8.89 | 4.7 | 10.2 | 8.54 | 133.90 |
| 2020 | 8.89 | 4.1 | 10.3 | 7.87 | 113.80 |

的流速于 2013 年、2019 年、2020 年分别为 10.18、8.54 和 7.87 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 冲击力分别为 190.21、133.90、113.80 kPa。2013 年泥石流的冲击力、冲出量等参数均最大。2013 年泥石流发生当日,降雨是在夜间突然增大的(图 2),加之沟口高速设计建造前,簇头沟几十年内未发生过泥石流灾害,因此爆发时造成了超乎预期的后果。因该次泥石流极强的破坏性,当地政府在 2014 年于沟内中部主导修建了两道拦沙坝减小灾害规模(图 9a 和图 9c),在此之后两次泥石流的流速和冲击力均有下降。

4 讨论

通过对簇头沟的实地调查和遥感资料的分析,综合呈现了汶川地震后沟内物源的动态变化与三次泥石流特征和规模的关系。在计算冲出量时,本文采用遥感影像与改进计算模型相结合的方法,可通过获取多期遥感影像解译出堆积体的面积而对灾害多次发生地区的泥石流冲出量进行精确计算。该计算方法一定程度上减少了对冲出量计算时空上的限制。但因遥感技术近些年来才蓬勃发展,对于泥石

流爆发间隔过长或爆发时间过于久远的地区,可能会因遥感数据无法收集而难以适用本文的冲出量计算方法,因此具体的使用需要结合当地具体情况综合进行取舍。

2020 年的泥石流灾害相较于前两次泥石流而言有很大的不同。不仅与上一次泥石流时间间隔较短,且该次泥石流发生当日的累计降雨量及降雨集中程度也远不及前两次泥石流(图 2)。除了近年来沟内松散物源活动愈加频繁的原因外^[23],流域内物源的大量蓄积无法排出也是这一现象发生的原因之一。一方面,簇头沟主沟弯曲度高,在前两次泥石流运动过程中蓄存部分松散物源^[21-22,31-32],而 2020 年泥石流发生前的降雨,充分浸润了陡峭区域蓄存的松散物源,使当地更易产生径流^[33-34],并最终造成当地泥石流的降雨阈值下降。另一方面,当地政府在 2014 年于簇头沟中部修建的两道拦沙坝中库容较大的拦沙坝 1(图 9a 和图 9b)在 2019 年泥石流后被物源淤满并部分冲毁。因清理难度大,其库内堆积物至 2020 年泥石流发生前也仅清理了部分,造成了 2020 年泥石流发生时,坝内库容严重不足的状况。



图 9 流域内清理防护工作:(a) 拦沙坝 1;(b) 拦沙坝 1 内的物源状况;(c) 拦沙坝 2

Fig. 9 Dredging work in the basin: (a) check dam 1; (b) sediments in check dam 1; (c) check dam 2

簇头沟流域在2014—2019年间无泥石流冲出,很大程度归功于沟内拦沙坝对物源的拦蓄^[35]。目前,虽在当地的治理下拦沙坝后方的沟中下部的物源清理已颇具成效,但随着2020年泥石流再次将拦沙坝淤满和沟内上部支沟近年来物源变化日趋活跃,簇头沟当前的治理压力依然巨大,未来仍有爆发泥石流灾害的可能。希望当地政府未来能够加大对簇头沟内物源的清理力度,且清理工作应逐渐向沟内上部沟道和支沟转移。

5 结论

本文以四川省绵虬镇簇头沟多次泥石流为研究对象,通过野外调查遥感影像解译、冲出量模型改进等方式,对当地泥石流的形成条件、致灾机理与运动特征进行了研究,现得出以下结论:

(1)簇头沟当地地形整体上游陡峭于下游,且沟内崩滑体物源在震后多年里频繁变化。流域下游区域内的崩滑体面积在2013年泥石流前大量增加,而在2013年泥石流后开始减少并趋于稳定。流域上游支沟的崩滑体面积在2019年泥石流后大量增加,并在2020年泥石流后面积继续扩大。三次泥石流的发生均受降雨作用,2013年、2019年泥石流发生当日的降雨集中且单一时段降雨量较大,2020年则较为分散。

(2)簇头沟三次泥石流的堆积扇呈现出不断增大的趋势,最大堆积面积在2020年达41 962 m²;而冲出量呈现先增大后减少的趋势,其中冲出量从大到小依次为2019年11.91万m³、2013年11.50万m³、2020年11.04万m³。相较于流域内总物源量而言,近三次泥石流总冲出量占比不及5%,仍有大量崩滑体物源残留于沟道内。

(3)当地政府对拦沙坝的修建与沟内清淤力度的加大,减小了2019年与2020年泥石流的破坏性及冲出量。但因拦沙坝拦蓄能力下降、簇头沟主沟蜿蜒的原因,仍有大量物源蓄积于沟内,建议未来加大物源清理力度,且清理工作应逐渐向沟内上部沟道和支沟转移。

参考文献 (References)

[1] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004:3-5. [KANG Zhicheng, LEE Chackfan, MA Ainai, et al. Study on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 3-5]

[2] 崔鹏,邓宏艳,王成华. 山地灾害[M]. 北京:科学出版社,2018:4-5. [CUI Peng, DENG Hongyan, WANG Chenghua. Mountain disaster [M]. Beijing: Science Press, 2018: 4-5]

[3] HU Xudong, HU Kaiheng, TANG Jinbo, et al. Assessment of debris-flow potential dangers in the Jiuzhaigou valley following the August 8, 2017, Jiuzhaigou earthquake, western China [J]. *Engineering Geology*, 2019, **256**: 57-66. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.05.004

[4] 胡凯衡,陈成,李秀珍,等. 地震区降雨作用下泥石流易发性动态评估[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(2):1-8. [HU Kaiheng, CHEN Cheng, LI Xiuzhen, et al. Dynamic assessment of debris-flow susceptibility under the influence of earthquake and rainfall events [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, **29**(2): 1-8] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.01

[5] 李明威,唐川,陈明,等. 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征[J]. 水文地质工程地质,2020,47(3):182-190. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan county in the Wenchuan earthquake zone [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, **47**(3): 182-190] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201909006

[6] 冯文凯,何山玉,刘志刚,等. 平武县兴坪沟泥石流特性及其工程防治效果分析[J]. 工程地质学报,2017,25(3):794-805. [FENG Wenkai, HE Shanyu, LIU Zhigang, et al. Features of debris flows and their engineering control effects at Xiping gully of Pingwu county [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(3): 794-805] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.03.027

[7] FAN Xuanmei, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts [J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(2): 421-503. DOI: 10.1029/2018RG000626

[8] DOMENECH G, FAN Xuanmei, SCARINGI G, et al. Modelling the role of material depletion, grain coarsening and revegetation in debris flow occurrences after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2019, **250**(21): 34-44. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.01.010

[9] 潘华利,安笑,邓其娟,等. 泥石流松散固体物源研究进展与展望[J]. 科学技术与工程,2020,20(24):9733-9741. [PAN Huali, AN Xiao, DENG Qijuan, et al. Progress and prospects of research on debris flow solid source [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(24): 9733-9741] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.24.007

[10] 徐瑞池,李秀珍,胡凯衡,等. 横断山区山地灾害的动态危险性评价[J]. 灾害学,2019,34(3):196-201+208. [XU Ruichi, LI Xiuzhen, HU Kaiheng, et al. A dynamic hazard assessment for mountain hazards in Hengduan mountain area [J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, **34**(3): 196-201+208] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.036

[11] 蒋志林,朱静,常鸣,等. 汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J]. 山地学报,2014,32(1):81-88. [JIANG Zhilin, ZHU Jing, CHANG Ming, et al. Dynamic evolution

- characteristics of Hongchun gully source area of debris flow in Wenchuan earthquake region [J]. *Mountain Research*, 2014, **32** (1): 81 – 88] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2014.01.011
- [12] 李惠. 沟谷型泥石流演化及动力学数值模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 12 – 14. [LI Hui. A Study of evolutionary and dynamic numerical simulation for gully-shaped debris flow [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 12 – 14] DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.001158
- [13] 熊江, 唐川, 龚凌枫, 等. 基于 GIS 的强震区泥石流流域崩滑物源演化强度评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, **36** (1): 58 – 64. [XIONG Jiang, TANG Chuan, GONG Lingfeng, et al. Evaluation of evolution intensity of slump-mass sources in debris flow basin in strong earthquake area based on GIS [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, **36**(1): 58 – 64] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2020.01.009
- [14] TANG Chuan, ZHU Jing, DING Jun, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. *Landslides*, 2011, **8**(4): 485 – 497. DOI: 10.1007/s10346-011-0269-5
- [15] 丁军. 强震区泥石流活动规模与最大堆积长度预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 51 – 52. [DING Jun. Research on magnitude and runout distance of debris-flows in strong earthquake area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 51 – 52]
- [16] HURLIMANN M, COPONS R, ALTIMIR J, et al. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach [J]. *Geomorphology*, 2006, **78**(3): 359 – 372. DOI: 10.1007/s10346-011-0269-510.1016/j.geomorph.2006.02.003
- [17] GARTNER J E, CANNON S H, SANTI P M, et al. Empirical models to predict the volumes of debris flows generated by recently burned basins in the western U. S. [J]. *Geomorphology*, 2008, **96**(3): 339 – 354. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.02.033
- [18] 李彦稷, 胡凯衡. 基于扇形地形形态特征的泥石流危险评估[J]. *山地学报*, 2017, **35**(1): 32 – 38. [LI Yanji, HU Kaiheng. Risk assessment based on morphological characteristics of debris flow alluvial fan [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(1): 32 – 38] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000193
- [19] 常鸣, 唐川, 夏添, 等. 强震区泥石流堆积物的演化特征与方量估算模型[J]. *水利学报*, 2012, **43**(S2): 117 – 121. [CHANG Ming, TANG Chuan, XIA Tian, et al. Debris flow deposits model and accumulation evolution in seismic area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(S2): 117 – 121] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.s2.008
- [20] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. *地质灾害与环境*, 2009, **20**(2): 86 – 93. [XU Qiang. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2009, **20**(2): 86 – 93]
- [21] 严炎, 葛永刚, 张建强, 等. 四川省汶川县簇头沟“7.10”泥石流灾害成因与特征分析[J]. *灾害学*, 2014, **29**(3): 229 – 234. [YAN Yan, GE Yonggang, ZHANG Jianqiang, et al. Research on the debris flow hazards in Cutou gully, Wenchuan county on July 10, 2013 [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, **29**(3): 229 – 234] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.03.042
- [22] 陈俊淇. 强震区泥石流源侵蚀运移特征分析——以汶川县棉鹿镇锄头沟为例[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 7 – 10. [CHEN Junqi. Analysis of material source erosion and migration characteristics of debris flows in strong earthquake areas: A case study of Chutou gully, Wenchuan, Sichuan [D]. Changchun: Jilin University, 2020: 7 – 10] DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006318
- [23] FAN Xuanmei, SCARINGI G, DOMENECH G, et al. Two multi-temporal datasets that track the enhanced landsliding after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earth System Science Data*, 2019, **11** (1): 35 – 55. DOI: 10.5194/essd-11-35-2019
- [24] FAN Jianrong, LI Xiuzhen, GUO Fenfen. Empirical-statistical models based on remote sensing for estimating the volume of landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **8**(5): 711 – 717. DOI: 10.1007/s11629-011-2133-4
- [25] GUZZETTI F, ARDIZZONE F, CARDINALI M, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, **279**(3 – 4): 222 – 229. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.01.005
- [26] LARSEN I J, MONTGOMERY D R, KORUP O. Landslide erosion controlled by hillslope material [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3** (4): 247 – 251. DOI: 10.1038/NGE0776
- [27] 蒋志林. 基于 RS 的震区泥石流物源演化特征分析——以四川省汶川县映秀地区为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 35 – 36. [JIANG Zhilin. Research on the materials evolution characteristics of debris flows based on RS in earthquake area-case study in Yingxiu area of Wenchuan in Sichuan province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 35 – 36]
- [28] 方群生, 唐川, 程霄, 等. 汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J]. *水利学报*, 2015, **46**(11): 1298 – 1304. [FANG Qunsheng, TANG Chuan, CHENG Xiao, et al. An calculation method for predicting landslides volumes of the debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(11): 1298 – 1304] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150352
- [29] 李宁, 唐川, 史青云, 等. 九寨沟震区“6.21”泥石流成因与致灾机制研究[J/OL]. *工程地质学报*, 2021: 1 – 10 [LI Ning, TANG Chuan, SHI Qingyun, et al. Investigation and analysis of “6.21” debris flow in Jiuzhaigou county, Sichuan province [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, 2021: 1 – 10] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-509
- [30] 周明慧, 熊海贝, 赵书平, 等. 泥石流冲击力简化计算方法——以舟曲县三眼峪泥石流为例[J]. *山地学报*, 2017, **35**(2): 187 – 194. [ZHOU Minghui, XIONG Haibei, ZHAO Shuping, et al. Simplified calculation of impact force of debris flow based on the case study of Sanyan valley debris flow [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(2): 187 – 194] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000211

- [31] CHEN Ming, TANG Chuan, ZHANG Xianzheng, et al. Quantitative assessment of physical fragility of buildings to the debris flow on 20 August 2019 in the Cutou gully, Wenchuan, southwestern China [J]. *Engineering Geology*, 2021, **293**(3): 106319. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106319
- [32] 丰强, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区绵虬镇"8·20"登溪沟泥石流灾害调查与分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, **42**(1): 51 - 59. [FENG Qiang, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Field investigation and research on debris flow on August 20, 2019 in Mianshi town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, **42**(1): 51 - 59] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20210220002
- [33] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(12): 158 - 164. [GAN Fengling, HE Binghui, WANG Tao. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(12): 158 - 164] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.023
- [34] 曾凤铃, 刘淑婧, 运剑苇, 等. 模拟降雨条件下三峡库区紫色土坡地入渗特征[J]. *中国水土保持科学*, 2022, **20**(1): 107 - 113. [ZENG Fengling, LIU Shujing, YUN Jianwei, et al. Runoff and infiltration characteristics of purple soil slope in the Three Gorges Reservoir region under simulated rainfall [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, **20**(1): 107 - 113] DOI: 10.16843/j.sswc.2022.01.014
- [35] 张友谊, 钟磊, 樊晓一, 等. 岷江河谷锄头沟震后泥石流致灾模式[J]. *山地学报*, 2021, **39**(5): 756 - 766. [ZHANG Youyi, ZHONG Lei, FAN Xiaoyi, et al. The disaster model of debris flows after earthquake at Chutou gully of Minjiang river valley, China [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(5): 756 - 766] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000636

Relationship Between Debris Flow Sediments and Amount of Debris Flow Discharges in Earthquake Affected Region: A Case Study of the Cutougou Valley in Wenchuan County, Sichuan Province, China

HU Xudong^{1a,1b}, SHEN Yitong^{1c}, HU Kaiheng², ZHANG Xiaopeng², XU Wennian^{1a,1b}

(1. a. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education;

b. College of Civil Engineering and Architecture; c. College of Hydraulic and Environment Engineering;

China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract: Massive landslide mass (sediments) generated by the Wenchuan Earthquake are constantly evolving dynamically, typically for years providing a rich source of loose geo-materials for debris flow motivation, resulting in group-occurring of post-shock debris flows. It is quite necessary in science to analyze the temporal and spatial patterns of these landslide mass (sediment) in the post-shock areas and determine their geophysical association with debris flow scale (the amount of debris flow discharges), undoubtedly by which it can provide scientific basis for evaluation of long-term effects of post-quake geohazard chain, as well as for policymaking of post-shock geohazard control. Research on calculation of the amount of debris flow discharges was mostly estimated based on the accumulation formed by a single debris flow or multiple debris flows; there was still a lack of research using remote sensing technology and field survey to determine it. In this study, the Cutougou valley lied in the quake-hit area was selected as research target. Research approaches, including field investigation, remote sensing interpretation and improved numerical calculation were combined to investigate the dynamic variation of the landslide mass conformation in the valley, and the association between the change of sediment storages in the gully with multiple debris flow discharges. Following facts are obtained: (1) The storage of landslide mass in lower branch of the Cutougou valley had decreased after debris flow events in 2013 while in the upper branch there were noticeable increments in sediments after debris flow events in 2019. (2) There was a certain linear relationship between the

storage of landslide mass and debris flow discharges; and the total amount of debris flow discharges accounted for less than 5% of the total storage of landslide mass, still abundant sediments to be remained in the gully. (3) The retaining capacity of check dam decreased year by year, so it is necessary to dredge the dam continually; and consequent prevention and control measures are expected to be added to the upper branch of the valley. This study is beneficial to knowledge updating on the evolution characteristics of landslide sediments in quake-hit areas and its influence on post-shock debris flow risk, and it provides theoretical guidance for optimizing site selection of debris flow disaster prevention project.

Key words: debris flow; sediment; dynamic variation; the amount of debris flow discharges; earthquake; remote sensing interpretation; the Cutougou valley; Wenchuan county

粤港澳大湾区开发建设与丘陵浅山区山地灾害相关性

(黎昊,王钧,黄建国,罗依珍,宫清华)

丘陵浅山区是平原向山地的过度地带,是城市开发与山地生态保护冲突剧烈区域。粤港澳大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强、城镇化速度最快的丘陵浅山区域之一,粤港澳大湾区城市群丘陵、台地面积占一半以上。城市扩张深刻改变了粤港澳大湾区原有地质地貌环境,不合理削山造地等工程活动增加了丘陵浅山区地质灾害的发生风险。城市周边的山体稳定对于维持山地城市圈整体生态与环境安全的意义重大。科学合理设定建设用地对山体的安全退让距离,可以有效杜绝建设源头风险,规避山地灾害风险。

测度丘陵浅山区山地灾害的胁迫度,评价建设用地开发的适宜性,提出开发建设用与山体的建议退让距离,从源头规避山地灾害,这将有利于引导城镇和人口密集区向低风险区布局,促进城市建设与山地保护之间的关系协调,保障丘陵地区土地资源合理利用和城市群生态安全。

详见本期《粤港澳大湾区开发建设与丘陵浅山区山地灾害相关性》一文。